



LEHRBUCH

Alfred Herbert Fritz · Jörg Schmütz *Hrsg.*

Fertigungstechnik

13. Auflage



Springer Vieweg

Fertigungstechnik

Alfred Herbert Fritz · Jörg Schmütz
(Hrsg.)

Fertigungstechnik

13. Auflage



Springer Vieweg

Hrsg.

Alfred Herbert Fritz
Berlin, Deutschland

Jörg Schmütz
Bremen, Deutschland

ISBN 978-3-662-64874-2 ISBN 978-3-662-64875-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-64875-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 1998, 2001, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2015, 2018, 2022
Ursprünglich erschienen unter: Fritz, A. H./Schulze, G. (Hg.)

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Eric Blaschke
Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE
und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur dreizehnten Auflage

Der neue Mitherausgeber Prof. Dr.-Ing. Jörg Schmütz (Leiter des Gießereilabors der Berliner Hochschule für Technik) hat jetzt das gesamte Kapitel Gießen übernommen. Es wurde aktualisiert und der Abschnitt Gießen von Komponenten für Windkraftanlagen ergänzt.

In diesem Fachbuch wird bei der Vorstellung eines neuen Fertigungsverfahrens durch eine Fußnote auf einen vorhandenen Podcast (Wissens-Floater) hingewiesen. Das hat sich insbesondere durch die in der Corona-Krise notwendig gewordene Lehre in Digitalform als sehr nützlich erwiesen, denn der optisch erklärte Ablauf eines Verfahrens bleibt den Lernenden eindrücklicher in Erinnerung.

Als Podcast werden die Mediendateien bezeichnet, die direkt im Internetbrowser abgerufen werden können. Nach dem Herunterladen öffnet sich ein sog. Movieplayer (z. B. Windows Media Player). Der Ablauf beginnt dann automatisch.

Prof. Dr.-Ing. Helmut Richter (Bergische Universität Wuppertal) hat spezielle kurze Lehrfilme und PowerPoint-Bildschirm-Präsentationen erstellt, die mit visuellen Elementen einen kleinen, abgeschlossenen Wissensbereich darstellen. Sie können als Podcast oder PP-Datei kostenfrei und ohne Passwort heruntergeladen werden.

Im einzelnen sind Videos in HD-Qualität auch für das Mobiltelefon unter youtube wissensfloater zu folgenden Kapiteln dieses Buches abrufbar:

Kap. 1 Einteilung der Fertigungsverfahren

Stahl 1- vom Erz zum Roheisen; Stahl 2- vom Roheisen zum Stahl; Stahl aus dem Lichtbogenofen; Stähle für den Auto-Leichtbau; Eisen-Kohlenstoff-Zustands-Schaubild 1 bis 2

Kap. 2 Urformen (Herstellung eines festen Körpers aus formlosem Stoff)

Rekristallisation; Prinzip Sandguss; Gießen in Dauerformen; Gießen von Großgussstücken; Gusseisen mit Kugelgrafit ADI; Gusseisen mit Lamellengrafit; Feingießen; Feinguss-Präzisionsguss; Spritzgießen; Stranggießen von Gusseisen; Thixoforming; Powder-Metallurgy; Sintertechnik 1 bis 3; Rapid Prototyping

Kap. 3 Umformen (Plastisches Ändern der Form ohne Stoffverlust)

Flachwalzen; Walzen von Schienen; Kaltwalz-Plattieren; Freiformen; Ge-senkschmieden; Tiefziehen in der Kfz- und Metalltechnik; Streckziehen von Bus- und Flugzeugteilen; Innen-Hochdruck-Umformen; Thixoforming-zwischen Gießen und Schmieden

Kap. 4 Trennen (Formänderung durch örtliches Aufheben des Zusammenhalts)

Varianten des Scherschneidens; Drehen- eine Kurzeinführung; CNC-Technik 1 bis 5; Microfinish; Funkenerosives Abtragen; Metalle schneiden mit dem Laserstrahl; Reinigen mit dem Laserstrahl; Wasserstrahl-Schneiden

Kap. 5 Fügen (Zusammenbringen verschiedener Werkstücke)

Abbrenn-Stumpf-Schweißen von Schienen; Schienenschweißen mit dem Thermit-Prozess; Punktschweißen; Buckelschweißen; Rollennahtschweißen; Bolzen-Schweißen; Laserstrahlschweißen und -schneiden; Laser-Kunststoff-Schweißen; Ultraschallschweißen; Hartlöten; Weichlöten; Kleben; Mechanische Fügeverfahren.

Die Herausgeber danken Herrn Prof. Dr.-Ing. Carsten Bye von der Privaten Fachhochschule für Wirtschaft und Technik in Diepholz für die Erstellung des Abschn. 5.10 Fügen durch Umformen.

Ebenso gebührt Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Hilgenberg (BAM und TU Berlin), der sich bereit erklärt hat, den Abschnitt über das Laserstrahlschweißen zu aktualisieren.

Wegen der raschen Fortentwicklungen auf dem Sachgebiet Rapid Prototyping wurde der Abschn. 2.11 Additive Fertigungsverfahren wesentlich erweitert. Hier werden neben der Herstellung von Prototypen auch einbaufertige Ersatzteile und Werkzeuge in großen Stückzahlen gefertigt. Der DIN-Normenausschuss hat unterdessen die Additiven Verfahren in die DIN 8580 eingegliedert.

Alle Kapitel dieses Buches enthalten einen ausführlichen Abschnitt über die zweckmäßige konstruktive und fertigungstechnische Gestaltung der einzelnen Werkstücke. Damit kann der Konstrukteur abschätzen, ob die vorgegebene Form kostengünstig und in der gewünschten Stückzahl gefertigt werden kann.

Die Wirtschaftlichkeit der industriellen Produktion hängt vorwiegend von der richtigen Auswahl der Fertigungsverfahren ab. Dabei müssen Produktionsplaner, Fertigungstechniker und Konstrukteure ausreichende Kenntnisse über die neuen technischen Entwicklungen haben. Dazu will dieses Buch einen Beitrag leisten.

Berlin
im November 2021

Alfred Herbert Fritz
Jörg Schmütz

Vorwort zur ersten Auflage

Das vorliegende Lehr- und Nachschlagewerk „Fertigungstechnik“ soll die Lücke schließen zwischen den großen mehrbändigen, überwiegend theorie-orientierten Lehrbüchern der Fertigungstechnik und den ausschließlich für den Praktiker geschriebenen Büchern, die häufig nicht alle Aspekte der Fertigungstechnik ausreichend berücksichtigen.

Die Autoren haben sich das Ziel gesetzt, einen Überblick über die wichtigsten Fertigungsverfahren nach dem heutigen Wissensstand zu vermitteln. Die Beschränkung auf die wesentlichsten Grundlagen steht dabei im Vordergrund. Dies betrifft nicht nur die Anzahl der beschriebenen Verfahren, sondern auch den Umfang der theoretischen Erörterungen. Die Autoren waren zudem stets bemüht, die Grenzen, Möglichkeiten und die Leistungsfähigkeit der Verfahren aufzuzeigen. Ein wichtiges Mittel für die intensive Auseinandersetzung mit dem gebotenen Lehrstoff ist die unübliche große Anzahl der Schaubilder, Diagramme und Verfahrensskizzen. Dagegen haben die Verfasser auf Photographien von Maschinen und Anlagen weitgehend verzichtet, da der Informationswert solcher Bilder gering ist. Dem raschen Auffinden bestimmter Einzelheiten dient das umfangreiche Sachwortverzeichnis. Die Reihenfolge der zu beschreibenden Verfahrensgruppen weicht etwas von der in DIN 8580 vorgegebenen ab. Die in diesem Buch gewählte Folge, nämlich

- Gießen (Urformen),
- Schweißen (Fügen),
- spanende Fertigungsverfahren (Trennen) und
- spanlose Fertigungsverfahren (Umformverfahren)

wird in vielen Fachhochschulen und Universitäten bevorzugt, weil dann die Schmelzverfahren hintereinander behandelt werden können.

Bei den Gießverfahren muss berücksichtigt werden, dass die Studienanfänger heute keinen gesicherten Bezug mehr zum Gießen haben. Eine anschauliche Darstellung ist daher ebenso wichtig wie das Herausstellen der praktisch unbegrenzten Gestaltungsmöglichkeiten. Der Entwicklungstrend

geht hier eindeutig zu den Seriengießverfahren: Mehr als 70 % aller erzeugten Gussstücke sind Serien. Der weitaus größte Anwender von Guss-teilen ist mit über 50 % der Fahrzeugbau.

Die Kenntnis vieler verfahrenstechnischer Einzelheiten ist noch keine hinreichende Gewähr für den sinnvollen Einsatz der schweißtechnischen Fertigungsverfahren. Wesentlicher ist, dass die beim Schweißen ablaufenden Werkstoffänderungen einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Gütwerte der Schweißverbindung haben. Die oft zitierte Grunderfahrung „Der Werkstoff diktiert die Schweißbedingungen“ wird immer wieder in den Vordergrund gestellt.

Die spanenden Fertigungsverfahren sind wegen der erreichbaren Fertigungsgenauigkeit in Verbindung mit den vielfältigen Bearbeitungsmöglichkeiten von großer Bedeutung. Die Verfahren sind unterteilt in solche mit geometrisch bestimmten und solche mit geometrisch unbestimmten Schneiden. Die Autoren haben die neuesten Begriffe der Zerspanetechnik berücksichtigt, die nach einer grundlegenden Neuordnung der DIN- und ISO-Normen neue Kurzzeichen erhalten haben.

Die Technologie der wichtigsten Fertigungsverfahren ist in einem der Bedeutung und den bestehenden Tendenzen in der Fertigungstechnik entsprechenden Umfang wiedergegeben. Einheitlich sind für alle spanenden Fertigungsverfahren Gesichtspunkte zur Einteilung sowie zu den Fertigungsmöglichkeiten, Werkzeugen und Berechnungsgrundlagen beschrieben.

Die Umformverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass der Stoffzusammenhalt beibehalten wird. Da die als Rohling eingesetzte Masse konstant bleibt und im Fertigteil wiederzufinden ist, gibt es nur sehr geringe Materialabfälle. Die Umformverfahren sind vorwiegend gekennzeichnet durch die Kraftwirkungen, die zwischen der Umformmaschine und dem eingesetzten Werkzeug einerseits sowie dem umzuformenden Werkstück andererseits auftreten. Deshalb müssen zunächst die Beanspruchungen und Spannungszustände des Werkstoffs im Umformprozess betrachtet und erläutert werden. Das Ordnungsprinzip der DIN geht von den beim Umformen herrschenden Spannungszuständen aus: Druckumformen, Zugdruck-, Zug-, Biege- und Schubumformen.

Im Abschnitt Umformen wird zunächst jedes Verfahren in seinen Einzelheiten erklärt und dann der Kraft- und Arbeitsbedarf überschlägig berechnet. Diese Angaben sind nötig, um für eine bestimmte Fertigungsaufgabe die geeignete Maschine entsprechend ihrer Nennkraft und ihrem Arbeitsvermögen auszuwählen. Mitunter muss der Umformtechniker seine Fertigungsschritte in kleineren Stufen vorgeben, damit die vorhandenen kleineren Maschinen für die vorgesehene Umformaufgabe sinnvoll eingesetzt werden können.

Bei den Berechnungen des Kraft- und Arbeitsbedarfs greift der Verfasser bewusst auf die elementare Plastizitätstheorie zurück; denn aufwendige moderne Verfahren benötigen einen großen Rechneraufwand, liefern aber keine wesentlich genaueren Ergebnisse für den praktischen Einsatz im Betrieb.

Zu jedem Abschnitt des Buches werden konstruktive Hinweise in Form der Gegenüberstellung „unzweckmäßige und zweckmäßige Gestaltung“ gegeben. Somit haben auch Anfänger die Möglichkeit, grobe Fehler in der Gestaltung der Teile zu vermeiden. Erfahrene Praktiker werden daran erinnert, wie man die Bearbeitung und das Einspannen von Werkstücken bereits bei der Konstruktion berücksichtigen kann.

Berlin
Juni 1998

Alfred Herbert Fritz
Günter Schulze

Inhaltsverzeichnis

1 Einteilung der Fertigungsverfahren	1
Klaus-Dieter Kühn	
2 Urformen	7
Jörg Schmütz, Alfred Herbert Fritz	
und Burghilde Wieneke-Toutaoui	
2.1 Urformen durch Gießen	7
2.1.1 Grundbegriffe der Gießereitechnologie	8
2.2 Metallkundliche Grundlagen des Gießens	18
2.2.1 Entstehung der Gussgefüge	18
2.2.2 Stoffzustände	18
2.2.3 Keimbildung und Impfen	19
2.2.4 Kristallformen.	22
2.2.5 Erstarrungstypen.	24
2.2.6 Isotropes, anisotropes und quasi-isotropes Verhalten von Gusswerkstoffen	26
2.3 Gusswerkstoffe	27
2.3.1 Eisengusswerkstoffe.	27
2.3.2 Nichteisen-Gusswerkstoffe.	39
2.4 Gießbarkeit	45
2.4.1 Fließ- und Formfüllungsvermögen.	46
2.4.2 Schwindung (Schrumpfung).	48
2.4.3 Warmrissneigung	51
2.4.4 Gasaufnahme	52
2.4.5 Penetrationen	54
2.4.6 Seigerungen	54
2.4.7 Fehlerzusammenstellung bei Sandguss	55
2.5 Form- und Gießverfahren	56
2.5.1 Gießverfahren mit verlorenen Formen	56
2.5.2 Gießverfahren mit verlorenen Formen nach verlorenen Modellen.	70
2.5.3 Gießverfahren mit Dauerformen	74
2.6 Gießen von Motoren im Leichtbau.	85
2.6.1 Sandguss im Kernpaketverfahren und Kokillenguss mit Rahmenkernaufbau.	85

2.6.2	Niederdruckkokillenguss von V8 Zylinder-kurbelgehäusen aus Aluminium	87
2.6.3	Einsatz von Simulationstechniken in der Gussteilentwicklung	88
2.7	Gießen von Komponenten für Wind-Energie-Anlagen	91
2.8	Gestaltung von Gussteilen	96
2.8.1	Allgemeines	96
2.8.2	Gestaltungsregeln	96
2.8.3	Gießgerechte Gestaltung	96
2.8.4	Beanspruchungsgerechte Gestaltung	100
2.8.5	Fertigungsgerechte Gestaltung	102
2.9	Urformen durch Sintern (Pulvermetallurgie)	104
2.9.1	Pulvermetallurgische Grundbegriffe	105
2.9.2	Pulver-Erzeugung	106
2.9.3	Presstechnik	107
2.9.4	Sinter-Prozess	109
2.9.5	Verfahren zum Verbessern der Werkstoffeigenschaften	110
2.9.6	Anwendungen	112
2.10	Gestaltung von Sinterteilen	114
2.11	Additive Fertigungsverfahren	117
2.11.1	Stereolithografie	121
2.11.2	Laser-Sintern und Strahlschmelzen	122
2.11.3	Fused Layer Modeling/Manufacturing oder Fused Deposition Modeling	125
2.11.4	Multi-Jet Modeling und PolyJet Modeling	129
2.11.5	3D-Drucken	131
2.11.6	Layer Laminated Manufacturing	133
2.11.7	Digital Light Processing	133
2.11.8	Thermotransfer-Sintern (TTS)	134
2.11.9	Digital Light Synthesis (DLS)	134
2.11.10	Entwicklungen	135
3	Umformen	141
	Alfred Herbert Fritz	
3.1	Einteilung und Vorteile der Umformverfahren	141
3.2	Grundlagen der Umformtechnik	143
3.2.1	Versetzungen	145
3.2.2	Fließkurven	147
3.3	Druckumformen	154
3.3.1	Walzen	154
3.3.2	Schmieden	163
3.3.3	Eindrücken	170
3.3.4	Durchdrücken	173
3.4	Zug-Druck-Umformen	183
3.4.1	Draht- und Stabziehen	183
3.4.2	Gleitziehen von Rohren	186
3.4.3	Abstreckziehen von Hohlkörpern	187

3.4.4	Tiefziehen	189
3.4.5	Drücken	195
3.4.6	Krangenziehen (Bördeln von Öffnungen)	197
3.5	Zugumformen	197
3.5.1	Längen	197
3.5.2	Weiten	198
3.5.3	Tiefen (Streckziehen)	198
3.5.4	Blechprüfung zur Kennwertermittlung	200
3.6	Biegen	203
3.6.1	Einteilung der Biegeverfahren	203
3.6.2	Biegespansungen, Verformungen und Kräfte	205
3.7	Innenhochdruckumformen (IHU)	209
3.7.1	Allgemeines	209
3.7.2	Anwendungsgebiete	210
3.7.3	Bauteil- und Prozessauslegung	212
3.7.4	Anlagen- und Werkzeugtechnik	216
3.7.5	Fertigteilqualität	217
3.7.6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	221
3.7.7	Fertigungsbeispiele	222
3.8	Gebauter Nockenwellen, hergestellt mit Umformverfahren	223
3.8.1	Aufweiten durch Innen-Hochdruck-Umformen (IHU)	224
3.8.2	Thyssen-Krupp-Presta-Verfahren (Aufpressen auf rolliertes Rohr)	225
3.9	Gestaltung von Umformteilen	228
3.9.1	Allgemeines	228
3.9.2	Gestaltung von Gesenkschmiedestücken	228
3.9.3	Gestaltung von Tiefziehteilen	232
4	Trennen	235
	Klaus-Dieter Kühn, Alfred Herbert Fritz und Ralf Förster	
4.1	Verfahrensübersicht Trennen	235
4.2	Scherschneiden	237
4.2.1	Beschreibung des Schneidvorgangs	238
4.2.2	Schneidkraft	240
4.2.3	Gestaltung von Schneidwerkzeugen	241
4.2.4	Vorschubbegrenzungen	242
4.2.5	Feinschneiden	244
4.3	Spanen	248
4.3.1	Einteilung nach DIN 8589	248
4.3.2	Technische und wirtschaftliche Bedeutung	249
4.4	Grundbegriffe der Zerspantechnik	249
4.4.1	Bewegungen und Geometrie von Zerspanvorgängen	249
4.4.2	Eingriffe von Werkzeugen	250
4.4.3	Spanungsgrößen	251
4.4.4	Geometrie am Schneidteil	251

4.4.5	Kräfte und Leistungen	253
4.4.6	Standzeit- und Verschleißbegriffe.	254
4.5	Grundlagen zum Spanen.	254
4.5.1	Spanbildung	255
4.5.2	Spanstauchung	256
4.5.3	Scherwinkelgleichungen.	256
4.5.4	Spanarten	256
4.5.5	Spanformen.	258
4.5.6	Energieumwandlung beim Spanen.	260
4.5.7	Schneidstoffe	260
4.5.8	Werkzeugverschleiß	267
4.5.9	Kühlschmierstoffe	269
4.5.10	Hart-, Hochgeschwindigkeits- und Trocken- bearbeitung	269
4.5.11	Mikrozerspanung	270
4.5.12	Standzeitberechnung und Standzeitoptimierung . . .	271
4.5.13	Schnittkraftberechnung.	274
4.6	Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden	275
4.6.1	Drehen	276
4.6.2	Bohren, Senken, Reiben	282
4.6.3	Fräsen	287
4.6.4	Hobeln und Stoßen	293
4.6.5	Räumen.	295
4.6.6	Auswahl spanender Fertigungsverfahren	299
4.7	Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden	303
4.7.1	Schleifen	304
4.7.2	Einsatz von Sensorik beim Schleifen	326
4.7.3	Mikroschleifen	327
4.7.4	Honen	330
4.7.5	Läppen und Feinschleifen mit Läppkinematik	338
4.7.6	Gleitschleifen	343
4.8	Abtragende Verfahren.	345
4.8.1	Thermisches Abtragen	345
4.8.2	Chemisches Abtragen	351
4.8.3	Elektrochemisches Abtragen	352
4.9	Thermisches Schneiden	354
4.9.1	Autogenes Brennschneiden	354
4.9.2	Plasmaschneiden.	360
4.9.3	Laserschneiden	363
4.10	Wasserstrahlschneiden	366
4.10.1	Einleitung	366
4.10.2	Verfahrensgrundlagen.	367
4.11	Gestaltung von Schnittteilen.	373
4.12	Gestaltung spanend herzustellender Werkstücke	376
4.12.1	Gestaltung für das Drehen	376
4.12.2	Gestaltung für das Bohren, Senken, Reiben.	378
4.12.3	Gestaltung für das Fräsen.	379
4.12.4	Gestaltung für das Hobeln und Stoßen.	380

4.12.5	Gestaltung für das Räumen	381
4.12.6	Gestaltung für das Schleifen.....	382
5	Fügen	387
	Alfred Herbert Fritz, Kai Hilgenberg und Carsten Bye	
5.1	Schweißen als Fügeverfahren.....	387
5.1.1	Bedeutung der Schweißtechnik	387
5.1.2	Abgrenzung beim Fertigungsverfahren Schweißen.....	388
5.1.3	Einteilung der Schweißverfahren.....	388
5.1.4	Hinweise zur Wahl des Schweißverfahrens	392
5.2	Werkstoffliche Grundlagen für das Schweißen	394
5.2.1	Wirkung der Wärmequelle auf die Werkstoffeigen- schaften.....	394
5.2.2	Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe	394
5.2.3	Einfluss des Temperaturfeldes	396
5.2.4	Werkstoffbedingte Besonderheiten beim Schweißen.....	398
5.3	Schmelzschweißverfahren	404
5.3.1	Gasschweißen (G) (Ordnungsnummer: 311)	404
5.3.2	Lichtbogenhandschweißen (E) (ON: 111) Metall- Lichtbogenschweißen.....	409
5.3.3	Schutzgasschweißen (SG) (ON: 13–15).....	429
5.3.4	Unterpulverschweißen (UP) (ON: 12)	453
5.3.5	Elektronenstrahlschweißen (EB) (ON: 51)	462
5.3.6	Laserstrahlschweißen (LA)(ON: 52)	467
5.4	Widerstandsschweißen (ON: 2)	471
5.4.1	Widerstandspressschweißen (ON: 21–24)	472
5.4.2	Widerstandsschmelzschweißen (ON: 72).....	484
5.4.3	Reibschweißen (Ordnungsnummer: 42).....	484
5.4.4	Bolzenschweißen (ON: 783 bis 786)	487
5.4.5	Aluminothermisches Schweißen (Thermit-Verfahren)	490
5.5	Gestaltung von Schweißverbindungen.....	493
5.5.1	Allgemeines	493
5.5.2	Gestaltungsregeln.....	494
5.5.3	Gestaltung von Schmelzschweißverbindungen	494
5.5.4	Gestaltung von Punktschweißverbindungen.....	498
5.6	Löten (Ordnungsnummer: 9)	499
5.6.1	Grundlagen des Lötzens.....	499
5.6.2	Einteilung der Lötverfahren	503
5.6.3	Flussmittel; Vakuum; Schutzgas.....	506
5.6.4	Lotwerkstoffe	509
5.7	Gestaltung von Lötverbindungen	512
5.7.1	Allgemeines	512
5.7.2	Gestaltungsregeln.....	512
5.7.3	Gestaltung gelöteter Blechverbindungen	513
5.7.4	Gestaltung gelöteter Rundverbindungen	513

5.7.5	Gestaltung gelöteter Rohrverbindungen	514
5.7.6	Gestaltung gelöteter Bodenverbindungen	515
5.8	Kleben	516
5.8.1	Wirkprinzip des Klebens	516
5.8.2	Vorbehandlung zur Steigerung der Klebfestigkeit	518
5.8.3	Vorbereitung der Klebung	519
5.8.4	Eigenschaften polymerer Werkstoffe	520
5.8.5	Klebstoffarten	522
5.8.6	Herstellung der Klebung	524
5.8.7	Anwendungsbeispiele	526
5.9	Gestaltung von Klebverbindungen	532
5.9.1	Allgemeines	532
5.9.2	Gestaltung geklebter Blechverbindungen	532
5.9.3	Gestaltung geklebter Rohrverbindungen	533
5.10	Fügen durch Umformen	534
5.10.1	Allgemeines	534
5.10.2	Clinchen	535
5.10.3	Fügen mit Hilfsfügeteil	536
5.10.4	Qualitätssicherung	544
	Stichwortverzeichnis	551

Autorenverzeichnis

Prof. Dr. -Ing. Alfred Herbert Fritz Berlin, Deutschland,
e-mail: fritz.herbert@t-online.de
Kap. 3 und Kap. 5; Abschn. 2.8–2.10; 4.2; 4.11–4.12

Prof. Dr. -Ing. Ralf Förster Berlin, Deutschland,
e-mail: rfoerster@bht-berlin.de
Abschn. 4.8–4.10

Prof. Dr. -Ing. Klaus-Dieter Kühn Braunschweig, Deutschland,
e-mail: k.kuehn@tu-BS.de
Abschn. 1; 4.1–4.7

Prof. Dr. -Ing. Jörg Schmütz Berlin, Deutschland,
e-mail: jschmuetz@bht-online.de
Abschn. 2.1–2.7

Prof. Dr. -Ing. Burghilde Wieneke-Toutaoui Berlin, Deutschland,
e-mail: burghilde.wieneke@posteo.de
Abschn. 2.11

Einteilung der Fertigungsverfahren

Klaus-Dieter Kühn

Zusammenfassung

Die Fertigungstechnik ist ein Teil der übergeordneten Produktionstechnik. Sie erzeugt Produkte, die durch stoffliche und geometrische Merkmale gekennzeichnet sind. Die Vielfalt der bekannten und der zukünftigen Fertigungsverfahren lässt sich nach DIN 8580 unter dem Ordnungsgesichtspunkt *Stoffzusammenhalt* (nämlich: schaffen, beibehalten, vermindern oder vermehren) in fünf Hauptgruppen untergliedern:

1. Urformen; 2. Umformen; 3. Trennen; 4. Fügen; 5. Beschichten

Hinzu kommt dann noch die letzte Hauptgruppe: 6. Stoffeigenschaften ändern.

Diese Hauptgruppen werden in Gruppen weiter unterteilt und darin dann die speziellen Fertigungsverfahren in Untergruppen gekennzeichnet. Diese Systematik wird nach den Regeln der Dezimalklassifikation mit Ordnungsnummern belegt.

In diesem Kapitel werden die erreichbaren Genauigkeiten der verschiedenen Fertigungsverfahren verglichen und die Zielsetzungen für die industrielle Produktion diskutiert. Früher

standen Kostensenkung und Erhöhung der Qualität und der Produktivität im Vordergrund, heute gehören Flexibilität, Energie- und Ressourcen-Effizienz zu den Zielsetzungen einer nachhaltigen Gestaltung der Produktion.

Die Aufgabe der Fertigungstechnik besteht in der wirtschaftlichen Herstellung eines durch eine Zeichnung oder einen anderen Informationsträger vorgegebenen Werkstücks. In diesen „Konstruktionsunterlagen“ sind Anweisungen und Einzelheiten festgelegt, die die Fertigung des Werkstücks ermöglichen. Dazu gehören u. a. die Abmessungen, die Werkstoffe, die erforderlichen Maßtoleranzen, die Oberflächengüten sowie die Prüf- und Messmittel während bzw. nach der Fertigung.

Damit sind schon weitgehend (zusammen mit den betrieblichen Möglichkeiten) die zum Herstellen des Bauteils geeigneten Fertigungsverfahren vorgegeben.

Die in der Zeiteinheit zu fertigenden Teile und der zeitliche, wirtschaftliche und (oder) personelle Aufwand bestimmen den Automatisierungsgrad der Fertigung. Die Möglichkeiten reichen von handbedienten Universalmaschinen über numerisch gesteuerte Maschinen, bei denen die Wirkinformationen in Form von Programmen gespeichert sind, und über flexible Fertigungssysteme, bei denen mehrere CNC-gesteuerte Fertigungssysteme (Bearbeitungszentren, Fertigungszellen, -inseln und Einzelmaschinen) durch eine übergeordnete

K.-D. Kühn (✉)
Braunschweig, Deutschland
E-Mail: k.kuehn@tu-bs.de

Werkstück- und Werkzeugversorgung sowie integrierte Auftragsablaufsteuerung mit Anschluss der Zellenrechner an übergeordnete Leitrechner miteinander verbunden sind. Eine Folge der zunehmenden Automatisierung ist die kontinuierliche Verschiebung der Tätigkeit der Menschen von der handwerklich ausführenden zur geistig anspruchsvollen, planenden Arbeit.

Die Vielzahl der Fertigungsverfahren zwingt zur Einordnung der einzelnen Bereiche in ein überschaubares, widerspruchsfreies System, in dem die bekannten und die in der Zukunft entwickelten Verfahren Platz finden.

Die Norm DIN 8580 enthält die systematische Einteilung der Fertigungsverfahren, Tab. 1.1. Ein wesentliches Ordnungsprinzip ist das Ändern des Zusammenhalts. Es bezieht sich sowohl auf den Zusammenhalt der Teile eines festen Körpers als auch auf den Zusammenhalt der Teile eines komplexen Bauteils:

- Zusammenhalt schaffen (Hauptgruppe 1),
- Zusammenhalt beibehalten (Hauptgruppe 2),
- Zusammenhalt vermindern (Hauptgruppe 3),
- Zusammenhalt vermehren (Hauptgr. 4 und 5).

Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Unterscheidung zwischen Formgeben und dem Ändern der Stoffeigenschaften. Damit ergibt sich eine zweidimensionale Ordnungsmatrix der in sechs Hauptgruppen eingeteilten Fertigungsverfahren, Tab. 1.1. In diesem Ordnungssystem wird jedes Fertigungsverfahren mit einer mehrstelligen Ordnungsnummer (ON) bezeichnet:

- Hauptgruppen (1. Stelle der ON: Einteilung)
- Gruppen (2. Stelle der ON: Unterteilung)
- Untergruppen (3. Stelle der ON: Verfahren).

Die Gruppen 1.10 Urformen durch Additive Fertigung und 1.6 Urformen durch Schweißen wurden neu in die DIN 8580 aufgenommen. Bei der Additiven Fertigung liegt der Schwerpunkt auf dem Schaffen einer Form, weshalb sie in der Gesamtheit dem Urformen zugeordnet wird. Die Beschreibung der Additiven Fertigungsverfahren sowie zur Anwendung kommende Werkstoffe,

Werkzeuge und Wirkmedien sind in DIN EN ISO 17296-2 aufgeführt

In Bezug auf die jeweilige Bearbeitungsaufgabe bieten sich in der Regel mehrere Fertigungsverfahren bzw. Kombinationen von Fertigungsverfahren an. Von den zu bearbeitenden Formelementen, den formelementspezifischen Abmessungen, Toleranzen und Oberflächenmerkmalen, vom Werkstückstoff und von den Stoffeigenschaften ist es unter anderem abhängig, wie sich Anwendungsgrenzen von Fertigungsverfahren verschieben.

Fertigungsverfahren und Fertigungssysteme sind so zu wählen, dass die Werkstücke in ausreichender Ausbringung und Qualität bei minimalen Kosten sowie unter ergonomischen und umweltverträglichen Bedingungen gefertigt werden können.

Die fortwährende Verbesserung der bestehenden Fertigungsverfahren vollzieht sich i. Allg. als komplexer Prozess. So werden die in der industriellen Fertigung erreichbaren Genauigkeiten urformend oder umformend vorgefertigter Werkstücke zunehmend größer, und in vielen Fällen wird nur noch ein spannendes Fertigungsverfahren für die Endbearbeitung erforderlich sein. Die Forderungen nach kürzeren Durchlaufzeiten und geringerer Kapitalbindung verlangen zudem, dass die klassischen Fertigungsfolgen mit dem Ziel der Kostensenkung und mit teilweise erhöhten Anforderungen an die Qualität der gefertigten Werkstücke neu überdacht werden. Zukunftsorientierte Fertigungsstrategien haben neben den bekannten Forderungen nach höherer Produktivität auch verstärkt die Flexibilität und Zuverlässigkeit der Fertigung zu berücksichtigen. Es wird künftig weniger darum gehen, die einzelnen Arbeitsvorgänge selbst zu optimieren. Technologische Prozesse lassen sich deshalb nicht mehr isoliert betrachten, sondern müssen als Kette von vor- und nachgelagerten Teilverfahren beurteilt werden. Eine zentrale Forderung in der Produktion ist die Reduzierung der Anzahl notwendiger Fertigungsschritte. Unter Ausnutzung der größer werdenden Anwendungsbreite und Formgebungsmöglichkeiten

Tab. 1.1 Einteilung der Fertigungsverfahren (nach DIN 8580). In Klammern: Beispiele

Hauptgruppen					
1 Urformen	2 Umformen	3 Trennen	4 Fügen	5 Beschichten	6 Stoffeigenschaft ändern
Definitionen					
Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff	Plastisches Ändern der Form eines festen Körpers	Formändern eines festen Körpers durch örtliches Aufheben des Zusammenhaltes	Zusammenbringen von Werkstücken auch mit formlosem Stoff	Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff	Ändern der Eigenschaften des Werkstoffes, z. B. durch Diffusion, chem. Reaktion, Gitterversetzungen
Zusammenhalt der Teilchen bzw. Bestandteile wird					
geschaffen	beibehalten	vermindert oder aufgehoben	vermehrt		
Gruppen (mit Beispielen)					
1.1 aus dem flüssigen Zustand (Gießen)	2.1 Druckumformen (Walzen, Fließpressen, Schmieden)	3.1 Zerteilen (Scherschneiden)	4.1 Zusammensetzen (Einlegen)	5.1 aus dem flüssigen Zustand (Lackieren)	6.1 Verfestigen durch Umformen (Schmieden)
1.2 aus dem plastischen Zustand (Spritzegießen)	2.2 Zugdruckumformen (Drahtziehen, Tiefziehen)	3.2 bestimmten (Drehen, Bohren, Fräsen)	4.2 Füllen (Einfüllen)	5.2 aus dem plastischen Zustand (Spachteln)	6.2 Wärmebehandeln (Glühen, Härteten)
1.3 aus dem breiigen Zustand (Gießen von Keramik)	2.3 Zugumformen (Längen, Weiten, Tiefen)	3.3 unbestimmten (Schleifen, Honen, Läppen)	4.3 An- und Eindrücken (Schrumpfen)	5.3 aus dem breiigen Zustand (Verputzen)	6.3 Thermomechanisches Behandeln
1.4 aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand (Pressen, Sintern)	2.4 Biegeumformen (mit drehender Werkzeugbewegung)	3.4 Abtragen (thermisches Trennen, chem. Abtragen)	4.4 Fügen durch Urformen (Ausziehen, Umgießen mit Kunststoff)	5.4 aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand (Wirbelsintern)	6.4 Sintern, Brennen
1.5 aus dem span- oder faserförmigen Zustand	2.5 Schubumformen (Verdrehen)	3.5 Zerlegen (Lösen von Verbindungen)	4.5 Fügen durch Umformen (Nieten, Bördeln, Clinchen)		6.5 Magnetisieren
1.6 Urformen durch Schweißen		3.6 Reinigen (Reinigungsstrahlen)	4.6 Fügen durch Schweißen (Schmelzverbindungsschweißen)	5.6 durch Schweißen (Schmelzauftragsschweißen)	6.6 Bestrahlen
			4.7 Fügen durch Löten (Weichlöten, Hartlöten)	5.7 durch Löten (Auftrag-weichlöten)	6.7 Photochemische Verfahren (Belichten)
1.8 aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand			4.8 Kleben	5.8 aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand (Vakuumbedampfen)	
1.9 aus dem ionisierten Zustand (elektrolytisches Abscheiden, Galvanoplastik)			4.9 Textiles Fügen	5.9 aus dem ionisierten Zustand (Galvanisieren)	
1.10 Urformen durch Additive Fertigung					

Fertigungsverfahren	erreichbare Genauigkeiten																			
	IT-Qualitäten											Rautiefe Rz [μm]								
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	0,25	1	2,5	4	10	16	63	250
Gießen					■	■											■	■		
Sintern					■	■	■	■	■					■	■	■	■	■	■	■
Gesenkschmieden			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Präzisionsschmieden			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Kaltfließpressen	■	■												■	■	■	■	■	■	■
Walzen		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Schneiden				■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Drehen		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Bohren					■	■	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■
Planfräsen		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Hobeln		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Räumen		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Rundschleifen		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■

normal erreichbar durch Sondermaßnahmen erreichbar

Abb. 1.1 Erreichbare Genauigkeiten bei verschiedenen Fertigungsverfahren. (Nach K. Lange et al.)

von Fertigungsverfahren und bei weitgehender Annäherung der Ausgangsform (Rohteil) an das Fertigteil („Near-Net-Shape“-Technologie) konnten durch Substitution, Integration und Elimination von Fertigungsverfahren Kosten und Durchlaufzeiten innerhalb von Prozessketten insgesamt verringert und die Qualität von Produktion und Produkt erhöht werden.

Abb. 1.1 gibt eine Übersicht der erreichbaren Genauigkeiten wichtiger Fertigungsverfahren. Durch die Erweiterung der Leistungsbereiche urformender und umformender Fertigungsverfahren werden sich dabei zugleich Möglichkeiten ergeben, die Bearbeitungszugaben und damit auch den Anteil der Nachbearbeitung erheblich zu reduzieren.

Neben der Einhaltung vorgegebener Maß-, Form-, Lage- und Rauheitstoleranzen bestimmen jedoch noch eine Vielzahl von weiteren Kriterien die Verfahrensauswahl. So wird diese unter Umweltverträglichkeitsgesichtspunkten zunehmend von Fragen der Entsorgung, z. B. von Spänen und Kühlenschmierstoffen, beeinflusst.

Waren früher vor allem Kostensenkung und Produktivitätserhöhung die Zielsetzungen, so

geht es heute und zukünftig in der industriellen Produktion darum, zusätzlich die Bestände zu senken, die Flexibilität und Qualität zu erhöhen und die human- und umweltzentrierten Aspekte in der Zielsetzung höher zu gewichten, Abb. 1.2.

So sind gestiegene Kosten für Rohstoffe und Energie neben verschärften gesetzlichen und

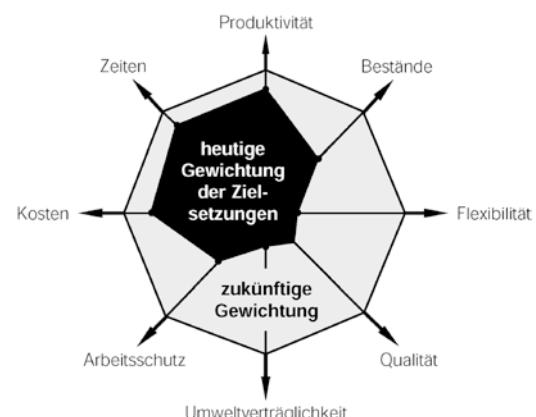


Abb. 1.2 Gewichtung der Zielsetzungen zur Entwicklung wettbewerbsfähiger Produktionskonzepte. (Nach Westkämper)

gesellschaftlichen Rahmenbedingungen ein entscheidender Antriebsfaktor für mehr Nachhaltigkeit in der Produktion. Viele der Rohstoff- und Energiequellen sind zudem nicht erneuerbaren Ursprungs. Energie- und ressourcen-effizient geplante Fertigungsprozesse sowie das Schließen von Materialkreisläufen sind deshalb wichtige Bausteine einer nachhaltigen Produktion.

Abb. 1.3 zeigt einen Vergleich des Energiebedarfes und der Werkstoffausnutzung für die Werkstückherstellung durch verschiedene Fertigungsverfahren. Die Werte für spanende Fertigungsverfahren lassen gegenüber anderen Fertigungsverfahren einen deutlich höheren Energiebedarf erkennen. Die energetische Betrachtung von Fertigungsprozessen kann nicht isoliert erfolgen, sondern muss als Kette von vor- und nachgelagerten Teilvergängen beurteilt werden. Moderne Gieß- und Umformverfahren ermöglichen heute eine endkonturnahe Teilefertigung und ermöglichen so eine höhere Energie-Effizienz und Werkstoffausnutzung.

Der Energie- und Ressourcenverbrauch in der Produktion ist jedoch durch eine Vielzahl von Einzelverbräuchen bestimmt. Eine zielgerichtete Effizienzverbesserung erfordert deshalb eine Bewertung aller stofflichen und energetischen Flüsse in einem erweiterten Prozess- und Systemverständnis. Neben der Produktion

mit den verschiedenen Fertigungstechnologien sind auch die Technische Gebäudeausstattung (TGA) und die Gebäudehülle von Fabriken einzubeziehen. Die Technische Gebäudeausstattung sorgt für die notwendigen Umgebungsbedingungen der Produktion (z. B. Klimatisierung) sowie die Herstellung, Bereitstellung und Aufbereitung notwendiger Medien und Energien (z. B. Druckluft, Prozesswärme in Form von Dampf usw.). Dazu wird ebenfalls Energie in Form von Elektrizität, Gas oder Öl benötigt bzw. direkt aus regenerativen Energiequellen (Solarenergie, Windkraft) erzeugt. Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion erfordert es, alle relevanten Energie- und Stoffflüsse in deren wechselseitigen systemdynamischen Abhängigkeiten zu betrachten, Abb. 1.4.

Ergänzendes Schrifttum

- *Herlan, T.: Optimaler Energieeinsatz bei der Fertigung durch Massivumformung.* Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1989
- *Herrmann, Chr., G. Posselt u. S. Thiede (Hrsg.): Energie- und Hilfsstoff-optimierte Produktion.* Springer Vieweg, Berlin Heidelberg 2013
- *Lange, K., Th. Neitzert u. H. Westheide: Möglichkeiten moderner Umformtechnik.* wt-z. incl. Fertig. 73 (1983), S. 349–358

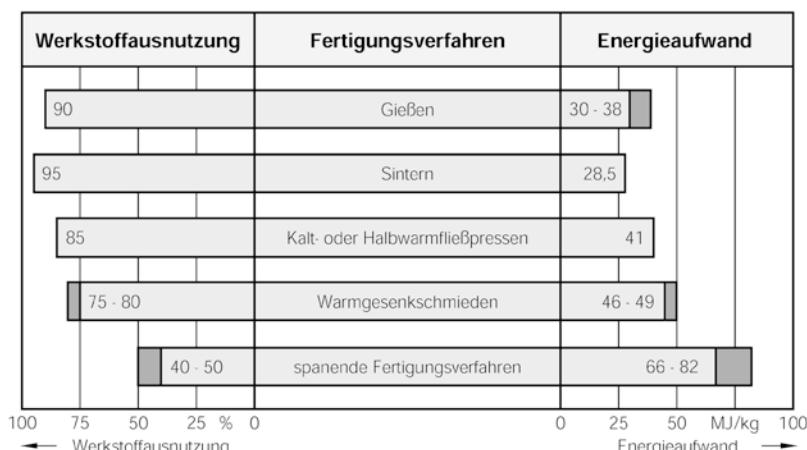


Abb. 1.3 Werkstoffausnutzung und Energieaufwand verschiedener Fertigungsverfahren. (Nach Lange)

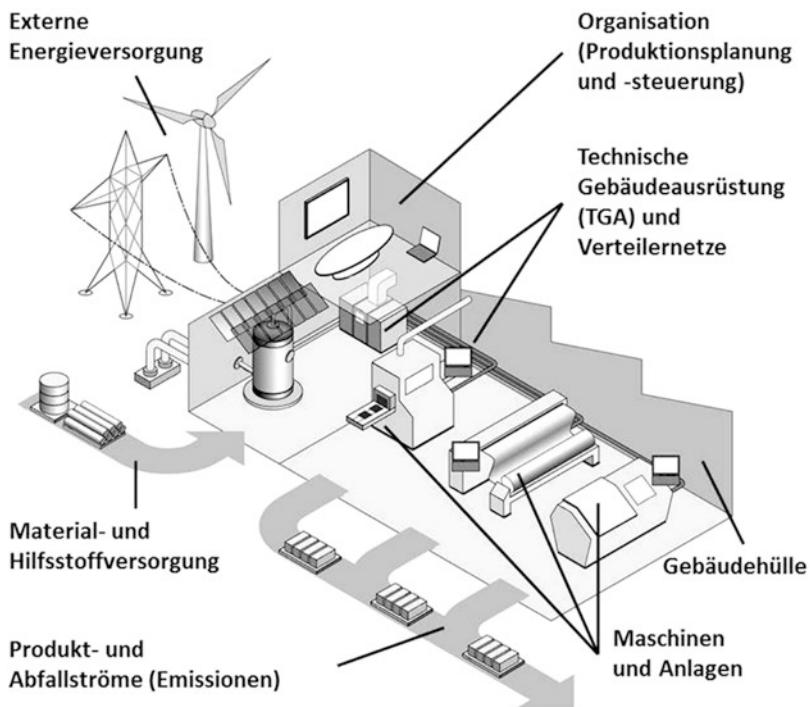


Abb. 1.4 Ganzheitlicher Ansatz zur Energie- und Ressourcen-Effizienz in der Produktion (IWF-TU Braunschweig)

Urformen

Jörg Schmütz, Alfred Herbert Fritz
und Burghilde Wieneke-Toutaoui

Zusammenfassung

Die Hauptgruppe *Urformen* wird als Fertigungsverfahren nach DIN 8580 definiert: *Urformen ist das Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhalts*. Dabei lassen sich die Stoffeigenschaften des Werkstücks messtechnisch bestimmen. Als formloser Stoff werden Gase, Flüssigkeiten, Pulver, Fasern und Späne bezeichnet. Die wichtigsten Verfahren zur Erzeugung von festen Körpern durch *Urformen* sind die Herstellung

- aus dem flüssigen oder breiigem Zustand (Gießen von metallischen Werkstücken),
- aus dem festen, körnigen oder pulvriegen Zustand (Pulvermetallurgie: pressen, danach sintern),
- additive Fertigungsverfahren (schichtweiser Aufbau von Bauteilen mit fast beliebiger Geometrie).

Die meisten Werkstücke werden durch *Gießen* hergestellt. Die Gießverfahren stellen den kürzesten Weg von der Konstruktion bis zum fertigen Rohteil dar. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen werden oft spanende Fertigungsverfahren nachgeschaltet. Durch *Sintern* können Werkstoffe hergestellt werden, die in flüssigem Zustand nicht mischbar sind sowie sog. Pseudolegierungen aus Metallen und Nichtmetallen.

Die *Additiven Fertigungsverfahren* wurden früher zum Herstellen von Design- und Funktions-Prototypen eingesetzt. Nach einer stürmischen Weiterentwicklung können sie heute z. T. klassische Fertigungsschritte vollständig ersetzen.

Die Abschnitte zum Gießen von Motoren im Pkw-Leichtbau wurden aktualisiert, ebenso das Gießen von Komponenten für Windkraftanlagen.

2.1 Urformen durch Gießen

Nach dem Fertigungsverfahren Gießen werden aus *Metallen* und *Legierungen* Gussstücke erzeugt. Aber auch zahlreiche andere Werkstoffe erhalten durch Gießverfahren ihre endgültige Form, z. B.

- Porzellan und Beton,
- Gläser und
- Kunststoffe.

A. H. Fritz (✉) · B. Wieneke-Toutaoui
Berlin, Deutschland
E-Mail: fritz.herbert@t-online.de

B. Wieneke-Toutaoui
E-Mail: burghilde.wieneke@posteo.de

J. Schmütz
Bremen, Deutschland
E-Mail: jschmuetz@bht-berlin.de

Im Folgenden werden ausschließlich metallische *Gusswerkstoffe* und deren Gießverfahren betrachtet.

Durch Gießen lassen sich metallische Werkstücke dann besonders wirtschaftlich fertigen, wenn mit Gießverfahren wie

- Sandformguss¹,
- Kokillen- und Druckguss sowie
- Präzisions- oder Feinguss

bessere *Werkstückeigenschaften* erzielt werden als mit konkurrierenden Formgebungsverfahren (z. B. spangebende Verfahren: Drehen, Fräsen, Hobeln; Schweißverfahren). Die Werkstücke lassen sich mit genügender Genauigkeit durch die gewünschten Eigenschaften und Besonderheiten den verschiedenen Fertigungsverfahren zuordnen. Die Zuordnung ist von einer Reihe unterschiedlicher Faktoren abhängig:

- Maßgenauigkeit, z. B. IT-Qualitäten,
- Oberflächengüte, z. B. Rautiefe,
- Wanddicke,
- Stückzahl,
- Stückmasse (Stückgewicht),
- Abmessungen.

Im Vergleich verschiedener Verfahren der Teilefertigung lassen sich durch Gießen nur *Rohteile* herstellen. *Fertigteile* mit hohen Genauigkeiten werden durch spanende oder umformende Fertigungsverfahren erzeugt. Durch Gießen können Werkstücken in einem Arbeitsgang in ihre endgültige Form gebracht und verlustarm hergestellt werden. Das bedeutet für die Teilefertigung: Rohteile unter Reduzierung der Anzahl notwendiger Fertigungsschritte nur an Funktionsflächen so wenig wie möglich spanlos oder spanend fertig bearbeiten.

2.1.1 Grundbegriffe der Gießereitechnologie

Die Beschreibung der gießtechnischen Fertigung, also des Verfahrensablaufs im Gießereibetrieb von der *Konstruktionszeichnung* bis zum fertigen Gussstück, erfordert die Kenntnis von Grundbegriffen, die i. Allg. durch ein Gießereipraktikum erworben werden.

Die Konstruktionszeichnung wird der Gießerei zur Angebotsabgabe zugesandt entweder als

- Rohteilzeichnung oder als
- Fertigteilzeichnung.

Die *Rohteilzeichnung* enthält die vom Besteller geforderten (gewünschten) *Aufmaße*, *Bearbeitungszugaben* und *Formschrägen* mit *Längen-, Dicken- und Winkeltoleranzen*. Es ist üblich, in Rohteilzeichnungen für Seriengussstücke die Spannflächen (sog. Erstaufnahmeflächen) für die erste spanende Bearbeitung zu kennzeichnen. Ferner sind die Flächen für *Beschriftungen* und *Herstellerzeichen* wahlweise vertieft oder erhaben eingezeichnet.

Die bei der Einzelfertigung und bei Kleinserien übliche *Fertigteilzeichnung* wird in der Arbeitsvorbereitung der Gießerei durch Angabe der vorgegebenen, vereinbarten oder erforderlichen Aufmaße, Formsschrägen und Toleranzen in eine Rohteilzeichnung umgewandelt.

2.1.1.1 Modelle und Formverfahren

Die Fertigungseinrichtungen, z. B. *Modelle*, *Modellplatten*, *Schablonen* oder *Kokillen*, werden nach der Rohteilzeichnung im **Modell-** oder **Formenbau** angefertigt und sind Eigentum des Bestellers; hierbei sind kleinere Änderungen fast bis zur Fertigstellung möglich. Dies ist von besonderer Bedeutung für Neuentwicklungen.

Zunächst werden in Zusammenarbeit zwischen Arbeitsvorbereitung und Gießereibetrieb dem Modell- oder Formenbau folgende Angaben gemacht:

- Formteilung,
- Zahl und Lage der Anschnitte sowie
- Kerne und Kernlagerung.

¹ Das Prinzip Sandguss. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=KjyfXQHdLqU).

Die *Formteilung* ist diejenige gedachte Fläche, die am Gussstück – sie ist außen und innen als Teilungsgrat sichtbar – die Formhälften anzeigen. Die Wahl der Formteilung bestimmt meistens auch die Anzahl und Lage der Kerne und ist deshalb von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Bei Serienguss ist es zweckmäßig, Lage und Anordnung der Formteilung mithilfe einer formtechnischen Analyse zu ermitteln.

Am Beispiel eines einfachen Lagerdeckels wie in Abb. 2.1 sollen verschiedene *mögliche Lagen* der Formteilung erläutert werden.

Der Deckel wird spanend bearbeitet. Der Wälzlagersitz soll feingedreht und die Deckelfläche als Dichtfläche plangefräst oder plan überdreht werden. Zum Befestigen des Deckels durch Schrauben ist der Flansch an den Ecken mit vier Bohrungen zu versehen. Dabei ist die Zentrierung für die Bohrer möglichst auszuformen, da Bohrungen unter etwa 15 mm Durchmesser durch *Kerne* nicht wirtschaftlich hergestellt werden können. Sie sollten gebohrt werden!

Alle Bearbeitungsvorgänge können von einer Seite in einem Aufspannen erfolgen, wenn das Rohrende des Deckels als *Erstaufnahmefläche* dient.

Zum Sichern des Lagers gegen Herauswandern aus dem Deckel wird der Innendurchmesser rohrseitig als Sicherungsbund ausgeführt. Die Formteilung in Abb. 2.2 soll zunächst in die zu bearbeitende Deckelfläche gelegt werden. Dadurch liegt der Lagerdeckel praktisch nur in einer *Formhälfte*.

Der Innendurchmesser des Deckels wird *kernlos* durch *hängende* und *stehende Ballen*

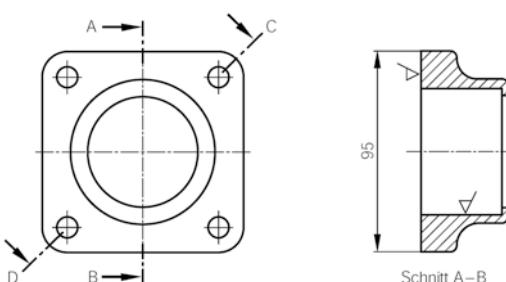


Abb. 2.1 Zum Begriff der Formteilung an einem Lagerdeckel für einen Pkw

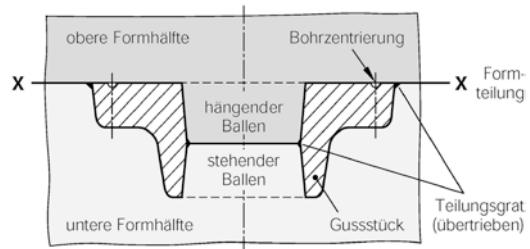


Abb. 2.2 Lagerdeckel, Schnitt C-D in Abb. 2.1, kernlos geformt in der unteren Formhälfte mit Formteilung X-X, die in der Deckelhälfte beginnt

ausgeformt. Dabei ist es vorteilhaft, die *Ballenteilung* auf der Mitte der Lagersitztiefe zu wählen, weil dadurch beide Ballenhälften mit minimalen *Formschrägen* auskommen. Der zwischen den Ballen entstehende geringe *Teilungsgrat* liegt auf einer Fläche, die spanend bearbeitet wird. Der *hängende* Ballen sollte allerdings nicht tiefer als 60–80 mm sein. Die Bohrzentrierungen lassen sich problemlos ausformen.

Zum Entfernen der *Speiser* oder *Steiger* sowie zum Gussputzen ist die Formteilung in Abb. 2.3 geeigneter. Die Formteilung beginnt außen auf der Flanschmitte und teilt die Lagerbohrung zur Hälfte in einen *hängenden* und *stehenden* Ballen auf. Die bei den meisten Gusswerkstoffen zum Volumenausgleich erforderlichen Speiser müssen in der Formteilung durch *Anschnitte* (genauer: Anschnittflächen) mit dem Gussstück verbunden werden. Vom *Eingusstrichter* aus lassen

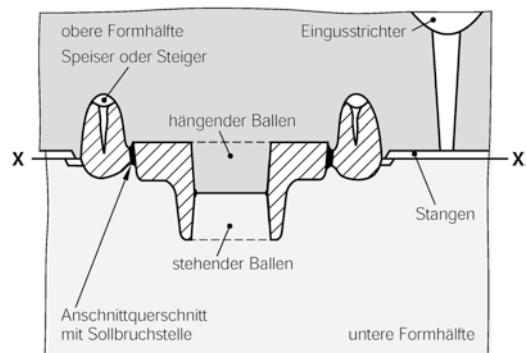


Abb. 2.3 Kernlos geformter Lagerdeckel mit Anschnittsystem und Formteilung X-X auf Flanschmitte beginnend

sie sich über *Stangen*, die sich in der Teilung überlappen, mit Schmelze füllen.

Durch das Ausformen einer stark gekerbten *Sollbruchstelle* zwischen Anschnitt und Speiser kann bei spröden Gusswerkstoffen nach dem Erstarren das gesamte *Anschnittsystem*, bestehend aus

- Speiser oder Steiger,
- Verteilerstangen und
- Eingusstrichter

durch einfaches *Abschlagen* vollständig entfernt werden. Der in Abb. 2.3 in Flanschmitte auftretende *Teilungsgrat* wird mit Putzmaschinen vollständig beseitigt. Diese elegante Möglichkeit der Trennung des Anschnittsystems vom Gussstück kann bei *duktilen*, d. h. zähen Gusswerkstoffen, nicht angewandt werden. Es entstehen dann erhebliche Putzkosten.

Aus formtechnischer Sicht ist die Lage der Formteilung in Abb. 2.3 noch unbefriedigend, da die *Formfläche* – dies ist die Projektion der durch die Formteilung erzeugten Ebene des Gussstücks in die Teilungsebene – durch den flachen Lagerdeckel nach der Tiefe hin nur ungenügend ausgenutzt ist. In Abb. 2.4 können auf einer nur wenig vergrößerten Formfläche bedingt durch den *Kern* und die *Kernlagerung* zwei Lagerdeckel gegossen werden. Die Teilung zwischen Kern und Ballen im Innendurchmesser kann

auch unsymmetrisch ausgeführt werden, wenn dadurch der Kern kleiner und damit preiswerter wird oder wenn der rohrseitige Sicherungsbund angegossen werden soll.

Weitere Variationen der Formteilung, dargestellt z. B. in Abb. 2.5, als *Diagonalteilung* nach Abb. 2.1, Schnitt CD, ausgeführt, bringen bereits Nachteile für die Anschnitt- und Speisertechnik. Auch das Formen der Zentrierungen für die Flanschbohrungen wird schwieriger, weil der Kern als kostengünstiger *Hohlkern* mit geringem Sandverbrauch und guter Gasableitung unvorteilhaft hohe Stege haben müsste.

Der optimalen Wahl der Formteilung kommt bei Seriengussstücken große Bedeutung zu, weil damit auch evtl. erforderliche Kerne, die Hohlräume oder nicht formbare Flächen – Hinterschneidungen – abbilden sollen, beeinflusst werden. Die Formteilung ist am Gussstück als dünner **Grat** innen und außen auch nach dem Putzen noch sichtbar und erhöht die Masse, das **Stückgewicht**.

Da bei allen Seriengießverfahren die Formfläche durch die vorhandene *Formmaschine* vorgegeben und nicht variabel ist, muss versucht werden, diese kostengünstig mit geringerem Sandverbrauch nach der Tiefe hin auszunutzen. An Hand der Rohteilezeichnung wird in der Gießerei über das wirtschaftliche Herstellverfahren entschieden. Je nach

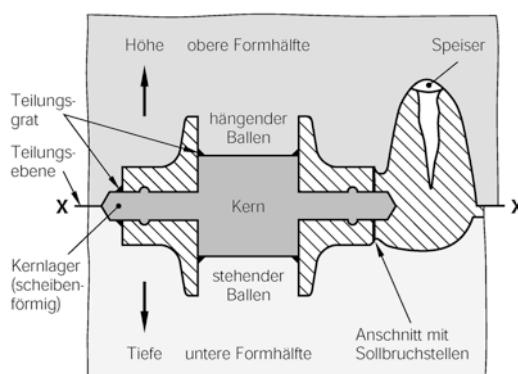


Abb. 2.4 Zum Begriff der Formfläche: Lagerdeckel als Doppelmodell mit Kern und Formteilung X-X in der Kernteilung

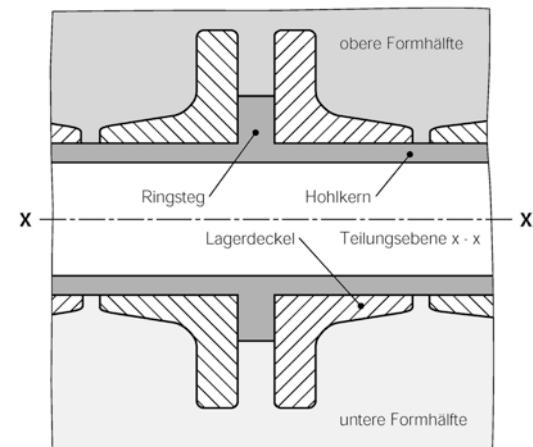


Abb. 2.5 Lagerdeckel mit Diagonalteilung, siehe Schnittebene CD in Abb. 2.1, mit Hohlkern geformt

- Kompliziertheit,
- Maßtoleranzen,
- Stückmasse,
- Losgröße,
- Werkstoff

wird im Modellbau ein sogenanntes

- **Dauermodell** für Formverfahren mit *verlorenen Formen* oder im Formenbau eine
- **Dauerform (Kokille)** für ein *Dauerformverfahren* angefertigt.

Bei beiden Verfahren ist es möglich, Hohlräume und nicht formbare Flächen, Hinterschneidungen, durch *Kerne* oder *Kernschieber* abzubilden.

Werkstoffe für Dauermodelle sind

- Modellholz,
- Gießharze und
- Metalle.

Je nach Beanspruchung werden *Dauermodelle* nach *Modellgüteklassen* nach DIN EN 12890 mit auf Nennmaßbereiche bezogenen Maßabweichungen angefertigt. Für die drei Nennmaßbereiche zwischen 50 mm und 180 mm sind als Beispiel in Tab. 2.1 die *zulässigen Maßabweichungen* am Gussstück angegeben für.

- H: Holzmodelle,
- M: Metallmodelle und
- K: Kunststoffmodelle.

DIN EN 12890 macht auch Angaben über **Formschrägen** an inneren/äußeren Modellflächen und bei Holzmodellen über Anstrich- und Farbkennzeichnungen. Für den Nennmaßbereich 50 mm bis 80 mm nach Tab. 2.1 sind etwa

1° Formschräge für das Herausziehen der Metallmodelle M1 erforderlich. Formschrägen erhöhen das Stückgewicht und sollten möglichst an den zu bearbeitenden Flächen liegen.

2.1.1.2 Gießverfahren mit verlorenen Formen

Die verlorenen Formen oder Kerne werden aus Gießereisanden im *bildsamen Zustand* meist auf Vorrichtungen, wie z. B. Formmaschinen, Kernblas- oder Kernschießmaschinen hergestellt. Näheres ist in Abschn. 2.5 erläutert. Die Formen (Kerne) bestehen aus *Quarz-, Silica-, Chromit- oder Zirkonsand* mit natürlichen oder chemischen Bindemitteln, sowie Zugaben wie z. B.

- Ton (Bentonit),
- Wasserglas, Zement, Gips,
- Kunsthärze auf Phenol-, Kresol-, Furan- und Polyurethanbasis und
- Zusätzen (Wasser, Kohlenstaub).

Der Ausdruck verlorene Formen oder verlorene Kerne bezieht sich dabei auf den Zustand unmittelbar nach der Erstarrung des Gussstücks. Zu diesem Zeitpunkt soll die Form mit den Kernen durch die thermische Beanspruchung zerfallen.

Das Gussstück lässt sich dadurch leicht entformen, d. h. *auspacken*. Der Formstoff ist aber nicht verloren. Er dient als *Kreislaufsand* nach einer Aufbereitung zur Herstellung neuer verlorenen Formen. Die Formverfahren mit verlorenen Formen werden sowohl bei der Einzelfertigung als auch bei Großserien, z. B. in der Automobilindustrie, angewendet.

Bestimmte Gussstücke lassen sich günstiger fertigen, wenn *gleichzeitig* mit *verlorenen Modellen* und *verlorenen Formen* gearbeitet wird. Die verlorenen Modelle für den *Fein-* oder

Tab. 2.1 Zulässige Maßabweichung $\pm \Delta l$ in mm für drei Nennmaßbereiche (Nach DIN EN 12890)

Modellgüteklasse	H1a/H1	H2/3	M1	M2	K1	K2
Nennmaßbereich	50 bis 80 mm	0,3	0,6	0,15	0,25	0,25
	80 bis 120 mm	0,4	0,7	0,2	0,3	0,3
	120 bis 180 mm	0,5	0,8	0,2	0,3	0,5

Präzisionsguss werden aus synthetischen Wachsen oder thermoplastischen Kunststoffen mit Hilfe des *Spritzgießens* in einer geteilten Dauerform erzeugt oder für Mittel- und Großgussmodelle aus Hartschaumblöcken geschnitten und miteinander verklebt. Durch Erwärmen (Brennen) der ungeteilten Form vor dem Abguss schmilzt das Wachs oder der Kunststoff heraus, oder der Hartschaum verbrennt beim Eingießen der Schmelze.

Eine Übersicht der gebräuchlichen Formverfahren zeigt Tab. 2.2.

2.1.1.3 Dauerformverfahren

Die *Dauerformen* oder *Kokillen* für die Dauerformverfahren können nur aus Metallen gefertigt werden. Werkstoffe für Kokillen sind

- verschleißfeste, hitze- und zunderbeständige Stähle,
- niedrig- oder hochlegiertes Gusseisen,
- Kupfer und Kupferlegierungen.

Da Dauerformen in der Herstellung lohnintensiv und somit teuer sind, werden nur Seriengussstücke in Kokillen vergossen.

Auch Dauerformen unterliegen erheblichem Verschleiß und haben eine von der Beanspruchung (Entformung und Temperaturwechsel) abhängige Lebensdauer. Das *Entformen*, d. h., das *Ausstoßen* oder das *Auswerfen* der Gussstücke aus den Kokillen erfordert z. T. aufwendige Vorrichtungen.

Bei den Verfahren mit verlorenen Formen lassen sich mit Dauermodellen auch Kerne für alle

Tab. 2.2 Formverfahren mit verlorenen Formen und Dauerformen

verlorene Formen		Dauerformen
Dauermodelle	verlorene Modelle	Kokillen
Handformen Maschinenformen Maskenformen Keramikformen	Feingießen Vollformgießen	Druckgießen Kokillengießen Schleudergießen Stranggießen Verbundgießen

anderen Formverfahren mit Ausnahme des *Druckgießens* herstellen. Der *Gießdruck* ist beim Druckgießen so hoch, dass nur Kernschieber oder Kerne aus Metallen zur Abbildung von Hohlräumen oder Hinterschneidungen verwendbar sind.

Die Wahl eines bestimmten Formverfahrens nach Tab. 2.2 für ein Gussstück an Hand der Rohteilzeichnung ist nur in wenigen Fällen eindeutig möglich. Vor allem bei Seriengussstücken sind oft verschiedene Formverfahren aus wirtschaftlichen Gründen dann von Interesse, wenn die geforderten Werkstückeigenschaften auch durch andere Gusswerkstoffe erreicht werden können. Zum Beispiel werden Zylinderkurbelgehäuse und Zylinderköpfe sowohl aus Gusseisen in verlorenen Formen als auch aus Leichtmetall in Dauerformen hergestellt.

2.1.1.4 Schmelzen

Parallel zur Form- und Kernherstellung werden im Schmelzbetrieb der Gießerei die Gusswerkstoffe erschmolzen. Dies geschieht werkstoffbedingt im

- *Schachtofen*, z. B. Kupolofen,
- *Tiegelofen*, z. B. Induktionsofen,
- *Herdofen*, z. B. Lichtbogenofen.

Die Öfen werden mit Koks, Öl, Gas oder elektrisch beheizt und sind in der Regel *sauer* ausgekleidet. Die feuerfeste Auskleidung besteht aus *Quarz* (SiO_2) oder *Klebsanden* (Quarz und Ton).

Der bekannteste Gießereischachtofen ist der saure oder futterlose **Kupolofen** mit Heißwind. Abb. 2.6 zeigt den in Eisen- und Tempergießereien vorherrschenden Heißwindkupolofen mit dem Netzfrequenztiegel im Verbund als *Duplexbetrieb*. Der *Syphonabstich* hält flüssiges Eisen im Ofen zurück, das dort aufkohlen kann und über eine Rinne kontinuierlich dem Induktionsofen zufließt. Durch Zugabe von Sauerstoff durch die Düsen können Schmelzleistung und Eisentemperatur erhöht werden. Der Kupolofen wird auch zunehmend für das Verwerten und Entsorgen der gießereieigenen Reststoffe genutzt. Stäube werden brikettiert oder gepresst als Zuschlüsse mit der Beschickung eingesetzt. Formstoffreste, die sog. Knollen, werden durch

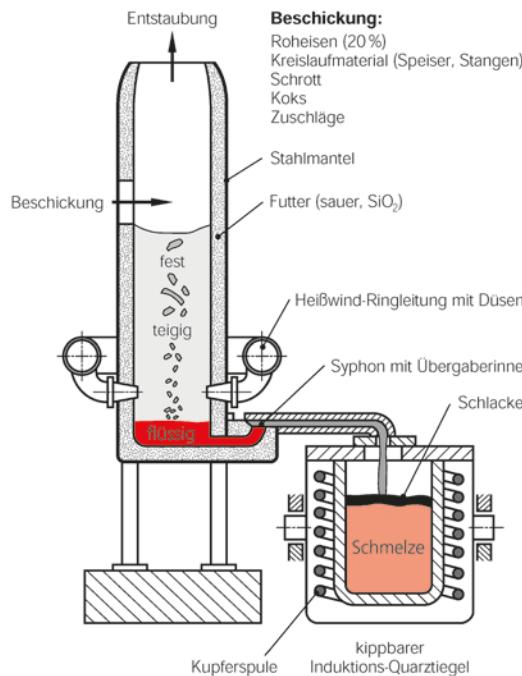


Abb. 2.6 Heißwindkupolofen im Duplexbetrieb mit einem Netzfrequenz-Induktionstiegelofen

eine Vorrichtung in der Düsenebene eingeblasen und verschlacken. Das Legieren, also das Einstellen der Zusammensetzung, erfolgt im Tiegel, der dazu auf Druckmessdosen gelagert ist, die den Füllstand anzeigen.

2.1.1.5 Gießen

Das Gießen, Abgießen oder Füllen der Form ist der nächste Schritt einer gießtechnischen Fertigung. Nach der Art des *Gießdrucks* unterscheidet man:

- *Schwerkraftgießen*,
- *Druckgießen* und
- *Schleudergießen*.

Weil *Druckguss* spezifisch werkstoffabhängig ist (typisch für Zink und Leichtmetalle), wird dieses Verfahren in Abschn. 2.5.2.1 zusammen mit den *Druckgusswerkstoffen* beschrieben. Beim *Schleuderguss* als Formguss (Abschn. 2.5.3.3) sind bisher Rohre und ringförmige Gussstücke aus allen Gusswerkstoffen vorherrschend.

Beim *Schwerkraftgießen* werden oben offene Sand- oder Dauerformen mit Schmelze gefüllt. In Abb. 2.7 ist der Flüssigkeitsspiegel in der oben offenen Nockenwellenform im Einguss und im Speiser durch die Volumendifferenz flüssig-fest wie in kommunizierenden Röhren ($h_1 = h_2$) als Lunker ausgebildet und eingefallen: sog. *Einfalllunker*. Diese Art der Gießtechnik lässt sich nur mit *aufgesetzten* Speisern verwirklichen, da anderenfalls Einfalllunker im Gussstück auftreten würden.

Übrigens werden zzt. noch 70 % aller Nockenwellen durch Gießen hergestellt. Aber der Anteil der mit Umformverfahren hergestellten sog. „Gebauten Nockenwellen“ nimmt ständig zu (s. Abschn. 3.8).

Die Formfüllung ist grundsätzlich steigend oder fallend möglich:

- *Steigender Guss*, z. B. in Sandformen/Kokillen,
- *fallender Guss*, z. B. in Kokillen.

Bei der steigenden Formfüllung können Verunreinigungen, wie z. B. Schlacke, lose Sandreste und Gase, im Speiser aufsteigen. Die Form wird laminar ohne Gefahr von Auswaschungen und ohne Spritzer gefüllt. Keramische Filterelemente aus Glasfasern oder Korund im Eingusskanal von

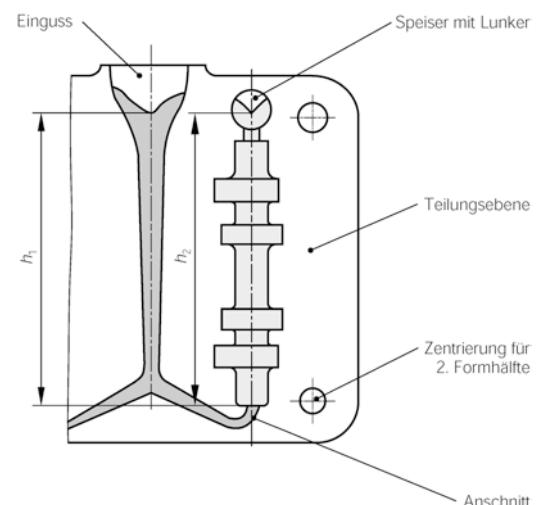


Abb. 2.7 Draufsicht in der Teilungsebene auf eine für das steigende Schwerkraftgießen vorbereitete Formmaskenhälfte

Dauerformen für Leichtmetalle können auch Oxidhäute zurückhalten. Beim fallenden Guss entstehen hingegen durch die turbulente Strömung Spritzer und Oberflächenfehler.

In Schmelzen pflanzt sich der Gießdruck nach allen Seiten gleichmäßig fort (= hydrostatisches Paradoxon). Bei horizontal geteilten Formen, wie z. B. bei den *Formkästen* der Maschinenformerei, wird dadurch die obere Formhälfte druckbeaufschlagt.

Die Abhebekraft F_A gegen den *Oberkasten* wie in Abb. 2.8 bei steigendem Guss beträgt

$$F_A = g \cdot A_p \cdot \rho_s \cdot h.$$

mit g Fallbeschleunigung, A_p in der Formteilung gegen den Oberkasten projizierte Fläche des Gussstücks, ρ_s Dichte der Schmelze und h Oberkastenhöhe. Der Druck gegen den Oberkasten wird bei Gussstücken mit Kernen durch deren Auftrieb noch zusätzlich erhöht.

Jeder in eine Schmelze eintauchende Kern erfährt nach dem *Archimedischen Prinzip* einen senkrecht nach oben gerichteten Auftrieb. Diese *Kernauftriebskraft* F_K ist gleich der Gewichtskraft des durch den Kern verdrängten Schmelzvolumens und wird über die Kernlager in der Regel ebenfalls in die obere Formhälfte eingeleitet, die Dichte des Kernmaterials spielt hierbei keine Rolle.

$$\sum F = F_A + F_K.$$

Die *Kernauftriebskraft* F_K soll nach Abb. 2.9 für eine Büchse berechnet werden. Das für den Auftrieb wirksame Kernvolumen V_K ist

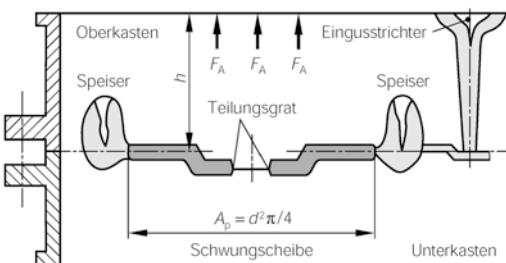


Abb. 2.8 Pkw-Schwungscheibe als kernloser Kastenguss mit Anschnittssystem zur überschlägigen Berechnung der Abhebekraft F_A

$$V_K \approx \frac{D^2 \pi}{4} \cdot L + \frac{d^2 \pi}{4} \cdot l = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 L + d^2 l),$$

d. h. die Summe beider Zylindervolumen ohne die Kernlager, die in den ausgeformten Kernmarken der Ober- und Unterformhälften die maßgenaue Lagerung des Kerns ermöglichen. Die Auftriebskraft

$$F_K = V_K \cdot g \cdot \rho_s$$

wird bei horizontal geteilten Formen über die beiden *Kernlager* in die Oberform eingeleitet.

Die Kernlager in Abb. 2.9 sind in ihrer Länge auf die *Kernfestigkeit* abgestimmt. Bei zu geringer Wanddicke oder zu kurzen Kernlagern besteht die Gefahr des Abscherens und Aufschwimmens während der Erstarrung.

In horizontal geteilten Formen ist Gießen und ungestörtes Erstarren nur möglich, wenn der Gießdruck und der Auftrieb durch

- Beschweren oder
- Verklammern

der Oberformhälfte wie in Abb. 2.10 abgefangen wird. In senkrecht geteilten Sandformen muss der seitlich wirksame Gießdruck durch

- Verkleben oder
- Verklammern

und mithilfe von zusätzlichem *Hinterfüllen*, d. h. seitliches Stützen der Formhälften mit Formstoff, Drahtkorn oder Gusskies, abgefangen werden.

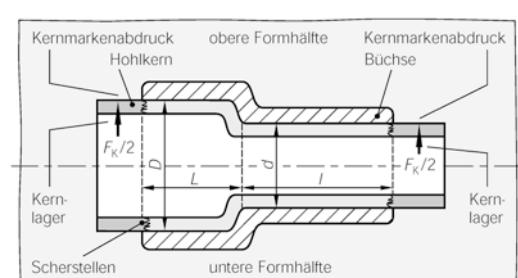


Abb. 2.9 Büchse, liegend geformt, mit Hohlkerne zur Bestimmung der Auftriebskraft F_K des Kerns

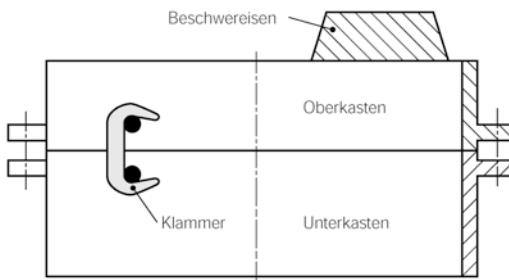


Abb. 2.10 Maschinenformkästen unterschiedlicher Tiefe, links verklammert und rechts im Schnitt beschwert

Die Zeit für das Erstarren von Gussstücken kann sehr unterschiedlich sein. So beträgt die Erstarrungszeit z. B. mehrere

- **Sekunden** bei Druckguss, Kokillenguss, Schleuderguss,
- **Minuten** bei Sandguss, Maskenguss, Maschinenformguss und
- **Stunden bzw. Tage** bei Großguss.

Bei Seriengussstücken gibt die Erstarrungszeit die Taktzeit für den nächsten Fertigungsschritt, das *Entformen* vor.

Je kürzer die Erstarrungszeiten werden, desto schneller müssen die Gussstücke entformt oder ausgepackt werden. Erstarrende und abkühlende Gussstücke *schwinden* und *schrumpfen* (Abschn. 2.4.2). Allgemein wird ein möglichst frühes Entformen bevorzugt, da dann der Schwindungs- und Schrumpfungsvorgang weniger behindert wird.

In Dauerformen werden die Gussstücke mit Hilfe von *Auswerfern* automatisch zwangsentformt, um die Kokillentemperatur in einem vorteilhaften, engen Temperaturbereich zu halten. Beim Entformen wird versucht, Teile des Anschnittsystems, wie z. B. Speiser, Stangen und Eingusstrichter, gleich mit zu entfernen.

2.1.1.6 Putzen

Nach dem Entformen folgt als nächster Fertigungsschritt im Gießereibetrieb das Putzen. Dazu gehört das Entfernen von Eingüssen, Stangen und Steigern sowie das Entgraten.

Putzarbeiten sind nur selten vollständig mechanisierbar und deshalb teuer. Nach Untersuchungen der Verbände VDI und VDG können die Putzarbeiten für mittelschweren Maschinen-guss bis zu 30 % der Herstellkosten betragen. Eine gute Gusskonstruktion muss darum unbedingt *putzgerecht* sein, d. h., der Umfang der Putzarbeit sollte möglichst gering sein. Putzarbeiten werden beeinflusst durch

- Formteilung,
- Zahl und Lage der Anschnitte,
- Kerne,
- Formstoffe.

Für die Lagerdeckel in Abb. 2.3 und 2.4 sind die Putzarbeiten gering, weil sich die vier Speiser bei *Temperguss* und *Gusseisen* durch einfaches Abschlagen entfernen lassen. Die Bruchfläche des *Anschnittquerschnitts* kann entweder am Gussstück verbleiben oder wird mit der Schleifscheibe überschliffen. Der Teilungsgrat im Bereich der Ballen liegt in einer Fläche, die ausgedreht wird. Form und Größe des Lagerdeckels erlauben maschinelles Putzen in *Schleuderstrahlputzmaschinen*. Die Gussstücke werden dabei lose auf Drehtischen oder in Trommeln liegend oder auch in Kabinen hängend durch ein Schleuderrad, wie es Abb. 2.11 zeigt, mit Gusskies

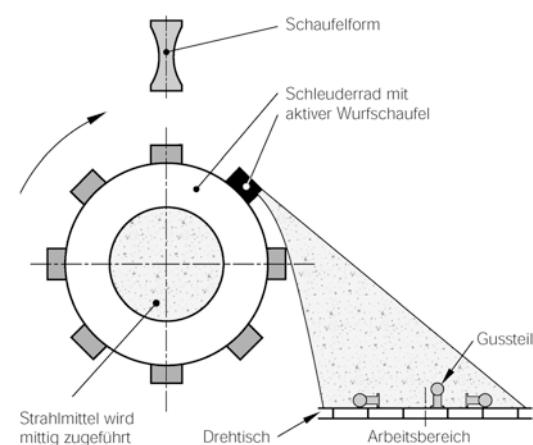


Abb. 2.11 Schleuderstrahlen zum Gussputzen und Festigkeitsstrahlen (Peenen) in Trommeln, Drehtischen und Kabinen

oder Drahtkorn unter verschiedenen Winkeln bestrahlt. Die inneren und äußeren Oberflächen werden von den Formstoffresten und den dünnen messerscharfen Teilungsgraten befreit und sind danach metallisch blank. *Peenen* ist ein Festigkeitsstrahlen, bei dem durch Verfestigung der Oberfläche die Dauerfestigkeit um 30 bis 50 % erhöht wird.

Die Schwungscheibe in Abb. 2.8 erfordert größere Putzarbeit. Der Gusswerkstoff Gusseisen mit Kugelgraphit ist *duktil*, d. h. zäh und fest. Die Speiser (vier oder zwei Stück) lassen sich nicht durch Abschlagen vom Gussstück trennen. Sie müssen durch Abbrechen, Abdrücken, Sägen oder Brennen entfernt werden. Der Anschnittquerschnitt muss mit unterbrochenem Schnitt vorgedreht werden. Der Teilungsgrat zwischen den Ballen liegt in der später zu bearbeitenden Fläche für die Reibkupplung und kann bleiben. Die Öffnung der Scheibe ermöglicht ein Einhängen in eine *Hängebahnpuztmaschine*.

Das *Nassputzverfahren* gewinnt bei mittleren bis großen Teilen an Bedeutung. Die Formstoffreste am Gussstück werden dabei in einer Kabine durch einen Druckwasserstrahl staubfrei entfernt. Nach dem Putzen ist das Gussstück fertig für die *Endkontrolle*.

2.1.1.7 Wärmebehandlung

Zum normalen Fertigungsablauf gehört bei einigen Gusswerkstoffen noch eine *Wärmebehandlung*. Dadurch lassen sich Eigenschaften, wie z. B. Festigkeit, Härte und Dehnung, im Gussstück beeinflussen. Die Art der Wärmebehandlung ist vom Gusswerkstoff abhängig.

Gusseisen mit Lamellengraphit, der mengenmäßig bedeutendste Eisengusswerkstoff, wird nur in Ausnahmefällen geglüht. Zum Beispiel werden

- Temperguss und Gusseisen mit Kugelgraphit grafitierend geglüht,
- Stahlguss normalgeglüht und (oder) vergütet, aber auch einsatzgehärtet,
- NE-Gusswerkstoffe homogenisiert und (oder) ausgehärtet.

2.1.1.8 Qualitätsmanagement

Die Endkontrolle ist der letzte Teil einer Reihe von Maßnahmen, die den Fertigungsablauf und die Qualität der Gussstücke garantieren. In der Fertigung sicherheitsrelevanter Serienteile aus dem Fahrzeugbau muss durch eine *Einzelprüfung* das Ausfallrisiko vermieden werden. Solche Teile sind z. B.

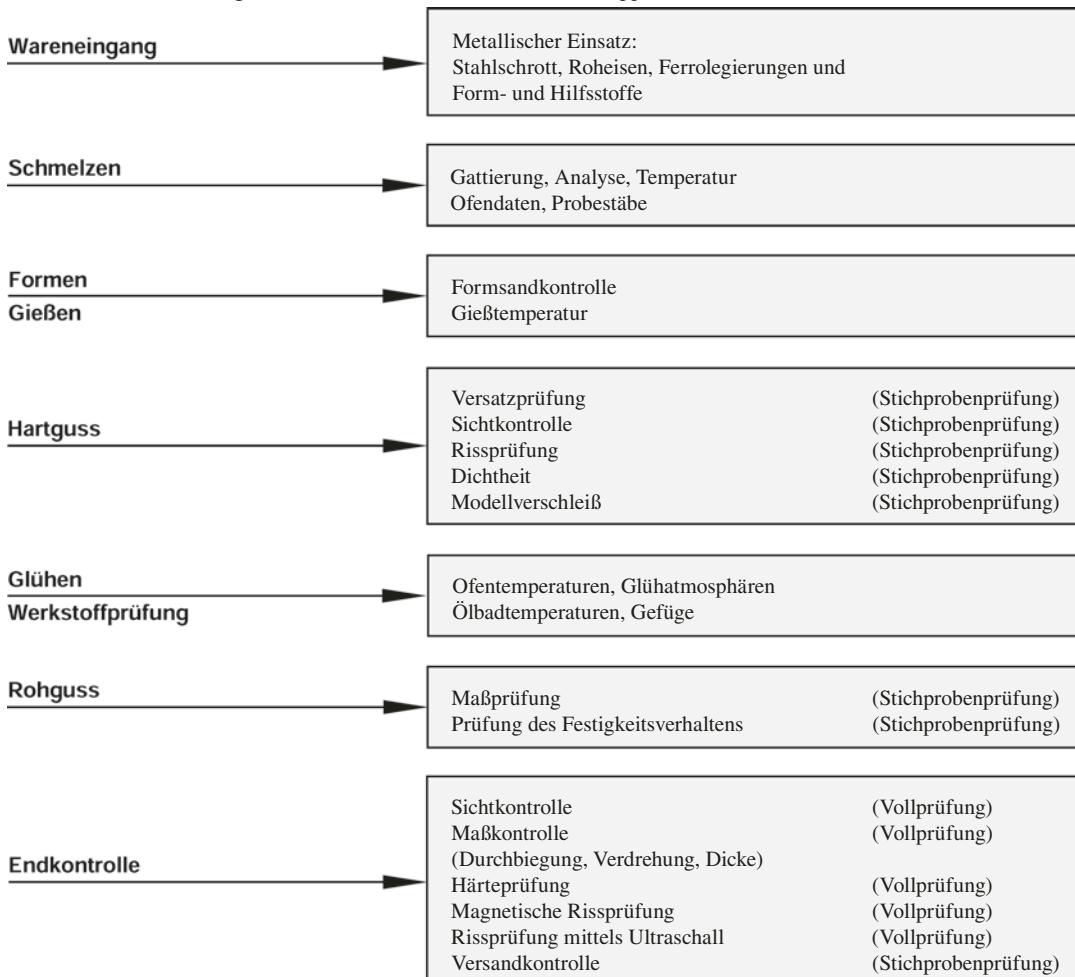
- Pkw-Pleuel,
- Kurbel- und Nockenwellen,
- Radnaben und Felgen,
- Gelenkwellenflansche.

Die dazu notwendigen Maßnahmen und Prüfgrößen sind produktbezogen und werden mit dem Oberbegriff *Qualitätsmanagement* bezeichnet.

In Tab. 2.3 ist ein *Kontrollschema* für Pkw-Pleuel dargestellt. Die Rohstoffe werden im *Wareneingang* bereits erstmals geprüft. Die Daten der Schmelz-, Form- und Gießanlagen werden kontinuierlich erfasst und zur sicheren und gleichmäßigen Prozessführung eingesetzt. Im Hartguss- und (oder) Rohgussbereich lassen sich durch *Stichprobenprüfungen* zulässige Abweichungen in einem so frühen Stadium erkennen, dass Gegenmaßnahmen rechtzeitig möglich sind. Der Modellverschleiß lässt sich z. B. durch regelmäßige Messungen an Rohgussstücken nach einem *Stichprobenplan* exakt feststellen.

Bei Sicherheitsteilen, wie z. B. Felgen und Gelenkwellen, kann auf Vollprüfungen in der Endkontrolle nicht verzichtet werden. Die produktbezogenen Prüfgrößen werden dabei unterschiedlich sein, z. B.

- Sichtkontrollen an äußeren und inneren Oberflächen,
- Maßkontrollen mit Messmaschinen,
- zerstörungsfreie und automatische Härteprüfungen oberflächennaher Zonen,
- zerstörungsfreie Prüfung auf Lunker, Poren und Risse durch Röntgenanalyse und Computer-Tomografie,
- teil- und vollautomatische Rissprüfungen.

Tab. 2.3 Qualitätsmanagement für Pkw-Pleuel (Nach Gut und Trapp)

Für einen wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Betrieb ist ein geschlossener Formstoff- und Werkstoffkreislauf von großem Vorteil. Eine Risikoanalyse solcher Fertigungen durch die Fehler-Möglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ist Stand der Technik für Serienteile des Fahrzeugbaus und verursacht steigende Qualitätskosten.

2.1.1.9 Konstruieren mit Gusswerkstoffen

Beim Entwurf eines Gussstücks nach den gießtechnischen Gestaltungsrichtlinien (Abschn. 2.8) sollte sich der Konstrukteur zunächst *nicht* auf ein bestimmtes Gießverfahren festlegen. Die Kombinationsmöglichkeiten mit Gusswerkstoffen

auf der Basis Eisen- und Nichteisenmetalle sind groß.

Die Optimierung des Gussstücks nach den technischen Erfordernissen und den wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgt zweckmäßig erst in Zusammenarbeit mit der Gießerei. Dabei kann sicherer die Entscheidung für verlorene Formen oder für ein Dauerformverfahren getroffen werden. Dabei müssen schon Überlegungen zum Recycling einbezogen werden. Für Seriengussstücke sollten z. B. nur genormte Standardlegierungen ausgewählt werden. In der Einzelfertigung oder der Kleinserie können auch legierte Sonderwerkstoffe zweckmäßig sein.



Abb. 2.12 Bremssattel aus GJS-600-3 (Georg Fischer Automotive AG)

2.1.1.10 Mechanische Bearbeitung und Beschichtung

Gießereien liefern heute nicht nur Rohteile zur weiteren Bearbeitung an ihre Kunden, sondern sind häufig selbst Lieferant für mechanisch bearbeitete Fertigteile oder Baugruppen aus Gussteilen.

Dementsprechend findet sich in vielen Gießereien heute eine angegliederte spanende Fertigung, in denen Funktionsflächen, Bohrungen und Gewinde an Gussteilen hergestellt werden. Abb. 2.12 zeigt beispielsweise einen Bremssattel aus GJS-600-3, der spanend bearbeitet und kathodisch tauchlackiert an den Kunden aus der Automobilindustrie ausgeliefert wird.

2.2 Metallkundliche Grundlagen des Gießens

Urformen durch Gießen metallischer Gusswerkstoffe bedeutet Einflussnehmen auf die Zustandsänderung flüssig → fest, die in einer Gussform in Abhängigkeit von der Zeit abläuft. Die dabei auftretenden metallphysikalischen Probleme sind sehr komplex. Auch entzieht sich das Geschehen nach dem Abguss, z. B. das Kristallwachstum oder das *Formstoffverhalten*, einer direkten Beobachtung, sodass bisher nur Modellvorstellungen zur Erklärung der beobachteten Phänomene bekannt sind.

In diesem Abschnitt werden nur die wichtigsten metallkundlichen Begriffe des Gießens

erläutert. Der Einfluss der Gusswerkstoffe auf die gießtechnischen Fertigungsverfahren soll so deutlich gemacht werden.

2.2.1 Entstehung der Gussgefüge

Bei der Entstehung des Gussgefüges werden die Werkstück- und Werkstoffeigenschaften des Gussstücks festgelegt. Nur wenige Eigenschaften können nachträglich mit erheblichen Kosten geändert werden.

Deshalb sollte der Konstrukteur von Guss-teilen durch die Formgebung gestaltenden Einfluss nehmen und in Zusammenarbeit mit dem Hersteller die sog. gelenkte Erstarrung von Gussstücken (Abschn. 2.2.4) anstreben.

2.2.2 Stoffzustände

Zum Gießen müssen Legierungen oder Reinmetalle zunächst vom festen in den flüssigen Aggregatzustand gebracht werden. Die Gusswerkstoffe können aufgebaut sein aus

- *Mischkristalle*: Eisen, Messing, Bronze,
- *intermediären Verbindungen*: Fe_3C , Al_3Mg_2 ,
- *nichtmetallischen Phasen*: Grafit, Schwefel.

Sie müssen aus dem festen Zustand durch Zufuhr von Energie in die gießfähige Schmelze überführt werden. Untersuchungen zeigten, dass derartige Schmelzen *amorphe Flüssigkeiten* ohne kristalline Anteile sind. Beim Abkühlen einer Schmelze in der Form läuft folgende Zustandsänderung ab:



Die Zustandsänderung wird als Erstarrung oder *Kristallisation* bezeichnet. Dabei muss die Form nicht nur die *Geometrie* des Gussstücks abbilden, sondern auch den größeren Teil der bei der Erstarrung frei werdenden *Kristallisationswärme* aufnehmen und weiterleiten.

Beim Phasenübergang flüssig-fest ändern sich viele Eigenschaften sprunghaft. Insbesondere kann die Dichteänderung zu schwer beherrschbaren Fehlern wie Lunkern, Warmrissen und Poren führen. Die mit der Erstarrung verbundene Entmischung kann Seigerungen und Gasblasen zur Folge haben.

Im *Abkühlschaubild*, das die Abhängigkeit der Temperatur von der Zeit wiedergibt, unterscheidet man nicht-eutektische Legierungen und eutektische Legierungen (letztere erstarren wie reine Metalle). In Abb. 2.13 ist die Abkühlung einer Aluminiumschmelze dargestellt. Eine typische Gießtemperatur ist z. B. $\vartheta_G = 730^\circ\text{C}$. Zum Zeitpunkt t_1 beginnt die Kristallisation bei dem Schmelzpunkt $\vartheta_L = 660^\circ\text{C}$, die nach der Zeit t_2 beendet ist. Die Aluminiumschmelze ist jetzt vollständig erstarrt, soll aber weiter bis auf die Raumtemperatur ϑ_R abkühlen. Dies kann in der Form oder schneller nach dem *Auspacken* bei der Temperatur ϑ_A erfolgen.

Das *Entformen* oberhalb der Raumtemperatur bietet eine Reihe von Vorteilen; z. B. können metallische Formen, sog. Dauerformen, sofort wieder mit Schmelze gefüllt werden. Außerdem werden dadurch die rissbegünstigenden *Schrumpfspannungen* klein gehalten. Das Gussstück kühlt dann auf dem Weg zur Putzmaschine von der Auspacktemperatur ϑ_A bis auf Raumtemperatur ϑ_R ab.

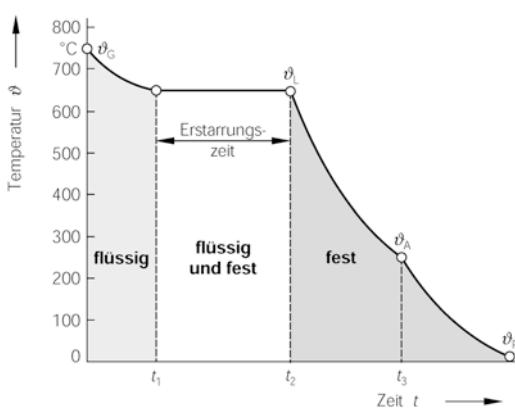


Abb. 2.13 Abkühlschaubild für Aluminium von Gießtemperatur ϑ_G bis auf Raumtemperatur ϑ_R

Abb. 2.14 zeigt das Abkühlverhalten der Eisen-Kohlenstoff-Legierung *Gusseisen* GJL. Unter-eutektisches Gusseisen wird mit einer typischen Gießtemperatur ϑ_G von etwa 1400°C vergossen. Die Kristallisation beginnt zum Zeitpunkt t_1 bei etwa 1270°C und ist bei der tieferen eutektischen Temperatur ϑ_E von 1200°C zurzeit t_3 beendet. Die Temperaturdifferenz zwischen der Liquidustemperatur ϑ_L und der eutektischen Temperatur ϑ_E wird *Erstarrungsintervall* $\Delta\vartheta$ genannt. In Abb. 2.14 beträgt das Erstarrungsintervall

$$\Delta\vartheta = \vartheta_L - \vartheta_E = 1270^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C} = 70^\circ\text{C}.$$

Der Gusswerkstoff befindet sich während des Erstarrungsintervalls in dem für das Gießen bedeutsamen *teigigen* Zustand. Während der Erstarrungszeit t_2 bis t_3 kristallisiert die restliche Schmelze bei der eutektischen Temperatur ϑ_E . Man nennt diesen Vorgang die *eutektische Reaktion*.

2.2.3 Keimbildung und Impfen

In Gussstücken werden verschiedenartige Gussgefüge beobachtet, die durch *Wachstumsprozesse* von *Erstarrungszentren* aus entstehen, die auch *Keime* genannt werden. Im Folgenden

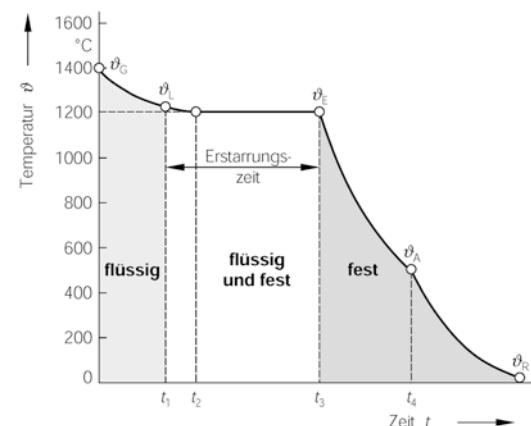


Abb. 2.14 Abkühlschaubild einer Gusseisen-Schmelze mit dem Erstarrungsintervall $\Delta\vartheta = \vartheta_L - \vartheta_E$

sollen zwei Möglichkeiten betrachtet werden, wie Keime in Schmelzen zu erzeugen oder in diese einzubringen sind.

2.2.3.1 Homogene Keimbildung

Die Keimbildung bezeichnet man als homogen, wenn die Schmelze selbst eigene Keime, sog. *arteigene Keime*, in der flüssigen Phase bilden kann. In Abb. 2.15 ist der Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf die Unterkühlung $\Delta\vartheta_U$ metallischer Schmelzen dargestellt. Kurve ① zeigt das schon bekannte Abkühlverhalten einer Schmelze. Die Erstarrung beginnt und endet bei der konstanten Schmelztemperatur ϑ_S , wenn die Abkühlgeschwindigkeit sehr klein ist. Bei zunächst hoher Abkühlgeschwindigkeit nach Kurve ② beginnt die Kristallisation an *arteigenen Keimen* erst bei der Temperatur ϑ_O unterhalb von ϑ_S . Die Erstarrungszentren werden in der Schmelze in umso größerer Anzahl gebildet, je stärker sie unterkühlt ist. Die Unterkühlung $\Delta\vartheta_U$ einer Schmelze ist die Temperaturdifferenz

$$\Delta\vartheta_U = \vartheta_S - \vartheta_O.$$

Durch die fortschreitende Erstarrung und die dadurch freiwerdende Kristallisationswärme steigt die Temperatur der Schmelze erneut bis ϑ'_S an, erreicht den Schmelzpunkt ϑ_S aber nicht. Dadurch ist eine große Anzahl von Keimen in unterkühlten Schmelzen *stabil*, d. h., sie werden nicht mehr aufgeschmolzen.

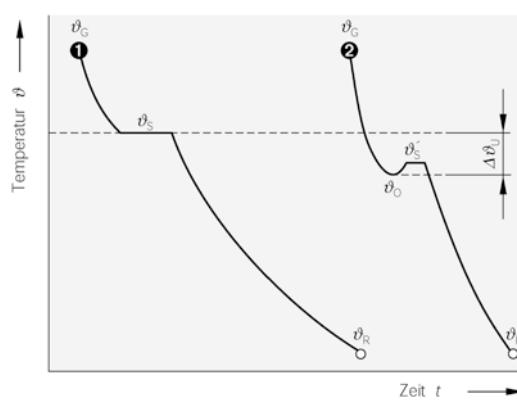


Abb. 2.15 Zum Begriff der Unterkühlung ($\Delta\vartheta_U$) von Schmelzen. Abkühlungsbilder: ①: Schmelze sehr langsam abgekühlt, ②: Schmelze schnell abgekühlt

Die Abkühlung einer Schmelze in einer dickwandigen, getrockneten Sandform kommt der Kurve ① nahe. Die Abkühlung der Schmelze in einer dünnwandigen, gekühlten, metallischen Dauerform, *Kokille* genannt, entspricht der Kurve ②, Abb. 2.15.

Messungen der Unterkühlung von Schmelzen haben gezeigt, dass die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_U$ größer wird, wenn die Schmelze vorher stärker erwärmt oder länger bei höheren Temperaturen aufbewahrt – der Gießer sagt: *überhitzt* oder *gehalten* – wurde. Eine überhitzte, d. h., eine in der Regel keimarme Schmelze ist also ein geeigneter Ausgangszustand zur Bildung art-eigener Keime.

Mit der Wahl des Form- und Gießverfahrens wird in der Gießereipraxis die Abkühlungsgeschwindigkeit festgelegt und damit die erzielbare Unterkühlung der Schmelze bestimmt. Das Gussstück bekommt dadurch ein typisches Gefüge. Der Vorgang wird *Primärkristallisation*, das Gefüge *Primärgefüge* genannt. Er wird von der Keimzahl und der Kristallisationsgeschwindigkeit bestimmt, die von der Abkühlgeschwindigkeit des Gussstücks abhängt.

In Abb. 2.16 sind die Gefüge für zwei unterschiedliche Abkühlbedingungen schematisch dargestellt. Geringe Keimzahlen und kleine Kristallisationsgeschwindigkeiten führen zu einem groben Gussgefüge, einem *Grobkorngefüge*.

Dagegen werden durch große Keimzahlen bei großen Kristallisationsgeschwindigkeiten feine Primärgefüge, das günstige *Feinkorngefüge*, erzeugt.

Die Abkühlung von dickwandigem Guss in gebrannten, vorgeheizten Formstoffen entspricht

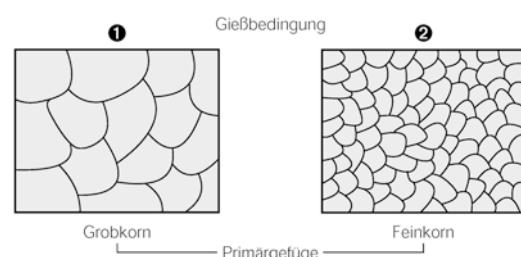


Abb. 2.16 Unterschiedliche Primärkristallisation durch Formen mit geringer ① und hoher Unterkühlung ②

der Bedingung ①. *Kokillenguss* und das Gießen in wasserhaltige Formstoffe, *Nassguss* genannt, sind Beispiele für die Abkühlbedingung ②. Zwischen diesen Extremwerten sind viele Zwischenstufen möglich. Sie entstehen durch die unterschiedlichen Wanddicken, Versteifungen und Durchdringungen der Gusskonstruktionen, Abb. 2.17.

Eine einfache Konstruktionsregel lautet

Nach Möglichkeit sollten Gussstücke etwa gleiche Wanddicken haben. Stark abweichende Abkühlbedingungen erzeugen beim Gießen Primärgefüge mit sehr unterschiedlicher Korngröße.

2.2.3.2 Impfen der Schmelze

Das Primärgefüge von Gussstücken lässt sich auch durch *Impfen* beeinflussen. Darunter versteht man das Verteilen von *Impfmitteln* in Schmelzen. Das sind *artfremde, heterogene Keime*, da die Impfmittel nicht der Zusammensetzung des Gusswerkstoffs entsprechen. Man nennt sie deshalb auch *Fremdgefäße*. Durch Impfen kann die Keimzahl N_{KZ} der Schmelze gesteuert werden, ohne die chemische Zusammensetzung merklich zu ändern.

Die Mehrzahl der empirisch – durch sinnvolles Probieren – gefundenen Impfmittel besteht aus Legierungen mit Grafit. Sie haben meist einen höheren Schmelzpunkt als der Gusswerkstoff selbst. Bekannte Impfmittel, die

feinkörnig oder stückig den Schmelzen kurz vor dem Vergießen zugesetzt werden, sind z. B.

- Ferrolegierungen wie: FeSi, FeMn, FeCr, FeP,
- Kohlenstoff als Grafit, Ruß, Pech,
- Verbindungen wie etwa
 - *Oxide*: Al_2O_3 , ZrO_2 , Fe_2O_3 ,
 - *Nitride*: Bor- und Eisennitrid,
 - *Carbide*: Bor- und Chromcarbid,
 - *Legierungen*: Ca–Si, Al–Si.

Die verhältnismäßig teuren Impfmittel werden häufig eingesetzt.

Die Impfwirkung wird in den Gießereien mithilfe thermischer Analysen und Gefügeuntersuchungen überprüft, um die optimalen Bedingungen zu ermitteln je nach

- Art und Menge der Zugabe, der
- Verteilung in der Form/Schmelze und dem
- Zeiteffekt (Abklingverhalten).

Einige wenige, aber besonders wichtige Impfmittel haben Schmelzpunkte, die erheblich niedriger liegen, als die der damit behandelten Gusswerkstoffe. Ihre Impfwirkung muss deshalb anders geartet sein, da sie im Gusswerkstoff aufschmelzen, Verbindungen bilden oder sogar verdampfen.

Solche Impfmittel sind die Metalle:

Natrium	$\vartheta_S = 98^\circ\text{C}$,
Magnesium	$\vartheta_S = 650^\circ\text{C}$,
Aluminium	$\vartheta_S = 660^\circ\text{C}$,
Cer	$\vartheta_S = 797^\circ\text{C}$

Mit Natrium werden viele Aluminium-Silicium-Legierungen geimpft, man sagt *veredelt*. Dabei wird die kurzzeitige Impfwirkung nicht durch Natriumfremdekeime herbeigeführt, sondern durch die jetzt größere Unterkühlung der Schmelze. Eine **Langzeitveredlung** mit Strontium erfolgt zweckmäßiger im Schmelz-, Gieß- oder Warmhalteofen.

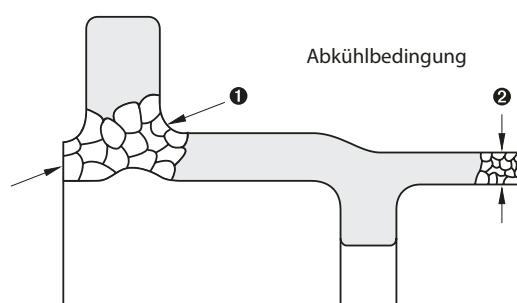


Abb. 2.17 Einfluss einer geringeren ① und einer höheren Abkühlgeschwindigkeit ② auf die Korngröße im Gussstück

Mit Magnesium oder Cer kann die Kristallisation von Grafit in hochkohlenstoffhaltigen Eisen-Gusswerkstoffen (2,4 bis 4,3 % C) beeinflusst werden. Die Erstarrung von Gusseisen ist zwingend auf kieselsäurehaltige Keime angewiesen. Aus den genannten Gründen ist die Beeinflussung der Erstarrung zum Vermeiden von Gussfehlern eine ständige Aufgabe der Praxis.

Zusammenfassend betrachtet sind also zwei Verfahren zur Einstellung der Primärgefüge in Gusswerkstoffen üblich:

- Impfen mit verschiedenen Impfmitteln,
- Überhitzen von Schmelzen (homogene Keimbildung wird erleichtert).

In der Gießereipraxis werden meist beide Verfahren angewendet, denn auch wenn keine Impfmittel direkt zugegeben werden, wirkt bereits der Formstoff oder die Wand als Fremdkeim auf die Schmelze.

2.2.4 Kristallformen

Zunächst sei der fortschreitende Erstarrungsablauf einer Schmelze näher betrachtet. Die Frage, wie aus

Keimen →^{durch Wachstum} Gussgefüge

entstehen, ist für das Gießen von besonderem Interesse. Hierbei besteht die Möglichkeit zum Beeinflussen der Erstarrung, die sog. *gerichtete Erstarrung*. Die *Kristallformen*, die zu einem Gussgefüge zusammenwachsen, hängen von mehreren Einflussgrößen ab. Dabei ist die Abkühlgeschwindigkeit von größter Bedeutung. Sie wird deshalb auch vom *Konstrukteur* und nicht nur vom Gießer durch Wahl des Form- und Gießverfahrens festgelegt.

In Abb. 2.18 ist schematisch eine geteilte Form mit der Schmelze in drei Phasen der Erstarrung dargestellt. Die geteilte, dünne Gussform wird Formmaske genannt, weil sie sich ähnlich einer Maske der Kontur des Gussstücks anschmiegt. Der Wärmefluss während der Erstarrung in der

Maske ist zum Zeitpunkt t_1 durch Pfeile in radialer Richtung angedeutet. Durch die fast gleiche Dicke der Form fließt die Wärme nach allen Seiten gleichmäßig ab. Es tritt kein Wärmestau auf. Die Körner oder Kristallite zu der Zeit t_2 wachsen gleichmäßig zu einem Gussgefüge bei t_3 zusammen. Die Erstarrungsdauer wird außer vom Gusswerkstoff und von der Gießtemperatur auch durch das Temperaturgefälle zwischen Kern- und Randzone der Form bestimmt.

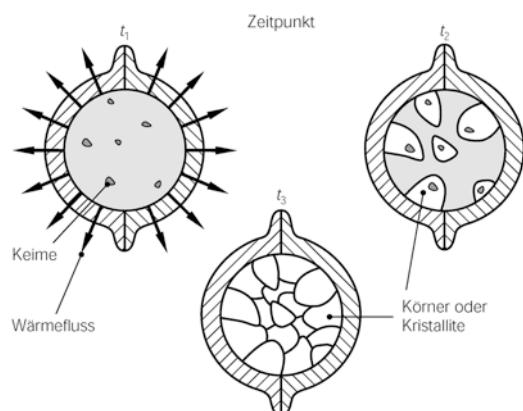


Abb. 2.18 Formmasken mit radial gleicher Abkühlgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t_1 der Keimbildung, t_2 des Kristallwachstums und t_3 des gerade erstarrten Primärgefüges

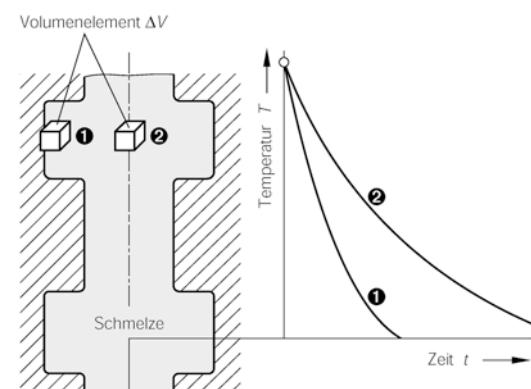


Abb. 2.19 Temperaturgefälle in einer gefüllten Form: Das Volumenelement der Schmelze ΔV kann abhängig von seiner Lage nach Kurve ② langsam oder nach Kurve ① schneller erstarren

Dazu ist in Abb. 2.19 der Einfluss der Wärmeableitung durch den *Formstoff* skizziert. Das Volumenelement ΔV der Schmelze kann nach Kurve ② bei flachem oder nach Kurve ① bei steilem Temperaturgefälle erstarrnen.

Die Kristallbasis der Haupt-Atomsorte der Gussgefüge wird Matrix genannt. Für die technischen Gusswerkstoffe sind praktisch nur zwei Kristallsysteme von Bedeutung, das *kubische* und das *hexagonale* Kristallsystem:

- krz (kubisch-raumzentriert),
- kfz (kubisch-flächenzentriert) und
- hdp (hexagonal dichteste Packung).

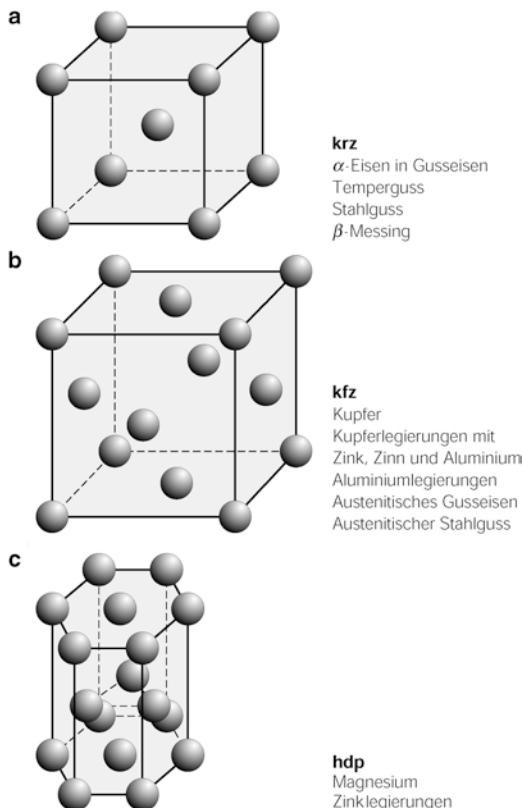


Abb. 2.20 Gusswerkstoffe mit **a** kubisch-raumzentrierter Matrix **b** kubisch-flächenzentrierter Matrix und **c** mit hexagonal dichtester Packung

In der Abb. 2.20 sind die Elementarzellen dargestellt und einigen häufig verwendeten Gusswerkstoffen zugeordnet.

Diese wenigen Beispiele zeigen, dass die wichtigsten Eisengusswerkstoffe und Kupfer-Zink-Legierungen im Wesentlichen die gleiche Kristallbasis haben. Aus Werkstoffen mit gleicher Matrix kann man aber unterschiedliche Gussgefüge (Primärgefüge) entwickeln. Die für die Qualität des Gussteils entscheidende Art der Erstarrung wird nicht so sehr vom Kristallaufbau, sondern von der Form- und Gießtechnik bestimmt.

2.2.4.1 Globulare Kristallformen

Treibende Kraft des Kristallwachstums ist die Abkühlgeschwindigkeit der Schmelze in der Form. Sie führt in Abhängigkeit vom Legierungsaufbau, der *Konstitution*, zu einer unterschiedlichen Unterkühlung und damit zu verschiedenen *Kristallformen*. Bei Gefügeuntersuchungen an Gusswerkstoffen können drei Kristallformen sicher unterschieden werden. *Globulare* Kristallformen entstehen durch annähernd gleiche Erstarrungsgeschwindigkeiten in den drei Achsrichtungen x , y und z des Kristallsystems. Sie werden auch als *Globulite* oder *Sphärolithe* bezeichnet. In Abb. 2.21 besteht das Gussgefüge nur aus einer Kristallart. Im mittleren Korn ist der Keim angedeutet, der jedoch nicht beobachtet werden kann. Die globularen Kristallformen führen in Gussgefügen zu besonders guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften.

Abb. 2.22 zeigt zwei globulare Kristallformen, die sich nebeneinander gebildet haben. In einer globulitischen Matrix sind rundliche Sphärolithe eingelagert.

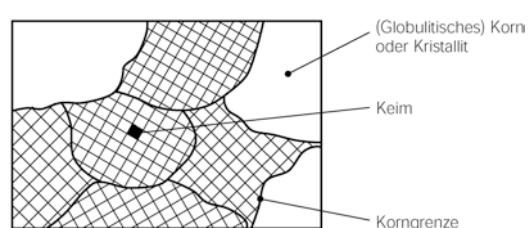


Abb. 2.21 Globulares Gefüge mit Keim, Kristalliten und Korngrenzen, schematisch

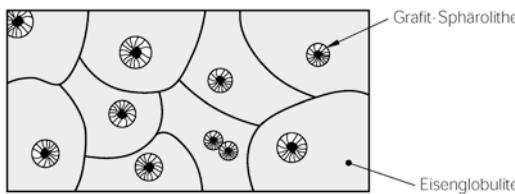


Abb. 2.22 Globulitische Eisenkristalle mit eingelagerten Grafit-Sphärolithen, schematisch

Globulare Kristallformen verhalten sich beim Gießen sehr vorteilhaft, da sie die Restschmelze beim Kristallwachstum vor sich her schieben und nicht einschließen. Gussstücke mit globulitischem Gefüge entstehen meist durch große Abkühlgeschwindigkeiten der Schmelze.

2.2.4.2 Säulenförmige Kristalle

Säulenförmige oder auch *prismatische* Kristallformen entstehen, wenn die Kristalle z. B. in einer Richtung bevorzugt wachsen, in den beiden anderen Richtungen dagegen weniger schnell.

Abb. 2.23 zeigt den Schnitt eines gegossenen Stabes in einer Maskenform. Man erkennt die vom Formstoff ausgehende *nadel- oder stängelartige Kristallform*, die streng entgegen dem Wärmefluss gerichtet ist. Dabei werden meist Verunreinigungen in der Restschmelze angereichert, sodass diese mit hoher Keimzahl globular erstarrt.

Nadelstrukturen werden an Gussstücken bei mittleren Abkühlgeschwindigkeiten beobachtet und haben bei einer Beanspruchung quer zu den

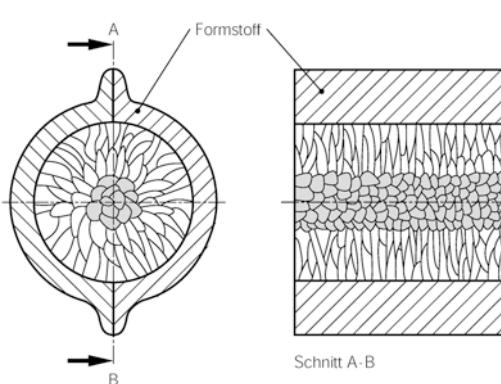


Abb. 2.23 Randzone mit Säulenkristallen und globulitisch erstarrender Restschmelze in der Mitte

Nadeln wegen der konzentrierten Anhäufung der Verunreinigungen an den Nadelkorngrenzen geringere Festigkeits- und Verformungseigenschaften.

2.2.4.3 Dendritische Kristallformen

Dendritisches Erstarrungsgefüge ähnelt der Form einer Tanne. Die Kristallformen nennt man daher auch *Tannenbaumkristalle*. Sie entstehen als Folge einer großen Erstarrungsgeschwindigkeit in einer bevorzugten Richtung. Abb. 2.24 zeigt ein Rohgussgefüge mit dendritischen Eisencarbiden, wie es für dünnwandige Gussstücke mit großem Erstarrungsintervall und hoher Unterkühlung der Schmelze charakteristisch ist. Auch bei der dendritischen Erstarrung können sich die Dendriten nach dem Wärmefluss ausrichten. Da die Schmelze in den feinen Seitenästen und Gängen abgeschnürt wird, erstarrt sie nicht dicht genug, wodurch häufig Mikrolunker entstehen. Dendritische Strukturen weisen meist schlechte Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften auf.

2.2.5 Erstarrungstypen

Die beschriebenen Kristallformen können teilweise gleichzeitig auftreten und auch unterschiedlich im Werkstückquerschnitt verteilt sein. Abb. 2.25 zeigt den Einfluss der Kristallform an einem bei Gussstücken häufig vorkommenden

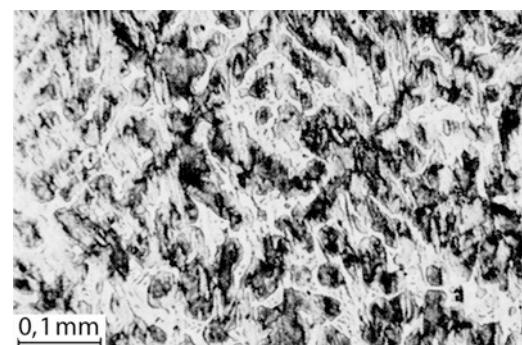


Abb. 2.24 Primärgefüge von Temperrohguss GTS, bestehend aus Dendriten (dunkel) und globularen, zum Teil fein verästelten Kristallen, entstanden aus der Restschmelze (hell)

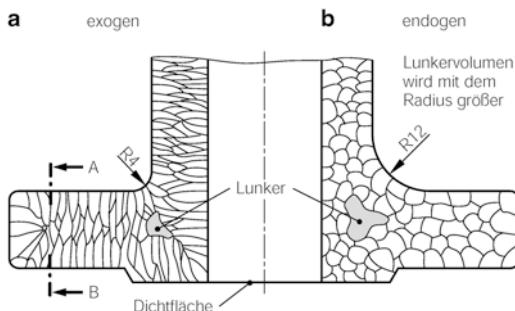


Abb. 2.25 Gießtechnisch nachteilige Flanschkonstruktion mit a exogener (Schnitt A–B, siehe Abb. 2.28) sowie mit b endogener Erstarrung bei vergrößertem Radius

Detail. Dazu sind *Stängelkristalle*, links, und *Globulite*, rechts, in gegossene Flanschstücke eingezeichnet. Flansche können konstruktiv an der späteren Dichtfläche nicht mit Radien versehen werden. Ein zu großer Radius R (rechts) ergibt eine unerwünschte *Werkstoffanhäufung*. Die Stängelkristalle (links) wachsen entgegen dem Wärmefluss in Richtung der geometrischen Mitte des Gussstücks. Diese Art der Erstarrung wird als *exogener Typ* bezeichnet und tritt besonders bei säulenförmigen und dendritischen Kristallen auf.

Der *endogene*, also ungerichtete *Erstarrungstyp* tritt bei globularen Kristallen auf. Obwohl der Wärmefluss, bedingt durch gleiche Geometrie und Formstoffe, fast identisch ist, erfolgt die Erstarrung meist *breiartig*.

Die *Erstarrungsfronten*, die sich beim Hineinwachsen der Kristalle in die Schmelze ausbilden, sind in Abb. 2.26 dargestellt. Das Nachfließen der Schmelze wird durch glattwandige oder ebene Erstarrungsfronten im Gussstück erleichtert.

Bei der exogenen Erstarrung am Flansch (Abb. 2.25a) ist durch die *raue*, nicht ebene Erstarrungsfront das Nachfließen der Restschmelze in der Wandmitte behindert. Dies führt an Materialanhäufungen zur *Lunkerbildung*, weil sie langsamer erkalten als die anschließenden Wandbereiche.

Die Lunkerbildung tritt auch bei endogener Erstarrung auf, wenn durch große Radien der Werkstoffquerschnitt so vergrößert wird, dass

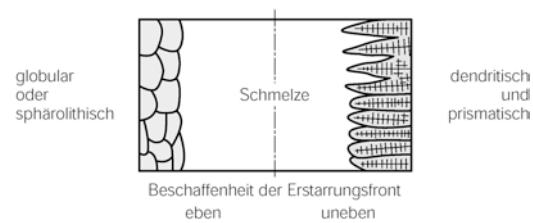


Abb. 2.26 Ebene oder unebene Erstarrungsfronten beeinflussen das Nachfließen der Restschmelze

die Schmelze dort zuletzt erstarrt. Zu beachten ist die besonders nachteilige Lage der Lunkerstellen. Durch Beanspruchung des Flansches im geschwächten Werkstoff können leicht zusätzlich *Kaltrisse* entstehen.

In Gussstücken mit dickeren Wänden werden noch kompliziertere Erstarrungsformen beobachtet. Man nennt sie *Mischtypen*.

Ein *exogen-endogener* Mischtyp, wie er häufig bei *Kokillenguss* entsteht, ist in Abb. 2.27 skizziert. Die unmittelbar an der Kokillenwand stark unterkühlte Zone erstarrt feinkörnig endogen. Die Übergangszone ist säulenförmig ausgebildet und schiebt durch die unebene Erstarrungsfront Fremdkeime in die Mitte. Der Keimreichtum in der zuletzt erstarrenden wenig unterkühlten Mittelzone bewirkt dort die breiartige, endogene Kristallisation. Mischtypen werden auch bei Gusswerkstoffen beobachtet, die in wasserhaltigen Formstoffen erstarren (*Nassguss*).

Eine Messmöglichkeit, mit der die Festigkeitseigenschaften indirekt über die Härte er-

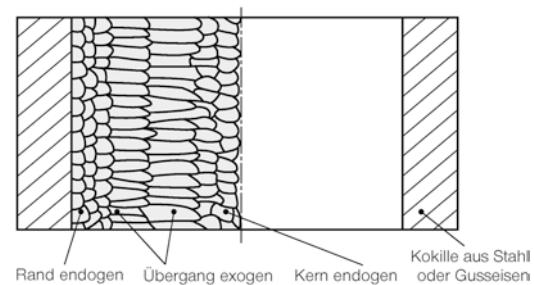


Abb. 2.27 Exogen-endogene Kristallisation bei Kokillenguss

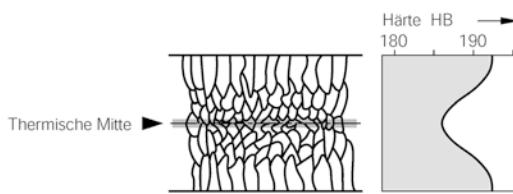


Abb. 2.28 Nachweis von Mikrolunkern durch Härtemessungen

mittelt werden können, ist in Abb. 2.28 angegeben. Die ungünstige Art des Zusammenwachsens gerichteter Kristalle in der *thermischen Mitte* (gleichzeitig auch Werkstückmitte) ist durch Härtmessungen über dem Werkstoffquerschnitt (Schnitt A–B in Abb. 2.25) einfach nachweisbar. Die Härte und damit auch andere Festigkeitseigenschaften fallen zur Mitte hin ab und zeigen dadurch die dort herrschende geringere *Werkstoffdichte* an. Ursache sind die beim Zusammenwachsen rauer Erstarrungsfronten auftretenden kleinen Hohlräume, die *Mikrolunker* genannt werden. Sie erschweren die Herstellung *druckdichter Gussstücke*. Deshalb versucht man, die Erstarrung von Schmelzen so zu beeinflussen, dass ein feinkörniges, ungerichtetes Gussgefüge entsteht. Dieses weist bessere Festigkeits- und Zähigkeitswerte auf.

2.2.6 Isotropes, anisotropes und quasi-isotropes Verhalten von Gusswerkstoffen

Gussstücke sollen den vom Konstrukteur oder Anwender vorgegebenen Anforderungen genügen. Dabei sollen die Werkstoffeigenschaften im Gussstück in der Regel unabhängig von der Beanspruchungsrichtung und der Geometrie des Gussstücks sein. Solche Werkstoffe besitzen isotrope, d. h. unabhängig von der Richtung gleiche Stoffeigenschaften.

Die bisherigen Erläuterungen zeigten, dass Gussstücke von Natur aus *anisotrop* sind, also richtungssabhängige Stoffeigenschaften haben. Markante Beispiele sind die Zonen, in denen Kristalle zusammenwachsen. Auch die Gussoberfläche ist als Randzone des Werkstücks mit abweichenden Eigenschaften ein solcher Bereich.

Mittels einer Reihe von *Nachbehandlungsverfahren*, z. B. durch

- Wärmebehandlungen: Normalglühen, Vergüten,
- Oberflächenverfestigen: Rollen,

gelingt es mehr oder weniger, aus richtungsabhängigen, anisotropen Werkstücken fast richtungsunabhängige, *quasiisotrope* Werkstoffeigenschaften in Gussstücken zu erzeugen.

Eine einfach zu merkende, aber schwer zu realisierende Konstruktionsregel hierzu lautet:

Gussteile beanspruchungsgerecht entwerfen.

Dies bedeutet, dass die anisotropen Werkstoffeigenschaften von Gussstücken bereits bei den Entwurfsüberlegungen berücksichtigt werden müssen. Abb. 2.29 zeigt, wie die Flanschkonstruktion wie in Abb. 2.25 beanspruchungsgerecht ausgeführt wird. Flansche werden auf Biegung beansprucht. Im Übergangsbereich Rohr-Flansch muss deshalb die Festigkeit des ungeschwächten Werkstoffs zur Verfügung stehen. Um Lunker zu vermeiden, sollte in diesen Bereichen daher kein Material angehäuft sein.

Als *gießgerecht* gelten Übergänge von 1 zu 5 mit entsprechenden von der Werkstückdicke s abhängigen Radien R :

$$\frac{1}{3} \cdot s > R > \frac{1}{4} \cdot s.$$

Das schematische Gefügebild (Abb. 2.29, rechts) zeigt, dass der Anteil der unerwünschten Stängelkristalle besonders gering ist.

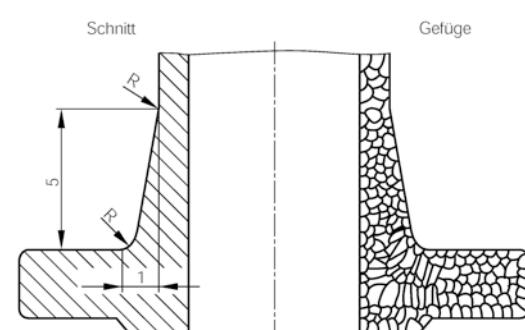


Abb. 2.29 Gießgerechter Flansch: Die Art der Formgebung drängt den Anteil prismatischer Kristalle zurück

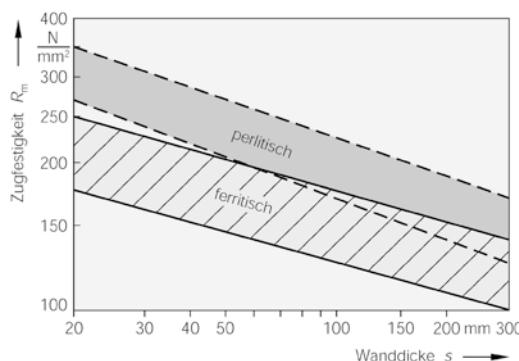


Abb. 2.30 Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Wanddicke bei Kokillengrauguss GGK. (Nach VDG-Merkblatt W 43)

Eine Reihe von Gusswerkstoffen weist ein von der Wanddicke abhängiges Festigkeitsverhalten auf, wie Abb. 2.30 zeigt. Enthält ein Gussstück Wände mit stark abweichender Dicke, kann dies zu Schwierigkeiten führen. Deshalb sei noch einmal an die Gestaltungsrichtlinie erinnert:

Gussstücke nach Möglichkeit mit annähernd gleichen Wanddicken ausführen.

Bei beanspruchungsgerechten Entwürfen für Gussstücke aus Gusseisen wird man auch die *drei- bis vierfach höhere Druckfestigkeit* gegenüber der Zugfestigkeit ausnutzen.

Typische Anwendungen für druckbeanspruchtes Kokillengusseisen GGK sind z. B. *Bremshydraulikgussteile* für Fahrzeuge. Je nach Sorte wird eine Druckfestigkeit zwischen 700 und 1000 N/mm² erreicht.

2.3 Gusswerkstoffe

Das gießgerechte Gestalten von Gussstücken ist ohne Beachtung der *Gießeigenschaften* der Gusswerkstoffe kaum möglich. Wegen der Vielzahl metallischer Gusswerkstoffe ist es bei einer Einführung in gießtechnische Fertigungsverfahren zunächst erforderlich, die Legierungen in der Reihenfolge ihrer mengenmäßigen Bedeutung im *Maschinen- und Fahrzeugbau* zu nennen. Tab. 2.4 zeigt einige wichtige metallische Gusswerkstoffe. Man unterscheidet *Eisengusswerkstoffe* und *Nichteisen-Gusswerkstoffe*. Von den Eisengusswerkstoffen sind besonders

Tab. 2.4 Metallische Gusswerkstoffe

Metallische Gusswerkstoffe

Eisengusswerkstoffe

Gusseisen, Temperguss
Stahlguss, Sonderguss

NE-Gusswerkstoffe

Leichtmetalle: Al, Mg, Ti
Schwermetalle: Cu, Zn, Pb, Sn

die hochkohlenstoffhaltigen Legierungen ausgezeichnet gießbar. Darunter versteht man Schmelzen, die zwischen 2,4 % und 4,3 % Kohlenstoff als Legierungselement enthalten. Der Stahlguss zählt nicht zu diesen Legierungen.

Bei den Nichteisen-Gusswerkstoffen haben *eutektische* Legierungen des *Aluminiums* wegen der guten Gießbarkeit überragende Bedeutung. Magnesium-Legierungen mit geringen Gehalten an Aluminium und Zink, Mangan oder Silicium stehen besonders im Fahrzeugbau vor einer Renaissance. *Kupfer-Zink-Legierungen* mit oder ohne Blei sind bei den Schwermetallen sehr gut gießbar. Auch die *Feinzinklegierungen* verhalten sich gießtechnisch einwandfrei.

2.3.1 Eisengusswerkstoffe

Über die Gusserzeugung in den wesentlichen Ländern der Welt wird regelmäßig vom BDG (*Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie*) berichtet. Die Statistik für das Jahr 2020 ergab für die Bundesrepublik Deutschland folgende Aufteilung:

- Gusseisen mit Lamellengrafit 60 %,
- Gusseisen mit Kugelgraffit 35 %,
- Stahlguss 5 %.

Die prozentuale Verteilung der Eisengusswerkstoffe bezieht sich auf die Jahresproduktion von 2,7 Mio. t mit einem Umsatz von 5,5 Mrd. €. Von den Eisen-Gussstücken werden 55 % (und 76 % beim NE-Guss) im Fahrzeugbau verwendet.

Die Wirtschaftlichkeit einer Gusskonstruktion wird nicht nur vom Kilopreis des Gusswerkstoffs bestimmt. Entscheidend ist meist der Preisvergleich mit anderen konkurrierenden Gusswerkstoffen. Die mittleren Preise für Gussstücke aus

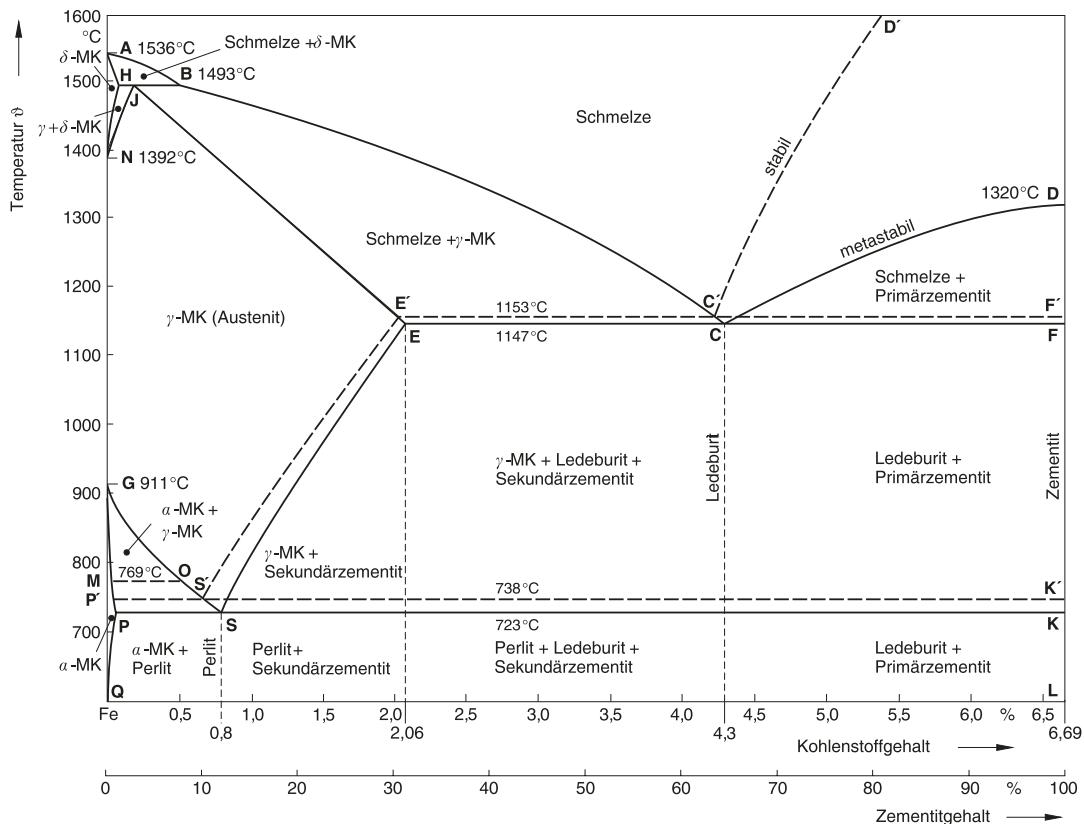


Abb. 2.31 Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS) für stabile (FeC) und metastabile ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$) Ausbildung des Kohlenstoffs

Gusseisen mit Lamellengrafit (GJL) zu Guss-eisen mit Kugelgraffit (GJS) zu Temperguss (GJM) und zu Stahlguss (GS) lassen sich etwa in folgendes Verhältnis setzen:

$$\text{GJL} : \text{GJS} : \text{GJM} : \text{GS} = 1 : 1,3 : 2,3 : 3 .$$

Das **Eisen-Kohlenstoff-Schaubild** vermittelt wichtige prinzipielle Einsichten für einen bestimmten Eisenwerkstoff. Die temperatur-abhängigen Gefüge-Arten und -Anteile hängen aber stark vom Gehalt der Legierungselemente ab. Abb. 2.31 zeigt das Fe-C - und $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ -Schaubild. Eisen bildet mit Kohlenstoff die sehr spröde intermediäre Phase Fe_3C (Zementit), die energiereicher als Kohlenstoff, also weniger stabil ist. Sie zerfällt bei hohen Temperaturen, langen Haltezeiten und langsamer Abkühlung in Kohlenstoff (Grafit) und Eisen. Deshalb unterscheidet man das *stabile* Fe-C - und das *metastabile* $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ -Schaubild.

Technische Fe-C -Legierungen erstarrn überwiegend nach dem metastabilen System. Der Begriff metastabil bezeichnet lediglich einen bestimmten thermodynamischen Zustand und darf nicht mit „unstabil“ im Sinne von „weniger haltbar“ gleichgesetzt werden. Stähle werden durch den Kohlenstoff- und nicht durch den Zementit-Gehalt charakterisiert, daher wählt man im Schaubild den Kohlenstoff als Abszisse. Gusswerkstoffe haben eine Kohlenstoffgehalt von etwa 5 %, deshalb ist nur die eisenreiche Seite des Schaubildes bis 6,69 % C (= 100 % Fe_3C) von Bedeutung.

Die wesentlichen Wirkungen des Kohlenstoffs im EKS² sind:

²Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild, Teil 1 und 2: Werkstofftechnik [youtube wissensfloater](#).

- Mit zunehmendem C-Gehalt nimmt die Schmelztemperatur ab (Liquiduslinie ABC),
- ebenso die A_3 -Temperatur (Linie GOS), unterhalb der die $\gamma > \alpha$ -Umwandlung erfolgt,
- dagegen wird die A_4 -Temperatur erhöht (Linie NJ).

Damit gehört Kohlenstoff zu den Elementen, die den Austenit-Bereich sehr stark erweitern, d. h. den austenitischen Zustand stabilisieren. Die entstehenden homogenen Mischkristalle und heterogenen Gefügebestandteile (Gemenge), ihre Bezeichnungen und Strukturen sind in Tab. 2.5 zusammengestellt. Der *Perlit* entsteht durch den eutktoiden Zerfall der γ -Mischkristalle mit 0,8 % C bei 723 °C. Die Reaktion verläuft isotherm, der sich ergebende Haltepunkt wird als A_1 bezeichnet.

Ferrit und *Zementit* sind im *Perlit* fast immer in einer charakteristischen Lamellenform angeordnet, Abb. 2.32. Während der Perlitreaktion müssen Kohlenstoff und Eisen im festen

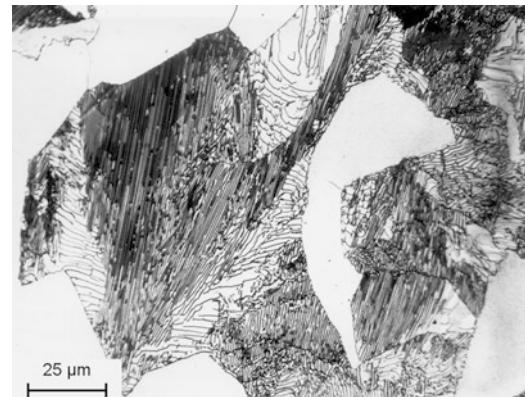


Abb. 2.32 Mikroaufnahme ferritisches-perlitisch, C 45, normalgeglüht (Bargel, 13. Aufl. 2022)

Zustand durch Diffusion transportiert werden. Dieser Vorgang ist sehr unterkühlungsanfällig, denn durch die kürzeren Diffusionszeiten wird der Massentransport erheblich erschwert, was Eigenschaftsänderungen zur Folge hat.

Tab. 2.5 Ausbildung der Gefügebestandteile im Eisen-Kohlenstoff-Schaubild. (Nach Bargel Werkstoffkunde, Springer 13. Auflage 2022)

Bezeichnung	Nähere Kennzeichnung	Lage im EKS, Gefügeskizzen
α -MK γ -MK δ -MK	Maximaler C-Gehalt 0,02 %, Punkt P 2,06 %, Punkt E 0,1 %, Punkt H	Metallografische Bezeichnung α -Ferrit Austenit δ -Ferrit
Eutektoid (S)	bestehend aus	Metallografische Bezeichnung Perlit
Eutektikum (C)	88 % Ferrit + 12 % Zementit 51,4 % Austenit + 48,6 % Zementit	Perlit Ledeburit
Primärzementit	entsteht durch	Primärkristallisation aus Schmelze (Linie CD)
Sekundärzementit		Ausscheidung aus Austenit (Linie ES)
Tertiärzementit		Ausscheidung aus Ferrit (Linie PQ)

Das Eutektikum *Ledeburit* entsteht bei 1147 °C durch Zerfall von Schmelze mit 4,3 % C in die beiden Phasen γ -Mischkristall und Fe₃C. Die beiden Bestandteile des Ledeburits sind fein verteilt, Abb. 2.33. Der sich aus den Austenitkristallen des Ledeburits ausscheidende Sekundärzementit kristallisiert bevorzugt an dessen Zementitmasse an und ist dann nicht mehr als extra Gefügebestandteil nachweisbar. Der C-Gehalt der γ -MK fällt dadurch bis auf 0,8 % C, Punkt „S“. Unterhalb 723 °C zerfällt der Austenit in Perlit.

Die meisten Stahl- und Gusslegierungen bestehen also aus Ferrit und Zementit. Ferrit ist sehr weich (60 HV) und hervorragend verformbar ($A = 50\%$, $Z = 80\%$). Zementit dagegen ist sehr hart (800 HV) und spröde. Mit zunehmendem Zementitgehalt nimmt daher die Zugfestigkeit zu und das Umformvermögen ab. Für die wichtigsten unlegierten Stähle zeigt Abb. 2.34 diesen Zusammenhang.

2.3.1.1 Gusseisen

Die naheutektischen *Eisen-Kohlenstoff-Silicium-Legierungen* werden als Gusseisen bezeichnet. Formguss hat etwa folgende Zusammensetzung:

- 3 bis 4 % Kohlenstoff,
- 2 bis 3 % Silicium.

Hinzu kommen noch geringe Gehalte an Mangan, Schwefel und Phosphor. Beim Gusseisen werden drei genormte Sorten unterschieden:

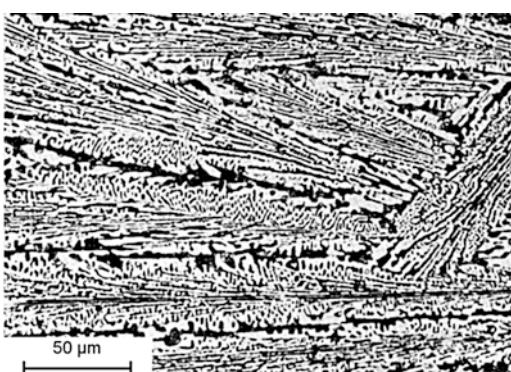


Abb. 2.33 Ledeburit (weißes Gusseisen) nach: Biegel: Werkstofftechnik. Springer, 13. Aufl. 2022)

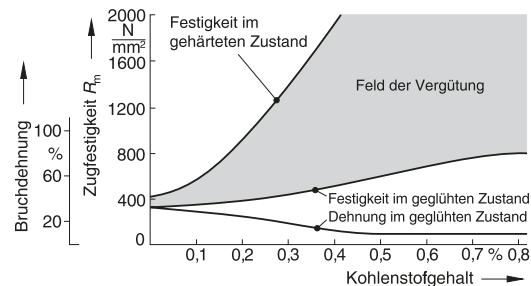


Abb. 2.34 Einfluss des Kohlenstoffgehaltes auf Zugfestigkeit und Dehnung. (Nach Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen)

- Gusseisen mit Lamellengrafit,
- Gusseisen mit Vermiculargraffit und
- Gusseisen mit Kugelgraffit.

Das in ISO 16112 genormte Gusseisen mit *Vermiculargraffit* („Würmchengrafit“), wird in der Gussstatistik zum Lamellengrafit gezählt.

Gusseisen mit Lamellengrafit

Der älteste und auch heute mengenmäßig am häufigsten verwendete Eisengusswerkstoff ist das Gusseisen mit Lamellengrafit³.

- Seine Bedeutung beruht auf den für das Gießen von Formguss wichtigen Gießeigenschaften und
- Gebrauchseigenschaften der Gussstücke.

Durch das Legieren von Eisen mit Kohlenstoff und Silicium wird die Schmelztemperatur bei *nah-eutektischer Erstarrung* bis auf etwa 1200°C erniedrigt. Dies ist vorteilhaft für folgende *Gießeigenschaften und Anforderungen*:

- Geringe Temperaturbelastung des Formstoffs,
- saubere Oberfläche,
- hohe Maßgenauigkeit,
- geringe Schwindung,
- sehr gutes Fließvermögen,
- einfachste Speisungsmöglichkeiten,

³Gusseisen mit Lamellengrafit GJL: [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=QfXwvIwzjyA).

- geringe Lunker- und Rissneigung,
- hohe Wärmeableitung.

Die *Gebrauchseigenschaften* des Gussstücks werden durch die lamellaren, blättchenförmigen Ausscheidungen des Grafits und die damit verbundene *Kerbwirkung* durch Unterbrechung der Eisengrundmasse bestimmt. Dadurch ergibt sich zwar eine geringe Festigkeit, die aber für viele Anwendungen ausreicht. In Bezug auf die Gebrauchseigenschaften hat nicht nur die Festigkeit allein, sondern vor allem die Kombination von Festigkeit mit weiteren Werkstoffeigenschaften größte Bedeutung:

- Zerspanbarkeit,
- Dämpfungsfähigkeit,
- Formstabilität,
- Verschleißbeständigkeit sowie
- Gleit- und Notlaufeigenschaften.

Gusseisen ist eine *Mehrstofflegierung*. Die wichtigsten Legierungselemente sind außer Kohlenstoff die Grundstoffe Silicium, Mangan, Phosphor und Schwefel. Den Einfluss der Legierungselemente versucht man durch eine charakteristische Zahl, den **Sättigungsgrad S_C** (Legierungselemente sind in Prozent anzugeben) auszudrücken:

$$S_C = \frac{C}{4,23 - 0,31 \cdot Si - 0,33 \cdot P + 0,07 \cdot Mn}.$$

Die Kennzahl S_C bestimmt die Lage der Mehrstofflegierung zum eutektischen Punkt des Zweistoffsystems, d. h., sie ist ein Maß für die Änderung des eutektischen Kohlenstoffgehalts durch die Wirkung der anderen Legierungselemente.

Gusseisen mit $S_C = 1$ erstarrt wie eine reine Eisen-Kohlenstoff-Legierung mit dem *eutektischen Kohlenstoffgehalt* von 4,23 %. $S_C < 1$ bedeutet eine unter-eutektische, $S_C > 1$ eine über-eutektische Erstarrung, d. h. die zunehmende Neigung zur *Grau-Erstarrung* infolge Primärausscheidung von Grafit und zur Austenit-Umwandlung nach dem stabilen System.

Die DIN EN 1561 unterscheidet sechs Sorten von Gusseisen mit Lamellengrafit, die in Sandformen oder Formen mit vergleichbarem

Temperaturverhalten hergestellt wurden. Die Sorten werden in zwei Hauptgruppen danach unterteilt, ob für die Weiterverarbeitung oder Verwendung der Gussstücke die Zugfestigkeit oder die Härte die entscheidende Kenngröße ist. Die Zahlenangaben im Werkstoffkurzeichen, Tab. 2.6, entsprechen einer maßgebenden Wanddicke von 15 mm. Sie werden ermittelt mit Proben, die entnommen wurden aus:

- getrennt gegossenen Probestücken,
- angegossenen Probestücken oder direkt aus Gussstücken.

Getrennt gegossene Probestäbe besitzen einen Rohgussdurchmesser von 30 mm. Angegossene Probestäbe sollen nur dann verwendet werden, wenn das Gussstück eine größere Wanddicke als 20 mm und eine größere Masse als 200 kg hat. Die Abb. 2.35 zeigt in Abhängigkeit von der Wanddicke im Bereich des Formgusses drei verschiedene Gussgefüge:

- Fläche II: Perlit und Grafit,
- Fläche IIb: Perlit, Ferrit und Grafit,
- Fläche III: Ferrit und Grafit.

Die den Flächen I und IIa entsprechenden Gefüge sind sehr hart und dürfen in lamellarem Gusseisen nach DIN EN 1561 nicht vorkommen. Sie werden als *Weißeinstrahlung* bezeichnet und gelten als Gussfehler. Das Mischgefuge nach Fläche IIb ist in Abb. 2.36 als Mikrogefuge wiedergegeben. In der perlitisch-ferritischen Grundmasse sind Grafitlamellen eingelagert. Je nach Wanddicke sind dazu verschiedene Gehalte an Kohlenstoff und Silicium erforderlich. Es ist nicht möglich, in einem Gussstück mit sehr unterschiedlichen Wanddicken *isotrope* Festigkeitseigenschaften zu erreichen.

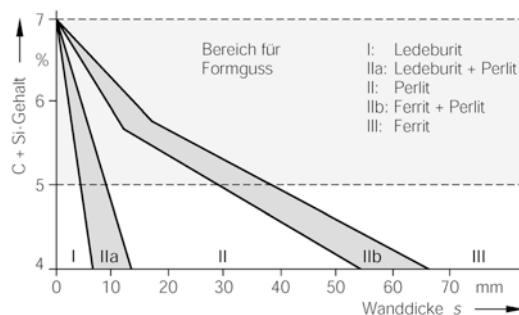
Gusseisen mit Kugelgrafit⁴

Nach dem Auslaufen der Schutzrechte stieg der Anteil von Gusseisen mit Kugelgrafit bis heute auf rd. 40 % der Gesamtgusseisenerzeugung.

⁴ Gusseisen mit Kugelgrafit GJS: [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=wIjyfJLWVQk).

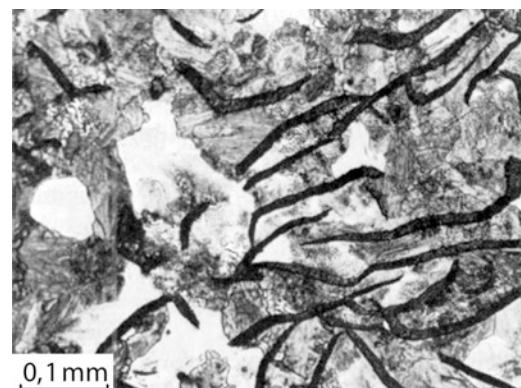
Tab. 2.6 Zugfestigkeit von Gusseisen mit Lamellengrafit nach DIN EN 1561

Werkstoffbezeichnung		Maßgebende Wanddicke		Zugfestigkeit R_m einzuhaltende Werte		Zugfestigkeit R_m
Kurzzeichen	Nummer	über	bis	Im getrennt gegossenen Probestück	Im ange- gossenen Probestück	Erwartungswerte im Gussstück
		mm	mm	N/mm ²	N/mm ² , min.	
EN-GJL-100	EN-JL 1010	5	40	100 bis 200	—	—
EN-GJL-150	EN-JL 1020	5	10	150 bis 250	—	155
		10	20		—	130
		20	40		120	110
		40	80		110	95
		80	150		100	80
EN-GJL-200	EN-JL 1030	5	10	200 bis 300	—	205
		10	20		—	180
		20	40		170	155
		40	80		150	130
		80	150		140	115
EN-GJL-250	EN-JL 1040	5	10	250 bis 350	—	250
		10	20		—	225
		20	40		210	195
		40	80		190	170
		80	150		170	155
EN-GJL-300	EN-JL 1050	10	20	300 bis 400	—	270
		20	40		250	240
		40	80		220	210
		80	150		210	195
		150	300		190	—
EN-GJL-350	EN-JL 1060	10	20	350 bis 450	—	315
		20	40		290	280
		40	80		260	250
		80	150		230	225
		150	300		210	—

**Abb. 2.35** Gusseisendiagramm nach Greiner-Klingenstein mit dem für Formguss üblichen Bereich

Davon entfallen rd. 60 % der Gussstücke auf den Maschinen- und Fahrzeugbau.

Sphäroguss ist eine geschützte Bezeichnung der Firma Metallgesellschaft AG für Gusseisen mit Kugelgraft. *Meehanite-Gusseisen* ist eine

**Abb. 2.36** Gusseisengefüge mit Lamellengrafit: Grundmasse überwiegend perlitisch (grau gestreift) mit einigen hellen Ferritkörnern

Tab. 2.7 Mindestwerte für die mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit, gemessen an mechanisch bearbeiteten, getrennt gegossenen Probestäben

Werkstoffbezeichnung		Zugfestigkeit R_m	0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$	Bruchdehnung A
Kurzzeichen	Nummer	N/mm ²	N/mm ²	%
EN-GJS-350-22-LT	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT	EN-JS1025	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT	EN-JS1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	400	250	15
EN-GJS-400-10	EN-JS1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2

geschützte Bezeichnung der Firma *Int. Meehanite Co.* für Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgraphit sowie legiertes Gusseisen mit einem sehr gleichmäßigen Gefüge, selbst bei unterschiedlichen Wanddicken.

Gusseisen mit Kugelgraphit besitzt sehr gute Gießeigenschaften. Der gegenüber lamellarem Gusseisen höhere Kohlenstoff- und Siliciumgehalt führt nach einer kombinierten Entschwefelung und Desoxidation in Verbindung mit einer *Schmelzbehandlung* durch Rein-Magnesium oder Magnesiumlegierungen zu der Grafitausscheidung in Kugelform. Damit werden die innere Kerbwirkung des Grafits verringert und die Festigkeits- und Dehnungswerte erhöht.

Die Gießeigenschaften werden durch die naheutektische Erstarrung im Schmelzbereich von etwa 1120 bis 1180 °C positiv beeinflusst. Im Vergleich zum Gusseisen mit Lamellengraphit ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der

- Wärmeleitfähigkeit und des
- Speisungsverhaltens.

Infolge der Kugelform des Grafits wird die Wärmeleitfähigkeit herabgesetzt und das Speisungsverhalten merklich verbessert. Gusseisen mit Kugelgraphit gilt als *nicht risseempfindlicher* Eisengusswerkstoff. Weiterhin werden höhere Festigkeits-, Dehnungs- und Zähig-

keitswerte erreicht als bei Gusseisen mit Lamellengraphit.

Gemäß Tab. 2.7 nach DIN EN 1563 unterscheidet man 13 Gusseisensorten mit Kugelgraphit, deren mechanische Eigenschaften an getrennten oder angegossenen, bearbeiteten Probestäben ermittelt werden. Wegen seiner stahlähnlichen Eigenschaften wird das Gusseisen mit Kugelgraphit zu den *duktilen* Gusswerkstoffen gezählt.

Die sehr große Zähigkeit des Gusseisens mit Kugelgraphit zeigt sich besonders deutlich bei den Sorten EN-GJS-350-22-LT und EN-GJS-400-18-LT beim Vergleich der Kerbschlagarbeit bei -40 °C mit den Werten bei Raumtemperatur nach Tab. 2.8. Die Werte für die Bruchdehnung A erreichen praktisch die Werte üblicher Massenbaustähle.

Dynamisch hoch belastete Bauteile, wie beispielsweise Kurbelwellen für PkW-Motoren entstehen aus höherfestem Gusseisen mit Kugelgraphit, wie beispielsweise EN-GJS-700-2 (s. Abb. 2.37). Durch Hohlstrukturen im Gussteil wird hier eine Gewichtsreduzierung von 12 % gegenüber einer massiven Ausführung erreicht.

Die *Brinell-Härte* wird bei den 8 Festigkeitsklassen der 13 Sorten nur zur Information angegeben. Sie wird nach *Siefer* aus der Beziehung

$$\text{Brinell-Härte HB} = \frac{R_m (\text{N/mm}^2)}{3,2}$$

Tab. 2.8 Mindestwerte für die Kerbschlagarbeit von Gusseisen mit Kugelgraphit, gemessen an ISO-V-Proben, die aus getrennt gegossenen Probestücken durch mechanische Bearbeitung hergestellt wurden

Werkstoffbezeichnung		Kerbschlagarbeit in J							
		bei Raumtemperatur $23 \pm 5^\circ\text{C}$		bei $-20 \pm 2^\circ\text{C}$		bei $-40 \pm 2^\circ\text{C}$			
Kurzzeichen	Nummer	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert
EN-GJS-350-22-LT	EN-JS1015	–	–	–	–	12	9		
EN-GJS-350-22-RT	EN-JS1014	17	14	–	–	–	–		
EN-GJS-400-18-LT	EN-JS1025	–	–	12	9	–	–		
EN-GJS-400-18-RT	EN-JS1024	14	11	–	–	–	–		

als Mittelwert gebildet. 90 % aller Werte liegen hierbei zwischen den Faktoren 2,64 und 3,4.

Die Vielseitigkeit der Werkstoffgruppe Gusseisen soll noch am Beispiel eines *legierten Gusseisens* mit Kugelgraphit erläutert werden. Von wirtschaftlichem und technischem Interesse ist die Kombination wichtiger Gebrauchseigenschaften – *duktil, hitzebeständig, korrosionsbeständig, warmfest, zerspanbar* – mit den guten Gießeigenschaften von Gusseisen. Das gilt besonders dann, wenn diese Eigenschaftskombination ohne die teuren Legierungselemente Chrom und Nickel, d. h. ohne die *austenitischen Gusswerkstoffe* erreichbar ist. Der warmfeste, duktile hochlegierte Gusswerkstoff mit der Bezeichnung GJS-XSiMo5-1 mit Kugelgraphit in einer ferritischen Grundmasse enthält 5 % Silicium und 1 % Molybdän. Dieser Gusswerkstoff ist

- *hitzebeständig* bis 820°C ,
- *warmfest* ($R_{p0,2} = 120 \text{ N/mm}^2$ bei 600°C),

- *korrosionsbeständig* und
- *zerspanbar* bei Härten von 200 bis 240 HB.

Wegen der Legierungsbestandteile Silicium und Molybdän lässt sich legierter Gusswerkstoff so gut wie Gusseisen vergießen. Gegenüber den teuren warmfesten austenitischen Sonderwerkstoffen bieten diese Gusswerkstoffe erhebliche Preisvorteile, z. B. bei Turboladern und Auspuffkrümmern (Abb. 2.38) für Motoren, die Temperaturen bis zu 900°C standhalten.

Die Möglichkeiten der Werkstoffgruppe Gusseisen sollen auch am Beispiel einer wärmebehandelten Sorte erläutert werden. Die DIN EN 1564 „*Bainitisches Gusseisen mit Kugelgraphit*“ ist eine neue Norm, die vier hochfeste Sorten mit gleichzeitig hohen Kennwerten für die Festigkeit und Zähigkeit enthält, Tab. 2.9. Die bisherige Bezeichnung: *Zwischenstufenvergütetes Gusseisen mit Kugelgraphit* sollte nicht mehr verwendet werden. Im angelsächsischen Sprachgebiet ist die Bezeichnung **ADI** – Austempered Ductile Iron – gebräuchlich. Die chemische Zusammensetzung der Gusseisenschmelze und die Einstellung der Wärmebehandlungsparameter müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Radnaben und Kettenräder für Lkw und



Abb. 2.37 Kurbelwelle aus Gusseisen mit Kugelgraphit EN-GJS 700-2 (Georg Fischer Automotive AG)



Abb. 2.38 Auspuffkrümmer für Pkw-Motor aus GJS SiMo1000. (Quelle: Georg Fischer Automotive AG)

Baumaschinen sind bekannte Anwendungen im Fahrzeugbau.

Speziell entwickelte Gusseisen-Werkstoffe wie SiboDur mit den Legierungszuschlägen Silizium und Bor vereinen hohe Zugfestigkeit, Dauerschwingfestigkeit und Zähigkeit. Somit sind diese Werkstoffe u. a. prädestiniert für den Einsatz im Fahrwerk und im Antriebsstrang von Fahrzeugen, Abb. 2.39. Ähnliche Festigkeiteigenschaften waren bisher nur mit Schmiedeteilen zu erreichen. Gussteile bieten bei der Konstruktion nun wesentlich größere Gestaltungsfreiraume.

Gusseisen mit Vermiculargrafit

Die Grafitausscheidung in Gusseisenschmelzen wird ganz wesentlich durch die chemische Zusammensetzung und die Schmelzbehandlung beeinflusst. Seit etwa 1995 wurde bei der Fertigung



Abb. 2.39 Radträger aus SiboDur700-10. (Quelle: Georg Fischer Automotive AG)

von Bremsklötzen für Eisenbahnen ein besonderes Gusseisen mit entartetem, „würmchenförmigem“ (vermiculus = Würmchen) Grafit verwendet, welches zu einer neuen, im August 2006 genormten Gusseisensorte weiterentwickelt wurde. Tab. 2.10 enthält die mechanischen Eigenschaften.

Durch eine unvollständige Schmelzenbehandlung, ähnlich wie bei der Herstellung von Guss-eisen mit Kugelgrafit, wird die Sphärolithenbildung nicht erreicht, aber die lamellare Grafitbildung stark gestört. Es entsteht ein kleinerer würmchenförmiger Grafit. Die neue Werkstoffbezeichnung nach ISO TR 15931 ist ISO/JV.

Gegossen werden in kleineren Serien Motorkurbelwellengehäuse und Zylinderköpfe für Dieselmotoren von Lkw und auch Pkw, weil die vermiculare Grafitausbildung in ferritisch-perlitischer Matrix höhere Drücke bei einer vergleichbaren Spanbarkeit erlaubt. Bei gleicher Beanspruchung kann bei einem Guss-eisen mit Vermiculargrafit die Wanddicke bis auf 3,5 mm in Zylinderkurbelgehäusen vermindert werden. Der Werkstoff ist fester als Gusseisen mit Lamellengrafit, weil die Kerbwirkung geringer ist. Gegenüber dem sphärolithischen Gusseisen entsteht dadurch ein beachtlicher Preisvorteil, weil der Gusswerkstoff ISO/JV nicht duktil, damit besser putzbar ist und eine Gewichtersparnis von ca. 10 % gegenüber Gusseisen mit Lamellengrafit entsteht. Das VDG Merkblatt W50 *Gusseisen mit Vermiculargrafit* ist die Basis für die neue ISO-Norm ISO 16112. Unterschieden werden fünf Sorten mit den Kurzzeichen ISO/JV/300 bis ISO/JV/500. Die Festigkeitsabstufung

Tab. 2.9 Mechanische Eigenschaften von bainitischem Gusseisen mit Kugelgrafit (ADI), nach DIN EN 1564

Werkstoffbezeichnung		Zugfestigkeit R_m	0,2%-Dehngrenze $R_{p0.2}$	Bruchdehnung A	Härtebereich HB
Kurzzeichen	Nummer	N/mm ²	N/mm ²	%	Einheiten
EN-GJS-800-8	EN-JS1100	800	500	8	260 bis 320
EN-GJS-1000-5	EN-JS1110	1000	700	5	300 bis 360
EN-GJS-1200-2	EN-JS1120	1200	850	2	340 bis 440
EN-GJS-1400-1	EN-JS1130	1400	1100	1	380 bis 480

Tab. 2.10 Mechanische Eigenschaften (ermittelt an getrennt gegossenen Probestücken, Kennzeichen „S“) von Guss-eisen mit Vermiculargrafit, nach ISO 16112

Werkstoffbezeichnung (Kurzzeichen) nach		Zugfestigkeit ¹⁾ R_m , min.	0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$, min.	Bruchdehnung A , min.	Brinellhärte, Richtwerte HBW 30
ISO/TR 15931	W50	N/mm ²	N/mm ²	%	Einheiten
ISO/JV/300/S ²⁾	GJV-300	300 bis 375	220 bis 295	1,5	140 bis 210
ISO/JV/350/S	GJV-350	350 bis 425	260 bis 335	1,5	160 bis 220
ISO/JV/400/S	GJV-400	400 bis 475	300 bis 375	1,0	180 bis 240
ISO/JV/450/S	GJV-450	450 bis 525	340 bis 415	1,0	200 bis 250
ISO/JV/500/S	GJV-500	500 bis 575	380 bis 455	0,5	220 bis 260

¹⁾ Zum Zweck der Annahme muss die Zugfestigkeit einer gegebenen Sorte zwischen ihrem Nennwert n (Position 5 des Werkstoffkurzzeichens) und $(n + 75)$ N/mm² liegen.

²⁾ Die sich an die Bezeichnung anschließenden Buchstaben haben folgende Bedeutung:

S: for separately casting sample (getrennt gegossene Proben), z. B. ISO/JV/450/S.
U: for cast on (angegossen), z. B. ISO/JV/300/U.

beträgt bei allen Gusseisensorten einheitlich 50 N/mm².

Aus den geringen Bruchdehnungswerten (d. h. der geringen plastischen Verformbarkeit) ist der nichtduktilen Werkstoffzustand klar erkennbar, der mit steigender Festigkeitsstufe kleinere Brinell-Härtespannen, gemessen als HBW 30, aufweist. Dies ist für die meist erhebliche spanende Bearbeitung von Motorkurbelgehäusen und Zylinderköpfen von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung.

2.3.1.2 Temperguss

Eine Legierung aus Eisen mit Grafit in flockiger oder knotiger Form, die durch Auflösung von spröden Eisencarbiden entsteht, heißt *Temperguss*.

Aus dem spröden *Temperhartguss* wird durch eine Wärmebehandlung in neutraler oder entkohrender Atmosphäre *duktiler Temperrohrguss* hergestellt, der gut mechanisch bearbeitbar ist. Um eine grafitfreie Primärerstarrung zu erreichen, wird mittels Bismut-Impfung und bestimmter Gehalte an

- Kohlenstoff (2,3 bis 3,4 %) und
- Silicium (1,5 bis 0,4 %)

eine Zusammensetzung des Hartgusses nach Abb. 2.35 eingestellt als

- Ledeburit/Perlit, Bereich IIa oder
- Ledeburit, Bereich I.

Das Mikrogefüge des Temperhartgusses besteht wie in Abb. 2.40 aus dunklen, exogenen Dendriten, zwischen denen die helle eutektische Restschmelze breiartig endogen erstarrt ist.

Die Kristallisation erfolgt in einem Erstarrungsintervall zwischen etwa 1300 °C und 1140 °C. Dies bedeutet hinsichtlich der wichtigsten Gießeigenschaften:

- Gutes Fließverhalten ist nur mit einer höheren Gießtemperatur möglich;
- die grafitfreie Primärerstarrung ist auf Wanddicken < 45 mm beschränkt;

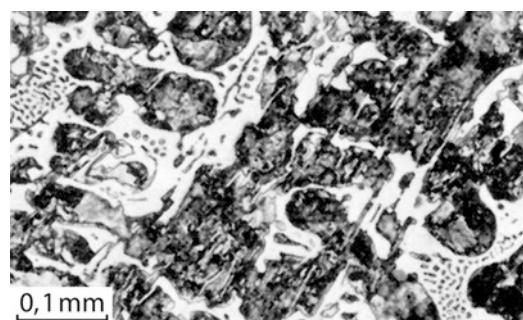


Abb. 2.40 Primärgefüge von Temperhartguss mit dunkleren Dendriten aus zerfallenen Austenitkristallen (Perlit) und Zementit (hell), entstanden aus Restschmelze

- Schwindung und Rissanfälligkeit werden durch das breite Erstarrungsintervall größer.

Die werkstofflichen Eigenschaften von Temperguss sind in DIN EN 1562 genormt. Je nach Bruchaussehen des duktilen Rohgusses unterscheidet man den

- entkohlend geglühten *weißen Temperi-guss* (Malleable White = GJMW) und den
- nicht entkohlend geglühten *schwarzen Temperi-guss* (Malleable Black = GJMB).

Der ältere *weiße* Temperi-guss wird auch *europeischer* Temperi-guss genannt. Der *schwarze* oder auch *amerikanische* Temperi-guss hatte erst mit den Serienteilen für die Autoindustrie den weißen Temperi-guss mengenmäßig überholt. Seine Bedeutung ist aber rückläufig, weil das Eigenschaftsspektrum durch Gusseisen mit Kugelgrafit preiswerter erfüllt wird.

Weißer Temperi-guss

Bei einer Wärmebehandlung in *entkohlenden Gasgemischen*, wie z. B. in

- Kohlenmonoxid/Kohlendioxid oder
- Wasserdampf/Wasserstoff

entsteht aus Temperhartguss ein sehr anisotropes Gefüge abhängig von der Wanddicke. Eine rein ferritische Randzone wird bei Wanddicken unter 8 mm erreicht, die Kernzone besteht aus aufgelockertem Perlit mit Temperkohleknöten, Abb. 2.41. Weißer Temperi-guss ist nach EN 1562 in fünf Werkstoffsorten eingeteilt mit den Normbezeichnungen EN-GJMW-350-4 für die Grundsorte und für die höchste Festigkeitsstufe EN-GJMW 550-4. Das „M“ steht für Malleable (= verformbar) und das „W“ für White. Durch die Wärmebehandlung, das Tempern, werden die Zugfestigkeiten in N/mm² und die prozentuale Bruchdehnung gemessen als A_{3/4} zuverlässig und in engen Streubreiten eingestellt.

Die Sorte EN-GJMW-360-12 W wird mit besonders großer *Entkohlungstiefe* hergestellt und ist für Festigkeitsschweißungen ohne thermische Nachbehandlung vorgesehen. Bei Wand-

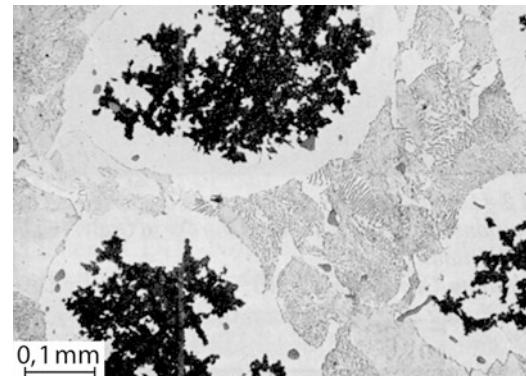


Abb. 2.41 Kernzone von weißem Temperi-guss (entspricht etwa der Sorte EN-GJMW-350-4) mit Perlit und Knotengrafit

dicken < 8 mm beträgt der Restkohlenstoffgehalt $\leq 0,30\%$.

2.3.1.3 Stahlguss

Stahl zu Formguss vergossen heißt Stahlguss, der je nach Beanspruchung

- unlegiert oder
- legiert, d. h. niedrig- oder hochlegiert sein kann.

Stahlguss wird dort eingesetzt, wo Festigkeit, Zähigkeit oder spezielle Eigenschaften der bisher beschriebenen hochkohlenstoffhaltigen Eisengusswerkstoffe nicht ausreichen. Der Anwendungsbereich von *Stahlguss* ist deshalb sehr groß, z. B. bei großen hoch beanspruchten Gussstücken bis 100 t oder bei Wanddicken von 8 bis 800 mm. Aus Kostengründen wird Stahlguss aber nur dann eingesetzt, wenn die geforderten Gebrauchseigenschaften keine andere Lösung zulassen. Zum Beispiel wird für ein Pumpengehäuse aus dem (hochlegierten) *austenitischen Stahlguss* GX6CrNiMo18-10 die Kombination der Eigenschaften korrosionsbeständig und warmfest bei einer Stückmasse von 31 t und Wanddicken bis 70 mm gefordert.⁵

⁵ Gießen Großgussstücke. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=wissensfloater).

Tab. 2.11 Mechanische Eigenschaften der Stahlgusssorten für allgemeine Verwendung nach DIN EN 10293, Auszug

Stahlgusssorte	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung ($L_0 = 5 d_0$)	Kerbschlagarbeit (ISO-V-Proben)	Beispiele für Anwendung
Kurzname	N/mm ²	N/mm ²	Prozent, min.	Mittelwert J, min.	
GE200	200	380 bis 530	25	27 (bei RT)	
GS200	200	380 bis 530	25	35 (bei RT)	
GS240	240	450 bis 600	22	27 (bei RT)	Maschinenbau, Bautechnik, Hochbau, Tiefbau für geringer belastete Bauteile
GE300	300	600 bis 750	15	27 (bei RT)	

Legierter Stahlguss					
G17Mn5	240	450 bis 600	24	70 (bei RT)	Gute Schweißeignung durch geringen Kohlenstoffgehalt
G20Mn5	300	480 bis 620	20	50 (bei RT)	
G15CrMoV6-9	700	850 bis 1000	10	27 (bei RT)	Warmgehende Bauteile und Behälter
G35CrNiMo6-6	700	800 bis 950	12	45 (bei RT)	Prägewerkzeuge, Schmiedegesenke
G9Ni19	380	500 bis 650	20	100 (bei RT)	Tieftemperaturanwendungen
GX3CrNi13-4	500	700 bis 900	15	27 (bei -120°C)	Chemischer Apparatebau

Ein besonders schwieriges Problem bei Stahlguss ist die geforderte *warmrissfreie* Primärerstarrung in der Randschale. Ursache der Warmrisse sind oft metallurgische Vorgänge in der Schmelze (niedrigschmelzende Verunreinigungen). Risse können aber auch bei großen Wanddicken und Abkühlungsgeschwindigkeiten auftreten. Nur mithilfe gießtechnischer Erfahrung, der Sekundärmetallurgie und dem Fertigungsschweißen in Verbindung mit zerstörungsfreien Prüfverfahren sind Warmrisse zu beherrschen.

Die weniger guten Gießeigenschaften von Stahlguss werden durch den geringen Kohlenstoffgehalt und Legierungselemente verursacht, die nur in Verbindung mit hohen Gießtemperaturen gut gießfähige Schmelzen liefern. Nachteilig sind folgende Eigenschaften von Stahlgussschmelzen:

- Hohe Gießtemperatur (etwa 1580 bis 1680 °C),
- Oberflächen-Anbrennungen am Formstoff,
- große Speiser zur Formfüllung erforderlich,
- Gefahr der Warmrissbildung,
- großer Aufwand beim Trennen der Angüsse,
- große flüssige und feste Schwindung und
- Auftreiben der Formen.

Die zahlreichen Stahlgusssorten sind in verschiedenen DIN-Normen, in Stahl-Eisen-Werkstoffblättern oder EURO-Normen beschrieben.

DIN EN 10213, 2008-01 enthält die technischen Lieferbedingungen für *Druckbehälter aus Stahlguss* mit den Stahlgusssorten für den Einsatz bei Raumtemperatur und die austenitischen und ferritischen kaltzähnen (warmfesten) Sorten für den Einsatz bei tieferen bzw. höheren Temperaturen.

Nach DIN EN 10293 unterscheidet man drei Festigkeitsklassen von Stahlguss für allgemeine Verwendung. Dies sind die unlegierten *Normalsorten* GE200 bis GE300, Tab. 2.11. Sie werden durch Legieren mit Kohlenstoff eingestellt. Bei den gut schmelzschweißgeeigneten Sorten für Fertigungs- und Konstruktionsschweißungen wurde zum Verbessern der Schweißeignung der Kohlenstoffgehalt etwas abgesenkt ($\leq 0,23\%$ C) und der Mangangehalt erhöht (G17Mn5, G20Mn5). Für größere Wanddicken steht der (niedrig-)legierte Feinkornstahlguss G8MnMo7-4 zur Verfügung, der sich wegen seines geringen Kohlenstoffäquivalents ohne Vorwärmung und ohne Wärmenachbehandlung rissfrei schweißen lässt. Die unlegierten Stahlgusssorten sind wegen der ungünstigen Gießeigenschaften seit Jahren rückläufig.

Die Schweißeignung ist bei Stahlguss von großer praktischer Bedeutung. Nach der Fehlerortung in den *Stahlgussstücken* werden durch Reparatursschweißungen – man spricht in diesem Fall vom *Fertigungsschweißen* – Lunker, Risse und Oberflächenfehler beseitigt. Das Stahlgussstück wird

zunächst *normalgeglüht* und im Anschluss an das Fertigungsschweißen *spannungsarm* gegläutet.

Nicht nur die Schweißeignung von Stahlguss wird hauptsächlich vom Kohlenstoffgehalt beeinflusst. In Abb. 2.42 sind die einstellbaren Festigkeits- und Verformungskennwerte in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt aufgetragen. Der durch Widmannstätten'sches Gefüge stark gefährdete Bereich zwischen etwa 0,25 % C und 0,35 % C ist hervorgehoben.

Große Bedeutung haben die zahlreichen niedriglegierten und hochlegierten Stahlgusssorten, wie z. B.

- Stahlguss für Druckbehälter nach DIN EN 10213,
- Stahlguss für allgemeine Verwendungszwecke nach DIN EN 10293,
- nichtrostender Stahlguss nach DIN EN 10283,
- nichtmagnetisierbarer Stahlguss nach Stahl-eisen-Werkstoffblatt SEW 390-91,
- Stahlguss für Erdöl- und Erdgasanlagen nach SEW 595-76,
- hitzebeständiger Stahlguss nach DIN EN 10295,
- kaltzäher Stahlguss nach SEW 685-89 und
- Flamm- und induktionshärtbarer Stahlguss.

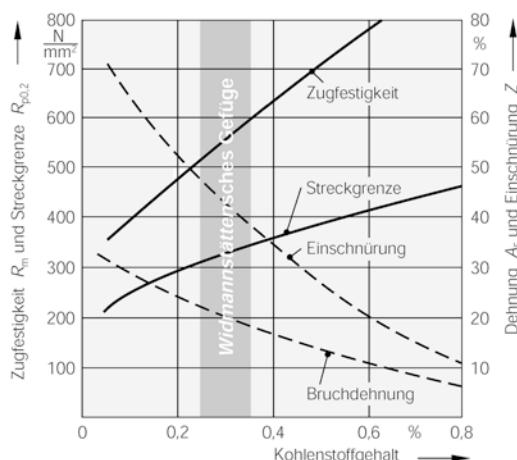


Abb. 2.42 Festigkeitswerte von unlegiertem, normalgeglütem Stahlguss in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt (Nach Roesch). Durch Widmannstättensches Gefüge gefährdeter Bereich

Der verhältnismäßig teure Stahlguss hat also ein mengenmäßig begrenztes, aber genau bestimmtes Einsatzgebiet bei Großguss- und Seriengussstücken mit besonderen Eigenschaften.

Da sich die Gießeigenschaften bei steigenden Gehalten an Legierungselementen i. Allg. verschlechtern, werden häufig Verbundkonstruktionen hergestellt, d. h. Gießen und Schweißen kombiniert mit

- Walzprofilen, z. B. Rohren,
- Schmiedestücken, z. B. Ringen, Flanschen, und
- umgeformten Grobblechen, z. B. Kümpelböden.

Die Einzelkonstruktionen kann man auf diese Weise einfacher oder billiger fertigen, außerdem wird die *Bauteilsicherheit* oft erhöht.

2.3.2 Nichteisen-Gusswerkstoffe

Die insgesamt erzeugten Mengen bei den NE-Gusswerkstoffen von über 770.000 t im Jahr 2020 verteilen sich auf 88 % Leichtmetall- und 12 % Schwermetallguss (davon 6 % Kupfer- und 6 % Zinkguss).

Ein Vergleich der Dichten von Aluminium-Magnesium-Legierungen im Verhältnis zu den Kupfer-Zink-Blei-Zinn-Legierungen von etwa 1 zu 3 macht aber deutlich, dass das vergossene Werkstoffvolumen der Leichtmetalllegierungen etwa zwölfmal größer ist.

Die Beschreibung von NE-Gusswerkstoffen ist wegen der Vielfalt der Legierungen in diesem Buch nur begrenzt möglich. Die wichtigsten Legierungstypen werden nach den erzeugten Mengen den Gießverfahren an Hand einiger Beispiele zugeordnet.

Der Magnesium-Leichtmetallguss betrug im Jahre 2020 rd. 21.000 t. Das Mengenverhältnis Al- zu Mg-Guss beträgt etwa 85 % zu 3 %. Mg ist ca. 33 % leichter als Al und 75 % leichter als Stahl.

Den Mg-Gusswerkstoffen wird erneut eine bedeutende Zukunft vorhergesagt, wenn es gelingt, die für Gusslegierungen verfügbaren Mg-Mengen

zu vervielfachen und den Preis auf die Höhe der Al-Gusswerkstoffe zu senken. Bei einem Verhältnis der Dichten von Al- zu Mg-Guss von 2,7 zu 1,8 sind Mg-Gusslegierungen für Anwendungen im Fahrzeugbau etwa preisgleich. Eine eingeschränkte Verfügbarkeit ergab sich bei Mg durch den großen Bedarf an Mobiltelefonen.

2.3.2.1 Leichtmetall-Gusswerkstoffe

Die wichtigsten Leichtmetall-Gusswerkstoffe sind **Aluminiumlegierungen**, die nach ihrem Hauptlegierungselement eingeteilt werden in

- Aluminium-Silicium-Legierungen,
- Aluminium-Magnesium-Legierungen und
- Aluminium-Kupfer-Legierungen.

Wegen der besonders vorteilhaften Kombination der Gieß- und Gebrauchseigenschaften kommt den naheutektischen *Aluminium-Silicium-Legierungen* die größte Bedeutung zu. Abb. 2.43 zeigt den aluminiumseitigen Ausschnitt des Al-Si-Zustandsschaubilds. Das Eutektikum liegt bei etwa 12 % Silicium und 577 °C. Es ist die Legierung mit dem besten Erstarrungsverhalten. Für Formguss werden nur Siliciumgehalte zwischen 6 % und 17 % verwendet. Eine Ausnahme bilden die Kolbenlegierungen, die eine minimale Wärmedehnung bei 25 % Silicium aufweisen. Zwecks Erhöhung der Warmfestigkeit werden Legierungselemente wie Kupfer und Nickel zugesetzt.

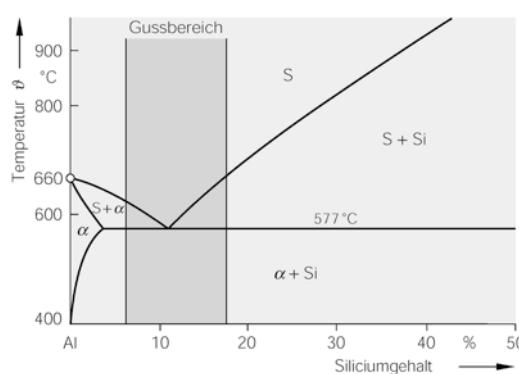


Abb. 2.43 Zustandsschaubild Aluminium-Silicium mit dem für Formguss bevorzugten Konzentrationsbereich

Die Gießeigenschaften der Aluminium-Silicium-Legierungen lassen sich wie folgt beschreiben:

- Niedrige Gießtemperaturen,
- gutes Formfüllungsvermögen, optimal bei 12 % Si,
- geringe Lunkerneigung, minimal bei 6 bis 8 % Si,
- geringes Schwindmaß von etwa 1,25 %,
- geringe Warmrissneigung bis < 6 % Si,
- geringer Wanddickeinfluss, bei Sandguss größer.

Eine feinkörnige Erstarrung durch Impfen mit Titan und Bor abgebenden Salzgemischen und eine rasche Abkühlung vermindern die Warmrissbildung und begünstigen druckdichte Gussgefüge mit nahezu wanddickenunabhängigen Gebrauchseigenschaften.

Die Leichtmetalle werden hauptsächlich nach vier Gießverfahren zu Formguss vergossen:

- **Druckguss**, Kurzzeichen **D**,
- **Kokillenguss**, Kurzzeichen **K**, (bei Cu-Gusswerkstoffen = **M**),
- **Sandformguss**, Kurzzeichen **S**,
- **Feinguss**, Kurzzeichen **L**.

Druckguss ist mit einem Anteil von über 60 % das wichtigste Gießverfahren.

Druckgusslegierungen Die wichtigsten Leichtmetall-Druckgusslegierungen sind

- **Aluminium-Silicium-Legierungen** und
- **Magnesium-Aluminium-Legierungen**.

Tab. 2.12 enthält die mechanischen Eigenschaften der vier wichtigsten Druckgusslegierungen nach EN 1706. Die neuen Werkstoffkurzzeichen werden den alten Bezeichnungen nach DIN 1725-2 gegenübergestellt. In den Bezeichnungen steht AC für Aluminium Casting. Die Legierungen werden in 11 Legierungsgruppen eingeteilt. Probestäbe mit einem Querschnitt von 20 mm² und einer Mindestwanddicke von 2 mm werden getrennt gegossen. Der Zustand „F“ kenn-

Tab. 2.12 Mechanische Eigenschaften von Aluminium-Druckgusslegierungen (F=Gusszustand)

DIN EN 1706	alt: DIN 1725-2	Werkstoff-zustand	Zugfestigkeit R_m , min.	Dehngrenze $R_{p0,2}$, min.	Bruch-dehnung A_{50} , min.	Brinell-härte HBW, min.
Legierungsbezeichnung chemisches Symbol	Werkstoff-Kurzzeichen		N/mm ²	N/mm ²	%	Einheiten
EN AC-Al Si12(Fe)	GD-AlSi12	F	240	130	1	60
EN AC-Al Si10Mg(Fe)	GD-AlSi10Mg	F	240	140	1	70
EN AC-Al Si8Cu3	GD-AlSi9Cu3	F	240	140	1	80
EN AC-Al Mg9	GD-AlMg9	F	200	130	1	70

zeichnet den Gusszustand, der meist durch Kaltauslagern nach Lösungsglühen und Abschrecken, Kurzzeichen „T4“, oder Wärmauslagern nach Lösungsglühen und Abschrecken, Kurzzeichen „T6“, erheblich verändert werden kann.

Die eutektische Al-Si-Legierung mit 12 % Si eignet sich für komplizierte, druckdichte Gussstücke und ist mit Cu-Gehalten kleiner als 0,5 % korrosionsbeständig gegen Salzwasser. Die Legierung mit 10 % Si und einigen Zehnteln Prozent Mg ist nicht ganz so gut gießbar, aber härter und ermöglicht dadurch beim Spanen bessere Oberflächen. Auf die *Umschmelzlegierung* EN AC-Al Si8Cu3 ($\rho = 2,75 \text{ kg/dm}^3$) entfallen mehr als 80 % der Druckgusserzeugung.

Si und Cu sind innerhalb bestimmter Grenzen gegeneinander austauschbar, ohne dass sich die Eigenschaften wesentlich ändern, wenn Si und Cu zusammen etwa 10 % betragen, z. B. EN AC-Al Si6Cu4.

Die preisgünstigste Gusslegierung des Aluminiums ist EN AC-Al Si6Cu4, Tab. 2.13. Sie ist gut gießbar und wird vielseitig dort angewendet, wo keine erhöhten Ansprüche an Festigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit gestellt

werden, z. B. bei Gehäusen aller Art und Getriebedeckeln für Pkw.

Komplexe Getriebegehäuse mit Einlegeteilen aus Stahl (Abb. 2.44) entstehen aus der Druckgusslegierung AlSi9Cu3. Zahlreiche Dicht- und Funktionsflächen werden hier spanend nachbearbeitet.

Die Al-Mg-Legierung EN AC-AlMg9 ist bei geringen Cu-Gehalten (< 0,05 %) beständig gegen Seewasser und ausgezeichnet polierbar. Abb. 2.45 zeigt, dass die Erstarrung der Schmelze zu α -Mischkristallen bei einem Mg-Gehalt von 9 % (L_1) in einem breiten Temperaturintervall von etwa 100 °C erfolgt. Die Schmelz- und Gießtechnik muss das Auftreten der β -Phase (Al_3Mg_2) vermeiden, die bevorzugt an den Korngrenzen zu interkristallinem Korrosionsangriff führt. Bei Druckguss ist es – anders als bei Halbzeugen – nicht möglich, durch eine Wärmebehandlung eine feindisperse Verteilung der β -Phase zu erreichen (Tab. 2.14).

Die Druckgusslegierungen des Magnesiums, Tab. 2.15 und Abb. 2.46, enthalten als Hauptlegierungselement Aluminium. Je nachdem, ob zusätzlich noch Zink, Mangan oder Silicium legiert werden, unterscheidet man die

Tab. 2.13 Mechanische Eigenschaften von Aluminium-Kokillen- und Sandgusslegierungen (F=Gusszustand, T6=lösungsgeglüht und wärmausgelagert)

DIN EN 1706	alt: DIN 1725-2	Werkstoff-zustand	Zugfestigkeit R_m , min.	Dehngrenze $R_{p0,2}$, min.	Bruch-dehnung A_{50} , min.	Brinell-härte HBW, min.
Legierungsbezeichnung chemisches Symbol	Werkstoff-Kurzzeichen		N/mm ²	N/mm ²	%	Einheiten
EN AC-AlSi12Mg	G-AlSi12(Cu)	F	170	100	2	75
EN AC-AlSi10	G-AlSi10Mg	T6	260	220	1	90
EN AC-AlSi107Mg0,3	G-AlSi7Mg	T6	290	210	4	90
EN AC-AlSi6Cu4	G-AlSi6Cu4	F	170	100	1	75



Abb. 2.44 Getriebegehäuse aus AlSi9Cu3. (Quelle: Georg Fischer Automotive AG)

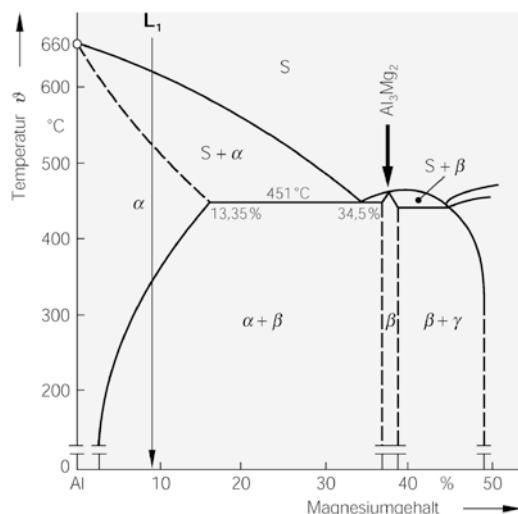


Abb. 2.45 Zustandsschaubild Aluminium-Magnesium mit der Druckgusslegierung GD-AlMg9 (L_1)

handelsüblichen Bezeichnungen AZ-, AM- und AS-Standardgusslegierungen. In der neuen EN 1753 werden die Legierungen sogar sieben Legierungsgruppen zugeordnet.

Magnesium-Druckgusslegierungen gewinnen an Bedeutung durch die steigenden Anforderungen hinsichtlich Energieeffizienz und Crash-Sicherheit im Fahrzeugbau. Druckgussteile wie der Sitzrahmen aus AM50 ($MgAl5Mn$) in Abb. 2.47 ermöglichen zudem ein hohes Maß an Funktionsintegration in einem Bauteil. So können Aufnahmepunkte für Sitzverstellung, Heizung, Lüftung und Sicherheitstechnik in einem Bauteil angebracht werden.

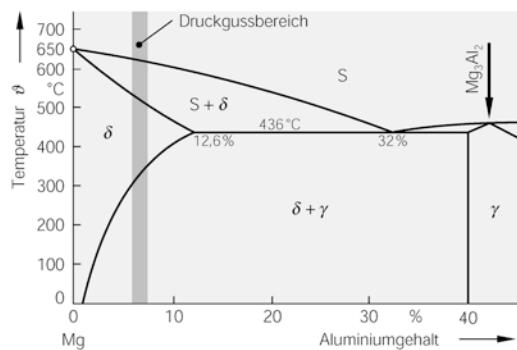
Die Legierung EN MC-MgAl9Zn1(A) (alt: AZ 91 bzw. GD-MgAl9Zn1) ist der universelle Werkstoff für Sand-, Kokillen- und Druckguss und wird am häufigsten vergossen. Sie weist im warmausgehärteten Zustand eine Zugfestigkeit bis 300 N/mm^2 auf bei einer Bruchdehnung bis zu 3 %. Die hervorragenden Gleiteigenschaften und die ausgezeichnete Gießbarkeit auf Warm- und Kaltkammer-Druckgießmaschinen haben zu vielfältigen Anwendungen bei dünnwandigen Gehäusen für Pkw-Getriebe, Schaltgehäuse, Kettenräder und Mobiltelefone geführt. Die Magnesiumlegierungen mit Aluminium und Mangan besitzen im Vergleich zu den AZ- und AS-Legierungsvarianten die besten Zähigkeits-eigenschaften. Sie werden im Fahrzeugbau für Instrumententafelträger, Sitzgestelle und Felgen eingesetzt. Die langzeitig wärmebelastbare Legierung AS 41 mit guter Kriechfestigkeit kann bei Temperaturen bis 150°C im Motoren-

Tab. 2.14 Mechanische Eigenschaften von Magnesium-Druckgusslegierungen (F = Gusszustand)

DIN EN 1706	alt: DIN 1729-2	Allgemeine Bezeichnung	Werkstoff-zustand	Zug-festigkeit R_m	Dehn-grenze $R_{p0.2}$	Bruch-dehnung A_{50}	Brinell-härte HBW
Legierungsbezeichnung chemisches Symbol	Werkstoff-Kurzeichen			N/mm ²	N/mm ²	%	Einheiten
EN MC-MgAl9Zn1(A)	GD-MgAl9Zn1	AZ 91	F	200 – 260	140 – 170	1 – 6	65 – 85
EN MC-MgAl6Mn	GD-MgAl6Mn	AM 60	F	190 – 250	120 – 150	4 – 14	55 – 70
EN MC-MgAl12Mn	GD-MgAl2Mn	AM 20	F	150 – 200	80 – 100	8 – 18	40 – 55
EN MC-MgAl4Si	GD-MgAl4Si1	AS 41	F	200 – 250	120 – 150	3 – 12	55 – 80

Tab. 2.15 Mechanische Eigenschaften von Zink-Druckgusslegierungen

DIN EN 17	alt: DIN 1725-2		Farb-kodierung	Zug-festigkeit	Dehn-grenze	Bruch-dehnung	Brinell-härte
	Kurzbezeichnung	Kenn-zeichen		R_m	$R_{p0.2}$	A_{50}	Einheiten
ZP3	Z400	GD-ZnAl4	weiß/gelb	280	200	10	83
ZP5	Z410	GD-ZnAl4Cu1	weiß/schwarz	330	250	5	92

**Abb. 2.46** Zustandsschaubild Magnesium–Aluminium mit dem für Druckguss vorteilhaften Konzentrationsbereich

raum für Kurbelgehäuse, Ölwanne und Deckel verwendet werden.

Die Neigung der Magnesium-Druckgusslegierungen zur interkristallinen Korrosion kann durch verringerte Gehalte an Nickel (< 0,003%), Eisen (< 0,005%) und Kupfer (< 0,015%) weitgehend ausgeschlossen werden. An HP-Legierungen (**High Purity**) wird im Salzsprühnebeltest für die Legierung AZ 91 eine Korrosionsrate bis zu 2 mg/cm² und Tag gemessen. Sie ist damit nur halb so groß wie die Korrosionsrate bei der wichtigsten Aluminium-Umschmelzlegierung EN AC-AlSi8Cu3 (GD-AlSi9Cu3).

Die drei Magnesium-Grundtypen mit Zink, Mangan und Silicium als Legierungselemente zusammen mit Aluminium besitzen eine geringere Festigkeit, Härte und Duktilität als vergleichbare Aluminium-Druckgusslegierungen. Der geringere Elastizitätsmodul von ca. 45.000N/mm² wird im *Leichtbau* durch örtliche Versteifungen und Rippen ausgeglichen.

**Abb. 2.47** Sitzrahmen aus der Magnesium-Druckgusslegierung AM50 (MgAl5Mn). (Quelle: Georg Fischer Automotive AG)

Kokillengusslegierungen

Die Kokillengusslegierungen des Aluminiums unterscheiden sich in ihren Gießeigenschaften und in der chemischen Zusammensetzung nur wenig von den Druck- und Sandgusslegierungen, wie Tab. 2.13 zeigt. Die nah-eutektischen Legierungen mit Silicium und Kupfer sind überwiegend wie die Druckgusslegierungen in Tab. 2.12 zusammengesetzt.

Von besonderer Bedeutung für den Einsatz von Leichtmetall-Kokillenguss ist die Möglichkeit, Kokillengussstücke *nachzubehandeln* durch

- Galvanotechnik und
- Aushärtung.

Beim Druckguss ist das wegen der Blasenbildung durch eingeschlossene Luft nicht möglich. Die sehr glatten und feinkörnig erstarrten Oberflächen gestatten eine *Beschichtung* mit zahlreichen Metallen und in unterschiedlichsten Farbtönen.

Der *Aushärtungseffekt* beruht auf der Ausscheidung von Vorstufen der intermediären Verbindung Mg₂Si aus dem α -Mischkristall nach einer dem Lösungsglühen bei ca. 520 °C folgenden Wärmebehandlung zwischen 125 °C und 175 °C („Aushärten“). Die Festigkeitswerte der Gussstücke, z. B. aus der Legierung G-AlSi12(Cu), lassen sich dadurch nahezu verdoppeln (Kurzzeichen „T6“).

Sandgusslegierungen

Alle Leichtmetalllegierungen lassen sich grundsätzlich auch in Sandformen vergießen (Tab. 2.13). Bei *Sandguss* existieren jedoch zahlreiche nicht genormte Legierungen mit speziellen Gebrauchseigenschaften, z. B. die *Kolbenlegierungen*. Leichtmetallsandguss aus Aluminiumlegierungen kann wie Kokillenguss oberflächlich oder vollständig nachbehandelt werden mittels

- galvanischer Verfahren und
- Aushärtung.

2.3.2.2 Schwermetall-Gusswerkstoffe

Schwermetalle, sog. *Börsenmetalle*, wie z. B. Kupfer, Zink, Zinn, Blei und Nickel, werden an den Metallbörsen gehandelt. Der Preis und die Verfügbarkeit bestimmen die Konkurrenzfähigkeit des Gusswerkstoffs. Die Austauschbarkeit – die *Substitution* – unterschiedlicher metallischer Gusswerkstoffe ist in diesem Fall bei gleichen Gebrauchseigenschaften oft nur eine Frage des Preises.

In Deutschland stehen die erzeugten Gusswerkstoffe in folgendem Preis-Verhältnis:

- Zinklegierungen 1 (praktisch nur als Druckguss vergossen)
- Kupferlegierungen 2
- nur zum Vergleich Alu-Leg. 11.

Messing, Rotguss und Zinnbronze sind die wichtigsten Kupfergusswerkstoffe, die nach allen Gießverfahren vergossen werden. Auf die folgenden Dauerformverfahren entfallen mehr als zwei Drittel der Erzeugung:

- **Kokillenguss (GM)** (bei Leichtmetall-Gusswerkstoffen: **GK**),
- **Schleuderguss (GZ)**,
- **Strangguss (GC)**.

Das Druckgießen, Kurzzeichen „GP“, von Kupferlegierungen auf Kaltkammermaschinen hat noch keine größere Bedeutung gewinnen können. Entsprechend ihrer Wichtigkeit werden von den Schwermetall-Gusswerkstoffen deshalb nur die Zinklegierungen und einige wenige Kupferlegierungen für Kokillen- und Sandguss erläutert.

Zink-Druckgusslegierungen

Die wichtigsten mechanischen Gütwerte der beiden Hauptlegierungen der neuen Norm EN 12844, die auch mit den Schlagzeichen Z400 5 oder GD-ZnAl4 und Z410 oder GD-ZnAl4Cu1 bezeichnet wurden, zeigt Tab. 2.15.

Die neuen Kurzzeichen „ZP3“ und „ZP5“ sind noch gewöhnungsbedürftig. Um im Schmelzbetrieb Verwechslungen zu vermeiden, wird die Vorlegierung als *Massel* mit der Farbkodierung weiß/gelb oder weiß/schwarz gekennzeichnet.

Die aluminiumhaltige Legierung GD-ZnAl4 wird bevorzugt für hochwertige, maßbeständige *Genaugussstücke* eingesetzt. Die kupferhaltige Legierung aus Schrott- und Umschmelzzink (GD-ZnAl4Cu1) dagegen ist billiger und besitzt höhere Festigkeits- und Härtegrade. Beide Druckgusslegierungen enthalten 4 % Aluminium. Sie sind naheutektisch und ausgezeichnet gießbar. Das Eutektikum liegt bei 5 % Aluminium und der eutektischen Temperatur von 380 °C. Ein geringer Magnesiumgehalt von 0,02 bis 0,06 % und streng begrenzte Gehalte für Zinn, Blei und Cadmium machen die Legierung auch bei hoher Luftfeuchtigkeit unempfindlich gegen interkristalline Korrosion.

Die mechanischen Eigenschaften der in Tab. 2.15 aufgeführten Zinklegierungen (ZP3,

Tab. 2.16 Mechanische Eigenschaften der Kupferwerkstoffe Gussmessing, Gussbronze und Rotguss

DIN EN 1982	alt: DIN 1709	Gießverfahren	Zugfestigkeit	Dehnungsgrenze	Bruchdehnung	Brinellhärte
Werkstoff-Kurzzeichen	Werkstoff-Kurzzeichen		$R_{m\text{r}}$, min.	$R_{p0,2}$, min.	A_{50} , min.	HBW, min.
		N/mm ²	N/mm ²	%	Einheiten	
CuZn33Pb2-C	G-CuZn33Pb	GS (Sandguss)	180	70	12	45
CuZn39Pb1Al-C	GK-CuZn37Pb	GM (Kokillenguss)	280	120	10	70
CuSn10-C	G-CuSn10	GC (Strangguss)	280	170	10	80
CuSn5Zn5Pb5-C	G-CuSn5ZnPb	GC (Strangguss)	250	210	13	65

ZP5) wurden an getrennt gegossenen Probestäben mit einer Dichte ρ von $6,7 \text{ kg/dm}^3$ ermittelt. Die Werte streuen in Abhängigkeit von der Wanddicke, der Gestalt und der Gießtechnik z. T. erheblich.

Kupfergusswerkstoffe

Gusswerkstoffe aus Kupferlegierungen lassen sich nach allen Gießverfahren vergießen. Die *Gussmessinge*, Legierungen des Kupfers mit Zink, sind mit ungefähr 50 % die größte Gruppe. Sie werden zu mehr als 90 % in Kokillen und in Sand vergossen. Die Gussteile werden in den meisten Fällen noch spanend bearbeitet, daher enthalten die Legierungen i. Allg. geringe Mengen Blei (0,5 % bis 3,5 %). Dieses Element wird zur besseren Spanbildung zulegiert. Die Hauptlegierung CuZn39PbAl-C (alte Bezeichnung: GK-Ms 60) enthält etwa 2 % Blei.

Armaturen mit Gussmassen unter 5 kg für Wasser, Gas und Dampf in Voll- oder Gemischtkokillen mit Sandkernen bilden den überwiegenden Anteil der Gussstücke. Ein bedeutender Anteil wird als horizontaler Strangguss (GC) zu Halbzeugen mit Rund-, Sechskant-, Vierkantquerschnitt vergossen. Daraus lassen sich preisgünstige Massendrehteile, sog. Fassondrehteile, fertigen. Hohlkörper wie Rohre, Ringe, Büchsen werden in rotierenden Dauerformen als Schleuderguss (GZ) gegossen.

Klassische Gussbronzen sind Kupfer-Zinn-Legierungen, mit 10 % bis 20 % Zinn. Sie besitzen höhere Festigkeiten und bessere Gleiteigenschaften als Messing und sind ausgezeichnet korrosionsbeständig und warmfest. Die Legierung mit 20 % Zinn ist als *Glockenbronze* bekannt. Sie

ist für technische Anwendungen meist zu teuer und zu spröde.

Rotguss ist eine Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierung, in der ein Teil des teuren Zinns durch Zink ersetzt wird. Daraus werden u. a. korrosionsbeständige und verschleißfeste Lager und Getriebe als Kokillen-, Schleuder- und Sandguss gefertigt. Tab. 2.17 zeigt eine Zusammenstellung der mechanischen Eigenschaften der drei wichtigsten Kupfer-Gusswerkstoffe

- Gussmessing,
- Gussbronze und
- Rotguss.

Die Streuung der mechanischen Gütwerte bei den zinnhaltigen Gusswerkstoffen wird durch eine spröde, intermediäre Cu-Sn-Verbindung verursacht, die sich durch ein Homogenisierungsglühen bei 600°C auflösen lässt.

Die *Gussbronzen* – dies sind Cu-Al- und Cu-Mn-Legierungen – sind bei hohen Festigkeiten gegen Seewasser und Salzlösungen beständig und durch geringe Zusätze von Eisen und Nickel aushärtbar (Tab. 2.16).

2.4 Gießbarkeit

Im Begriff *Gießbarkeit* sind eine Reihe von Eigenschaften zusammengefasst, die die Gussqualität entscheidend bestimmen. Für ein „gutes“ Gussstück ist die Zuordnung von

- Gusswerkstoff,
- Form- und Gießverfahren,
- Schmelz- und Erstarrungsbedingungen

und den in der Rohteilzeichnung festgelegten Gebrauchseigenschaften des Gussstückes erforderlich. Vom Gussstück wird in der Regel verlangt:

- Eine saubere, glatte Oberfläche,
- Maßhaltigkeit,
- Freiheit von Lunkern, Einschlüssen und Poren,
- Freiheit von Rissen und Spannungen.

Da diese und weitere Eigenschaften des Gussstücks durch die gießtechnischen Bedingungen beeinflusst werden, fasst man im Begriff Gießbarkeit messbare Einzelkriterien zusammen, denen typische *Gussfehler* am Gussstück zugeordnet werden. Das Schema in Tab. 2.17 zeigt, dass eine besondere Einteilung der Gießeigenschaften nach chemischen oder physikalischen Gesichtspunkten nicht erfolgt. Gießbarkeit ist also ein Sammelbegriff für Gießeigenschaften, die für die Gießereipraxis von Bedeutung sind.

So werden z. B. die Eigenschaften, die das Fließen und Füllen von Schmelzen in Formen beschreiben, unter den Begriffen *Fließ-* und *Formfüllungsvermögen* zusammengefasst.

Alle Vorgänge, die Volumen- oder Längenänderungen an den erstarrenden und erkalteten Gussstücken bewirken, werden mit den Begriffen *Schwindung* (flüssig/fest) oder *Schrumpfung* (fest/fest) beschrieben.

Tab. 2.17 Gießbarkeit: Gießeigenschaften und davon abgeleitete typische Gussfehler

Gießbarkeit	
Gießeigenschaften	Gussfehler
Fließ- und Formfüllungsvermögen	Nichtauslaufen, Kaltschweißen, Lunker
Schwindung, Schrumpfung	Lunker, Kaltrisse, nicht maßhaltig
Warmrissneigung	Warmrisse, Lunker
Gasaufnahme	Gasporosität, Schwammgefüge
Penetrationen	Rauigkeiten, Schülpen »Rattenschwänze«
Seigerungen	Nicht maßhaltig bearbeitbar, Korrosion

Warmrisse sind während der Erstarrung auftretende Werkstofftrennungen, die durch niedrigschmelzende Bestandteile entstehen. Zu den Gießeigenschaften der Schmelzen gehört auch die Neigung, Gase aufzunehmen („Gasaufnahme“). Das unerwünschte Verhalten zahlreicher Gusswerkstoffe, sich bei der Erstarrung zu entmischen, wird als *Seigerung* bezeichnet (siehe Abschn. 2.4.6).

Unter *Penetration* versteht man das Eindringen von Schmelze in oberflächennahe Schichten des Formstoffs, der bei der Bildung von *Schülpen* in charakteristischer Weise aus der Formstoffoberfläche herausbricht und bei linearer Ausdehnung als *Rattenschwanz* bezeichnet wird.

2.4.1 Fließ- und Formfüllungsvermögen

Das Fließvermögen einer Schmelze kann als deren Lauflänge in einem beliebig geformten Kanal gekennzeichnet/gemessen werden. Man hat verschiedene Probeformen vorgeschlagen, die sich unterscheiden durch

- konstante Laufquerschnitte oder
- variable Laufquerschnitte wie Keil oder Meniskuspitzen, Gitter-, Bogen- oder Harfenprofile.

Formen mit konstantem Laufquerschnitt sind als *Gießspirale* aufgerollt mit Mitteleinguss oder mit Außeneinguss als Maskenform hergestellt worden. Genauere Messungen sind in *Stabkokillen* möglich. Dabei kann man auch die Wiedergabe von Konturen und Kanten, also die fehlerfreie Formfüllung messen. Bei komplizierteren Gussstücken ist die Schmelzeigenschaft „*Formfüllungsvermögen*“ oft wichtiger als das Fließvermögen.

Dies belegen auch historische Beispiele: So steht beispielsweise die 3,2 m hohe Statue des Perseus von Benvenuto Cellini in der Loggia die Lanzi in Florenz. Die Zehen dieser Statue sind nicht mit abgegossen, da es an Formfüllungsvermögen mangelte.

Die Gießspirale mit Mitteleinguss nach *Sipp* zeigt Abb. 2.48. Die Schmelze wird über einen Siebkern ① mit konstanter Druckhöhe eingegossen. Die *Auslauflänge* ist ein Maß für das Fließvermögen. Die Anzahl der konturenscharf abgebildeten *Warzen* ② ist ein Maß für das Formfüllungsvermögen und wird in Prozent der Auslauflänge angegeben.

Untersuchungen mit der Gießspirale haben gezeigt, dass das Fließ- und Formfüllungsvermögen von zahlreichen legierungsspezifischen Einflüssen bestimmt wird:

- Gießtemperatur,
- Kristallisationswärme,
- Wärmeinhalt der Schmelze,

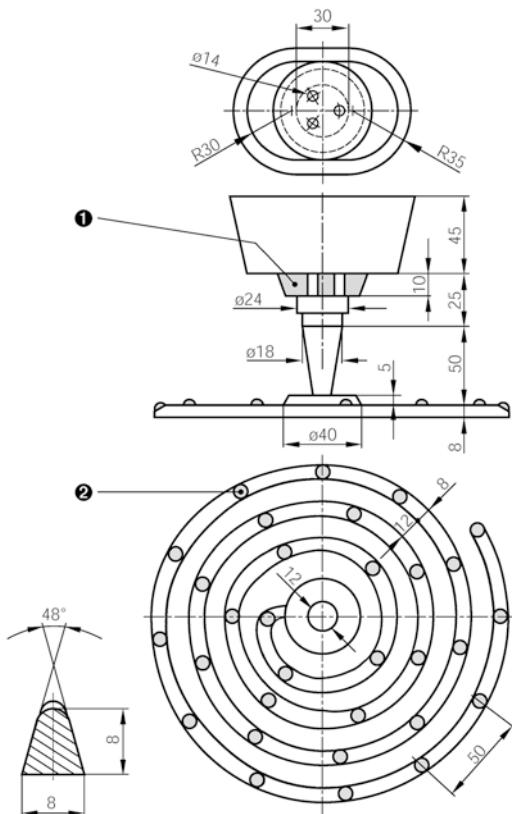


Abb. 2.48 Spiralprobe nach Sipp zur Bestimmung des Formfüllungsvermögens; ①: Einlaufsieb aus Kernsand mit drei Öffnungen von 6 mm Durchmesser; ②: 30 Warzen im Abstand von 50 mm

- Zusammensetzung der Schmelze,
- Erstarrungstyp und -intervall,
- Strömungsverhältnisse,
- Druckhöhe,
- Wärmeleitfähigkeit der Form und
- Benetzbarkeit der Form.

Das Formfüllungsvermögen von Gusseisen mit Lamellengrafit wird verbessert mit

- steigender Überhitzung,
- zunehmendem Kohlenstoffgehalt,
- zunehmendem Phosphorgehalt und
- kleinerem Erstarrungsintervall.

Untersuchungen an *Al-Si-Legierungen* mit dem scharfkantigen Spezialprofil von *Patterson* und *Brand* sind in Abb. 2.49 zusammengestellt. Die Spirallänge ist als Maß des Fließvermögens und das Formfüllungsvermögen für Siliciumgehalte bis 25 % gemessen worden. Das gute Gießverhalten der nah-eutektischen Legierungen ist deutlich erkennbar. Das geringere Fließ- und Formfüllungsvermögen ab etwa 18 % Si wird durch dendritische Kristallisation verursacht, die das ungehinderte Nachfließen der Schmelze stört.

In den Gießereibetrieben werden Fließ- und Formfüllungsvermögen nicht an Proben ermittelt. Man benutzt dazu bei Seriengießverfahren zweckmäßiger die Erfahrungen aus der laufenden Gussproduktion. Ein optimales Formfüllungsvermögen lässt sich einstellen durch Ändern von

- *Gießtemperatur*,
- *Formtemperatur*,
- *Formstoffsystem* und
- *Anschnittsystem*.

Denn *Kaltgusszonen* und *Kaltschweißstellen* an Gussteilen führen zu Ausschuss. Eine Beeinflussung des Fließvermögens durch Legierungselemente ist meist nicht möglich, da die Gebrauchseigenschaften der Gussstücke und die Zusammensetzung mit der Rohteilzeichnung vorgegeben sind.

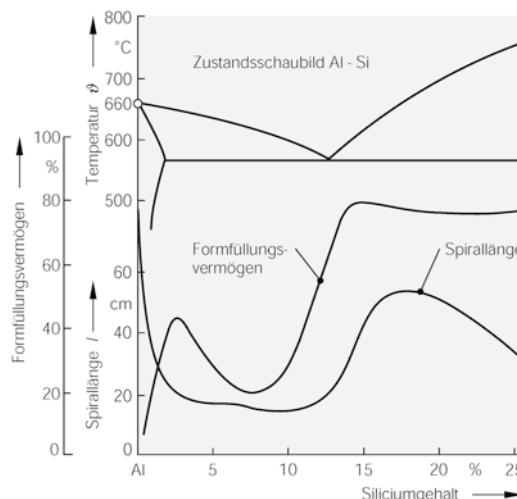


Abb. 2.49 Fließ- und Formfüllungsvermögen von Aluminium-Silicium-Legierungen. (Nach Patterson und Brand)

2.4.2 Schwindung (Schrumpfung)

Beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand ändern sich sprunghaft viele Eigenschaften der Legierungen. Das spezifische Volumen zahlreicher Gusswerkstoffe verkleinert sich beim Abkühlen von der Gießtemperatur ϑ_G auf die Raumtemperatur ϑ_R zunächst im flüssigen Zustand, Abb. 2.50. Der Volumensprung während der Erstarrung im Erstarrungsintervall $\Delta\vartheta$ ist besonders groß. Bei eutektischen Legierungen und reinen Metallen erfolgt diese *Kontraktion* bei konstanter Erstarrungstemperatur ϑ_S . Auch das Volumen des festen Gussstücks nimmt bis zum Erkalten auf Raumtemperatur weiter ab, es schrumpft meist nicht linear. Das haben Messungen an stark schwindungsbehinderten Gussstücken (z. B. Nocken- oder Kurbelwellen) nach unterschiedlich hohen Auspacktemperaturen gezeigt.

Es bedeuten:

- V_{fl} flüssige Schwindung,
- V_E Erstarrungsschwindung,
- V_K kubische Schwindung oder Schrumpfung,

$$V_G = V_{fl} + V_E + V_K \quad \text{gesamte Volumenkontraktion.}$$

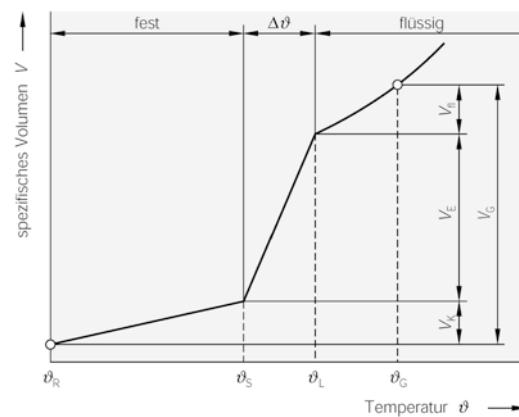


Abb. 2.50 Abhängigkeit des spezifischen Volumens von Gusswerkstoffen von der Temperatur: Lunkerung V_G als Summe von kubischer Schwindung V_K , flüssiger V_{fl} und Erstarrungsschwindung V_E , schematisch. $\Delta\vartheta$ = Erstarrungsintervall

Die Größe V_G wird als *Lunkerung* bezeichnet. Die gesamte Volumenkontraktion in Prozent vom Formvolumen beträgt z. B. bei

- Aluminium-Silicium-Legierungen ca. 9 %,
- Messinglegierungen etwa 13 % und
- Stahlguss etwa 13 %.

Von besonderer Bedeutung für den Gießereibetrieb ist die Verteilung der verschiedenen Schwindungsanteile, die technische Volumenkontraktion im Gussstück. Sie kann durch Lunkerproben ermittelt werden. Eine anschauliche *Lunkerprobe* ist die Quaderprobe nach Abb. 2.51. Bei Gießtemperatur ϑ_G ist der Formenhohlraum vollständig mit Schmelze gefüllt. Durch den Füllvorgang hat sich die Deckelfläche infolge der Wärmestrahlung stärker erwärmt. Die Erstarrung beginnt zuerst unten und an den Seiten. Hierbei kann zunächst Schmelze von oben nachfließen und bildet den *Außenlunker* (1). Wenn die Erstarrungsfronten weiter zur Mitte vorgedrungen sind und keine Schmelze von oben nachfließen kann, werden *Innenlunker* (2) gebildet. Besonders kleine Innenlunker bei exogenem Erstarrungstyp heißen *Mikrolunker* (3). Die feste Randschale beginnt ebenfalls zu schrumpfen und löst sich dabei oben und seitlich von der Formstoffoberfläche: Es tritt die *kubische Schwindung* (4) ein. Glatte,

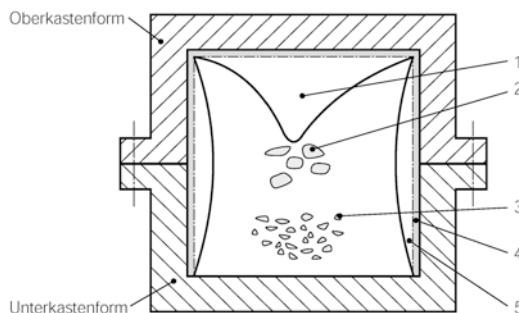


Abb. 2.51 Lunkerarten an Quaderproben: 1 Außenlunker, 2 Innenlunker, 3 Mikrolunker, 4 kubische Schwindung und 5 Einfallstellen

ebene Flächen, konkav nach innen gezogen, werden *Einfallstellen* (5) genannt.

Gussstücke mit Lunkern sind Ausschuss, da diese

- die Festigkeit vermindern sowie zu einem
- nicht maßhaltigen und
- nicht druckdichten Guss

führen. Deshalb sollten Konstrukteure und Gießer zusammenarbeiten und eine Lösung finden, um die Volumenkontraktion zu vermeiden. Der Ausgleich im flüssigen Zustand erfolgt durch Füllkörper, die *Speiser*, *Steiger* oder *Druckmasseln* genannt werden und den Anteil der flüssigen Schwindung V_f und der Erstarrungsschwindung V_E durch die Wirkung kommunizierender Röhren dem Gussstück nachspeisen.

Der Anteil der kubischen Schwindung im festen Zustand wird durch Aufmaße am Modell, den sog. Schwindmaßen, ausgeglichen.

Die *gelenkte Erstarrung* eines Keils durch einen Speiser ist in Abb. 2.52 dargestellt. Der Speiser hat die Aufgabe, das Nachspeisen des Gussstücks zu ermöglichen. Dazu muss er richtig bemessen und angeordnet werden. Er darf erst erstarren, wenn das Gussstück bereits fest ist, d. h., er soll am dicksten Querschnitt (nach Möglichkeit in der Formteilung) angebracht sein.

Eine einfache Wanddicken- und Speiserbemessung ist als *Heuverssche Kreismethode* bekannt. Ausgehend von der geringsten Wanddicke bei A_1 (Abb. 2.52) werden sich berührende Kreise in den Wandquerschnitt eingezeichnet,

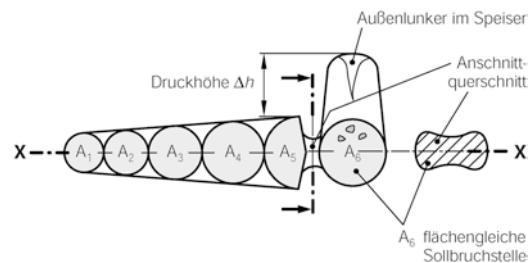


Abb. 2.52 Gelenkte Erstarrung am Keil: Der Speiser gleicht das Volumendefizit durch einen Außenlunker aus und stellt die Druckhöhe Δh zum Nachspeisen zur Verfügung

deren Kreisflächen sich um einen konstanten Faktor k_H bis zum Speiser A_6 vergrößern. Tab. 2.18 gibt die für Nass- und Sandguss zum Dichtspeisen bewährten *Heuversfaktoren* k_H für Eisengusswerkstoffe an. Man erkennt, dass mit größer werdendem Heuversfaktor der Aufwand zum Dichtspeisen zunimmt, d. h. die wirksame Speisungslänge abnimmt.

Die Verbindung zwischen Speiser und Gussstück, der *Anschnittquerschnitt*, muss so ausgebildet sein, dass der Speiser durch Abschlagen, Sägen, Trennen oder Brennschneiden relativ einfach zu entfernen ist. Ein effektiver Speiser zeigt nach dem Guss einen tiefen Außenlunker und Einfallstellen. In der Speiserhöhe muss eine ausreichende Druckhöhe Δh zum Gussstück als treibende Kraft zum Speisen verfügbar sein.

Nicht zweckmäßig ist das Eingießen der Schmelze direkt in den Speiser. Größere und komplizierte Gussstücke haben meist mehrere Speiser, die von einem zentralen Einguss über Stangen gespeist werden. Abb. 2.53 zeigt die Elemente des Anschnittsystems für Sandguss in Formkästen. Da Gießzapfen und Stangen nur

Tab. 2.18 Heuversfaktoren k_H von Eisengusswerkstoffen für Nass- und Sandguss

Eisengusswerkstoff	Heuversfaktor k_H
Gusseisen, lamellar	1,0 bis 1,1
Gusseisen, globular	1,1 bis 1,2
Gusseisen, vermicular	1,1 bis 1,2
Temperguss, weiß und schwarz	1,2 bis 1,3
Stahlguss	1,3 bis 1,5

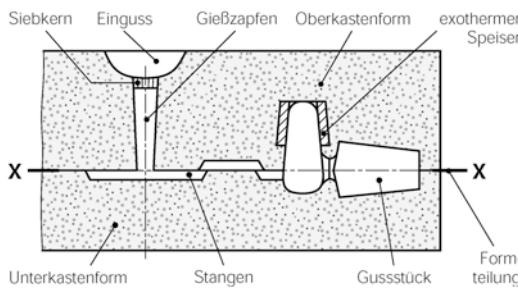


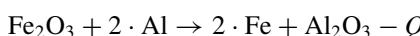
Abb. 2.53 Anschnittsystem, bestehend aus Einguss mit Siebkern und Gießzapfen, Stangen und exothermem Speiser für eine horizontal geteilte Sandgussform

wenig verkleinert werden können, versucht man, das wirksame Speiservolumen durch verzögerte Erstarrung im Speiser zu erhöhen. Nach der Formel von Chvorinov ist die Erstarrungszeit t eines Gussstückes in der Form proportional dem Quadrat seines Erstarrungsmoduls M :

$$t = k_{\text{Ch}} \cdot M^2 = k_{\text{Ch}} \cdot \left(\frac{\text{Volumen}}{\text{Oberfläche}} \right) \text{ in min.}$$

Der *Erstarrungsmodul* M in cm ist das Verhältnis von Gussstückvolumen in cm^3 zu wärmeabführender Gussoberfläche in cm^2 . Die *Chvorinovsche Konstante* k_{Ch} ist werkstoff-, temperatur- und formstoffabhängig. Die einfache *Heuverssche Kreismethode* ist eine grobe Näherung der Chvorinovschen Formel für ebene Erstarrungsprobleme. Die *Modultheorie* erlaubt aber eine verfeinerte mathematische Berechnung des Erstarrungsverhaltens und der Speiserbemessung von Gussstücken. Sie wurde besonders von Włodawer an Stahlguss entwickelt.

Die Erstarrungszeit des Speisers in Abb. 2.53 kann mithilfe exothermer, also wärmeabgebender Stoffe verlängert werden, ohne das Ausbringen zu verschlechtern. Mit der Goldschmidtschen Thermitreaktion



lässt sich ein kleinerer Speiser durch die Reaktionswärme $Q = 760 \text{ kJ}$ aufheizen, er kann so länger nachspeisen.

Die kubische Schwindung oder Schrumpfung an Gussstücken muss durch ein Aufmaß am Mo-

dell – dieses entspricht dem linearen *Schwindmaß* – ausgeglichen werden. In Tab. 2.19 sind die Schwindmaße nach DIN EN 12890 für einige Gusswerkstoffe zusammengestellt. Sie können nur als Anhaltswerte dienen; denn Schwindmaße sind keine Werkstoffkonstanten, sondern u. a. abhängig von:

- *Erstarrungsmodul M des Gussstückes,*
- *Wärmeleitfähigkeit des Formstoffs,*
- *Wärmeinhalt des Gusswerkstoffs.*

Bei Serienguss werden Schwindmaße durch *Probeabgüsse* ermittelt. Anschließend wird dann das Modell geändert. Bei Großguss und Einzelfertigung müssen Erfahrungen mit ähnlichen Stücken berücksichtigt werden. Der Erstarrungsablauf und das Entstehen unzulässiger Eigenspannungen und Verformungen in Gussstücken lassen sich durch Softwarepakete zur *Erstarrungssimulation* berechnen.

Wie schwierig das Problem Schwindung zu lösen ist, soll an einigen Gusseisensorten gezeigt werden. Gusseisen unterscheidet sich von anderen Gusswerkstoffen vor allem dadurch, dass während des Erstarrens Kohlenstoff als Lammellen- oder Kugelgrafit ausgeschieden wird. Daher misst man bei diesen Legierungen je nach ausgeschiedener Grafitmenge keine oder nur eine geringe Schwindung. Manche Gusseisenarten dehnen sich beim Erstarren sogar aus.

Tab. 2.19 Lineare Schwindmaße einiger Gusswerkstoffe nach DIN EN 12890 mit Ergänzungen

Werkstoff	lineares Schwindmaß in Prozent		
	Sand	Kokille	Druckguss
Stahlguss	1,5 bis 2,5		
Temperguss, weiß	0,0 bis 1,0		
Gusseisen, lamellar	0,7 bis 1,3		
Gusseisen, globular	0,8 bis 1,6		
Al-Legierungen	1,5 bis 2,0		
AlSi	0,9 bis 1,1	0,6 bis 0,8	0,5 bis 0,7
AlMg	1,0 bis 1,5	0,5 bis 0,9	0,6 bis 1,0
MgAl-Legierungen	1,0 bis 1,4	0,8 bis 1,2	0,8 bis 1,2
Cu-Legierungen	1,8 bis 2,2	1,5 bis 1,9	
CuSn	1,2 bis 1,8	1,0 bis 1,4	
CuZn	0,8 bis 1,6	0,8 bis 1,2	0,7 bis 1,2
CuAl	1,8 bis 2,2	1,4 bis 2,0	
ZnAl	1,0 bis 1,5	0,6 bis 1,0	0,4 bis 0,6

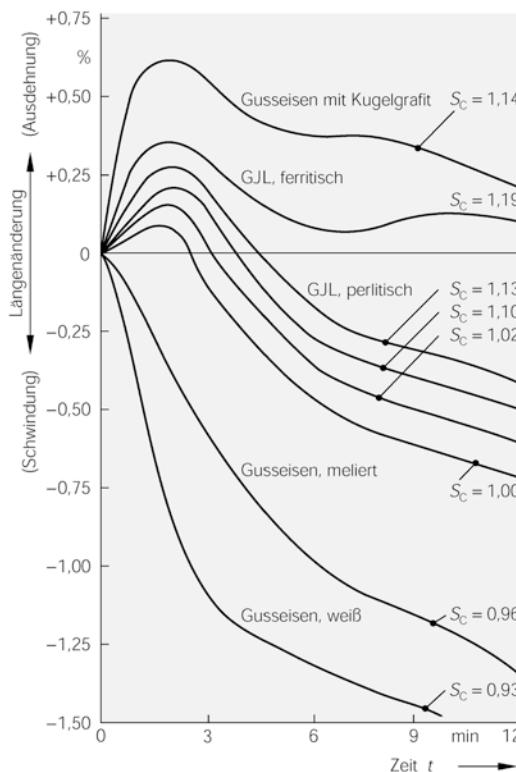


Abb. 2.54 Freie lineare Schwindung von Gusseisen mit Lamellengrafit GJL und Gusseisen mit Kugelgraft GJS in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad. S_C (Nach Vondrak)

Man sagt, *Gusseisen ist selbstspeisend*, und bezeichnet damit die Fähigkeit, Gussstücke ohne Speiser mit hohem Ausbringen lunkerfrei zu gießen. In Abb. 2.54 sind Schwindungsmesswerte von Gusseisensorten mit verschiedenem Sättigungsgrad S_C (Abschn. 2.3.1.1) über der Erstarrungszeit aufgetragen. Da sich das Volumen mancher Gusseisensorten beim Erstarren kaum verringert, können die für das Nachfließen der Schmelze erforderlichen Speiser kleiner und ihre Anzahl geringer sein. Gusseisen mit Kugelgraft GJS mit $S_C = 1,14$ und ferritisches, lamellares Gusseisen GJL treiben in der Form, d. h. erstarren unter Ausdehnung. Die perlitischen Sorten besitzen geringe Schwindung. Der graffitfreie *Hartguss* (weißes Gusseisen) schwindet in großem Maß.

2.4.3 Warmrissneigung

Risse, die zwischen der Liquidus- und der Solidustemperatur auftreten, werden *Warmrisse* genannt. Sie bilden sich kurz vor dem Ende der Erstarrung. Der Unterschied zu den Kaltrissen kann bei frischer Bruchfläche an ihrem Aussehen erkannt werden:

- **Warmrisse:** interkristallin, Dendriten, Anlauffarben, Zunder;
- **Kaltrisse:** transkristallin, feinkörnig, blank.

Beim Erstarren des Gusswerkstoffs in der Form wird bereits die erste kristalline Randschale durch die Erstarrungsschwindung und die Schrumpfung beansprucht. Wenn das Gussstück sehr unterschiedliche Wanddicken mit ungünstig gestalteten Übergängen aufweist, oder wenn Form und Kerne das freie Schwinden des Gussstücks behindern, können diese Spannungen die *niedrige Warmstreckgrenze* des Gusswerkstoffs überschreiten und so zu Werkstofftrennungen führen. Die noch vorhandene geringe Menge Restschmelze umgibt die primär erstarrten Körner mit einem dünnen Film, der bei geringsten Beanspruchungen „reißt“. *Korngrenzenfilme* können auch niedrigschmelzende Verbindungen (bzw. Eutektika) sein, z. B. Eisensulfid (FeS) bei Stahlguss und Stahl.

Die Warmrissneigung wird grundsätzlich mit zunehmendem Erstarrungsintervall größer. Die Gusswerkstoffe sind unterschiedlich warmrissempfindlich. Bekannt ist die schwierige rissfreie Primärerstarrung von Stahlguss. Auch Eisenwerkstoffe, die überwiegend graffitfrei und ledeburitisch zu *Temperhartguss* oder *Kokillengusseisen* erstarren, sind warmrissempfindlich.

Auch die naheutektischen Druck- und Kokillengusslegierungen des Aluminiums, Magnesiums und des Kupfers neigen zur Bildung von Warmrissen.

Die Formstoffe beeinflussen durch ihre Wärmeableitung und ihre Festigkeit erheblich die Warmrissbildung. Bei den Dauerformverfahren können während der Erstarrung besonders

- Druckgießformen und
- Voll- und Gemischtkokillen

den durch das Schwinden und Schrumpfen des Gusswerkstoffs verursachten Spannungen nur elastisch ausweichen. Eine möglichst gleichbleibende Temperatur in der Dauerform und ein möglichst frühes Entformen sind bewährte Vorbeugungsmaßnahmen gegen Warmrisse.

Die Warmrissneigung von Gusswerkstoffen kann mit verschiedenen Proben wie Rippenkreuzen, Spannungsgittern u. a. festgestellt werden. Abb. 2.55 zeigt einen Schnitt durch ein *Rippenkreuz*. Unter der Wirkung der Schwindungskräfte treten Warmrisse vor allem an Querschnittsübergängen auf, die hier nicht gespeist werden. Infolge des Wärmestaus in den Sandkanten erstarren die Knotenpunkte zuletzt unter Lunkerbildung. Lage und Form der hier entstehenden Lunker erleichtern die Warmrissbildung. Tritt bei der Warmrissbildung ein Lunker auf, so kann der Luftdruck den Warmriss aufweiten, da im Lunker ein *Vakuum* herrscht.

Die Warmrissbildung an einem ausgesteiften Deckel oder einer Platte zeigt Abb. 2.56. Wenn die Rippendicke überdimensioniert ist und die Erstarrungsfront stängelförmig entgegen dem Wärmefluss zur thermischen Mitte hin wächst,

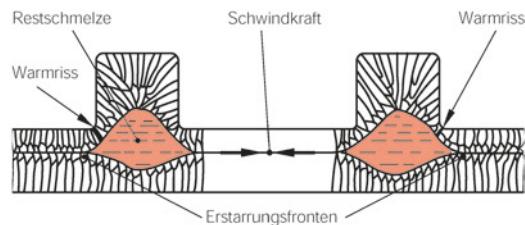


Abb. 2.56 Warmrissbildung bei Stängelkristallisation unter dem Einfluss von Schwindungskräften

können leicht Warmrisse durch den Schwindwiderstand des Formstoffs in den Rundungen entstehen. Durch Umgestaltung der Rippen unter Anwendung der *Heuverschen Kreismethode* kann man die Warmrissneigung vermindern.

In Serienfertigungen werden zum Verhindern der Warmrissneigung *Kühleisen* als örtlich begrenzte Kokillen mit eingefügt, wie dies Abb. 2.57 zeigt. Das Angießen von *Reißrippen*, sog. Federn, die statt des Gussstücks die Warmrisse aufnehmen, ist teuer, weil dies mit hohen Putzkosten verbunden ist. Bei einigen dünnwandigen Gehäusen, z. B. bei Pkw-Hinterachsgehäusen, können die Federn am bearbeiteten, einbaufertigen Gussstück verbleiben. Die Reißrippen vergrößern die Oberfläche für den Wärmeübergang. Sie werden deshalb auch als *Kühlrippen* bezeichnet.

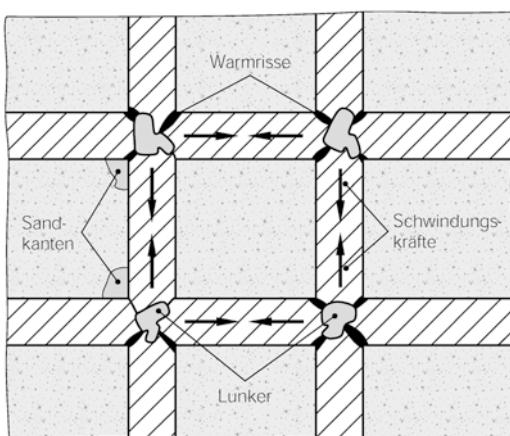


Abb. 2.55 Warmrisse und Lunker am Rippenkreuz: Schwindungskräfte beanspruchen geschwächte Knotenpunkte, die durch den Sandkanteneffekt langsamer als die Stege abkühlen

2.4.4 Gasaufnahme

Gusswerkstoffe nehmen beim Schmelzen, Warmhalten, Vergießen, Erstarren und Glühen Gase auf. Die Löslichkeit der zweiatomigen Gase, die in der Luft enthalten sind, sowie die des Wasserdampfs, Chlors und Kohlenoxids (O_2 , N_2 , H_2 , Cl_2 ,

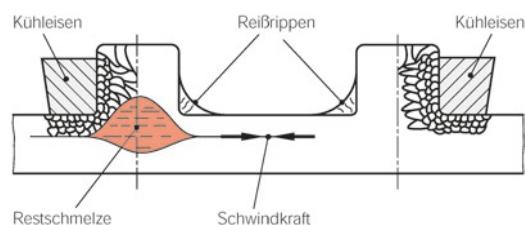


Abb. 2.57 Anordnung von Reißrippen (Federn) und Kühleisen

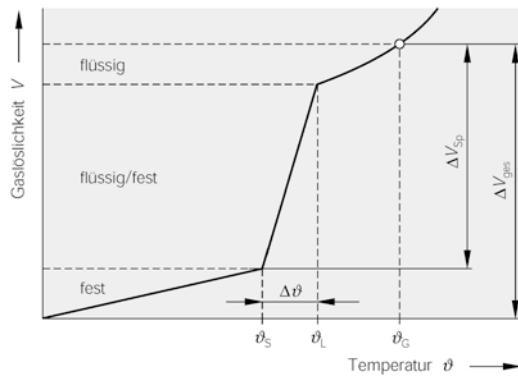


Abb. 2.58 Gaslöslichkeit metallischer Werkstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur, schematisch. $\Delta\vartheta$ = Erstarrungsintervall

CO) ist sehr temperatur- und druckabhängig. Abb. 2.58 zeigt schematisch die Abhängigkeit der *Gaslöslichkeit* metallischer Werkstoffe von der Temperatur. Schmelzen bei der Gießtemperatur ϑ_G können große Gasmengen gelöst enthalten. Bei der Abkühlung aus dem flüssigen Zustand nimmt die Gaslöslichkeit nach Unterschreiten der Liquidus- (ϑ_L) und der Solidustemperatur (ϑ_S) sprunghaft ab. Auch im festen Zustand verringert sich die Gaslöslichkeit messbar.

Die in Gussstücken ausgeschiedenen Gase führen zur Bildung von Gussfehlern in Form von *Gasblasen* und *Gaslunkern*. Im Speiser kann nur ein Teil ΔV_{sp} der in der Schmelze gelösten Gasmenge ΔV_{ges} ausgeschieden werden (Abb. 2.58). Kleine Gasblasen, die nicht oder nur langsam in der erstarrenden Schmelze aufsteigen können, werden in der Erstarrungsfront eingeschlossen und verursachen die unerwünschten Mikroporen. Man nennt Gussgefüge mit Mikro-Porositäten auch *Schwammlunker*. Dieser Fehler ist schwer feststellbar. Er führt zu Ausschuss, wenn das Gussstück druckdicht sein muss.

Bei Dauerformverfahren ist die Erstarrungszeit oft so kurz, dass sich größere Gasmengen nicht ausscheiden können. Allgemein gilt, dass die Gasausscheidung in der Form nicht nur wegen der Gasblasen schädlich ist, sondern weil zusätzlich das Nachspeisen der Erstarrungsfronten vom Speiser aus behindert wird.

Der Einfluss des Drucks p auf die im Metall gelöste Gasmenge V (= Gasvolumen) für

zweiatomige Gase definiert *Sieverts* nach der Beziehung

$$V = K_s \cdot \sqrt{p}.$$

Hierin bedeuten: V Gaslöslichkeit, p Druck des Gases im Metall und K_s eine von der Gasart und der Legierung abhängige Konstante.

Nach dieser Beziehung lässt sich die Gasausscheidung durch Anwendung niedrigster Drücke vor dem Vergießen (Vakuumbehandlung) wirksam verstärken, d. h. der Gasgehalt erheblich verringern.

Beispiel:

Eine Schmelze wird bei Gießtemperatur unter Normaldruck p_1 vergossen. Eine zweite Schmelze gleicher Zusammensetzung wird vorher bei $p_2 = 0,04$ bar *vakumentgast*. In welchem Verhältnis stehen die Gasvolumina $V_{1\text{Gas}}$ und $V_{2\text{Gas}}$ in den Schmelzen zu einander?

$$\frac{V_{1\text{Gas}}}{V_{2\text{Gas}}} = \frac{\sqrt{p_1}}{\sqrt{p_2}} = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{0,04}} = \frac{1}{0,2} = \frac{5}{1}.$$

Die im Erstarrungsintervall freiwerdende Hauptgasmenge lässt sich mittels *Vakuumgießen* entfernen. Dieses Verfahren konnte sich aber bei Massengussstücken in verlorenen Formen oder Dauerformen noch nicht durchsetzen. Bei Druckguss in Dauerformen aus Stahl lasten große hydraulische Drücke auf den erstarrenden Schmelzen und verhindern die Bildung größerer, aufsteigender Gasblasen.

Die unterdrückte Gasausscheidung beim Druckgießen wird durch thermische Nachbehandlungsverfahren wie Glühen, Aushärten, galvanische Oberflächenbehandlungen u. a. aufgehoben und führt zu charakteristischen Fehlern. Schmelzschweißen an Bauteilen aus Druckguss ist wegen der sich ausdehnenden Gasblasen nicht porenfrei möglich.

Die Maßnahmen zum Verhindern von Gaslunkern in Gussstücken lassen sich wie folgt gliedern:

- Vorbeugende Maßnahmen gegen Gasaufnahme während des Schmelzens, Warmhalte und Vergießens, wie z. B.
 - Schutzabdeckungen durch Schlacken, Salze,
 - Schutzgase,

- Vakuumschmelzen, -entgasen und gießen.
- Maßnahmen zum Entfernen von Gasen aus der Schmelze vor dem Vergießen durch spezielle Gießmaßnahmen und pfannenmetallurgische Reaktionen, wie z. B.
 - Sauerstoffentzug durch Desoxidation mit Aluminium oder Silicium,
 - Wasserstoffentzug durch Spülen mit Chlor abspaltenden Verbindungen.
- Maßnahmen während der Erstarrung, z. B.
 - Druckgießen, Schleudergießen.

2.4.5 Penetrationen

Penetrieren heißt Eindringen der Gusswerkstoffe in oberflächennahe Formstoffpartien.

Diese Erscheinung wird bei Formverfahren mit verlorenen Formen durch bestimmte Fachausdrücke gekennzeichnet, z. B.

- raue Oberflächen,
- Vererzung, Anbrennungen,
- Rattenschwänze,
- Schülpen.

Da sich gute Formstoffe von metallischen Schmelzen nicht benetzen lassen, kann durch Bestimmen des *Randwinkels* Θ wie in Abb. 2.59 die Eignung eines Formstoffs für gießtechnische Zwecke ermittelt werden. Randwinkel von etwa 180° haben z. B. Sand, Quarz, Zirconium-Sand, Lehm, Ton, Grafit.

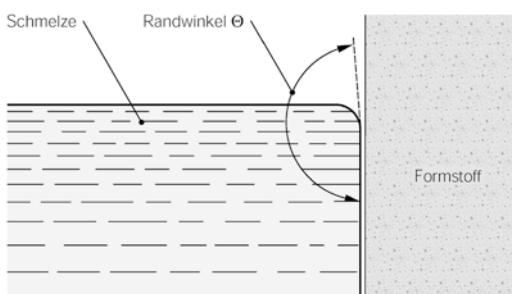


Abb. 2.59 Randwinkel Θ eines idealen Formstoffs

Thermisch besonders hoch beanspruchte Formstoffpartien oder Kühleisen müssen zusätzlich mit dünnen Überzügen – sog. *Schlichten* – gegen Benetzen durch den Gusswerkstoff geschützt werden. Schlichten bestehen aus nicht benetzbarer Stoffen, wie z. B. Grafit, Ruß, Quarz oder Zirconiummehl, die in Wasser, Alkohol oder anderen Flüssigkeiten fein verteilt sind.

Eine alkoholische, flüssige (lackähnliche) Schlichte lässt sich durch Tauchen oder Sprühen auf der Form- oder Kernpartie oder dem Kühleisen verteilen. Nach dem Abflammen ist die Beschichtung sofort gießfertig.

Raue Oberflächen sind Vorstufen für angebrannte oder vererzte Gussstücke, bei denen Formstoff und eingedrungene Schmelze an der Oberfläche verschweißt sind.

Auch mit guten Putzmaschinen gelingt es nicht, diese Fehler restlos zu entfernen. Die Gussstücke sind außerdem auch nicht maßhaltig.

An Formstoffen und Kernen, die beim Gießen von der einfließenden oder aufsteigenden Schmelze aufgeheizt oder angestrahlt wurden, entstehen *Quarzausdehnungsfehler* in Form von Rissen oder flächigen Abplatzungen. Wegen der nicht geraden Rissform und des schuppigen Aussehens nennt man sie *Rattenschwänze*. *Schülpen* oder *Warten* heißen die flächenartigen Fehlererscheinungen.

Auch bei den Dauerformverfahren (Kokillen-, Druck- oder Schleuderguss) können Oberflächenfehler an Gussstücken entstehen. *Brandrisse* breiten sich netzförmig an den thermisch und mechanisch hoch beanspruchten Teilen der Kokille aus, bilden sich auf den Gussstücken ab und erschweren das Entformen. Kleine Risse in den Kokillen können zunächst durch Zuhämmern oder Verstemmen nachgearbeitet werden. Durch Einbringen von Schlichten wird die Rissgefahr herabgesetzt oder bereits vorhandene kleinere Risse „zugeschlichtet“.

2.4.6 Seigerungen

Seigerungen sind Entmischungen der Legierungselemente im Gussstück mit vom Gusswerkstoff und vom Gießverfahren abhängigen, typischen Konzentrationsunterschieden. Sie ent-

stehen bei der Erstarrung durch beschleunigtes Abkühlen, d. h. beim Abweichen vom Gleichgewichtszustand.

Bei der *Kristallseigerung* entstehen unterschiedlich zusammengesetzte Körner. Hiervon ist die *Blockseigerung* zu unterscheiden, die den gesamten Querschnitt erfasst. Verunreinigungen oder unerwünschte (niedrigschmelzende) Verbindungen reichern sich in der Restschmelze an und können so die Warmrissbildung begünstigen. Großgussstücke aus legiertem Stahlguss und NE-Metallguss verlieren dadurch z. B. ihre *Korrosionsbeständigkeit* und lassen sich außerdem schlechter bearbeiten und schweißen. Die Fehlererscheinung wird durch große Erstarrungsintervalle, hohe Gießtemperaturen, große Wanddicken und damit geringe Abkühlgeschwindigkeiten begünstigt, z. B. bei Trockenguss.

Ein Homogenisieren von Kristallseigerungen und Zonenmischkristallen ist durch Diffusionsglühen möglich. Die hohen Glühtemperaturen und langen Haltezeiten führen aber meistens zum *Verzug* der Gussstücke und zur *Grobkornbildung*.

Dichteunterschiede in den erstarrnden Kristallarten verursachen eine weitere Seigerungsform, die *Schwereiseigerung*. Dieser Fehler tritt bei übereutektischem Guss Eisen mit Lamellen- und Kugelgraphit auf. Die primär erstarrenden Graphikristalle (als Garschaumgraphit oder als Sphärolithen bezeichnet) schwimmen in der eutektischen Restschmelze z. T. auf. Die Abb. 2.60 zeigt ein liegend gegossenes, geschnittenes Kurbelwellenhauptlager, das durch die aufgeschwommenen Sphärolithen bei der späteren spanenden Bearbeitung infolge schwankender Schnittkräfte

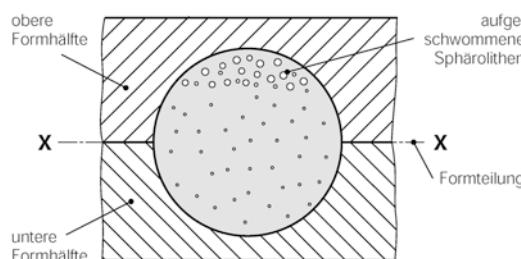


Abb. 2.60 Seigerungen als Folge der Schwerkraft bei dickwandigem Gusseisen mit Kugelgraphit

- Folge unterschiedlicher Oberflächenhärten – nicht rund wird.

2.4.7 Fehlerzusammenstellung bei Sandguss

Die bei Sandguss häufig vorkommenden und an der Oberfläche sichtbaren Gussfehler sind in Abb. 2.61 lagerichtig gekennzeichnet. Loser *Sand* und *Schlacke* sind leichter als Gusseisen und befinden sich deshalb bevorzugt an dickeren Wänden in der Oberkastenformhälfte des Gussstückes. Ungleiche Wanddicken von Bohrungen, die durch einen Kern vorgegossen werden, entstehen durch *Kernversatz*. Teilungsversatz verursacht einen dicken *Teilungsgrat* und meistens auch *Druckstellen*. Die Form wird beim Zulegen bevorzugt in der Teilung auch durch den Kern eingedrückt.

Weit in die Formhälfte hineinragende Wände sind „*getrieben*“, weil der Formstoff dort nicht ausreichend stark verdichtet wurde. Durch zu schwach gekerbte Anschnittquerschnitte brechen beim Abschlagen der Speiser Teile des Gussstückes mit heraus. An weit von den Angüssen entfernten Stellen können Metallströme soweit abgekühlt sein, dass sie beim Aufeinanderstoßen nicht mehr

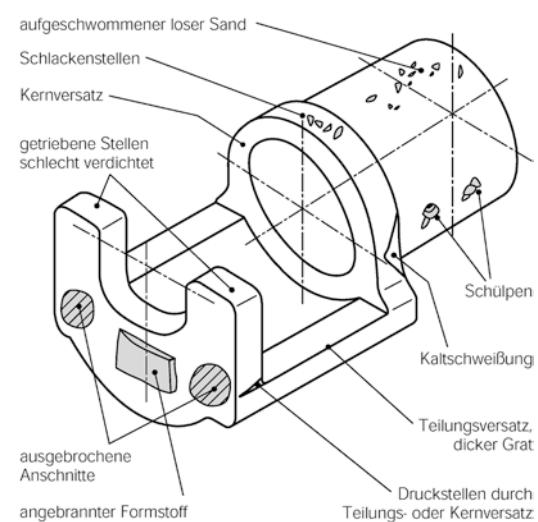


Abb. 2.61 Sandgussfehler an typischen Stellen einer Festsattelbremsklaue aus Gusseisen mit Kugelgraphit

verschweißen und rinnenartige Vertiefungen auf der Oberfläche, d. h. *Kaltschweißungen* bilden. *Schülpen* (Sandausdehnungsfehler) können an allen Oberflächenpartien außen und innen am Gussstück vorkommen. Angebrannter Formstoff sitzt bevorzugt an den heißesten Stellen des Guss-teils fest, z. B. dicht neben den Anschnitten.

2.5 Form- und Gießverfahren

Fertigungsverfahren, die Werkstücke verlustarm, in einem Arbeitsgang und in der sog. *ersten Hitze* herstellen können, werden als Urformverfahren bezeichnet, weil diese Verfahren den kürzesten Weg von den Urstoffen zu fertigen Werkstücken haben. Zu ihnen gehören die *Gießverfahren* und das *Sintern* (Abschn. 2.7).

Seit langem sind Entwicklung und Forschung bei den Urformverfahren darauf gerichtet, die Werkstücke noch

- verlustärmer,
- maßgenauer und
- massengleicher zu fertigen.

Bei der Weiterentwicklung der Urformverfahren wird die Herstellung von Werkstücken angestrebt, die nur an wenigen Funktionsflächen meist geringfügig spanend oder umformend bearbeitet werden.

Noch nicht eingeführt ist bei den Form- und Gießverfahren der kostengünstige *Genauguss* – im Angelsächsischen *Präzisionsguss* genannt –, der Funktionsflächen ermöglicht, die nicht mehr bearbeitet werden. Großverbraucher von Massenteilen hätten dann Preisvorteile, weil man auf einen Teil der teuren spanenden Fertigung verzichten würde.

Als billiger Massenguss für alle denkbaren Gusswerkstoffe ist Genauguss mit verlorenen Formen und Modellen als *Feinguss* (Abschn. 2.5.2.1) bisher nicht konkurrenzfähig.

Durch Überwachen des Kokillenverschleißes ist bei Dauerformverfahren für Leichtmetall- und Zinkdruckguss eine Annäherung an Genauguss möglich. Nach den bisherigen Erfahrungen

geht dadurch aber die Anzahl der möglichen Abgüsse beträchtlich zurück, sodass auch bei den Dauerformverfahren ein Genauguss meist nicht wirtschaftlich ist.

2.5.1 Gießverfahren mit verlorenen Formen

Alle Einzelgussstücke und der größere Teil der Seriengussstücke werden nach Form- und Gießverfahren mit verlorenen Formen gefertigt.

Da die Form nach jedem Abguss verloren ist, besteht die Möglichkeit, aus dem wieder aufbereiteten Formstoff eine *wiederholbar gleiche, neue Form* herzustellen. Das Abformen des Formstoffs am Modell und der dabei auftretende Modellverschleiß ist eine relativ geringe Beanspruchung, da nur der Formstoff und nicht die Schmelze das Modell berührt.

Bei den Dauerformverfahren ist die metallische Dauerform (= Kokille) Modell und Formstoff zugleich. Mit jedem Abguss wird die Form durch die Schmelze maximal beansprucht. Deshalb wird die Formoberfläche durch nicht benetzbare Überzüge, die *Schlichten*, gegen den Kontakt mit der Schmelze geschützt. Schlichten lassen sich nur schwer mit wiederholbar gleichmäßiger Schichtdicke auf einer nicht ebenen Kokillenoberfläche auftragen. Jeder weitere Abguss verschleißt die Kokillenoberfläche, die Gussstücke werden zunehmend ungenauer. Vergleicht man schematisch die beiden Möglichkeiten:

Modell	→ verlorene Form → Gussstück,
Kokille	→ verschleißende Form → Gussstück,

die zur Massenfertigung von *wiederholbar maß- und massengleichen* Gussstücken führen sollen, so fällt die günstige Ausgangslage der Formverfahren mit verlorenen Formen auf. Modelle und Kokillen sind mit genügender Genauigkeit herstellbar.

Für Gießverfahren mit verlorenen Formen verwendet man im Allgemeinen Formstoffe, die aus einer körnigen Grundmasse – diese ist meist

Tab. 2.20 Verfahren zur Form- und Kernherstellung, geordnet und ausgewählt nach der Bindung des Formstoffsystems im formbaren Zustand

Mechanische Verfahren	Chemische Verfahren zur Form- und Kernherstellung				Physikalische Verfahren
Zuführen von Verdichtungsarbeit	Kalthärtend in der Form oder Kernbüchse		Heißhärtend in der Form oder Kernbüchse		Magnetfeld, Vakuum
formgerecht, feucht	formgerecht, feucht	formgerecht, feucht und begasen	trocken und rieselfähig	formgerecht, feucht	trocken und rieselfähig
Synthetischer Bentonitsand, Natursand, Schamotte, Ton, Lehm, Mergel	Zementsand, Polyphosphat, Magnesia, Gips, Sand	Wasserglasverfahren, Cold-Box-Verfahren	Croning-Verfahren	Hot-Box-Verfahren	Magnetform-Verfahren, Vakuumform-Verfahren

Sand mit einem Bindemittel – bestehen. Das wichtigste Bindemittel für Modellsand ist der *Bindeton*. Kernsande werden vorteilhafter mit verschiedenen *organischen Bindern* wie Kunstharze, Abfallzucker, Öle oder Sulfitablauge gebunden.

Die besonderen Eigenschaften des jeweiligen Formstoffsystems sind in den folgenden Abschnitten erläutert.

Tab. 2.20 zeigt eine Übersicht der Verfahren zur Form- und Kernherstellung mit verlorenen Formen je nach Art der Bindung des Formstoffgemisches, die mechanischer, chemischer oder physikalischer Natur sein kann. Die *mechanische* Bindung wird bei den Nassguss- und Trockengussformstoffen durch Verdichten, z. B. durch Stampfen, Rütteln oder Pressen erreicht. Die gebundenen Formen oder Kerne kann man je nach Art der zahlreichen Bindemittel unterscheiden. Die Werkzeugkosten sind stark abhängig von einer Unterteilung nach *kalthärtenden* oder *heißhärtenden* Bindemitteln. Bei zwei Verfahren sind Vorrichtungen erforderlich, um Reaktionsgase zuzuführen. Es ist besonders wirtschaftlich, wenn der Formstoff *rieselfähig* dem Formwerkzeug zugeführt werden kann. Dies ist jedoch nur bei dem *Croning-Verfahren* und den beiden neueren Entwicklungen, dem *Magnetformverfahren* und dem *Vakuumformverfahren* der Fall.

Wegen der stark gestiegenen Deponiekosten für kunstharzgebundene Gießerei-Altsande hat das Interesse an billigen anorganischen, selbst-

härtenden Bindemitteln für Formen und Kerne zugenommen. Zement, polymere Phosphate, kaustische Magnesia und Gips können aber – abhängig vom Gusswerkstoff – nur bedingt an Stelle organischer Binder eingesetzt werden. Tab. 2.21 zeigt die wichtigsten Form- und Gießverfahren mit verlorenen Formen, abgegrenzt von den Dauerformverfahren. Sie werden anschließend in dieser Reihenfolge erläutert.

Das *Verbundgießen* ist sowohl mit verlorenen Formen als auch mit Dauerformen möglich und hat bei einigen Serienteilen des Fahrzeugbaus größere Bedeutung erlangt. Beispiele sind die gusseisernen Bremstrommeln mit Stahlblechboden als Kastenformteile und die mit Stahl verstärkten Radnaben beim Aluminium-Druckguss.

2.5.1.1 Tongebundene Formstoffe

Zum Abformen der Außenkonturen von Gussstücken haben sich *Formsande*⁶ bestens bewährt, die aus der feinkörnigen Grundmasse Quarzsand und dem Bindemittel Ton bestehen. Weil dieser Formstoff unmittelbar am Modell anliegt, nennt man ihn *Modellsand*. Quarzsand, der Hauptbestandteil der Formsande, besteht zu mehr als 99 % aus Siliciumdioxid SiO₂.

Kornform, *Korngröße* und *Kornverteilung* des Sandes beeinflussen wichtige Eigenschaften des Formstoffsystems, wie z. B.

⁶Das Prinzip Sandguss: [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=IwvXyfjyJYU).

Tab. 2.21 Die wichtigsten Form- und Gießverfahren für verlorene Formen mit Dauermodellen und verlorenen Modellen, abgegrenzt gegenüber den Dauerformverfahren

Form- und Gießverfahren		
Verlorene Formen		Dauerformen
Dauermodelle	Verlorene Modelle	Ohne Modelle
Handformen, Herdformen, Schablonenformen	Feingießen	Druckgießen: Warmkammerverfahren Kaltkammerverfahren
Maschinenformen, Kastenformen, kastenloses Formen		Kokillengießen: Voll-, Halb-, Gemischtkokillen
Maskenformen, <i>Croning</i> -Verfahren	Vollformgießen	Schleudergießen und Stranggießen horizontal
Verbundgießen		Verbundgießen

- Verbrauch an Bindemittel,
- Verdichtbarkeit,
- Rauheit der Gussoberfläche,
- Gasdurchlässigkeit und Feuerfestigkeit.

Für Formsande sind annähernd kugelförmige Quarzkörner am besten geeignet, weil die Kugel die kleinste Oberfläche je Körpervolumen hat.

In den natürlichen Sandlagerstätten versucht man, die Kornverteilung konstant zu halten durch eine Aufbereitung, die aus Mischen, Schlämmen und Sieben besteht. Aus dem Balkendiagramm der fünf Siebstufen wie in Abb. 2.62 kann als Kennwert des Sandes die

mittlere Korngröße berechnet werden. Ein typischer Wert ist eine mittlere Korngröße von 0,22 mm. Für thermisch hoch beanspruchte *Kernsande* wählt man meist eine mittlere Korngröße über 0,27 mm.

Bei gleicher Verdichtungsarbeit lässt sich ein größerer Sand stärker verdichten als ein feinerer. Durch die mit zunehmender Feinheit sich sehr vergrößernde spezifische Oberfläche wird der Reibungswiderstand gegen das Verdichten erhöht. Gröbere Körner können in der Kastenformerei zu so harten Formen verdichtet werden, dass sich die Quarzausdehnung nach dem Gießen nur durch *Warmrisse* im Gussstück ausgleichen lässt. Mit feineren Sanden verbessert man das konturenscharfe Abformen des Modells und damit die Wiedergabe feinster Oberflächen und Kanten.

In der betrieblichen Praxis ist die *Gasdurchlässigkeit* des verdichteten Formsands ein Maß für die optimale Sandkörnung; denn bereits durch Verringern der mittleren Korngröße von etwa 0,3 mm auf 0,2 mm halbiert sich der Wert für die Gasdurchlässigkeit von tongebundenen Nassgussanden.

Die Gasdurchlässigkeit wird durch geringe Gehalte an Feinkorn unter 0,063 mm, Schlammstoff und Staub beträchtlich vermindert. Die Gussstückoberfläche wird rauer, weil der Feinanteil mit der Schmelze leichter verschlackt. Die *Feuerfestigkeit* des Formstoffs nimmt ab.

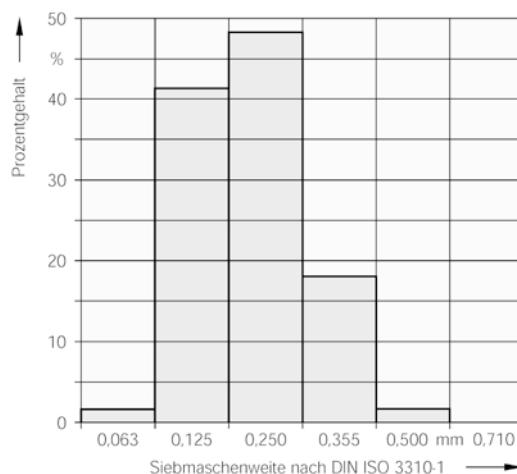


Abb. 2.62 Kornverteilung von Quarzsand der Grube Haltern mit einer mittleren Korngröße von etwa 0,22 mm

Kennzeichen eines guten Formsands ist außerdem ein möglichst geringer Gehalt an Calciumcarbonat (CaCO_3). Beim Abguss zerfällt das Carbonat, wobei sich Kohlendioxid bildet. Der zurückbleibende gebrannte Kalk (CaO) setzt sich im feuchten (H_2O) Formstoff zu Calciumhydroxid [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] um und vermindert damit die Feuerbeständigkeit.

Für den mittleren und schweren Stahlguss reicht die Feuerbeständigkeit von Quarzsand (etwa 1790 °C) nicht aus. Als feuerfeste Grundmasse ist *Schamottesand* geeignet, den man aus gebranntem Ton durch Zerkleinern und Absieben gewinnt. Der Formstoff aus Schamottesand und Binderton wird durch Aufbereiten mit Wasser bildsam gemacht, und die fertige Form vor dem Abguss gebrannt und geschlichtet.

Gute Formsandlagerstätten sind selten. Beim *Natursand* bilden die tonigen Binder bereits in der Lagerstätte mit dem Sand ein natürliches Gemenge.

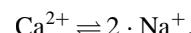
Synthetischer Formsand entsteht durch Mischen von gewaschenem und gesiebtem Sand und Bindeton als Reinsubstanz in der Sandaufbereitung der Gießerei.

Ein Formsand ist nur dann ein guter Formstoff, wenn die Sandkörnung zur Menge und Qualität des tonigen Binders in vorgegebenen sehr engen Grenzen liegt. Durch Zugabe von 2,5 bis 3,5 % Wasser (Massengehalt) wird der für das Verdichten nötige bildsame Zustand eingestellt. Der Formsand bildet dabei eine krümelige Masse. Formsande enthalten werkstoffabhängig meist außerdem noch geringe Mengen an weiteren Zusätzen, wie z. B. Kohlenstaub, Perlpech, Sulfitablauge, Schwefelpulver und Borsäure.

Bentonite sind hochbindefähige Tone aus wasserhaltigen Aluminiumsilikaten nicht einheitlicher Zusammensetzung (etwa ein Teil Al_2O_3 auf vier Teile SiO_2). Sie liegen als kolloidale, geschichtete Teilchen unter 2 μm Schichtdicke vor. Die wichtigste Eigenschaft der Bentonite ist die Fähigkeit, im Kristallgitter Wasser unter 6- bis 8-facher Volumenvergrößerung sowie Metallionen einzulagern. Sie gehen auf-

grund dessen in den plastisch formbaren, gequollenen Zustand über.

Chemisch verhalten sich Bentonite wie Ionenaustauscher; sie können z. B. ihre Calciumionen gegen Natriumionen austauschen:



Weil die Wasseraufnahme im Kristallgitter und an der Oberfläche mit der Anzahl der eingelagerten Metallionen größer wird, ist ein Natrium-Bentonit hochquellfähig, ein Calcium-bentonit dagegen nur sehr wenig. Das Umwandeln der in der Natur vorhandenen Calciumbentonite mittels Soda (Na_2CO_3) in Natriumbentonite wird als *Aktivieren* bezeichnet. Dadurch werden zahlreiche, wichtige Eigenschaften des Formstoffs beeinflusst: Die Quellfähigkeit des Bentonits nimmt z. B. zu und damit auch seine Bindefähigkeit, während sich die Feuerbeständigkeit verringert.

Von großer praktischer Bedeutung ist das *Temperaturverhalten* des Bentonits. Die Wirkung als reversibler Ionenaustauscher ist oberhalb von etwa 700 °C nicht mehr vorhanden. Das Kristallwasser verdampft und sprengt den Bentonitkristall. Der Ton wird „totgebrannt“. Im Formstoffkreislauf muss man durch möglichst frühes Entformen verhindern, dass größere Mengen des tongebundenen Formstoffs länger als nötig erhitzt werden, da der totgebrannte Tonanteil (etwa 2 %) durch Zugabe von neuem, aktiviertem Bentonit ausgeglichen werden muss.

Den Verfahren mit tongebundenen Formstoffen kommt auch aus Umweltschutzgründen steigende Bedeutung zu, weil Ton und Bentonit im Gegensatz zu allen anderen Formstoffbindern durch die Formherstellung und den Abguss nur teilweise unwirksam – *totgebrannt* – werden. Der wesentliche Grund für die Wirtschaftlichkeit besteht darin, dass fast der gesamte Altsand als *Umlaufsand* wieder verwendet werden kann. Das Aufbereiten besteht nur aus den Schritten *Entstauben*, *Kühlen* und *Ausgleichen* der totgebrannten Bentonitmenge und des verdampften Wassers beim Mischen.

Bei den anderen bekannten Bindemitteln laufen irreversible chemische Umwandlungen beim

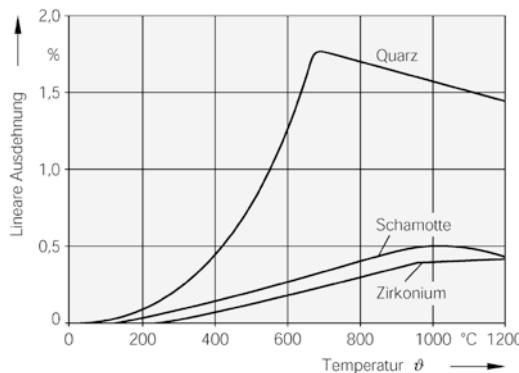


Abb. 2.63 Ausdehnungsverhalten verschiedener Formsand, die mit 5 % Bentonit gebunden sind. (Nach Hofmann)

Aushärten der Formen oder der Kerne und beim Abguss ab.

In *Nassgussformen* aus tongebundenem, feuchtem Quarzsand werden alle Gusswerkstoffe vergossen, hauptsächlich

- Gusseisen und Temperguss,
- Stahlguss mit Massen unter 25 kg,
- Schwer- und Leichtmetalle.

Alle Formstoffe dehnen sich als Folge des direkten Kontakts mit der Schmelze und aufgrund der Wärmestrahlung aus. Das nachteilige Ausdehnungsverhalten von Quarzsand zeigt Abb. 2.63. Ein Verändern der Körnung und des Bindemittels kann die lineare Ausdehnung nicht wesentlich verringern. Im Vergleich zu *Schamotte*- und *Zirconium-Sand* dehnt sich Quarzsand mehr als dreimal stärker aus. Im tongebundenen Quarzsand tritt das Maximum bei etwa 630 °C auf. Sandausdehnungsfehler lassen sich darauf zurückführen, z. B. die *Schlüpen* und *Rattenschwänze* (s. Abschn. 2.4.5).

Handformen Handformen ist ein Formverfahren für kleinere bis größte Gussstücke in kleineren Serien. Die Formfüllung erfolgt bei allen Gusswerkstoffen als Folge der Schwerkraft steigend oder fallend.

Für den offenen oder den gedeckten Herdguss ist ein ungeteiltes Modell erforderlich, das in mit Formstoff gefüllten Gießgruben, den Her-

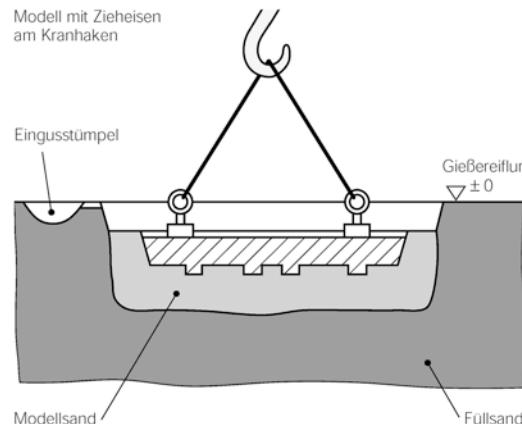


Abb. 2.64 Modellziehen beim offenen Herdguss

den, abgeformt wird. Beim *offenen Herdguss*, z. B. von dekorativen Kamin- oder Ofenplatten, kann die Oberseite der Form in Abb. 2.64 offen bleiben und das Gießen über eine schmale Rinne vom Einguss aus erfolgen. Das *ungeteilte* Modell wird zunächst im Modellsandbett ausgerichtet. Das Verdichten des Formstoffs erfolgt je nach Modellgröße durch einfaches Eindrücken, Einpressen oder Stampfen von Hand mit Pressluft oder Handstampfern. Zum Ziehen des Modells lassen sich auf der Rückseite *Zieheisen* einschrauben, die bei Großmodellen ein Abheben mit dem Hallenkran ermöglichen.

Der *gedeckte Herdguss* ist mit ungeteilten oder geteilten Modellen möglich. Die Modelloberseite in Abb. 2.65 wird an einem aufgesetzten, mit Formstoff gefüllten, stabilen Formkasten abgebildet, der meist auch den Einlauf und den Eingusstrichter enthält. Eine Spezialität des gedeckten Herdgusses sind stark verrippete *Werkzeugmaschinenbetten* bis zu den größten Abmessungen. Die großvolumigen Kerne lassen sich meist seitlich nicht ausreichend in *Kernlagern* abstützen. Sie werden durch *Kerneisen* vom aufgesetzten Oberkasten aus in ihrer Lage gehalten.

Ein spezielles Verfahren zum Herstellen rotationssymmetrischer Gussstücke ist das *Schablonenformen* (Abb. 2.66). Man arbeitet hierbei mit einfachen Dreh- oder Ziehschablonen. Die Modellkosten sind daher gering. Die Außenkontur der Schlackenpfanne

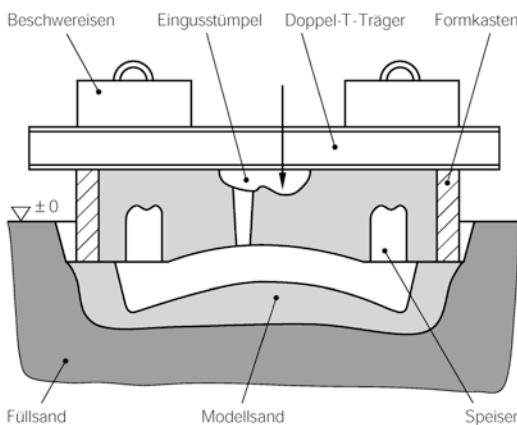


Abb. 2.65 Gedeckte Herdgussform mit aufgesetztem und beschwertem Formkasten vor dem Gießen

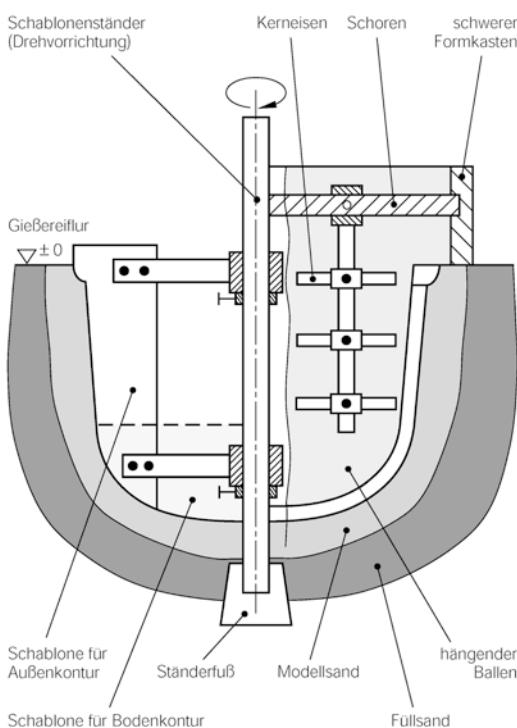


Abb. 2.66 Links: Schablonenformen einer Schlackenpfanne, rechts: Zum Gießen fertige Form

formt man im Herd mit einer Holzschablone. Der Formstoff wird segmentweise zugegeben und durch Drehen oder Ziehen der Schablone verdichtet. Man baut die Innenkontur der Pfanne mit einer zweiten, kleineren Schablone auf dem zunächst gewendeten Formkasten auf und ver-

steift sie mit Kerneisen, die an den *Schören* im Kasten eingehängt sind. Nur drei Schablonen, je eine für die Außenkontur, die Innenkontur und für den Boden sind nötig. Das Schablonenformen wird auch örtlich mit dem Handformen nach Modellen kombiniert, wenn sich dadurch die Kosten der Modelle oder der Kernkästen verringern lassen.

Die Formstoffe für das Handformen reichen vom tongebundenen Nassgussand über die *Lehmform*, den *Zementsand* bis zu den schnellhärzenden, kunstharzgebundenen *Kalثارzsanden*. Durch Mischen von Sand mit Harz und Härtern in fahrbaren Durchlaufmischern wird der Formstoff meist direkt an der Gießgrube hergestellt und sofort in die Form oder den Kernkasten eingelegt. Auf das Pressluftstampfen kann verzichtet werden, wenn sich das Formstoffsysteem durch gutes Fließvermögen unter der Wirkung der Schwerkraft oder mit Vibratoren am Form- oder Kernkasten vor der chemischen Reaktion wie ein *Fließsand* selbst verdichtet.

Maschinenformen mit Kästen Das wichtigste Verfahren für die Gussstückfertigung in mittleren Serien bis millionenfache Stückzahlen nach verlorenen Formen ist die *Kastenformerei*. Die Modelle aus Holz, Kunststoff oder Metall sind geteilt und werden nach Möglichkeit zur Hälfte auf je einer Modellplatte für den Unterkasten und den Oberkasten fest verschraubt. Die Anordnungen in Abb. 2.67 verdeutlichen das Verfahren. Die Arbeitsgänge der Kastenformerei erfolgen in der Reihenfolge:

- Verdichten des Formstoffs im Unterkasten (c),
- Abheben und Wenden des Unterkastens (d),
- Verdichten des Formstoffs im Oberkasten (e),
- Abheben des Oberkastens,
- Kerneinlegen von Hand in den Unterkasten,
- Zulegen der Kästen (f), Beschweren (g) und Abgießen (h),
- Auspacken nach dem Abkühlen der Gussstücke.

Das Verdichten des Formstoffs in den Kästen erfolgt gleichzeitig an verschiedenen Orten.

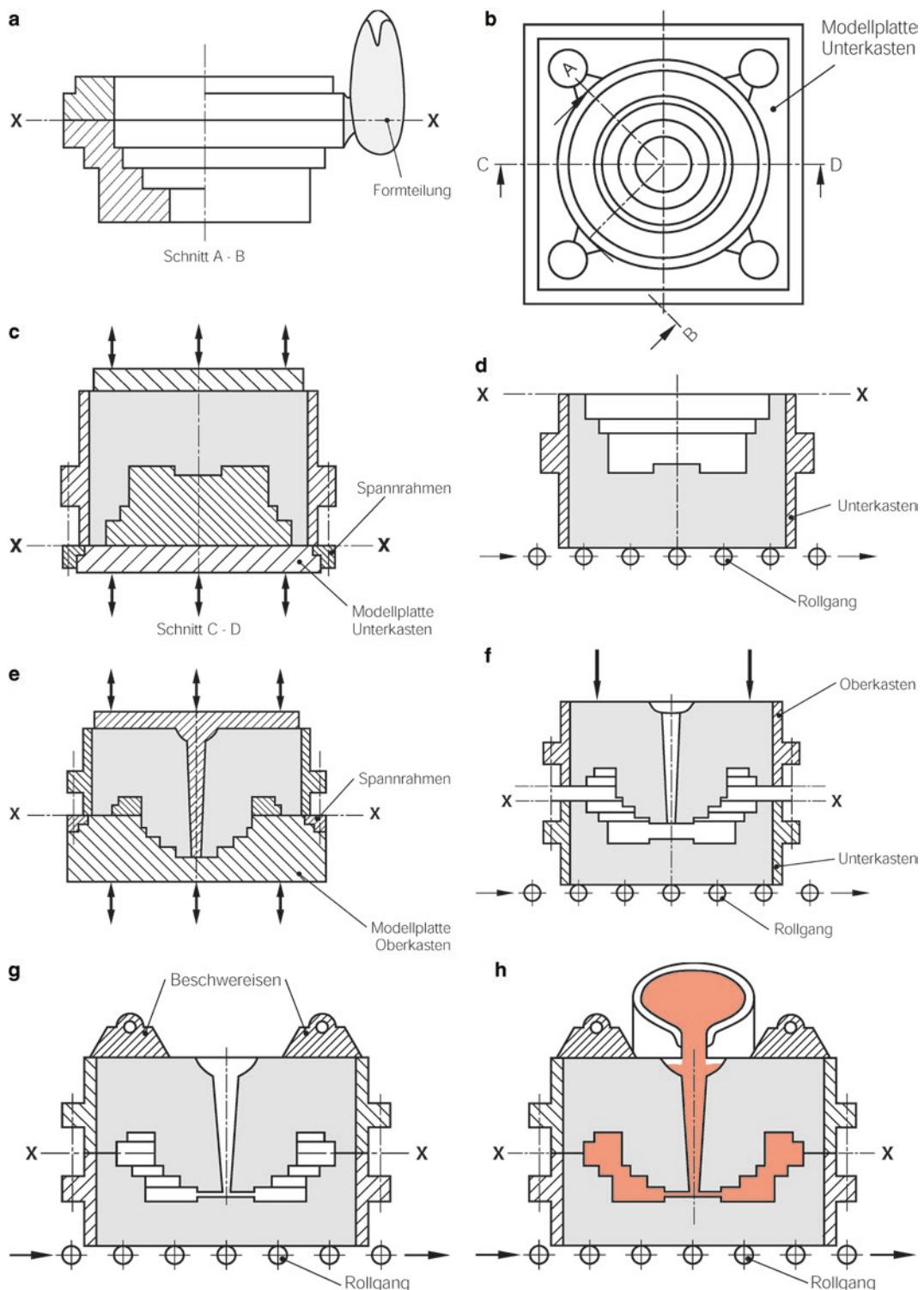


Abb. 2.67 Maschinenformen mit Kästen. **a** Modell links und Gusstrahne rechts, **b** Draufsicht: Modellplatte Unterkasten, **c** Verdichten des Formstoffs im Unterkasten, **d** Unterkasten gewendet auf dem Rollgang, **e** Verdichten des Formstoffs im Oberkasten, **f** Zulegen der Kästen, **g** Beschweren, **h** Gießen

Die glockenförmige Schwungscheibe ist kernlos mit hängendem Ballen geformt. Zum maschinellen Verdichten des Formstoffs wird die *Schleuder-Nachpress-Abhebeformmaschine* verwendet, Abb. 2.68. Auf dem massiven Formmaschinentisch wird die Modellplatte für den Oberkasten von dem Spannrahmen gehalten. Mit elektrischen Heizplatten an der Unterseite werden die Modelle auf etwa 40 bis 70 °C beheizt, damit man sie konturenscharf abheben kann.

Führungselemente des Formkastens sind die im Spannrahmen fest verschraubten Dübel, links als Rundloch- und rechts als Langlochdübel ausgebildet, um ein Klemmen der Kästen beim Auflegen und Abheben zu verhindern. Der Formsand wird bei ausgeschwenker Pressplatte von oben aus dem Sandbunker mit einer Dosiervorrichtung locker in den Formkasten gefüllt.

Bei neueren Kastenformanlagen erfolgt die Verdichtung nicht mehr mittels Rütteln und Pressen, sondern durch Vibrieren und Gas-Impulspressen. Ein dosierbares Gas-Luftgemisch wird im Presszylinder elektrisch gezündet und der Gasstoß auf einen oder mehrere Pressstempel verteilt. Durch diese Verbesserung konnten die unerträglichen Schallemissionen in Kastenformereien erheblich vermindert werden.

Das Maschinenformen kann mit unterschiedlichem Mechanisierungsgrad bis hin zur vollautomatischen *Form- und Gießanlage* ausgebaut werden. Das Kerneinlegen erfolgt dabei von Hand

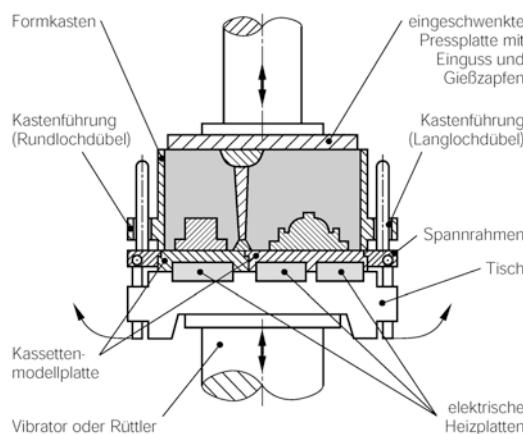


Abb. 2.68 Formmaschine in Position Ende Verdichten des Formstoffs im Oberkasten

oder bei großen Stückzahlen auch per Industrieroboter. Auf hochautomatisierten Kastenformanlagen entstehen beispielsweise Radträger für Automobile aus dem Gusseisenwerkstoff Sibodur 700-10. Abb. 2.69 zeigt eine Studie, bei der ein Serienteil in zweiter Generation durch Bionik-Design weiterentwickelt wurde.

In der Bionik werden über Jahrtausende evolutionär entwickelte, erfolgreiche Gestaltungsprinzipien der belebten Natur auf die Technik übertragen, um beispielsweise das Verhältnis der Festigkeitseigenschaften zum Gewicht zu verbessern. In der abgebildeten Studie des Radträgers konnte das Gewicht durch eine Werkstoffänderung (Serienstand: GJS-400-15) in Verbindung mit dem Bionik-Design im Vergleich zum Serienteil um 32 % auf unter 3 kg reduziert werden.

Beim Kastenformen verwendet man hauptsächlich tongebundenen, synthetischen Formsand, der innerhalb von Sekunden hoch verdichtbar ist. Natursande und Wasserglas-Sande sind speziellen Gussstücken vorbehalten, sie sind aber ebenfalls gut verdichtbar. Die Formfläche liegt nur bei wenigen Großanlagen über 1 m². Durch die zunehmende Fertigung von Motorenblöcken auf Kastenformanlagen hat



Abb. 2.69 Schwenklager aus Sibodur 700-10, in 2. Generation optimiert durch Bionik-Design. (Quelle: Georg Fischer Automotive AG)

sich die mittlere Stückmasse der Eisengusswerkstoffe bis auf etwa 25 kg erhöht.

Die Sandgusslegierungen der Leichtmetalle werden erst dann in der Kastenformerei gefertigt, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Große Stückmassen bis 1000 kg,
- großes Verhältnis Oberfläche/Volumen,
- schwierige Innen- und Außenkerne,
- Änderungsmöglichkeit des Modells,
- kurze Lieferzeiten.

Meist werden Serien- und Einzelteile vergossen, deren Formkosten gegenüber Druck- und Kokillenguss erheblich niedriger sind. Deshalb werden z. B. Neuteile für Druck- und Kokillenguss zunächst als *Nullserie* in Sandguss gefertigt. Erst nach dem Abschluss der Entwicklungs- und Änderungsarbeiten stellt man auf ein Dauerformverfahren um.

Die Sandform (*verlorene Form*) wird durch den Abguss zwar zerstört und ist damit verloren, nicht aber der Sand. Dieser läuft im Kreislauf um und wird mit *Grünton* (Bentonit) und Wasser zu neuem Formsand aufbereitet. Für die Außenkontur verwendet man bevorzugt den *Nassguss-sand*. Die Innen- und Außenkerne werden mit wasserfreien Bindemitteln aus trockenem, gewaschenem Quarzsand hergestellt. Wegen des Zerfalls der Kerne nach dem Abguss wird dem Kreislaufsand dadurch immer wieder Neusand zugeführt. Der gemischte Formaufbau, d. h.

- außen Nasssand und
- innen Trockenkerne,

bringt Vorteile für die von außen nach innen gerichtete Erstarrung sowie für das Speisen der Gussstücke und die Nachgiebigkeit der gesamten Form. Der Wassergehalt des Nassgussands bewirkt eine große Abkühlgeschwindigkeit und damit ein feinkörniges, dichtes (porenfreies) Gefüge. Längenänderungen der Kerne beim Gießen der Wände und beim Erstarren können durch Nachgeben aufgefangen werden. Deshalb sind auch im Sandguss Legierungen (und Konturen) gießbar, die wegen ihrer starken *Warmriss-*

neigung nicht mit den Dauerformverfahren vergossen werden können.

Mit automatisierten Formanlagen kann die in DIN 1688-1 festgelegte Genauigkeit von Sandgussstücken unterboten werden, da das Trennen der Form vom Modell und das Zulegen wiederholbar genau erfolgen. Damit lassen sich im Sandguss diejenigen Kokillengussstücke, deren Innenpartien von Sandkernen abgebildet werden, z. T. kostengünstiger fertigen. Das Umstellen der Zylinderkopffertigung von Gemischtkokillen auf automatisch geformten Sandguss zeigt diese Entwicklungsrichtung.

Bei den naheutektischen Aluminium-Silicium-Legierungen können dichtere Gussgefüge und damit bessere Gebrauchseigenschaften durch *Veredeln* der Schmelzen erreicht werden. Durch Zufügen von wenigen Gramm Natrium, eingewickelt in Aluminiumfolie, direkt in das Gießgefäß oder in den Ofen wird die Unterkühlung der Schmelze beträchtlich erhöht. Die in der Schmelze bereits vorhandenen Keime sind daher unwirksam. Deshalb wird das Verfahren auch als Keimvergiftung bezeichnet. Die Veredlung von Schmelzen wird nur bei größeren Wanddicken durchgeführt, da die Gießbarkeit negativ beeinflusst wird (Abschn. 2.4.1).

Ein bisher ungelöstes Problem bei der Kastenformerei ist der *Gussversatz*. Die verschiedenen Versatzmöglichkeiten des Oberkastens zum Unterkasten zeigt Abb. 2.70. Als Koordinatenmittelpunkt wird willkürlich die Mitte der linken Führungsbüchse (Rundloch) des Unterkastens angenommen. Dabei liegt der Unterkasten auf dem Transportwagen, der in y-Richtung stetig fördert. Der Oberkasten kann gegen den Unterkasten in x- oder y -Richtung versetzt oder in jeder Drehrichtung verkantet sein. Beim Zulegen wird der Oberkasten in verlängerten Rundloch- und Langlochdübeln gehalten und langsam entlang der z -Achse abgesenkt.

Nach dem Zulegen liegt der Oberkasten auf dem Unterkasten planparallel auf und kann einen Versatz in x- und y-Richtung und durch Verdrehen um die Vertikale aufweisen. Außerdem können beim Zulegen noch leicht Druckstellen, besonders an Kernmarken, erzeugt werden.

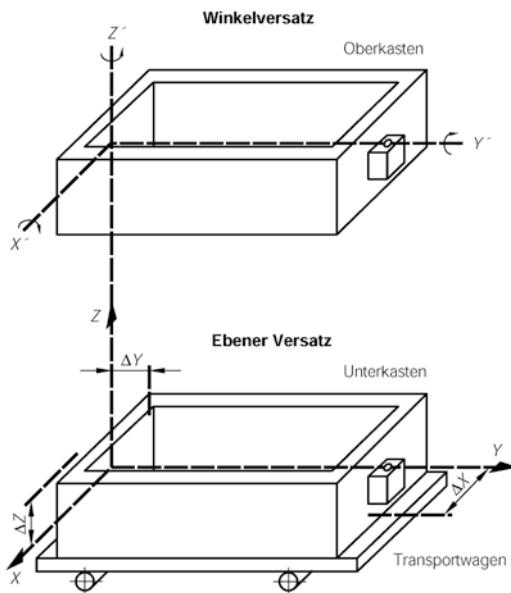


Abb. 2.70 Versatzmöglichkeiten zweier Formkästen, bezogen auf die Rundlochführung im Unterkasten

Danach kann ein noch so genaues Zulegen den Versatz nicht ausgleichen, der bereits durch die Positionier- und Fertigungs-Ungenauigkeiten zwischen Modellplatte, Spannrahmen, Zentrierdübel und Führungen in die Kastenformhälfte übertragen wird.

Als Grenze der Genauigkeit von Kastenformanlagen wird in der Praxis für ein Nennmaß von etwa 500 mm eine Toleranz von $\pm 0,3$ mm angesehen, obwohl das Modell auf der Modellplatte mit einer Toleranz von kleiner als $\pm 0,1$ mm angefertigt wurde. Ziel der Weiterentwicklung von Kastenformanlagen ist das Verkleinern der Gusstoleranzen durch *modellgenaues* Positionieren und Zulegen.

Eine neue Variante der Kastenformerei stellt das in Japan entwickelte *Vakuum-Formverfahren* dar. Als Formstoff wird binderfreier, reiner Quarzsand, der hervorragend fließfähig ist, in die Kästen eingefüllt und durch Unterdruck bei leichtem Vibrieren verdichtet. Das Abdichten der Kästen in der Teilungsebene und auf den Kastenrückseiten erfolgt durch 0,1 mm dicke *Kunststofffolien*. Die Formherstellung beginnt mit dem Auflegen der zugeschnittenen Folie auf die mit Luftschlitzten versehene Modellplatte

bei aufgesetztem Kasten. Infolge einer Flächenbeheizung und eines geringen Unterdrucks von etwa 0,5 bar legt sich die Folie konturenscharf an das Modell.

Das Vakuum wird beim Abheben, Kerneinlegen, Zulegen und Gießen über Schlauchverbindungen des Formkastens mit der Vakuumpumpe aufrecht erhalten und darf erst nach dem Erstarren aufgehoben werden. Diesem verfahrenstechnischen Nachteil stehen Vorteile durch Wegfall des Binders und der Formstoffaufbereitung sowie durch Verminderung der Putzkosten gegenüber. In Europa werden Guss Teile für Lkws in Vakuumkästen mit bis zu 4 m² Formfläche vergossen.

Kastenloses Formen Auch für das kastenlose Formen wird mindestens ein Formkasten oder Maschinenrahmen benötigt, aus dem der verdichtete Formstoff als *Formstoffballen* herausgedrückt wird, wie es Abb. 2.71 zeigt. Modellplatte und Spannrahmen sind mit dem Presszylinder verbunden, der gegen den von der Formmaschine gehaltenen Rahmen nach oben verdichtet und nach unten abhebt. Beim Aus-

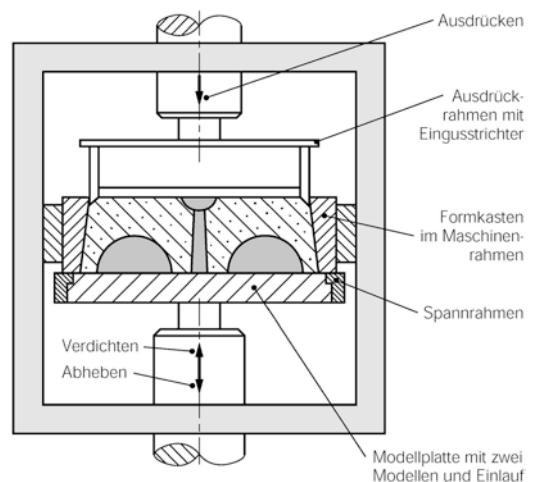


Abb. 2.71 Kastenlose Formmaschine mit dem Oberballen in der Position Ende Verdichten

drücken wird der Einguss-Trichter vom Ausdrückrahmen im Oberballen geformt.

Die kastenlose Form kann waagerecht oder senkrecht geteilt hergestellt werden mit einer nutzbaren Formfläche von meist kleiner als $0,6 \text{ m}^2$. Für Formen mit vielen Kernen wird die waagerechte Formteilung entsprechend Abb. 2.72 bevorzugt, da die Kerne von Hand sorgfältig eingelegt werden können.

Die senkrechte Formteilung wie in Abb. 2.73 führt zu besonders geringem Formstoffumlauf, weil der Ballen auf der Vorder- und Rückseite die doppelte Formfläche abbildet. Das Aneinanderreihen der Ballen zu einem theoretisch endlosen *Formstoffstrang* macht das Be schweren der Formen überflüssig, da sich die Ballen gegenseitig abstützen und direkt auf dem Transportrost abgegossen werden können. Das Einlegen der Kerne erfolgt von Hand in horizontaler Lage auf einer Hilfsvorrichtung außerhalb der Formteilung. Mithilfe von Unterdruck werden die Kerne festgehalten und durch Schwen-

ken der Vorrichtung automatisch in die senkrechte Teilungsebene übertragen.

2.5.1.2 Kohlensäure-Erstarrungsverfahren(CO_2 -Verfahren)

Nassgussformen aus tongebundenen Formstoffen trocknen rasch aus, sind nicht lagerfähig und müssen deshalb zügig abgegossen werden. Das kann von Nachteil sein, wenn das personalaufwendige Formen einschichtig und das mechanisierbare Gießen, Erstarren und Auspacken kontinuierlich sowie das Putzen zwei- oder dreischichtig erfolgen sollen.

Mit dem 1952 entwickelten CO_2 -Verfahren können Kastenformen, kastenlose Formen und besonders Kerne gefertigt werden, die fast unbegrenzt lagerfähig sind, weil sie chemisch gebunden sind.

Als Bindemittel für den Quarzsand dient Wasserglas $\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ mit einem Massenverhältnis, (dem Modul $M = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) von 2,3 bis 2,6. Im Formstoffmischer wird Sand mit etwa 3 bis 4 % Wasserglas gemischt und anschließend zu Formen oder Kernen verdichtet. Da der Formstoff gut gasdurchlässig ist, erfolgt das Aushärten durch Begasen mit Kohlendioxid. Wasserglas und Kohlensäuregas reagieren sekundenschnell und härten die Form durch fein verteilt Kieselsäuregel nach der Summenformel:

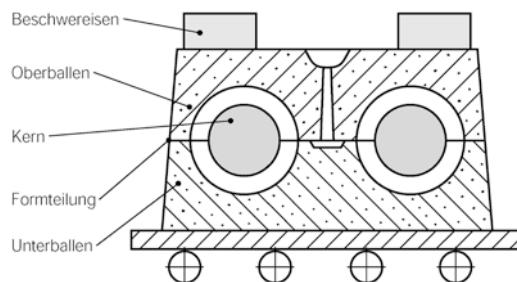
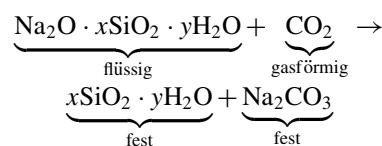


Abb. 2.72 Kastenlose, waagerecht geteilte Form für zwei Büchsen vor dem Abguss

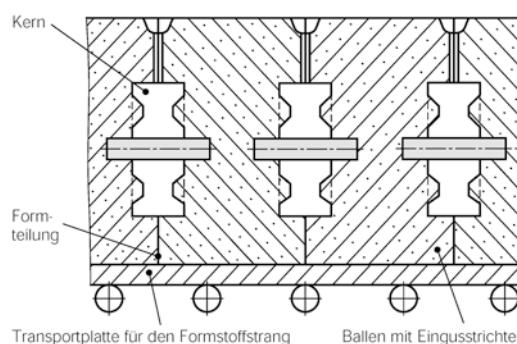


Abb. 2.73 Kastenlose, senkrecht geteilte Formen

Für das CO_2 -Verfahren wurden Formmaschinen und Kernschießmaschinen entwickelt, die das Verdichten und Begasen nacheinander in der Form am gleichen Ort oder an verschiedenen Stationen vornehmen.

In die Modellplatte mit dem Modell in Abb. 2.74 sind Schlitzdüsen eingelassen, die nach dem Verdichten der Mischung auf einer normalen *Rüttel-Press-Formmaschine* vor dem Abheben des Formkastens den Sand begasen. Die Formen werden nach dem Zulegen verklammert und in senkrechter Lage abgegossen.

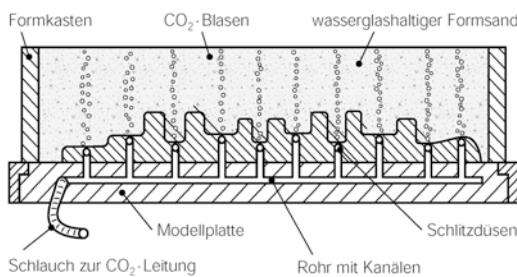


Abb. 2.74 Kastenform mit verdichtetem, wasserglasähnlichem Sand beim Begasen mit Kohlendioxid

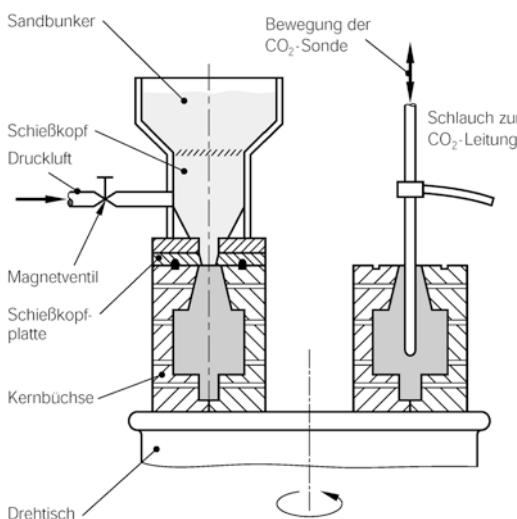


Abb. 2.75 Rundtischkernschießmaschine mit den Stationen Kernschießen links, Kern begasen und aushärten rechts (Kernbüchse öffnen ist nicht sichtbar; schematisch)

Für die Kernherstellung wie in Abb. 2.75 wird das Verdichten vom Begasen getrennt, um kürzere Fertigungszeiten zu erreichen. Den Formstoff verdichtet man durch Einschießen mit Druckluft von etwa 7 bar in die Kernbüchse, und in einer zweiten Station wird durch Einstechen einer CO_2 -Sonde ausgehärtet.

Das Kohlensäure-Erstarrungsverfahren ist besonders dann kostengünstig, wenn das Kohlendioxidgas für das Begasen der Formen als Nebenprodukt der Schutzgaserzeugung von Gasglühöfen nahezu kostenlos anfällt. Die Gießereien erzeugen den Stickstoff für ihre Gasglühöfen durch vollständigen Sauerstoffentzug der Luft, d. h. durch Verbrennen von Gas

oder Öl in einer *Schutzgasanlage*. Das dabei kontinuierlich anfallende Kohlendioxid kann direkt der Formerei oder Kernmacherei zugeleitet werden.

2.5.1.3 Maskenformverfahren

Aushärtbare Kunstharze als Sandbinder ergeben so große Formstofffestigkeiten, dass man statt kompakter Formen und Kerne leichte, nur wenige Millimeter dicke *Formschalen*, sog. *Masken* und *Hohlkerne* mit einer sehr guten Abbildbarkeit herstellen kann. Das erste Patent für dieses Verfahren erhielt 1944 *Johannes Croning* für

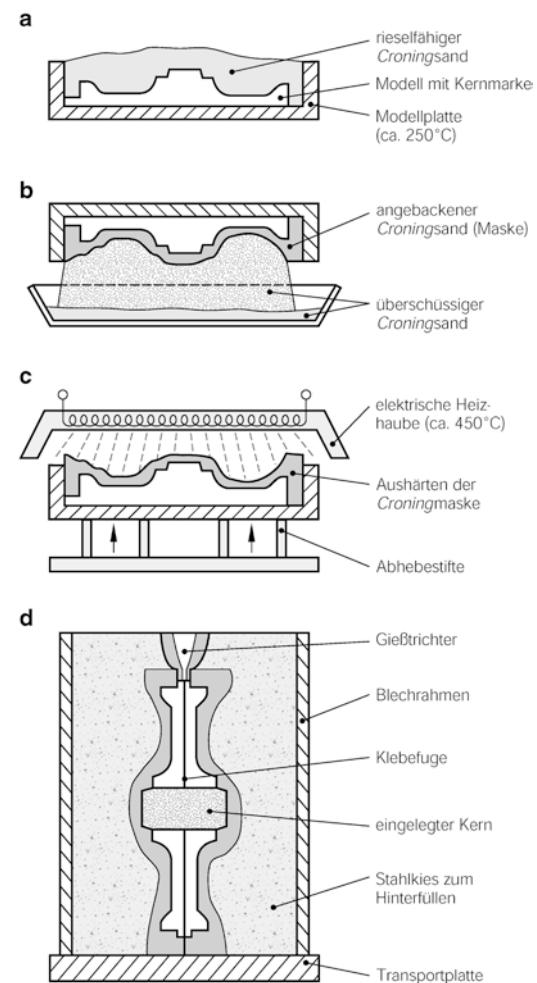


Abb. 2.76 Maskenformverfahren: **a** Schüttung und Aufbacken von Croningsand; **b** Wenden der Modellplatte; **c** Aushärten und Abheben; **d** Fertige Form zum Gießen

Formstoffmischungen aus Quarzsand und fein gemahlenen Phenol-Kresol-Kunstharzpulvern.

Das rieselfähige Formstoffgemisch wird entsprechend Abb. 2.76 auf die etwa 250 °C warme Metallmodellplatte geschüttet, die außer den Modellen und dem Anschnittsystem auch die Zentrierflächen für die zweite Halbschale abbildet.

Der Phenol-Kresol-Harzanteil (wegen der Kosten nur 4 bis 6 % vom Gesamtformstoff) beginnt oberhalb von 100 °C zu schmelzen. Je nach der Dicke der Maske verbackt in etwa 6–12 s eine Harz-Sandschicht von 5 bis 8 mm durch die höhere Modellplattentemperatur. Der überschüssige Formstoff wird durch Wenden um 180° und Abkippen zur Weiterverarbeitung entfernt.

Die Phenol-Kresol-Kunstharze lassen sich mit pulverförmigem Hexamethylentetramin in der Wärme rasch aushärten. Die Modellplatte mit dem in Maskendicke aufgebackenen Formstoff setzt man zu diesem Zweck für etwa 30 bis 40 s unter eine Heizhaube, sodass der Formstoff bei Temperaturen von etwa 450 °C aushärtet. Die fertige, noch warme Maskenhälfte wird nun durch Abhebestifte in der Modellplatte angehoben und mit der zweiten Hälfte von Hand nach dem Kerneinlegen zugelegt und verklebt. Zum Abgießen wird die Maske in einem oben

und unten offenen Blechrahmen mit Stahlkies hinterfüllt.

Das klassische *Croning-Verfahren* mit pulverförmigem Phenol-Kresol-Harz und Hexamethylentetramin als Härter ist kaum noch in Gebrauch, da der erforderliche teure Harzanteil zu hoch ist.

Das **Maskenschüttverfahren**, bei dem der Formstoff von oben auf die Modellplatte geschüttet wird, ist die wichtigste Verfahrensvariante.

Vier Varianten mit veränderten *Phenolharzbindersystemen* zeigt Tab. 2.22 für Serienteile der Automobilgießereien. Für das *Croning-Maskenformverfahren* werden verschiedene harzumhüllte Sande hergestellt. Dabei werden zunächst flüssige Resolharze in meist alkoholischen Lösungsmitteln, sog. *Novolake*, als dünner Lackfilm mit oder ohne Härter auf der einzelnen Sandkornoberfläche verteilt.

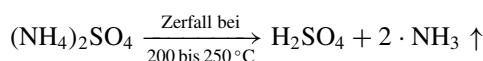
Je nach der Temperatur im Sandmischer unterscheidet man kalt-, warm- oder heißumhüllten *Croningsand*. Durch sorgfältiges Mischen, Sieben und Verdunsten des Lösungsmittels wird ein wirtschaftlicher Harzanteil von unter 3 % in der Formstoffmischung dann erreicht, wenn jedes einzelne Sandkorn gerade ausreichend mit einem dünnen Lackfilm umhüllt ist. Der harzumhüllte, trockene und rieselfähige

Tab. 2.22 Phenolharzgebundene Form- und Kernherstellverfahren im Fahrzeugbau nach Gardziella und Müller

Verfahren	Croning-Maskenformverfahren	Hot-Box	Cold-Box	Kaltharz (No-Bake)
Anteil in Prozent	35	20	30	15
Harz-Härter-System bestehend aus	Novolake und Hexamethylentetramin	flüssige Resole und saure Härter	modifizierte Novolake, Resole, Diisocyanate, Begasen mit Aminen	Phenolresole und aromatische Sulfonsäuren
Sandtemperatur bei der Verarbeitung	250 °C bis 300 °C	200 °C bis 250 °C	Raumtemperatur	Raumtemperatur
Sandbinder-Zustand	trocken, rieselfähig	formgerecht, feucht	formgerecht, feucht	feucht, fließend
Anwendung des Verfahrens für	Formmasken und Hohlkerne	Kerne und Hohlkerne	Formen und Kerne	Formen und Kerne
Typische Beispiele	Kurbelwellen, Nockenwellen, Zylinderköpfe, Gehäuse	Wassermantel, Gehäusekerne, Auslasskrümmerkerne	kleinere Kerne für Nabens, Lagerdeckel, Differenzialgehäuse	Motorblöcke für den Lkw-Bereich

Croningsand wird von den Großverbrauchern von Masken- und Kernsanden in eigenen Anlagen erzeugt oder zugekauft.

Das **Hot-Box-Verfahren** dient hauptsächlich zur sehr genauen Fertigung von Kernen für Zylinderköpfe, Motoren, Getriebe- und Lenkgehäuse. Der flüssige Resolharzbinder wird mit sauren Härtern und mit Kernsand gemischt. Das Verdichten in der 200 bis 250 °C warmen, geteilten Metallkernbüchse erfolgt mit Druckluft bis 7 bar. *Hot-Box-Sand* ist preisgünstiger als harzumhüllter *Croningsand* und lässt sich als feuchter, nicht rieselfähiger Formstoff auch in komplizierten und kleinen Kernbüchsen verdichten. Das Aushärten wird durch thermisches Spalten der Ammoniumsalze spontan eingeleitet und durch die dabei entstehende Säure noch außerhalb der warmen Kernbüchse fortgesetzt, z. B.



d. h., Ammoniumsulfat zerfällt zu Ammoniak und Schwefelsäure.

Das Hot-Box-Verfahren erlaubt kürzere Taktzeiten als das *Croning*-Verfahren. Den Kernsanden werden oft noch geringe Mengen *Stärke* oder *Melasse* zugemischt, um den Kernzerfall nach dem Abguss zu erleichtern und die Putzarbeit zu verringern. Der stechende Ammoniageruch deutet schon aus größerer Entfernung auf dieses Verfahren hin.

Mit dem **Cold-Box-Verfahren** nach *Ashland* werden meist Kerne für Seriengussstücke, aber auch Formmasken gefertigt. Der Ablauf bei der Kernfertigung ist vergleichbar mit den Arbeitsschritten beim CO₂-Verfahren. Das organische Zweikomponentenbindersystem wird als formgerechter, nicht rieselfähiger Formstoff durch den gasförmigen Katalysator bei Raumtemperatur in Sekunden im Kernkasten ausgehärtet.

Der besondere Verfahrensvorteil liegt in der kalten Kernbüchse – *Cold-Box* – oder Modellplatte, die damit aus Modellholz oder Kunststoff sein kann und bei gleicher Genauigkeit preiswerter als die Metallausführung ist.

Eine weitere wichtige Variante des Bindersystems mit Phenol-Kresol-Harzen ist das *No-Bake-Verfahren* oder *Cold-Set-Verfahren*, das im deutschen Sprachraum **Kalثارzverfahren** genannt wird. Der Formstoff wird in der häufig fahrbaren *Füll-Mischmaschine* formgerecht selbstfließend eingestellt und direkt in den Kernkasten bzw. die Kasten- oder Herdform gefüllt. Der Härter besteht aus einer wässrigen aromatischen Sulfonsäure, z. B. Benzolsulfonsäure, und kann so eingestellt werden, dass die Mischung bis zu vier Stunden formbar bleibt. Das Verdichten wird meist nur durch Vibrieren der Kernkästen erreicht. Dieses Verfahren ist bei größeren Kernen und Formen für Werkzeugmaschinenguss und beim Guss von Motorenblöcken für Lkws verbreitet. Formmasken aus *Kalثارzsand* sind wegen der verhältnismäßig langen Aushärtezeit bisher nicht üblich.

Danach lässt sich die Maskenform mit Phenolharzbindern im Vergleich zur tonausbundeten Kastenform oder zur kastenlosen Form abgrenzen durch

- Gussmassen kleiner als 100 kg,
- Wanddicken kleiner als 60 mm,
- fast halbiertes Toleranzfeld,
- Gussrauheit zwischen 25 µm und 160 µm.

Die Einhaltung der MAK-Werte z. B. für Phenol und Formaldehyd bei der Kern- und Formherstellung sowie in der Abluft einschließlich der karzinogenen Pyrolyseprodukte wie Benzol und Benzpyren macht Absaugsysteme an jeder Maschine und die Kapselung der abgegossenen Formen erforderlich.

Der Rücklauf der gebrauchten Sande ist bisher nur teilweise möglich und verursacht stark steigende Deponiekosten. Die Deponierbarkeit von Altsanden wird zzt. nach der Trinkwasserverordnung beurteilt. Gemessen werden als Summenwert die Konzentrationen von sechs verschiedenen polzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen im Altsand selbst und in dessen wässrigem Auszug.

Jährlich müssen etwa 2 Mio. t nicht deponiefähiger *Gießereialtsande* gießereiintern oder gießereiextern regeneriert werden. Der Harzanteil im Altsand wird in einer Aufbereitungsanlage bei hohen Temperaturen im Drehrohr abgebrannt. Dabei entstehen ca. 90 % Kernsand, den die Gießerei zurücknimmt und etwa 10 % (Fein-)Staub, der in der Bauindustrie als Rohstoff eingesetzt wird.

Der Altsand von Monoformstoffsystemen, z. B. einer Maskenformanlage, lässt sich einfacher regenerieren als ein bentonithaltiger Mischsand einer Kastenformanlage mit z. B. vier verschiedenen Kernbindersystemen in variablen Mengen.

2.5.2 Gießverfahren mit verlorenen Formen nach verlorenen Modellen

Aus der Römischen Kaiserzeit sind Kleinbronzen und Reiterstandbilder erhalten, die ohne Formteilung nach dem damals aus dem Orient bekannten *Wachsausschmelzverfahren* gegossen wurden.

Im Mittelalter wurden von den Glockengießern außer der Glockenschablone *Wachsmodellplatten* für Inschriften und Verzierungen verwendet. An den ältesten gusseisernen Geschützen und Steinbüchsen, die im 14. Jahrhundert aufkamen, wurden schwierige Formteile, wie Ösen, Ring und schmückende Verzierungen mit Schriften durch *Wachs* oder *Tierfette*, wie z. B. Talg („*Unschlitt*“), ausgeformt.

Als Seriengießverfahren führte man ein Wachsausschmelzverfahren unter dem Namen *Präzisionsguss* zum Fertigen von chirurgischen Instrumenten aus Kobaltlegierungen in New York ein (ab etwa 1930). Der Durchbruch gelang vor und während des Zweiten Weltkrieges, als Präzisionsgussteile ohne spanende Nacharbeit in Serien gefertigt wurden.

Die genormte Bezeichnung *Feinguss* wurde eingeführt, um von der durch mechanische Verfahren möglichen Präzision beim unzulässigen

Vergleich mit spanenden oder spanlosen Bearbeitungsverfahren abzugrenzen.

2.5.2.1 Feingießverfahren

Das hochentwickelte Feingießverfahren gestattet die Herstellung von Gussteilen mit gegenüber anderen Gießverfahren höherer Maßgenauigkeit und geringerer Oberflächenrauheit. Die ein teilige keramische Form und das Modell gehen dabei stets verloren. Alle Gusswerkstoffe sind nach diesem Verfahren gießbar. Die Feingussstücke haben keine Formteilung und sind grattfrei. Feinguss ist ein Seriengießverfahren mit Stückmassen zwischen etwa 2 g und 9 kg. Die große konstruktive Freizügigkeit wird durch den ein teiligen Formenaufbau erreicht.

Der erste Verfahrensschritt beginnt mit dem Fertigen des teuren *Ur-* oder *Muttermodells* in Stahl oder Aluminium auf Werkzeugmaschinen. Das Muttermodell ist geteilt und berücksichtigt die beim Formen und Gießen auftretenden Volumenänderungen. Diese sind werkstoff- und geometrieabhängig. Sie werden an Hand der Ergebnisse von meist mehreren Probeabgüssen ermittelt.

Vom Muttermodell formt man die geteilten Kokillen für die *Wachsmodelle*. Die Teilung ist nötig, damit das Wachsmodell entnommen werden kann. Die beiden Kokillenhälften werden in einem Stützrahmen aus Stahl oder Gusseisen durch niedrigschmelzende, naheutektische Blei-Zinn-Bismut-Legierungen schwindungsfrei ver vielfältigt. Das Urmodell wird mit der Acetylen flamme geschwärzt oder mit einer vorgespannten etwa 5 µm dicken Gummifolie vom *Weißmetall* getrennt, weil flüssige Trennmittel sich in den feinsten Konturen leicht festsetzen. Bohrungen, Kerne und Hinterschneidungen können mit Schiebern und Abzugsteilen ausgeführt werden.

Das Herstellen der Wachsmodelle (Abb. 2.77a) ist der Spritzgießtechnik der Kunststoffe entlehnt. Die Beanspruchungen beim Füllen unter der Wachs presse sind so gering, dass Weißmetall ausreichend verschleißbeständig ist und die Wärme schnell genug ableitet.

Modellwachse sind Gemische aus verschiedenen natürlichen und synthetischen Wach-

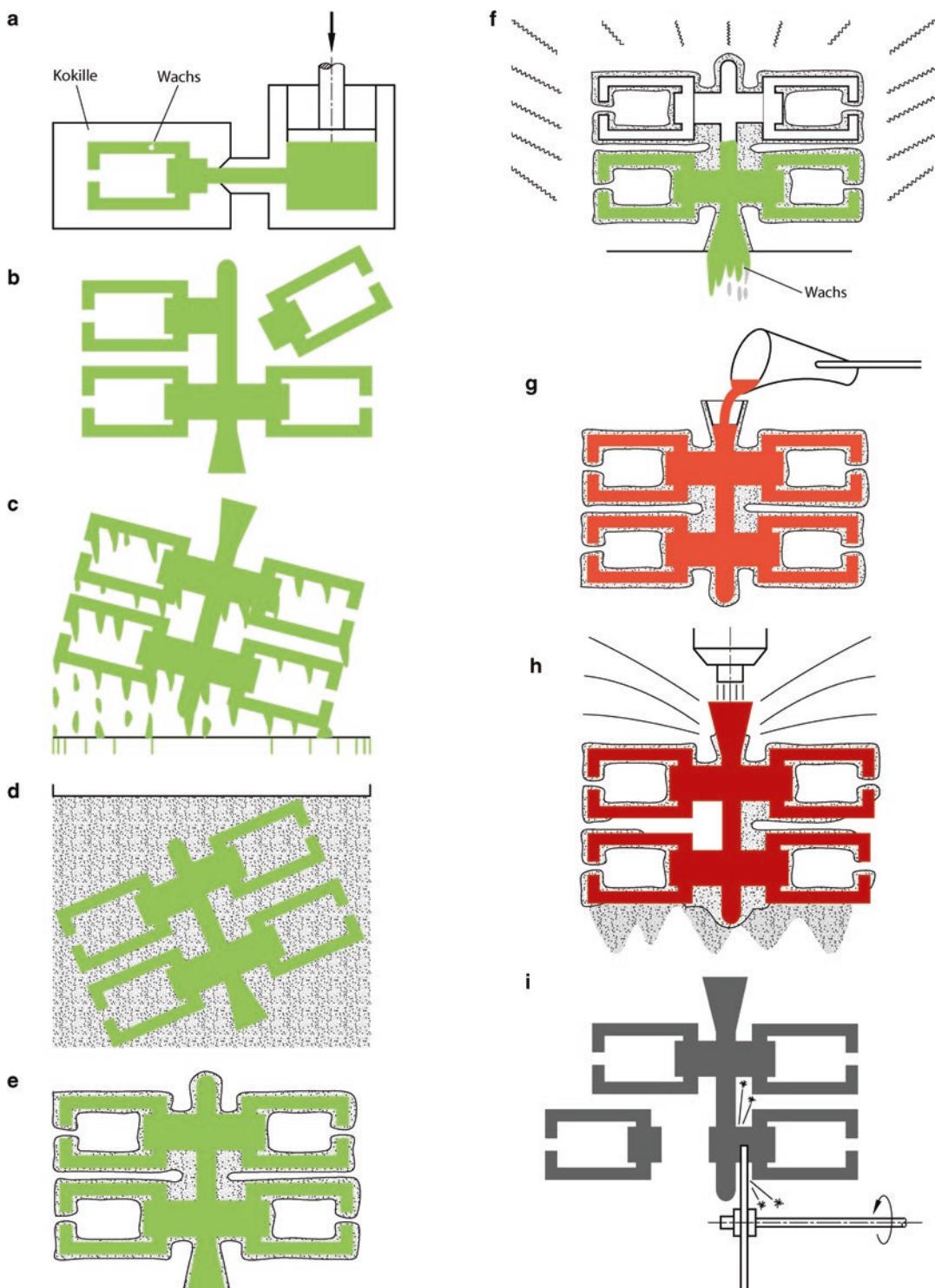


Abb. 2.77 Fertigungsschritte für Feinguss nach dem Schalenformverfahren. **a** Modellherstellung; **b** Montieren der Modelltraube von Hand; **c** Tauchen in keramische Masse; **d** Besanden; **e** Schalenbildung durch mehrmaliges Tauchen und Besanden; **f** Wachsausschmelzen und Brennen der Form; **g** Gießen in die heiße Form; **h** Ausklopfen, bzw. Zerstören der Form; **i** Abtrennen der Gussstücke. (Quelle: Fachausschuss Feinguss im VDG/ZfG)

sen mit Zusätzen. Der Schmelzbereich liegt bei den niedrigschmelzenden Typen zwischen 60 °C und 65 °C, bei den höher schmelzenden zwischen 65 °C und 90 °C. Sie sollen im festen Zustand bei Raumtemperatur genügend hart und fest, aber nicht zu spröde sein, damit beim Entformen aus der Kokille und beim Befestigen an der Modelltraube keine Deformationen oder Brüche auftreten. Modellwachs soll rückstands-frei verdampfen und verbrennen. Die Schwin-dung im festen Zustand soll gering sein, ebenso die Volumenzunahme beim Übergang vom festen in den flüssigen Zustand, um die luft-getrocknete Formschale beim Ausschmelzen (Abb. 2.77f) nicht zum Reißen zu bringen.

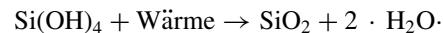
In Handarbeit werden die Modelle mit dem Trichter, den Verteilerstangen und den Läufen zu *Modelltrauben* oder *Modellbüumen* montiert (Abb. 2.77b). Dazu wird das Modell am Anguss mit dem erwärmt Spatel örtlich angeschmolzen und gegen den Gießlauf gedrückt. Die Wachsmodelle werden so montiert, dass sie nach dem Gießen noch gut mithilfe von Trennscheiben oder Bandsägen vom Angussystem abtrennbar sind.

Durch Tauchen in eine brennende, feinkeramische Masse erhält die Modelltraube den hochtemperaturbeständigen Überzug, die sog. *Feinschicht*. Sie wird beim Gießen unmittelbar mit der Schmelze in Berührung kommen und entscheidend die Oberflächengüte des Guss-stücks beeinflussen.

Die Modelltraube, dünn mit der Feinschicht überzogen, wird nach dem Abtropfen und Vor-trocknen zunächst besandet. Durch sechs- bis zehnmaliges Tauchen und Besanden wer-den die Schichten aufgebacken, bis man bei einer Schalendicke von 5 bis 8 mm eine aus-reichende Festigkeit der Formschale erreicht (Abb. 2.77e).

Die Modelltraube wird danach für acht bis zehn Stunden zum Trocknen bei Raum-temperatur aufgehängt, hierbei verdunstet der durch Hydrolyse gebildete Alkohol. Beim Brennen der Formen wird das Wachs bei Tem-peraturen um 120 °C flüssig und fließt aus der Form. Es kann zum größten Teil aufgefangen werden.

Bei üblichen Brenntemperaturen zwischen 650 °C und 1000 °C wird das Hydratwasser der Kieselsäure ausgetrieben:



Die Formschale ist damit *keramisch* gebunden. Sie wird noch warm, freistehend ohne Hinterfüllen wie in (Abb. 2.77g) abgegossen.

Die Genauigkeit beim Feingießen erreicht man durch die aufwendige Modell- und Formherstellung. Bei den Feingusstoleranzen werden die *Genauigkeitsgrade* D_1 bis D_3 unterschieden, Tab. 2.23. Es gelten die folgenden Abhängigkeiten:

- D_1 für Maße ohne Toleranzangaben,
- D_2 für allgemeine Genauigkeiten,
- D_3 für erhöhte Genauigkeiten.

Den Nennmaßbereichen bis 500 mm ist der Genauigkeitsgrad D_1 als *Allgemeintoleranz* zugeordnet. Im Genauigkeitsgrad D_2 kann bis zu dem Größtmaß 100 mm das *Toleranzfeld* 1,06 ohne Einschränkung angewendet werden. Der erhöhte Genauigkeitsgrad D_3 ist den Großserien vorbehalten und entspricht ungefähr der Streuung, die gleiche Feingussstücke verschiedener Serien untereinander aufweisen.

Die riefenfreie Gussoberfläche hat eine (ge-mittelte) *Rautiefe* $R_z = 5,9$ bis $32 \mu\text{m}$.

Um komplizierte Werkstücke nach dem Fein-gießverfahren wirtschaftlich herstellen zu kön-nen, müssen mehrere der folgenden Voraus-setzungen gleichzeitig erfüllt sein:

- Das Gussstück wird als Serienteil benötigt.
- Der Fertigungsaufwand sollte gering sein, eine mechanische Bearbeitung entfällt.
- Nichtebebene Funktionsflächen und Durch-brüche mit geforderter hoher Maßgenauigkeit erschweren oder verhindern eine spanende Bearbeitung.
- Für Bauteile aus Werkstoffen mit besonderen Eigenschaften, z. B. Werkstücke aus hoch-legierten Stählen mit geringer Wanddicke.

Das im Detail nicht einfach lösbare Kombinationsproblem zeigt der bisher geringe Feingussanteil in

Tab. 2.23 Maßtoleranzen nach VDG-Merkblatt P 690 für Längen, Breiten, Höhen und Mittenabstände in Millimeter für Feinguss (Auszug)

Nenn- bzw. Grenzmaßbereich		Länge, Breite, Höhe						Mittenabstand			
		Genauigkeitsgrad									
		D_1 (ohne Toleranzen)		D_2 (allg. Genauigkeit)		D_3 (erhöhte Genauigkeit)		D_1	D_3		
über	bis	Abmaß	Feld	Abmaß	Feld	Abmaß	Feld	Abmaß	Abmaß		
	6	$\pm 0,10$	0,20	$\pm 0,08$	0,16	$\pm 0,06$	0,12	$\pm 0,25$	$\pm 0,16$		
6	10	$\pm 0,12$	0,24	$\pm 0,10$	0,20						
10	14	$\pm 0,15$	0,30	$\pm 0,12$	0,24	$\pm 0,09$	0,18				
14	18	$\pm 0,20$	0,40	$\pm 0,14$	0,28						
18	24	$\pm 0,25$	0,50	$\pm 0,17$	0,34	$\pm 0,12$	0,23	$\pm 0,32$	$\pm 0,20$		
24	30	$\pm 0,30$	0,60	$\pm 0,20$	0,40	$\pm 0,14$	0,27				
30	40	$\pm 0,37$	0,74	$\pm 0,25$	0,50	$\pm 0,17$	0,33	$\pm 0,50$	$\pm 0,30$		
40	50	$\pm 0,44$	0,88	$\pm 0,30$	0,60	$\pm 0,20$	0,39				
50	65	$\pm 0,52$	1,04	$\pm 0,38$	0,76	$\pm 0,23$	0,46	$\pm 0,71$	$\pm 0,45$		
80	100	$\pm 0,68$	1,36	$\pm 0,53$	1,06	$\pm 0,30$	0,60	$\pm 0,90$	$\pm 0,60$		
140	160	$\pm 0,92$	1,84	$\pm 0,72$	1,44	$\pm 0,38$	0,76	$\pm 1,15$	$\pm 0,85$		
180	200	$\pm 1,12$	2,24	$\pm 0,88$	1,76	$\pm 0,43$	0,86	$\pm 1,80$	$\pm 1,00$		
200	225	$\pm 1,28$	2,56	$\pm 0,95$	1,90	$\pm 0,47$	0,93				
250	280	$\pm 1,64$	3,28	$\pm 1,15$	2,30	$\pm 0,56$	1,12	$\pm 2,20$	$\pm 1,25$		
280	315	$\pm 1,84$	3,68	$\pm 1,25$	2,50	$\pm 0,63$	1,26				
400	450	$\pm 2,70$	5,40	$\pm 1,80$	3,60	$\pm 0,90$	1,80	$\pm 3,10$	$\pm 2,00$		
450	500	$\pm 3,00$	6,00	$\pm 2,00$	4,00	$\pm 1,00$	2,00				

der Pkw-Fertigung: Zum Beispiel werden aus dem warmfesten Stahl GX20CrCoMoV12-2 Wirbelkammern für Dieselmotoren im Gewicht von ca. 53 g gegossen. Der martensitische Gusszustand erlaubt keine Bearbeitung der Innenkontur der Wirbelkammer. Die Einbaumaße in den Zylinderkopf werden durch Außenrundschleifen eingestellt.

Hauptanwendungen für Feinguss sind maßgenaue Serienteile mit glatten Oberflächen sowie mit einbaufertigen Funktionsflächen bei geringstem Bearbeitungsaufwand (meist Sonderwerkstoffe).

Feinguss wird zunehmend verwendet im Bereich Allgemeiner Maschinenbau, für Werkzeuge und Armaturen, für Strömungsmaschinen und Pumpen, im Chemieanlagenbau, in der Feinwerk- und Medizintechnik.

2.5.2.2 Vollformgießverfahren

Das Gießen der Schmelze in eine ungeteilte Form, in der sich noch ein *Schaumstoffmodell* befindet, wird *Vollformgießen* genannt. Der Modellwerkstoff, geschäumtes *Polystyrol* (bekannt als Verpackungs- und Wärmedämmmaterial), wird in der Modelltischlerei durch Sägen oder mit dem Heizdraht zugeschnitten. Modell und Angussystem aus Schaumstoff werden nach dem Handformverfahren, z. B. mit Kaltharzsand oder Zementsand, eingeformt. Nach dem Abbinden des Formstoffs verbrennt man, soweit von außen möglich, einen Teil des Schaumstoffs mit der Gasflamme. Beim vorsichtigen Eingießen der Schmelze vergast und verbrennt der Rest vollständig und rückstands frei. Die Form muss zunächst so langsam gefüllt

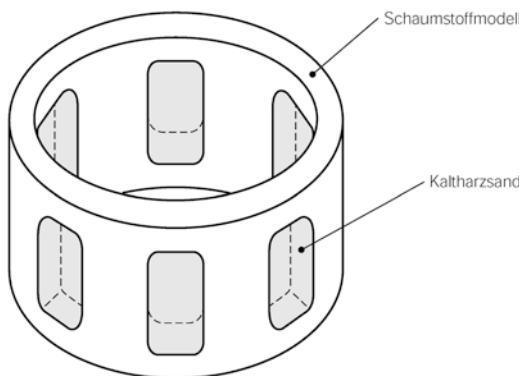


Abb. 2.78 Schaumstoffmodell eines Käfigläufers; die Durchbrüche werden mit Kaltharzsand kernlos geformt

werden, dass die kohlenwasserstoffhaltigen Zersetzungsgase explosionsfrei in oder außerhalb der Form verbrennen.

Vollformgießen bietet Kostenvorteile bei mittleren bis größten Gussstücken in der Einzelfertigung, bei kleinen Serien und bei Versuchsteilen, da Formarbeit und Modellkosten eingespart werden können. Der Käfigläufer wie in Abb. 2.78 kann z. B. nach dem Schablonenformverfahren mit Kernen im Herd eingeformt werden. Für die Alternative, die Vollform, werden Schaumstoffblöcke ringförmig zugeschnitten, aneinander geklebt und an den Durchbrüchen ausgeschnitten. Kerne sind nicht erforderlich.

Das Gussstück ist *gratfrei* und hat keine *Formschrägen*. Es wird überwiegend Gusseisen, aber auch Stahlguss nach dem Vollformverfahren vergossen.

Neben der Möglichkeit mit mechanisch oder chemisch verfestigtem Formstoff gibt es beim Vollformgießen eine weitere Alternative. Dabei wird ein trockener und rieselfähiger Formsand verwendet, der nur durch leichtes Vibrieren seine optimale Schüttdichte erreicht. Beim Einfüllen der Schmelze zerstört sich das Modell durch Depolymerisation. Dieses sog. Trockensand-Vollformgieten wird auch als Lost Foam Process bezeichnet.

Versuchsweise werden zzt. Zylinderköpfe, Saugrohre, Labyrinthgehäuse und sogar komplekte Kurbelgehäuse aus Aluminiumlegierungen gegossen.

Das im Jahr 1968 entwickelte *Magnetformverfahren* formt eine geschäumte Modelltraube mit Angussystem in rieselfähigem, feinkörnigem Eisenpulver als Formstoff mit einem Magnetfeld von etwa 1000 Gauß in dem oben offenen Formkasten ein. Die Teilchendurchmesser betragen 0,1 bis etwa 0,5 mm. Das Magnetfeld verdichtet den Formstoff um den geschlichteten Schaumstoff herum und wird erst nach dem Erstarren der Gießtraube abgeschaltet.

Aus dem wieder rieselfähigen Eisenpulver wird die noch rotwarme Gusstraube entnommen. Der Formstoff gelangt nach dem Kühlung und Reinigen wieder in den Kreislauf. Hergestellt werden kleine, meist kernlose Seriengussstücke.

Beim *Unterdruck-Vollformgießen* wird die geschlichtete Modelltraube in binderfreiem Quarzsand wie beim *Vakuumformen* behandelt. Die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren lässt sich nur schwer beurteilen und muss im Einzelfall am Seriengussstück im Vergleich zu konkurrierenden Formverfahren nachgeprüft werden.

2.5.3 Gießverfahren mit Dauerformen

Die wichtigsten Dauerformverfahren⁷ (Druckguss und Kokillenguss) sind *werkstoffspezifische* Form- und Gießverfahren für wenige ausgewählte Legierungen in größeren Serien. Die Verfahren lassen sich zweckmäßiger mit den speziellen Gusswerkstoffen darstellen (Abschn. 2.3.2.1 Druckgusslegierungen und 2.3.2.2 Zink-Druckgusslegierungen).

2.5.3.1 Druckgießverfahren

Man unterscheidet das Warm- und das Kaltkammerverfahren. Beim *Warmkammerverfahren* (Abb. 2.79) ist der Warmhalteofen mit der Gießkammer und dem Saugrohr Bestandteil der *Druckgießmaschine*. Nur wenige Zinklegierungen und Magnesiumlegierungen können außer Zinn- und Bleiwerkstoffen nach dem Warmkammerverfahren vergossen werden, denn einige Schmelzen jener Legierungen greifen die

⁷ Gießen in Dauerformen. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=wissensfloater).

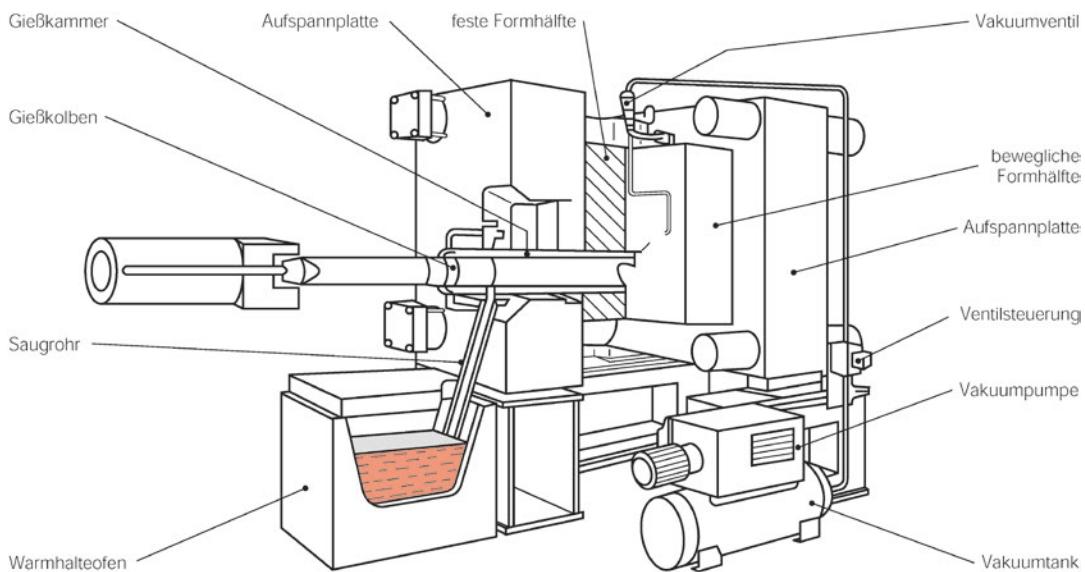


Abb. 2.79 Warmkammergießmaschine Vacural. (Nach Ritter)

Eisenwerkstoffe der Pumpe und des Warmhalteofens an.

Nach dem *Kaltkammerverfahren* werden hauptsächlich Aluminium- und wenige Magnesiumlegierungen vergossen. Die Druckgießmaschine und der Warmhalteofen mit dem Schöpfiegel als Dosiergefäß sind stets getrennt, wie Abb. 2.80 zeigt. Beim Druckgießen presst man die flüssige oder teigige Druckgusslegierung unter hohem Druck rasch in metallische Dauerformen. Der Arbeitsdruck wird durch einen unmittelbar wirkenden Kolben auf den Gusswerkstoff übertragen. Dabei werden auf die Schmelzen Drücke zwischen 70 bar und 1000 bar ausgeübt.

Von den teuren Dauerformen werden lange Haltbarkeit, hohe Maßgenauigkeit und Oberflächengüte verlangt. Aus diesem Grund werden sie aus niedrig- oder hochlegierten dreidimensional durchgeschmiedeten Warmarbeitsstählen gefertigt, die folgende Eigenschaften besitzen sollen:

- Gut bearbeitbar,
- anlassbeständig,
- warmfest,
- verschleißbeständig (Erosion),
- nicht warmrissanfällig.

Die Lebensdauer einer *Druckgießform* von 50.000 Abgüssen und mehr kann man mit Verfahren zur Oberflächenbehandlung weiter erhöhen:

- Feinschleifen und Läppen,
- Hartverchromen und
- Nitrieren.

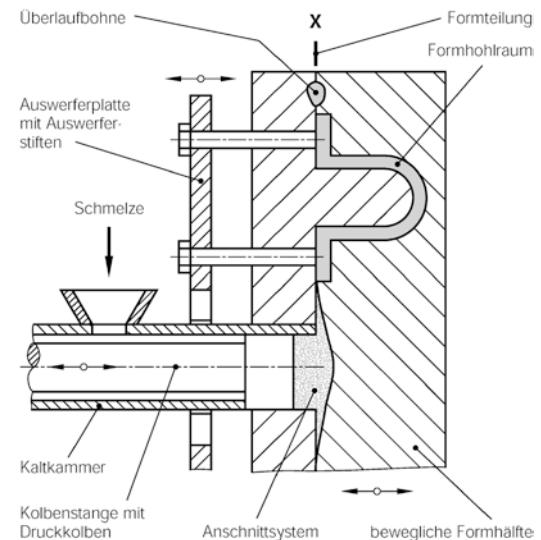


Abb. 2.80 Waagerechte Kaltkammer-Druckgießmaschine, schematisch

Wichtig ist vor allem bei Leichtmetallen das Vorwärmnen der Formen auf 200 bis 260 °C und ein Halten der Form beim Gießtakt auf möglichst hoher Temperatur, aber kleinem Temperaturintervall durch Verwenden geeigneter *Kühlsysteme*.

Für Aluminiumlegierungen und Magnesiumgusswerkstoffe ist die *Kaltkammer-Druckgießmaschine* besonders geeignet, da der Gusswerkstoff während der kurzen Verweilzeit in der nicht beheizten Kammer am wenigsten Gelegenheit zur schädlichen, qualitätsmindernden Eisenaufnahme hat.

Abb. 2.80 zeigt die Bauart mit waagerecht liegender nichtbeheizter *Kaltkammer* und senkrecht geteilter Druckgussform. Der Kolben drückt das flüssige Metall durch das *Anschnittsystem* in den Formhohlraum. Die eingeschlossene Luft kann über Kanäle, z. B. an den *Auswerferstiften* entweichen. Der erste Teil der Schmelze, der mit der Luft und den Schmiermitteldämpfen Oxide und Schlieren gebildet hat, wird über das Gussstück hinaus in einer *Überlaufbohne* aufgefangen. Durch Verschieben der Auswerferplatte werden das Gussstück und das Anschnittsystem nach dem Erstarren aus der geöffneten Druckgießform entfernt. Nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur soll sich das Anschnittsystem mit den Überlaufbohnen möglichst durch einfaches Abbrechen entfernen lassen, sodass nur der Gießgrat in der Formteilung und die Bruchstellen durch Putzen oder Schleifen geglättet werden müssen.

Druckgießmaschinen werden mit in der Formteilung wirksamen *Schließkräften* zwischen 0,3 MN und 15 MN automatisch und programmgesteuert betrieben. Der Gießtakt läuft dabei wie folgt ab:

- Form schließen,
- Kerne einfahren,
- Entlüften oder Vakuum,
- Einschießen der Schmelze,
- Halten und Nachdrücken,
- Kerne ausfahren,
- Form öffnen,
- Gussstück auswerfen.

Der bei kleinen Wanddicken bereits im Anschnittsystem erstarrende Gusswerkstoff wird durch den hohen Gießdruck in 1/100 bis 1/1000 s z. T. im teigigen Zustand mit hohen Geschwindigkeiten in die Form gepresst. Dabei werden unter Wirbelbildung große Gasmengen aus den sich zerlegenden Trennmitteln und dem Kolbenfett im Gussstück eingeschlossen. Die Formfüllung einer Al-Legierung auf einer Kaltkammermaschine wurde von Hansen über ein eingebautes Fenster aufgezeichnet. Gefilmt wurden Füllvorgänge mit Kolbengeschwindigkeiten bis 50 m/s durch eine Hochgeschwindigkeitskamera bei 1500 Bildern/s. Druckgusslegierungen sind nach Ruge und Lutze i. Allg. nicht porfrei schweißbar. Die Poren werden vor allem von dem unter hohem Druck eingeschlossenen Wasserstoff verursacht. Mit schweißtechnischen Maßnahmen jeder Art sind keine porfreien Schweißverbindungen herstellbar. In den letzten Jahrzehnten führten aber Untersuchungen zu einer entscheidenden Verbesserung der Schweißeignung von Druckgusslegierungen.

Die durch den Gießprozess in den Druckgusswerkstoff eingeschleppte Gasmenge muss also auf unterkritische Werte verringert werden. Dazu gehören eine möglichst effektive Entlüftung der Form sowie die Wahl geeigneter Formtrenn- und Kolbenschmierstoffe und eine effektive Spülgasbehandlung der Aluminiumschmelze. Aluminiumwerkstoffe mit Wasserstoffgehalten $\leq 3\text{ ppm}$ lassen sich erfahrungsgemäß praktisch porfrei schutzgasschweißen.

Druckgießen ist das wirtschaftlichste gießtechnische Urformverfahren für Großserien von Gussteilen mit kleinsten bis mittleren Abmessungen bei Stückmassen unter 40 kg. Es kommt aber sehr darauf an, Druckgussteile form- und gießgerecht zu konstruieren. Die Freiheit der Gestaltung ist begrenzt, weil folgende Bedingungen einzuhalten sind:

- Stückmassen $< 40\text{ kg}$,
- mittlere Abmessungen: 100 bis 1800 cm², Sprengfläche in der Teilungsebene,
- gleichmäßige Wanddicken von 1 bis 25 mm,
- geometrisch einfache Grundkörper,
- möglichst keine Hinterschneidungen.

Hinterschneidungen sind ausschließlich durch Ändern der Formteilung oder verschiebbare Kerne in der Form möglich, weil Sandkerne hohen Gießdrücken nicht standhalten. Losteile und Kernschieber verteuern jedoch die Form und machen sie stör-anfälliger. Zahlreiche integrierte Funktionsflächen führen an anspruchsvollen Gussteilen jedoch zu vielen Hinterschneidungen, die nur mit Schieberwerkzeugen herstellbar sind. Ein solches Beispiel ist das Konvertergehäuse, Abb. 2.81.

Feinkörnige Gussgefüge entstehen durch Überhitzen der Schmelze auf etwa 900 °C und Wahl einer möglichst niedrigen Gießtemperatur (630 bis 650 °C). Diese Temperaturdifferenz fördert die homogene Keimbildung. Wegen der geringen Löslichkeit für Eisen ist es möglich, im *Gießofen* in einem Eisentiegel unter Schutzgas zu schmelzen und mit einer Genauigkeit von ± 7 °C zu vergießen.

Die Oberflächen der Gussstücke sind nicht korrosionsbeständig und oxidieren. Durch eine Nachbehandlung werden die Oberflächen chemisch beständiger, z. B. durch

- Beizen mit Salpetersäure,
- Bichromatisieren mit Kaliumdichromat,

- Anstreichen mit Dispersionen oder
- Beschichten mit Kunststoffen.

Viele Druckgussstücke neigen zur Selbst-aushärtung. Darunter versteht man die meist unerwünschte Änderung der Bauteileigenschaften Festigkeit, Härte, Zähigkeit und Maß-beständigkeit in Abhängigkeit von der Auslagerungszeit.

Ein noch zu lösendes Druckgussproblem ist die Serienherstellung öldichter, dünnwandiger Getriebegehäuse. Bei der spanenden Bearbeitung werden Einschlüsse, Lunkerzonen, poröse und schwammige Stellen unter der Guss-haut angeschnitten. Jedes Gehäuse wird mehrfach im Fertigungsprozess abgedrückt oder durch Vakuum-Imprägnierverfahren mit Reaktionsharzen nachgedichtet.

Die Gießeigenschaften der Magnesium–Alu-minium-Legierungen lassen sich aus dem Zu-standsschaubild Mg–Al, Abb. 2.47, abschätzen. Die Schmelzen erstarren in einem breiten Temperaturintervall und bilden magnesium-reiche β -Mischkristalle. Wegen des auf das gleiche Volumen bezogenen und gegenüber

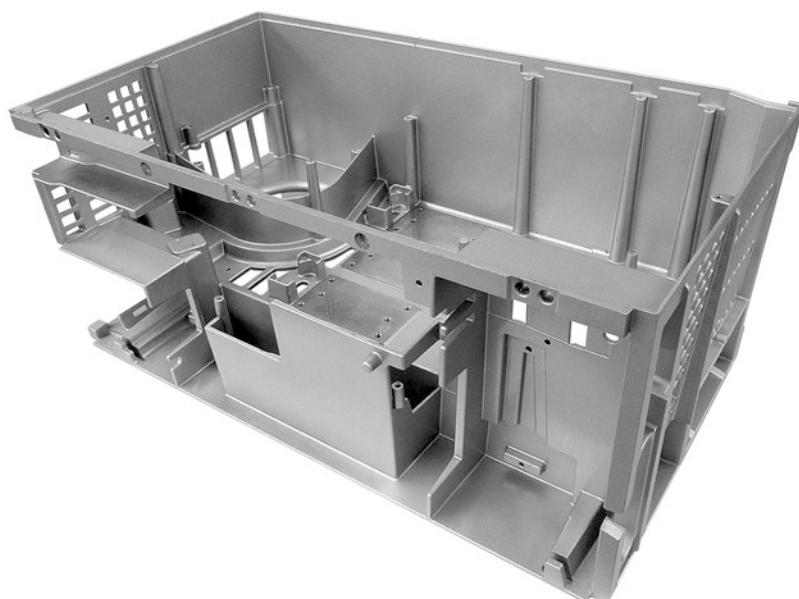


Abb. 2.81 Konvertergehäuse aus der Aluminium-Druckgusslegierung AlSi9Cu3 (Georg Fischer Automotive AG)

Aluminiumlegierungen nur halb so großen Wärmeinhalts der Magnesiumlegierungen werden die Gießformen thermisch geringer belastet. Die Standzeiten sind deshalb länger als bei Aluminiumlegierungen. Magnesium-Druckguss ist gekennzeichnet durch

- größere Lunkerneigung,
- größere Schwindung und hohe Auswerfertemperatur,
- größeren Speisungsaufwand und große Gießgeschwindigkeit und
- zunehmende Warmrissneigung.

Auch bei Druckguss sind z. B. Festigkeit, Härte und Zähigkeit wanddickenabhängig. Die oberen Grenzwerte werden bei mittleren, gleichmäßigen Wanddicken von 3 bis 5 mm erreicht. Dünne und dickere Wände haben, als Folge des Herstellverfahrens, ein unregelmäßigeres Werkstoffgefüge mit Luftblasen, Oxideinschlüssen und Schlieren. Wegen der freiwerdenden Blasen kann man Druckgussstücke i. Allg. nicht schweißen, austüpfeln oder dekorativ oberflächenbehandeln.

- Die Weiterentwicklung der Druckgießtechnik wird bei Gussteilen mit mittleren bis dickeren Wänden vorangetrieben durch *Nachdrückverfahren*: Die unter dem Druck des Hauptkolbens stehende Schmelze wird mittels eines Nebenkolbens nachverdichtet.
- *Thermische Analyse von Druckgießformen*: Die Bestimmung der Temperaturverteilung in einer Form ermöglicht eine gezielte Erstarrung bei gleichmäßigerem Gefüge. *Vakuumverfahren*: Sie ermöglichen eine Hybridtechnik, d. h. Verdichten und Nachdrücken der erstarrenden Schmelze erfolgt wie beim Kaltkammerverfahren.

Mit der Hybridtechnik lässt sich hochwertiger Druckguss erzeugen, der bei weiter verringerten Wanddickentoleranzen durch die Freiheit von eingeschlossener Luft, Kolbenfettdämpfen und Dämpfen von Trennmitteln auch austüpfelbar und schweißbar ist.

Durch Verbundguss oder Fügen lassen sich die Eigenschaften verschiedener Druckgusswerkstoffe

in einem Zusammenbau vereinen. Abb. 2.82 zeigt die erste Innentür mit einem Fensterrahmen aus Magnesium-Druckguss ($MgAl5Mn$) und einem Innentürrahmen aus der Aluminium-Druckgusslegierung $AlMg5Si2Mn$. Bei dieser Anwendung sind die Gussteile verschraubt.

Druckgussbauteile ersetzen bisweilen auch mehrteilige Blechteilkonstruktionen und tragen so zum Leichtbau bei. Der Vorgänger des heute durch Aluminium-Druckguss hergestellten Federbeindoms einer Pkw-Achse in Abb. 2.83



Abb. 2.82 Innentürrahmen aus Aluminium-Druckguss mit Fensterrahmen aus Magnesium-Druckguss. (Quelle: Georg Fischer Automotive AG)



Abb. 2.83 Federbeindom für Audi A6 aus $AlSi10MnMg$ T6 (Georg Fischer Automotive AG, AUDI AG)

bestand aus 9 Blechteilen. Durch Substitution der Blechkonstruktion konnte das Gewicht hier um 40 % reduziert werden.

Besonders wirtschaftliche Druckgussserien mit bis zu 1 Mio. Abgüssen je Form lassen sich mit *Zinklegierungen* auf Warm- oder Kaltkammermaschinen herstellen. Etwa 50 % der Zinkdruckgussstücke werden in Fahrzeuge eingebaut.

Der Aluminiumgehalt der Legierungen ermöglicht das Vergießen auf *Warmkammergießmaschinen*. Denn abweichend von der Kaltkammertechnik bildet beim Warmkammerverfahren das Gießvorratsgefäß mit dem Druckkolben aus Eisenwerkstoffen eine Baueinheit. Der Aluminiumgehalt der Schmelze begrenzt die Eisenaufnahme auf weniger als 0,05 % Eisen. (Bekanntlich verbindet sich Eisen beim *Feuerverzinken* begierig mit Zink zu Mischkristallen.)

Die Gießtemperaturen und Wärmeinhalte der Druckgusslegierungen GD-AISI, GD-MgAl und ZP5 sind in Tab. 2.24 der möglichen Anzahl der Abgüsse je Form gegenübergestellt.

Die *Formhaltbarkeit*, d. h. die Wirtschaftlichkeit des Druckgießens ist demnach in erster Linie von der Wärmemenge abhängig, die die Form abzuführen hat. Die Einflüsse der Strömungsmechanik durch den Formenaufbau stehen erst an zweiter Stelle.

Für die werkstoffgerechte Konstruktion von Druckgussteilen aus Zinklegierungen sind die ausgezeichnete Gießbarkeit und der niedrige Schmelzpunkt < 419 °C bestimmd. Es werden vier übliche Wanddickenbereiche unterschieden, die sich hauptsächlich aus Größe, Gestalt, Form-schrägen und Radien des Gussstücks ergeben:

Tab. 2.24 Mögliche Anzahl der Abgüsse von Druckgießformen für Al-, Mg- und Zn-Legierungen (Nach Schmidt)

Druckgusslegierungen		EN AC-AISI... alt: GD-AISI...	EN MC-MgAl... alt: GD-MgAl...	ZP5 alt: GD-ZnAl4Cu1
Gießtemperatur	°C	650 bis 700	650 bis 700	390 bis 420
Formtemperatur	°C	200 bis 280	250 bis 380	150 bis 180
Wärmeinhalt im Bereich von Form- bis Gießtemperatur	kJ/kg	1062	1162	268
	kJ/10³ cm³	2759	2090	1764
Anzahl der Abgüsse je Form		50000 bis 120000	80000 bis 200000	200000 bis 1000000

Gussstückgröße	Wanddickenbereich [mm]
Kleinstteile	0,3 bis 0,6,
Kleinteile	0,6 bis 1,0,
Mittelteile	1,0 bis 1,5,
Großteile	1,5 bis 2,5

Für Druckgussteile wird im VDG-Merkblatt P 680 der Begriff der *einhaltbaren Toleranzen* definiert. Tab. 2.25 ist ein Auszug dieser Richtlinie für Zinkdruckguss. Vier Bereichen von Raumdiagonalen sind 16 Nennmaßbereiche zugeordnet.

Für jede mögliche Kombination werden die Toleranzgruppen „a“ und „b“ unterschieden:

- a für formgebundene Maße in einer Formhälfte,
- b für nicht formgebundene Maße, Formteilung überschreitend.

Die Zuordnung eines Nennmaßes zu den Toleranzgruppen kann aus Abb. 2.84 ersehen werden. Zur Gruppe „a“ gehören alle Maße, die in einer Formhälfte liegen, zur Gruppe „b“ alle Maße, die von der Form- oder Kernteilung durchschnitten werden.

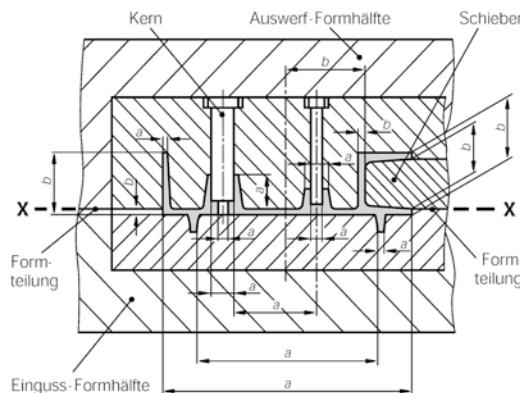
Beispiel

Eine runde, schmale Abdeckblende mit einer Raumdiagonale von 68 mm kann in der Gruppe „a“ ein toleriertes Nennmaß von $25 \pm 0,1$ mm oder von $25 \pm 0,26$ mm in der Gruppe „b“ besitzen.

Die Massen von Zinkdruckgussteilen betragen etwa zwischen 1 g und 3 kg. Auch dickwandige, kompakte Gussstücke können bei län-

Tab. 2.25 VDG-Merkblatt P 680; Toleranzen in μm für Zink-Druckgusslegierungen (Auszug)

Bereich der Raum- diagonalen mm	Toler- anz- gruppe	Nennmaß in mm														
		bis 6	über 6 bis 10	über 10 bis 18	über 18 bis 30	über 30 bis 50	über 50 bis 80	über 80 bis 120	über 120 bis 180	über 180 bis 250	über 250 bis 315	über 315 bis 400	über 400 bis 500	über 500 bis 630	über 630 bis 800	über 800 bis 1000
bis 50	a	50	60	70	85	100										
	b	120	150	180	210	250										
50 bis 180	a	60	75	90	105	125	150	175	200							
	b	150	180	215	260	310	370	435	500							
180 bis 500	a	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400			
	b	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970			
über 500	a	90	110	135	165	195	230	270	315	360	405	445	485	550	625	700
	b	240	290	350	420	400	600	700	800	925	1050	1150	1250	1400	1600	1800

**Abb. 2.84** Einzuhaltende Toleranzen für Zinkdruckguss
(Nach VDG-Merkblatt P 680)

geren Gießtakten hergestellt werden. Der Hauptvorteil des Zinkdruckgusses gegenüber dem Leichtmetalldruckguss sind die verschiedenen Möglichkeiten der *dekorativen Oberflächenbehandlung*. Zinkdruckguss lässt sich nach *Entfetten* und *Beizen*

- glanzverkupfern und mit Messing überziehen,
- vernickeln und verchromen,
- versilbern und vergolden.

Dekorative Effekte in abgestuften Brauntönen werden durch Phosphatieren, Patinieren und Teilbürsten erreicht. Farbanstriche, Hammer-

schlaglacke und Beschichtungen mit Kunststoffen lassen sich einbrennen. Die große Menge der dekorativen Massenteile werden vorzugsweise aus Zinkdruckguss hergestellt:

- Bau- und Möbelbeschläge,
- Fahrzeug- und Haushaltsmaschinenteile und
- Spielzeug.

Die Gussstücke sind auf den ersten Blick meist nur vom Fachmann zu erkennen, z. B. die mattverchromten Schermesserträger bestimmter Trockenrasierer aus ZP5 mit Wanddicken von 0,9 bis 2,9 mm. Die Tür des Miele-Waschautomaten mit einem Außendurchmesser von 385 mm und einem Innendurchmesser von 255 mm liegt in der Nennmaßgruppe 315 mm bis 400 mm nach Tab. 2.25 und kann in der Toleranzgruppe „a“ ohne mechanische Bearbeitung das Bullauge aus Pressglas geklemmt halten. Angegossen sind das Türscharnier und der Türschlosskasten mit den die Formteilung überschreitenden Maßen der Toleranzgruppe „b“. Dieses hoch integrierte große Gussstück ist durch Glanzverchromen dekorativ oberflächenveredelt und verleiht dieser Tür im Vergleich zu anderen Mischbauweisen eine besonders hohe Steifigkeit.

2.5.3.2 Kokillengießverfahren

Beim *Kokillenguss* werden Schmelzen unter dem Einfluss der Schwerkraft oder geringer

Drücke in Dauerformen steigend oder fallend vergessen. Die Dauerformen bestehen aus dem perlitischen lamellaren Gusseisen, dem *Hämatit*. Sie sollen mehr als 10.000 Abgüsse aushalten. Durch Cr- und Mo-Zusätze sowie niedrige P- und S-Gehalte werden *Temperaturwechselbeständigkeit* und *Formstabilität* erreicht. Nur für Verschleißteile der Dauerform werden an thermisch hoch beanspruchten Eingüssen oder Kernen warmfeste Stähle verwendet. Kokillenguss wird vergossen in

- Vollkokillen,
- Gemischtkokillen oder
- Halbkokillen.

Alle Teile der Form bestehen bei *Vollkokillen* aus Gusseisen oder Stahl. *Gemischtkokillen* bieten die Möglichkeit, durch Sandkerne die Gestaltungsfreiheit zu vergrößern. *Halbkokillen* bilden eine Formhälfte an der Dauerform ab, die andere an einer Sandform, meist um Warmrisse zu vermeiden. Das Kokillengießen ist ein Seriengießverfahren. Seine Entwicklung führte zu

- höheren Stückmassen (< 100kg),
- druckdichten Gussgefügen,
- glatten Oberflächen (Galvanik) und
- hohen Gießleistungen (Mechanisierung).

Das Füllen der Kokillen kann mittels *Schwerkraftgießen*, *Niveauverschiebung* der Schmelze wie in kommunizierenden Röhren oder durch geringen *Gasdruck* auf die Schmelze erfolgen.

Beim mechanisierten Schwerkraftgießen werden meist mehrere Kokillen zu einem *Gießkarussell* vereinigt und aus einem Vorrats- und Gießgefäß im Takt mit Schmelze gefüllt. Das Gießgefäß in Abb. 2.85 kann auch als *Warmhalteofen* mit einer zeit-, massen- oder füllstandsgesteuerten Gießvorrichtung ausgerüstet werden. Für jedes Kokillengussteil stimmt man durch sinnvolles Probieren („*Einfahren*“) Gieß- und Kokillentemperatur sowie die Erstarrungszeit aufeinander ab.

Beim *Kipptiegelverfahren* wird die Form durch Niveauverschiebung der Kokille gefüllt. Die

Form ist mit dem Gießgefäß, das gleichzeitig Vorratsbehälter und *Gießofen* ist, fest verschraubt. In Abb. 2.86 in der Stellung „2“ wird die Kokille mit Schmelze gefüllt. Der Einguss in die Kokille ist so bemessen, dass die gesamte Schmelze als Speiser wirksam wird. Während der Stellung „1“ erstarrt das Gussstück. Die Schmelze im Anschnitt ist noch flüssig und fließt in den Gießofen zurück.

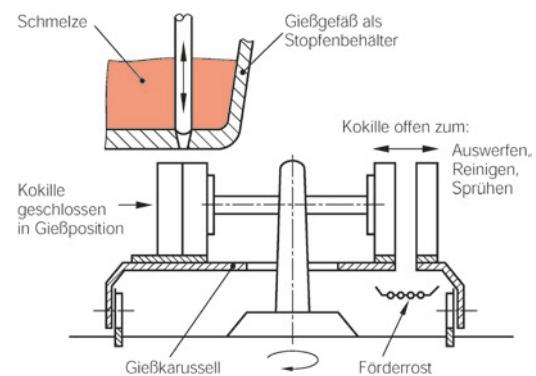


Abb. 2.85 Mechanisiertes Schwerkraftkokillengießen auf dem Karussell

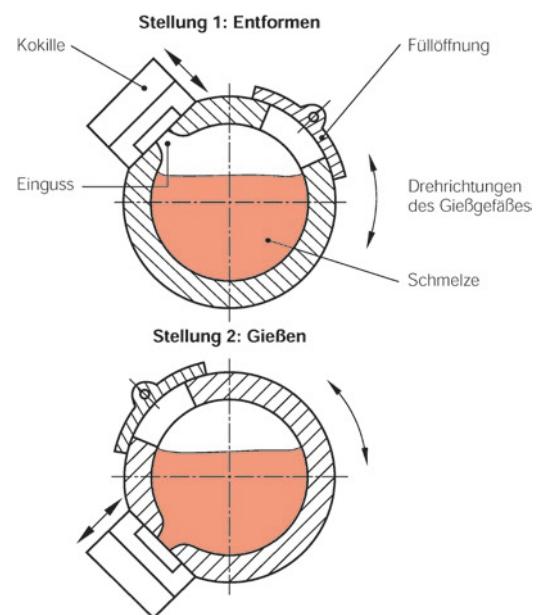


Abb. 2.86 Kipptiegelverfahren in Position *Entformen* (Stellung 1) und in Position *Gießen* (Stellung 2)

Das Kokillengießen nach dem Kipptiegelverfahren ermöglicht ein hohes *Ausbringen*. Daraunter versteht man das Verhältnis von Gussstückmasse zur Gesamtmasse; diese ist die Gussstückmasse einschließlich der zum Gießen erforderlichen Speiser, Stangen, Grate und Aufmaße. Es gilt:

$$\text{Ausbringen} = \frac{\text{Gussstückmasse}}{\text{Gesamtgussmasse}} (\times 100\%).$$

Das Ausbringen und der mögliche Grad der Mechanisierung bestimmen weitgehend die Wirtschaftlichkeit eines Gießverfahrens. Einfacher Aluminium-Kokillenguss kann ein Ausbringen bis 95 % erreichen, Gusseisen bei komplizierter Gestalt des Gussteils nur knapp 70 %.

Beim *Niederdruck-Kokillengussverfahren* erfolgt die Formfüllung mithilfe eines geringen Überdrucks von 0,2 bar bis 0,4 bar auf die Schmelze. Abb. 2.87 zeigt schematisch das Gießen einer Pkw-Felge. Die Kokille ist mit dem Gießofen durch ein Steigrohr direkt mit der Schmelze verbunden. Die Form wird langsam steigend ohne Turbulenz gefüllt. So entsteht ein Gussgefüge mit ausgezeichneten Gebrauchseigenschaften. Die Erstarrung ist dabei von oben nach unten gerichtet, damit der Ofen gleichzeitig die Funktion eines zentralen, unendlich großen Speisers übernimmt. Das Ausbringen liegt dann meist über 95 %. Der Anguss wird mit einem Fräser entfernt. Die Bohrungen für die Radmuttern lassen sich gleich mitgießen.

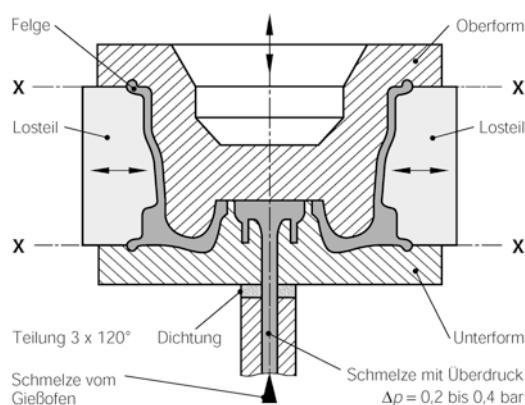


Abb. 2.87 Niederdruckkokille für Pkw-Felgen in Position Gießen, schematisch

Wegen der vorteilhaften Art der Formfüllung und Wärmeabfuhr in Kokillen lassen sich feinkörnige, blasen- (poren-) und lunkerfreie Gussgefüge erzielen, die druck- und vakuumdicht sind. Diese Ergebnisse beruhen im Einzelnen auf folgenden Tatsachen:

- Turbulenzarmes Gießen,
- steigend oder fallend möglich,
- hohe Kokillentemperaturen 250 bis 350 °C,
- Wanddicken 1 bis 25 mm,
- Sandkerne und Losteile.

Bewährte Niederdruck-Kokillengussteile sind Felgen, Saugkrümmer und Kurbelgehäuse mit sechs und acht Zylindern. Für Erstausrüstungen werden in Europa mehr als 15 Mio. Felgen je Jahr gegossen. Etwa 5 % günstigere Herstellkosten entstehen, wenn die Gießerei im Flüssigverbund mit einem Elektrolysewerk arbeitet.

Von den Eisengusswerkstoffen sind folgende Teile für das Schwerkraftgießen im Karussell besonders gut geeignet: *Fahrzeughydraulik*, insbesondere Bremszylinder, Bremssattel oder -klaue. Auch der *Armaturenguss*, vor allem in Messing und in großen Serien in Form von Schwermetall-Kokillengussstücken, ist weit verbreitet.

2.5.3.3 Schleudergießverfahren

Beim *Schleudergießen* gießt man die Schmelze in eine um die Mittelachse drehende rohr- oder ringförmige Kokille. Der Gusswerkstoff wird als Folge der drehzahlabhängigen Zentrifugalkraft gegen die Kokillenwand gepresst und nimmt beim Erstarren außen deren innere Form an. Diese kann auch profiliert sein. Im Inneren bildet sich symmetrisch zur Drehachse ein zylindrischer Hohlkörper. Die Wanddicke des Hohlzylinders kann durch genaues Abmessen oder Abwiegen der Schmelze verkleinert oder vergrößert werden. Die Drehachse kann horizontal, vertikal oder auch geneigt sein.

Die ersten horizontalen Schleudergießmaschinen wurden in Deutschland ab 1926 für gusseiserne Druckrohre mit wassergekühlter Kokille nach *de Lavaud* gebaut. Heute werden in solchen Heißkokillen hauptsächlich 6 m lange

Muffenrohre für Gas- und Wasserleitungen aus duktilem Gusseisen mit Kugelgrafit geschleudert, außerdem Zylinderlaufbüchsen und Kolbenringe aus Sondergusseisen. Der Vorteil der Heißkokille besteht im Wegfall der energieaufwändigen Zerfallsglühung, bei der der unerwünschte Ledeburit in Eisen und Grafit „zerfällt“.

Die möglichen Durchmesser liegen zwischen etwa 65 mm und 600 mm bei Wanddicken von etwa 5 bis 50 mm. Bei den horizontalen Schleudergießmaschinen ist zum Überwinden des Schwerefelds der Erde gegenüber anderen Winkellagen die geringste (kritische) Mindestdrehzahl n_{kr} erforderlich.

Beispiel

Für einen Hohlzylinder aus dem Werkstoff Gusseisen mit der Dichte $\rho \approx 7\text{ g/cm}^3$ und einem Außendurchmesser $D = 100\text{ mm}$ ergibt sich z. B. eine theoretische kritische Drehzahl n_{kr} von etwa 1300 min^{-1} .

Aus gießtechnischen Gründen (Lunker-, Schlackenfreiheit und Verdichtung) arbeitet man mit Drehzahlen bis zu 4000 min^{-1} . Die Zentrifugalkraft erzeugt den Gießdruck p , der drehzahlabhängig auf Werte bis zu 50 bar ansteigen kann.

Für die Güte von Schleuderguss ist das Verhalten von unerwünschten, kleinen Sand- und Schlackenteilchen unter dem Einfluss der Flieh- kraft von besonderem Interesse. Diese speziell leichten, sehr festigkeitsmindernden Be- standteile der Schmelze können sich unter der Wirkung der Zentrifugalkraft nur an der inneren Oberfläche des Hohlkörpers ab scheiden und sind nicht wie bei allen anderen Gießverfahren im Gussstück regellos verteilt.

Eine Kokillenanordnung zum Schleudergießen für drei Räder zeigt Abb. 2.88. Der Kokillenträger ist mit dem Antriebsflansch einer Schleuderspindel fest verbunden, die auch den Ausstoßer enthält. Die vordosierte Schmelze wird über das verschiebbare Gießhorn in die sich bereits drehende Kokillenanordnung eingegossen. Sobald die erste Kokille gefüllt ist, wird die Schmelze durch das Gießhorn in Axialrichtung verschoben und füllt zunächst die

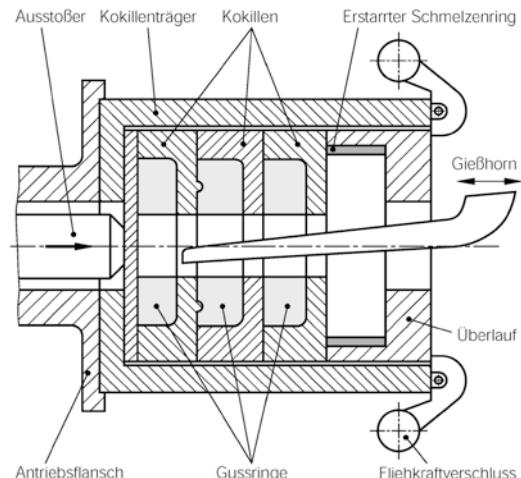


Abb. 2.88 Kokillenanordnung zum Schleudergießen von Gussringen bzw. Gussräder, schematisch

zweite und dann die dritte Kokille. Die Restschmelze wird vom sog. *Überlauf* aufgenommen und erstarrt als dünner Ring.

2.5.3.4 Stranggießverfahren

Wie schon bei den Kupferwerkstoffen erwähnt, wird ein erheblicher Anteil von ihnen als horizontaler Strangguss (GC) zu Halbzeugen mit Rund-, Sechs- und Vierkantquerschnitt vergossen. Daraus lassen sich dann preisgünstige Massendrehteile herstellen. Halbzeuge aus Stahl dienen meist als Vorprodukte für die Umformverfahren. Gießereitechnisch unterscheidet sich das Verfahren deutlich von der Formguss-herstellung. Beim Stranggießen mit Durchlauf-Kokille wird die Schmelze einem ortsfesten Urformwerkzeug zugeführt. Je nach Arbeits- und Bauweise unterscheidet man dis- und kontinuierlich arbeitende vertikale und horizontale Stranggießanlagen.

Die Erstarrung der Schmelze beginnt bereits in der Kokille, Abb. 2.89. Nach dem Austritt wird der Strang als Voll- oder Hohlprofil bis zur vollständigen Erstarrung durch Wasserduschen gekühlt. Nach dem Ablängen werden die Abschnitte ähnlich wie gegossene Blöcke durch Umformen weiter verarbeitet⁸.

⁸ Stranggießen von Gusseisen. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=QWzJyfjyfjU).

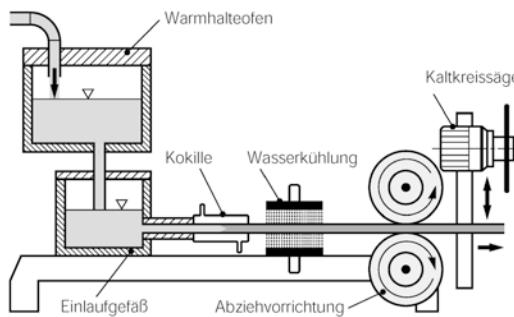


Abb. 2.89 Prinzip einer horizontalen kontinuierlichen Stranggießanlage. (Nach Spur)

Die in den Stahlwerken hergestellten Stranggussformate liegen bei Knüppelanlagen zwischen 100 und 550 mm Vierkant und bei Brammenanlagen bis zu 2500 mm. Auf horizontalen Stranggießanlagen lassen sich Rundstangen von 30 bis 350 mm Durchmesser, Hohlstangen bis 120 mm Außendurchmesser und 30 bis 60 mm Innendurchmesser sowie Sonderprofile aus Guss-eisen mit Lamellen- oder Kugelgraphit gießen.

2.5.3.5 Thixogießverfahren

Ein noch neues Anwendungsgebiet ist das senkrechte Stranggießen mit elektromagnetisch gerührter Schmelze (sog. Rheogießen). Dabei wird z. B. bei Aluminiumlegierungen ein feinkörniges, globulitisches Stranggefüge als Voraussetzung für das Thixogießen erreicht. Bei diesem Verfahren wird der Werkstoff bei einer Temperatur verarbeitet, die zwischen der Liquidus- und der Solidustemperatur liegt, also innerhalb des Erstarrungsintervalls. Der Werkstoff wird somit im halbfesten Zustand verarbeitet. Diese Technik wird auch als „Semi-Solid Metal Casting“ oder „Thixoforming“⁹ bezeichnet. Das nur teilweise (30 bis 40 %) geschmolzene Rohteil verhält sich wie ein Festkörper und kann mit Roboterzangen in die Gießkammer einer Druckgießmaschine eingesetzt werden. Unter dem Druck des Gießkolbens bewirken die Scherkräfte ein flüssig-

⁹Thixoforming- zwischen Gießen und Schmieden. Podcast des IFUM der Universität Hannover von B.-A. Behrens, Ph. Silberkuhl und F. Holz. Produktionstechnik: [youtube wissenschaftsfloater](https://www.youtube.com/wissenschaftsfloater).

keitsähnliches Verhalten des Materials („Thixotropie“¹⁰). Voraussetzung für das Thixogießen (es wird gegenwärtig noch in geringem Umfang eingesetzt) ist aber ein geeignetes, globulitisches Vormaterial, weil dendritische Gefüge das vollständige Einfüllen des halbgeschmolzenen Materials in die verzweigten, dendritischen Hohlräume (Druckanstieg!) verhindern.

Eine Grenze für das Verfahren setzt die Größe der Schnecke, in der das Granulat plastifiziert wird. Denn die Wärmezufuhr über die Heizbänder ist begrenzt. Die größten Maschinen haben z. Z. eine Schließkraft von ca. 10 MN für eine Gussmasse von 3,2 kg. Im Vergleich zu den traditionellen Gussverfahren sind thixotrope Schmelzen homogener. Die Gussteile weisen eine geringere Schwindung und eine höhere Zähigkeit auf. Die erreichbaren Wanddicken sind außerdem deutlich geringer: Bei kleinen Bauteilen 1 mm im Vergleich zu 2 bis 3 mm bei Druckguss.

Die Anwendungen für das Thixogießen liegen vorwiegend noch bei den Aluminium- und Magnesiumlegierungen, aber auch die Stahlverarbeitung nimmt ständig zu. Bei der Herstellung von Fahrwerksteilen sind Radaufhängungen, Zylinderdeckel und weitere druckdichte Teile zu nennen. Weltgrößter Hersteller von Thixoforming-Maschinen ist Japan Steel Works. Durch die Anforderungen zum Leichtbau in der Automobilindustrie ergeben sich hier folgende potenziellen Bauteile für das Thixogießen:

- Sitzkomponenten wie Lehne und Sitzrahmen,
- Lenkräder und Lenkstockaufnahme,
- Elektronik- und Displaygehäuse,
- Zylinderkopfdeckel,
- Träger für Mittelkonsole und Instrumente.

Durch Thixogießen von Aluminium werden in der deutschen Kfz-Industrie bereits Leichtbauteile in-

¹⁰Der Begriff der Thixotropie (griechisch: thixis „das Berühren“ und tropos „Ändern durch Berühren“ = Beanspruchen) bezeichnet bei Nicht-Newton'schen Fluiden eine Abhängigkeit der Fluid-Viskosität von der mechanischen Krafteinwirkung und deren Dauer. Bei konstanter Scherspannung wird im Laufe der Zeit ihre Viskosität geringer, d. h. sie werden dünnflüssiger.

dustriell gefertigt (z. B. Anschlussrohre für den Luftspeicher im VW Phaeton und Türknoten für den AUDI A4). Im Gegensatz zu den Gießverfahren können einige spezielle Verfahren auch dem Umformen zugerechnet werden. So wird beim Thixoschmieden das mit Robotern greifbare Rohteil in einem Gesenk in seine Endform gepresst. Die Krafteinleitung erfolgt über die gesamte Formoberfläche. Während beim Gesenkschmieden eines Flansches 4 Umformschritte mit einer Umformkraft von jeweils 435 t benötigt werden, beträgt beim Thixoschmieden der Materialeinsatz nur 45 % und der Kraftbedarf ist kleiner als 25 %. Neben dem Schmieden ist auch das Thixo-Strangpressen und Thixo-Querfließpressen möglich.

2.6 Gießen von Motoren im Leichtbau

2.6.1 Sandguss im Kernpaketverfahren und Kokillenguss mit Rahmenkernaufbau

Steigende Vorgaben des Gesetzgebers zur CO₂-Reduzierung bei Kraftfahrzeugen erfordern zunehmend effiziente Motoren mit einer hohen

Leistungsdichte und geringem Gewicht. Im Jahre 1990 waren noch 2 L Hubraum notwendig, um eine Leistung von 100 kW zu erzeugen; 2015 sind es nur noch 0,9 L Hubraum. Dies entspricht einer Leistungsdichte von mehr als 110 kW pro Liter Hubraum. Abgasladesysteme bei Ottomotoren und hoch verdichtende Dieselmotoren erzeugen Zündschlagdrücke von bis zu 200 bar bei Temperaturen von nahezu 250 °C im Zylinderkopf. Diesen extremen mechanischen Anforderungen halten nur Gussteile stand. Die zunehmende Leistungsdichte zwingt zum konstruktiven und werkstofflichen Leichtbau. Die Funktionen des Motors müssen in einen immer engeren Bauraum hinein konstruiert werden. So entfällt beim TFSI Motor 1,8 l (EA888) der AUDI AG der separate Abgaskrümmer durch Integration der Abgas kühlung in den Zylinderkopf (ZK) des Reihenvierzylindermotors, Abb. 2.90. Dies hat zur Folge, dass Luftführung und Wasserkühlung auf engstem Raum realisiert werden müssen. Die kleinsten Wanddicken des aus AlSi10Mg gegossenen Zylinderkopfes betragen nur noch 2,0 mm und stellen höchste Anforderungen an die Gestaltung von Gussteil, Form und Kernen. Der mehrteilige Sandkern für Luftführung und Wasserkühlung wird durch Industrieroboter auf

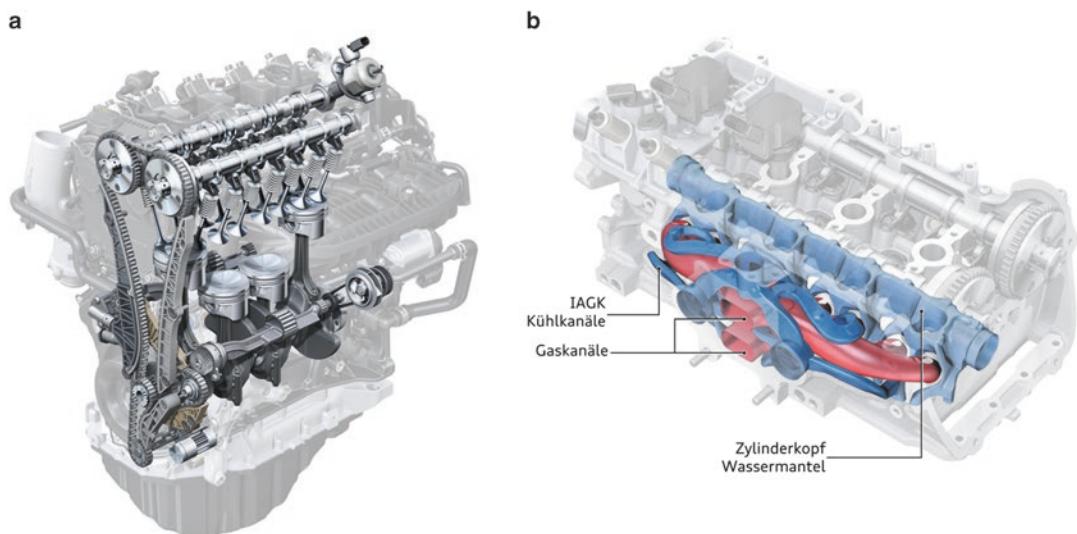


Abb. 2.90 AUDI TFSI Motor (EA888): Motor mit Grundtriebwerk (a) und Zylinderkopf mit integriertem Abgaskrümmer (b). (Quelle: AUDI AG)



Abb. 2.91 Sandkernpaket für den Zylinderkopf des Audi TFSI Motors, Montage auf einem Rundtakttisch durch Industrieroboter. (Quelle: NEMAK Wernigerode GmbH)



Abb. 2.92 Geöffnete Kokille für den AUDI-Zylinderkopf mit eingelegtem Sandkernpaket vor dem Abguss. (Quelle: NEMAK Wernigerode GmbH)

einem Rundtakttisch präzise und beschädigungs-frei montiert Abb. 2.91. Die Einhaltung engster Lagetoleranzen der Sandkerne wird durch

den Rahmenkernaufbau der Gießform erzielt. Abb. 2.92 zeigt die geöffnete Kokille mit eingelegten Sandkernen vor dem Abguss des Zylinderkopfes.

Das Zylinderkurbelgehäuse wird im Sandgussverfahren gegossen. Hierbei wird der Formhohlraum in einem umseitig geschlossenen Kernpaket gebildet, das vertikal auf einen mit Nassguss-Sand (Gemisch aus Sand, Bentonit, Kohlenstaub und Wasser) eben gefüllten Formkasten aufgesetzt wird, Abb. 2.93. In dieser 4fach-Gießform sind Teile des Gießsystems mit Anguss, Lauf und Filter eingearbeitet, sodass die Kavitäten im Kernpaket von unten steigend gefüllt werden können. Die Einzelteile des Kernpaketes sind chemisch gebundene Sandkerne, die in Kernschließautomaten hergestellt werden. Diese Kernfertigungslinie ist im verketteten Betrieb mit Robotern vollautomatisiert, um die Anforderungen an die Maßhaltigkeit bei Wanddicken < 3,0 mm im Guss-eisen GJL 250 sicherzustellen. Die Einzelkerne sind zu Kernaufbauten montiert, wobei Auflageflächen als sog. Kernmarken die Position zueinander exakt definieren. Bei der Montage kommen Schrauben, Nägel und Klebstoff zum Einsatz. Andernfalls würde der Auftrieb der Kerne beim Einfüllen der Schmelze zu einem unzulässigen Kernversatz führen. Industrieroboter erlauben die exakt reproduzierbare Positionierung und Lackierung der Kerne, die durch einen Schlichte-Überzug gegen das Anhaften der Schmelze geschützt sind.

Je vier Kernpakte in einem Formkasten werden auf einer verketteten Anlage in einer Gießzeit von 10 s gleichzeitig abgegossen. Die Schmelze fließt unter Schwerkrafteinwirkung mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s durch den Anschnitt in die Form. Überläufe sorgen für eine Entlüftung der Gießgase. Zum Ausgleich der Erstarrungsschrumpfung und für einen lunkerfreien Guss sind keine Speiser nötig, da die Grafitexpansion des GJL 250 bei entsprechender Einstellung der Schmelze ausreicht, um die Kontraktion des Metalls während der Erstarrung zu kompensieren.

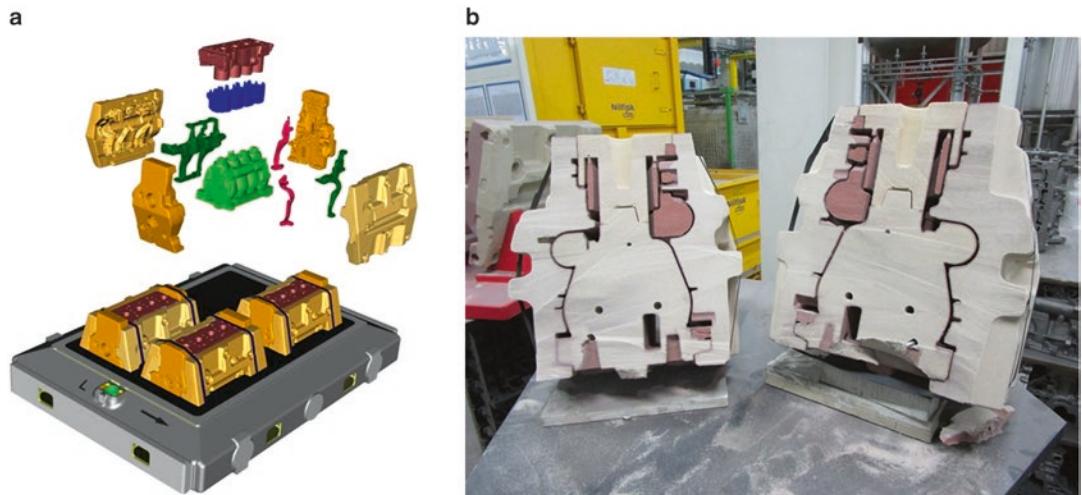


Abb. 2.93 Kernpaketaufbau für den Motorblock aus je 14 Sandkernen in 4fach-Belegung je Abguss im Formrahmen (a) und Kernpaket-Querschnitt mit den dünnwandigen Kavitäten (b). (Quelle: Eisenwerk Brühl GmbH)

2.6.2 Niederdruckkokillenguss von V8 Zylinderkurbelgehäusen aus Aluminium

Eine weitere Möglichkeit zur Gewichtseinsparung bietet der werkstoffliche Leichtbau. Beispiele hierfür aus dem Bereich des Motorenbau sind Nebenaggregate-Halter aus Leichtmetallen, Ölwanne aus Kunststoff oder Zylinderkurbelgehäuse (ZKG) aus Aluminium. Das Gießen komplexer Motorenteile mit Hohlräumen, Hinterschneidungen und dünnen Stegen stellt besonders hohe Anforderungen an den Gießereiprozess. Aus der Schmelze soll sich hier über gelenkte Erstarrung in allen Geometrie-Elementen ein gleichmäßiges und feinkörniges Gefüge ausbilden, das höchsten Festigkeitsanforderungen genügt. Dies ermöglicht bei Leichtmetallen u. a. der Niederdruckkokillenguss. Das Verfahren wird beispielsweise angewandt beim Gießen des Zylinderkurbelgehäuses des Audi V8 TFSI Motors aus monolithischem AlSi17Cu4MgNi, Abb. 2.94. Der Gesamtmotor leistet bis zu 382 kW (520 PS) bei einem Drehmoment von maximal 650 Nm. Um Kraftstoff einzusparen, können vier der acht Zylinder während der Fahrt durch das Motormanagement abgeschaltet werden.

Das Niederdruckkokillengießen ist sehr gut für die Herstellung von Teilen aus Aluminiumlegierungen in kleinen und mittleren Serien geeignet. Charakteristisch für dieses Verfahren sind eine turbulenzarme Füllung der Form und eine schnelle, gerichtete Erstarrung der Schmelze. Diese Gießereiprodukte zeichnen sich durch ein sehr gleichmäßiges, feinkörniges Gefüge aus und besitzen gute mechanische Eigenschaften, eine hohe Maßhaltigkeit sowie eine gute Oberflächenqualität. Die guten mechanischen Eigenschaften werden nicht zuletzt durch geringstes Risiko von kerbwirksamen Oxideinschlüssen sichergestellt. Diese Tatsache prädestiniert das Verfahren auch für die Herstellung von Leichtmetallrädern.

Die metallische Kokille aus Warmarbeitsstahl wird auf der Tischplatte einer Gießbühne zusammengesetzt aus Rahmenteilen auf einer Grundplatte. Die Rahmenteile dienen zur Führung von beweglichen Schiebern und ermöglichen so das Öffnen und Schließen der Form.

Abb. 2.95 zeigt den unteren Teil der Kokille auf der Gießbühne. Vor jedem Gießzyklus werden alle Teile der Kokille mit einer Schlichte überzogen, um die Formfüllung ohne Fehler zu ermöglichen und Anhaftungen zu vermeiden sowie das anschließende Entformen zu erleichtern.

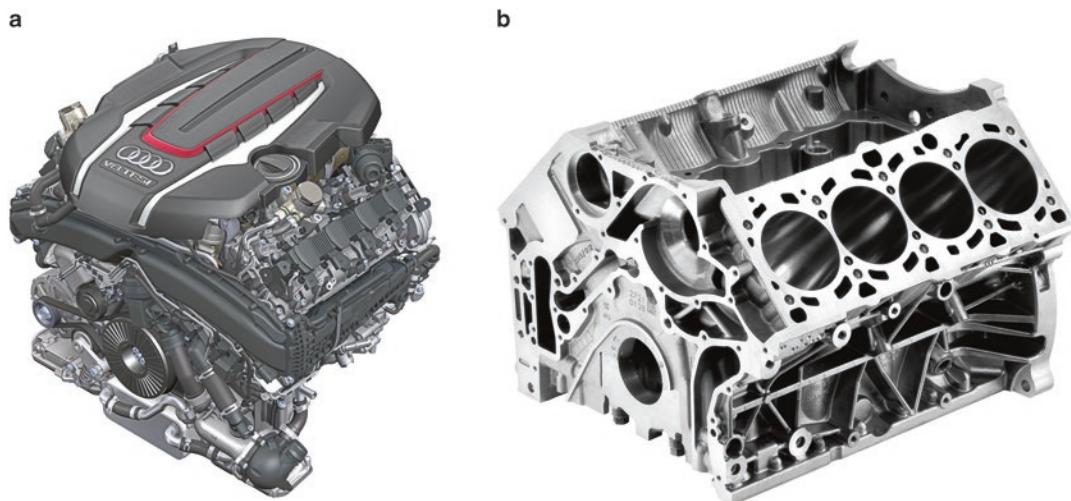


Abb. 2.94 Ansicht des AUDI TFSI Motors (a) und Zylinderkurbelgehäuse (ZKG) eines V8 Ottomotors aus Aluminium (b). (Quelle: AUDI AG und KS ATAG TRIMET Guss GmbH)

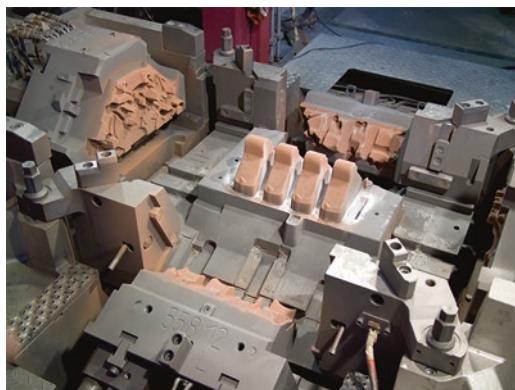


Abb. 2.95 Geöffnete ZKG-Kokille auf der Gießbühne. (Quelle: KS ATAG TRIMET Guss GmbH)

Der obere Teil der Kokille ist in einem Hubkorb aufgehängt, dessen vertikale Bewegung seitlich im Rahmen des Gießgerüstes geführt wird, Abb. 2.96. Den oberen Teil der Kokille bilden hier acht Kerne für die Zylinderbohrungen und ein Kern für die V-förmige Innengeometrie des Kurbelgehäuses. Hubzylinder und Schieber ermöglichen das vertikale und seitliche Öffnen bzw. Schließen der Kokille. Ein integriertes Wegmesssystem überwacht dabei den Hub. Im geschlossenen Zustand wird die Kokille verriegelt und die Formfüllung des vorgeheizten Gießwerkzeugs kann beginnen. Nach der Füll-

lung beginnt die aktive Kühlung der Kokille über luft- und wasserführende Kanäle zur gezielten Erstarrungskontrolle. Nur auf diese Weise können Lunker vermieden werden.

Nach dem Schließen der Kokille erfolgt die Formfüllung von unten, Abb. 2.97. Die in einem Tiegelofen unterhalb der Kokille vorgehaltene Schmelze wird mit einem Druck von 0,3 bar mit Stickstoff beaufschlagt und strömt so langsam von unten in die Form. Nach Erstarren des Angusses wird die Schmelze abgesenkt und strömt zurück in den Tiegel. Siebe im Anguss dienen als Keimbildner und beschleunigen die Erstarrung ohne Druck. Ein wirtschaftlicher Vorteil des Niederdruckkokillengießens besteht auch darin, dass kein Speiser existiert, der nachträglich recycelt werden muss. Hierdurch geht auch weniger Material durch Abbrand-Verluste verloren.

2.6.3 Einsatz von Simulationstechniken in der Gussteilentwicklung

Eine zunehmende Bedeutung hat heute die gießgerechte Gestaltung, die durch verschiedene Simulationen bereits in der Konstruktionsphase abgesichert werden kann. Geeignete

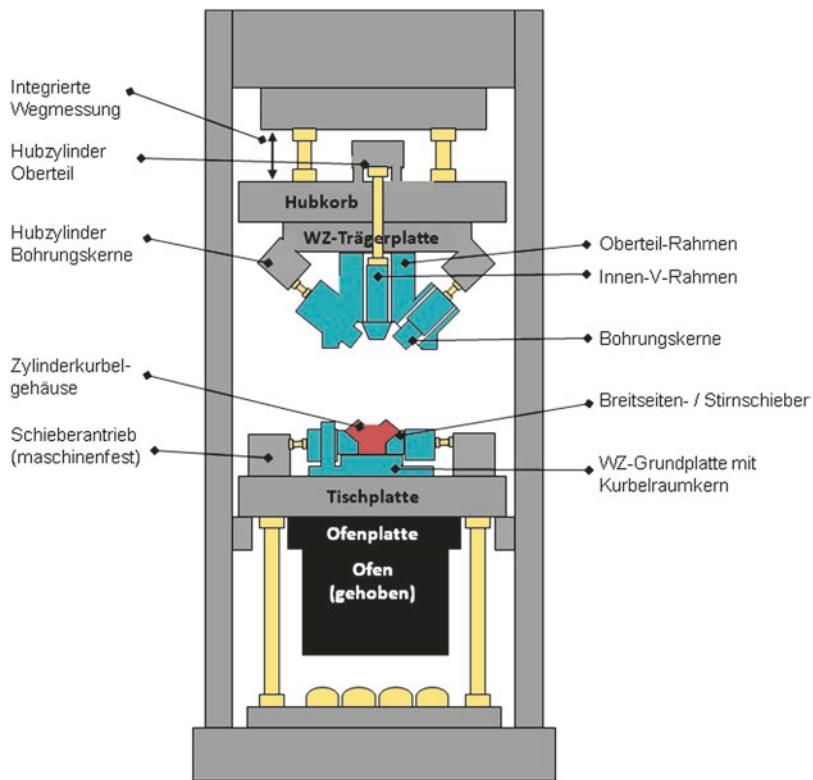


Abb. 2.96 Anlage für das Niederdruck-Kokillengießen, Prinzip nach R. Viets, AUDI AG

Simulationen zeigen den Formfüllvorgang ebenso wie Temperaturverteilungen und Erstarrungsvorgänge. Auf diese Weise können Gießfehler, wie Lunker, Kaltläufe oder ein fehlerhaft ausgeprägtes Gefüge, lange vor Auffertigung der Gießwerkzeuge erkannt und vermieden werden. Teure Nachbesserungen an Produkten und Werkzeugen lassen sich so vermeiden. Die Simulation der *Fließgeschwindigkeit bei der Formfüllung* ermöglicht beispielsweise die Software Flow3D. Dabei wird das gesamte schmelzhydraulische System aus Ofen und Formwerkzeug abgebildet. Idealerweise soll die Schmelze möglichst turbulenzarm in die Kokille strömen. Auch in engen Stegen ist ein Schwappen der Schmelze zu vermeiden, um Kaltläufen entgegen zu wirken. Abb. 2.98 zeigt die Fließgeschwindigkeiten bei der Formfüllung eines V8 Zylinderkurbelgehäuses mit einer Aluminiumschmelze. Das Schwappen der Schmelze im Bereich des

Kettenkastens (im Bild links oben erkennbar) kann durch Anpassung des Werkzeugs vermieden werden.

Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet der Simulation in der Bauteilentwicklung von Guss-teilen ist die *Vorhersage des Erstarrungsvorgangs*. Dies geschieht mit der Simulations-Software WinCast in einer zweistufigen Vorgehensweise. Zunächst wird die Temperaturverteilung nach der Formfüllung berechnet, Abb. 2.99. Diese Informationen dienen dann im zweiten Schritt als Eingangsgrößen bei der Simulation des Erstarrungsvorgangs.

Ziel ist die Lenkung des Erstarrungsvorgangs und die Vermeidung von isolierten Bereichen mit Restschmelze, in denen sich schwindungsbedingt Lunker bilden können. Durch eine Korrektur des Wanddickenverlaufs oder zusätzliche Kühlungen im Werkzeug müssen diese Restschmelzebereiche an den Speisungspfad angebunden werden.

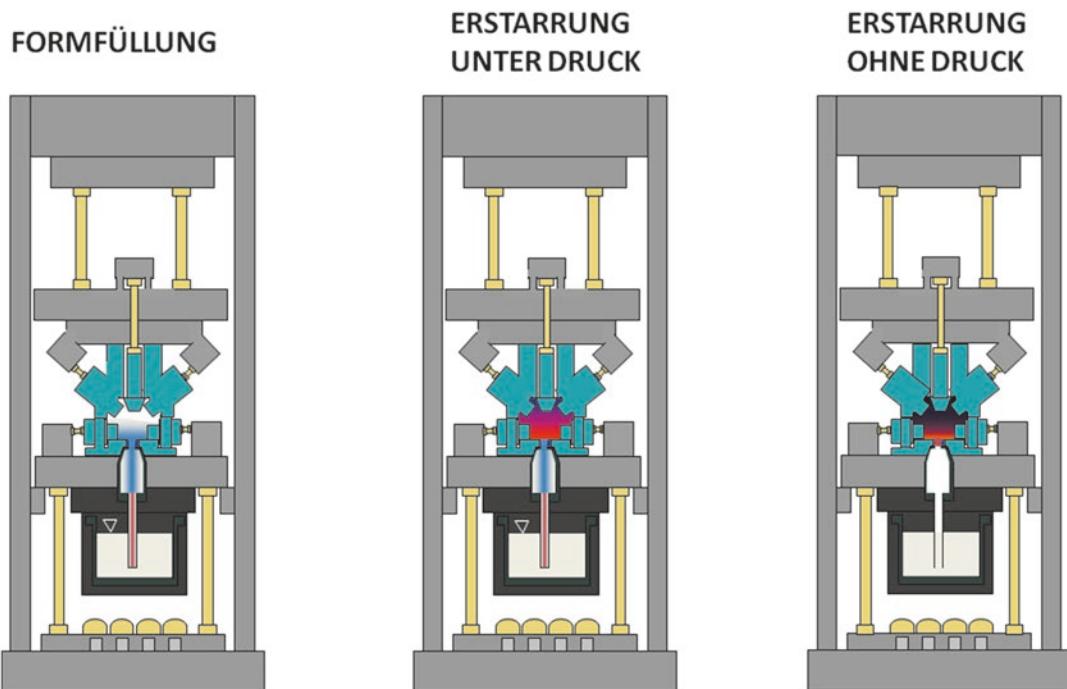


Abb. 2.97 Verfahrensschritte beim Niederdruck-Kokillenguss nach R. Viets, AUDI AG

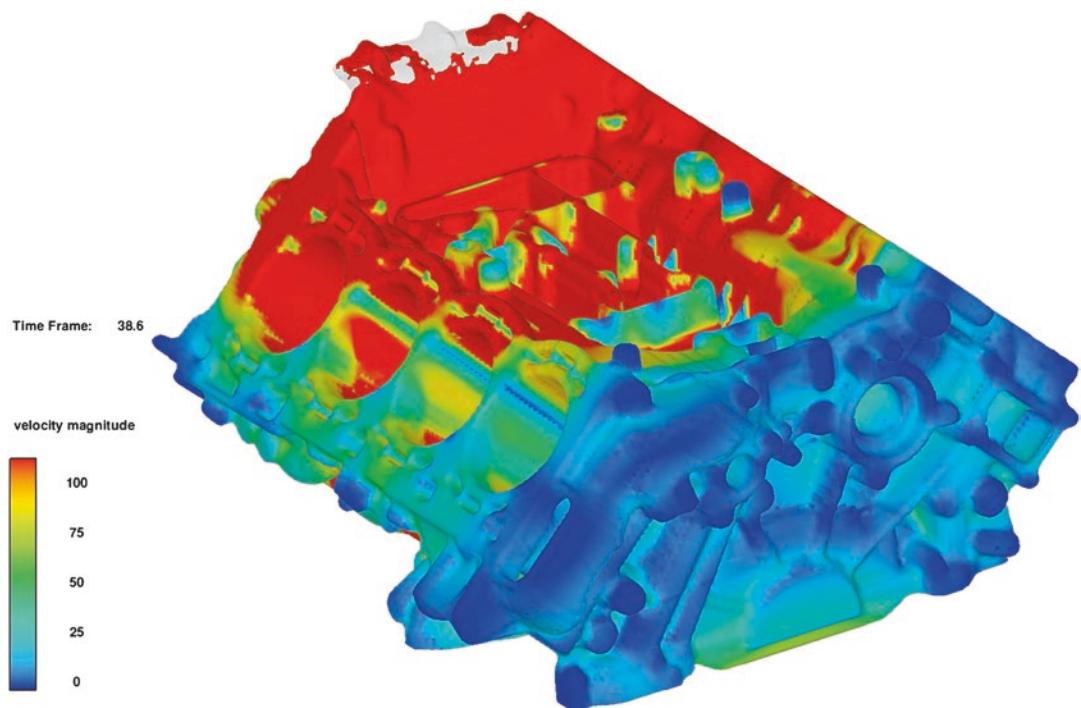
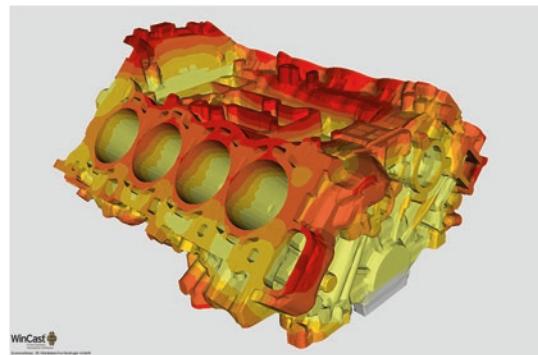


Abb. 2.98 Simulation der Fließgeschwindigkeit beim Formfüllvorgang für ein Zylinderkurbelgehäuse mit der Software FLOW3D (Fa. Flow Science). (Quelle: KS ATAG TRIMET Guss GmbH)

Abb. 2.99 Simulation der Temperaturverteilung nach der Formfüllung an einem Zylinderkurbelgehäuse mit der Software WinCAST (Fa. RWP). (Quelle: KS ATAG TRIMET Guss GmbH)



2.7 Gießen von Komponenten für Wind-Energie-Anlagen

Die Windenergie an Land (Abb. 2.100) ist neben der Solarenergie ein wichtiger Faktor für die Energiewende. Der Bedarf in Deutschland für Ende 2020 lautet ca. 30.000 Windräder an Land mit einer Gesamt-Leistung von 55.000 MW. Das Bundesimmissionsschutzgesetz schreibt z. Z. einen Mindestabstand von 600 m zur Wohn- und 250 m zur Gewerbebebauung vor. Dadurch werden die Landflächen langsam knapp. Auf hoher See gibt es inzwischen über 1500 Off-Shore-Windenergieanlagen (OWEA) mit einer Leistung von rd. 7800 MW. In der Windenergiebranche werden zur Zeit über 150.000 Menschen beschäftigt.

Der erste Off-Shore-Windpark in Deutschland ist 2010 mit einer Turbinenleistung von 5 MW in Betrieb gegangen. Für eine erfolgreiche Energiewende müssen aber die Stromentstehungskosten weiter reduziert werden. Das kann durch höhere Leistungen erreicht werden. Zur Zeit sind bereits 8-MW-Anlagen verfügbar und 12-MW-Anlagen in der Entwicklung. Das bedeutet aber auch höhere Lasten der Anlagen und küstenfernere Standorte mit größe-



Abb. 2.100 Windpark in Niedersachsen/Hamersen: Nennleistung 2 MW, Rotor-Dm. 82 m, Nabenhöhe 108 m. (Quelle: Enercon GmbH)

ren Wassertiefen, was mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten und Wellenlasten verbunden ist. Dadurch werden für die Grundstruktur größere Wanddicken und Stahl-Festigkeiten erforderlich. Für die schweißtechnische Fertigung von Gründungsstruktur und Turm hat der

DVS in Zusammenarbeit mit der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. die Forschungsinitiative „Erfolgreiche Energiewende durch zukunftsweisende fügetechnische Innovationen für die Windenergie“ aufgelegt.

Marktführer bei den Windenergie-Anlagen ist der Zusammenschluss von Siemens mit Gamesa (Spanien) mit einem Marktanteil von zus. 14 %. An 2. Stelle folgt der bisherige Marktführer Vestas (Dänemark) mit 11 %, gefolgt von Goldwind (China) und GE Energy (USA) mit jeweils 9 %. Der bisherige deutsche Marktführer ist die Enercon GmbH in Aurich (Ostfriesland) als größter mittelständischer Hersteller von Windenergieanlagen (WEA) an Land. Mit mehr als 28.000 installierten Anlagen und bei einer Gesamtleistung von mehr als 50 GW in über 45 Ländern gehört das Unternehmen zu den führenden der Branche. Rund die Hälfte der von Enercon hergestellten Anlagen wurden in Deutschland errichtet. Die Firma beschäftigt weltweit direkt und indirekt über 18.000 Beschäftigte.

Das technische Konzept

der Enercon Anlagen unterscheidet sich von den Turbinen der meisten anderen Hersteller. Charakteristisch ist das getriebelose Antriebskonzept, das 1993 mit der Serie E-40/500 begann. Die Nabe mit den Rotorblättern ist getriebelos mit dem Läufer des Ringgenerators verbunden (Direktantrieb). Die Rotor-Einheit rotiert über ein vorderes und hinteres Hauptlager um einen feststehenden Achszapfen. Die Drehzahl des Rotors wird also direkt auf den hochpoligen Synchronmotor übertragen. Es handelt sich um einen sog. Innenläufer, weil der Läufer im Stator rotiert. Da der Generator fremd erregt wird, kann auf den Einsatz von Permanentmagneten, die Seltene Erden enthalten, verzichtet werden. Im Vergleich zu Getriebeanlagen ist die Geschwindigkeit der rotierenden Komponenten geringer, was weniger mechanische Lastwechsel erzeugt. Die Drehzahl ist variabel und abhängig vom Anlagentyp. Sie beträgt je nach Windgeschwindigkeit bei der Anlage E-33 zwischen 18 und 45 U/min. Getriebeanlagen erreichen dagegen bis 1500 U/min bei Nennleistung.

Die Enercon Anlagen lassen sich optisch leicht von denen anderer Hersteller unterscheiden. Die Gondeln als Maschinenhäuser sind ab 1996 nach dem Design des britischen Architekten Norman Foster tropfenförmig ausgeführt. Der Turm trägt meist über dem Fundament farblich abgestufte grüne Ringe (auf Inseln in Blau), die nach oben immer heller werden. Dadurch sollen sich die Türme besser in den Horizont integrieren. Die Rotorblätter haben an den Blattspitzen sog. Tips, ähnlich wie die Winglets bei Flugzeugen.

Der seit 2017 in Deutschland am häufigsten genehmigte WEA-Typ ist E-115 mit einer Nennleistung von 3 MW und einem Rotor-Durchmesser von 115 m. Die Anlage ist für mittlere Standorte (Windklasse IIA) konzipiert. Die E-115/3 MW wird mit 149 m hohem Beton-Fertigteilurm angeboten. Eine Besonderheit dabei ist das zweigeteilte Rotorblatt aus GFK. Diese Ausführung wurde notwendig, da sich besonders lange Rotorblätter an Land nur noch schwierig transportieren lassen. Der innere Teil ist 14,3 m lang. Der äußere Teil ist 41,6 m lang (Blattgesamtlänge: 55,9 m). Die Gesamthöhe beträgt dann 206,8 m.

Das Gusszentrum Ostfriesland (Abb. 2.101) in Georgsheil (Niedersachsen) produziert als exklusiver Zulieferbetrieb für Enercon vor allem Rotornaben, Maschinenträger, Achszapfen und Statorglocken, d. h. die Last tragenden Komponenten als Kugelgraphitguss seit 2010 in Serienproduktion (Fließfertigung). Formenbau und Guss-Nachbehandlung sind in voneinander getrennten Bereichen untergebracht.

Die Gießerei

beschäftigt ca. 230 Mitarbeiter überwiegend aus der Region Ostfriesland, die zum Großteil in Zusammenarbeit mit dem Verein Deutscher Gießereifachleute (VDG) zur Gießereifachkraft im eigenen Hause geschult wurden.

Die Produktionsfläche beträgt 20.000 m². Die eingesetzten Induktionsschmelzöfen verfügen über eine Anschlussleistung von 10 MW und sind in der Lage, 16 t/h aufzuschmelzen. Die Gesamt-Kapazität liegt bei ca. 70 Bauteilen pro Woche.



Abb. 2.101 Abgießen einer Statorglocke E 82 im Gusszentrum Ostfriesland (GZO) als Zulieferbetrieb.
(Quelle: Enercon GmbH)

Das Gusszentrum setzt auf konsequente Serienfertigung von Komponenten für Windenergieanlagen mit Stückgewichten zwischen 10 bis 30 t. Die Produktion wurde als Fließfertigung geplant, bei der die bis 180 t schwere Formen mittels spezieller führerloser Transportsysteme (FTS) von Arbeitsstation zu Arbeitsstation bewegt werden. Dies war bisher in Handformgießereien nicht möglich.

Ein wesentlicher Aspekt war die sichere Gestaltung der einzelnen Arbeitsplätze. Die gesamte Gießstrecke wird während der Abguss-Vorgänge überhaupt nicht betreten. Das Abgießen der Eisenschmelze in die Formen erfolgt über den Gießkran. Ein weiteres Beispiel für die optimale Arbeitsplatzgestaltung ist die technische Unterstützung durch angepasste Arbeitspodeste in der Handformerei und Positionierer in der Guss-Nachbehandlung.

Das Gusszentrum verbraucht pro Jahr 40 GWh Strom und bewegt 195.000 t Formsand. Als Rohstoffe werden hauptsächlich Roheisen, Stanzschrott, Zuschlagstoffe für die Schmelze und Quarzsand benötigt.

Der Formsand wird zu fast 98 % wieder aufbereitet. Ausschussbauteile und Anguss-Systeme werden zerkleinert und wieder eingeschmolzen. Die in anderen Zulieferbetrieben anfallenden Stanzabfälle werden im Gusszentrum als Rohstoff für die Eisenschmelze verwendet.

In Bezug auf den Umweltschutz wird dem Gusszentrum seitens der Behörden ein hohes Schutzniveau auf dem aktuellen Stand der Technik bescheinigt. Die Filteranlagen sind z. B. so dimensioniert, dass sie nur 1/10 der erlaubten gesetzlichen Grenzwerte der TA Luft ausschöpfen.

Der Produktionsablauf

im Gusszentrum wurde für die Fließfertigung entwickelt. Es werden Seriengussteile für Komponenten von Windenergieanlagen anhand des sog. Handformverfahrens hergestellt. Das Roheisen wird mit der Bahn angeliefert, in einer Rohstoffhalle entladen und eingelagert. Von den sog. Bunkern aus wird das Roheisen zusammen mit Stanzschrott und anderen Zuschlagstoffen gattiert und als Charge in einen Induktions-Schmelzofen eingebracht.

Im Induktionsofen wird der Ofeninhalt induktiv auf ca. 1500 °C erwärmt. Nach Erreichen der Abgieß-Temperatur von 1350 °C wird die flüssige Eisenschmelze vom Ofen in eine Gießpfanne gefüllt und mit Magnesium injiziert. Die Magnesium-Injektion ist für eine kugelförmige Graphitausbildung notwendig, die das normale Gusseisen in einen Werkstoff mit besonders zähen Festigkeitswerten überführt (Sphäroguss). Danach wird die Eisenschmelze in vorbereitete Formen abgegossen.

Die Formen werden in einem separaten Formbereich als „verlorene“ (nur einmal nutzbare) Sandformen mithilfe von Formsandmischern hergestellt. Formaußenteile bilden beim Gießprozess das „Negativ“ für die Außenkontur des Gussteils, die Innenkontur wird durch Forminnenteile (Kerne) abgebildet. Kerne benötigt man für Hohlräume und Hinterschnitte der Außenkontur im Gussstück.

Nachdem das Formsandgemisch eine gewisse Festigkeit erreicht hat, wird es vom Modell abgezogen und die Oberfläche mit einer schnell trocknenden Wasser-Schichte benetzt.

Die Schlichte hat später die Aufgabe, das Eindringen der Eisenschmelze in den Formsand zu verhindern. Die fertig montierten Formkästen werden zu einem definierten Gießbereich transportiert und über Gießpfannen mit der Eisenschmelze gefüllt.

Anschließend kühlte die Eisenschmelze mehrere Tage auf einer Abkühlstrecke ab. Danach wird die komplette Form mit Rohguss zu einer Auspackstation befördert. Das Rohgussteil wird auf einem Ausschlagrost von dem anhaftenden Formsand befreit und in einer geschlossenen Strahlkabine grob gestrahlt. Der Sand wird einer Sandaufbereitungsanlage zugeführt und für eine Wiederverwendung aufbereitet. Überflüssige Trennfugen, Anguss- und Speiser-Reste werden in einer Putzstation vom Gussteil entfernt und dem Roheisenlager wieder zugeführt.

In einem weiteren Strahlvorgang wird die Gussteil-Oberfläche erneut gestrahlt und für eine Lackierung vorbereitet. Nach der Lackierung und Trocknung wird das Gussteil einer Qualitätsprüfung unterzogen und für den Warenabtransport bereitgestellt.

Abb. 2.102 zeigt die abschließende Ultraschallprüfung eines Maschinenträgers. Auf diesem lagert der gesamte Antriebsstrang. Er unter-

liegt einer hohen dynamischen Belastung, so dass hier höchste Qualitätsanforderungen gelten.

Die sogenannte *EP4-Plattform* wurde 2014 für 4 MW entwickelt als gemeinsame Basis für drei unterschiedliche Baureihen je nach Standort mit Stark-, Mittel- oder Schwachwinden. Im Gegensatz zu den bisher üblichen 25 Jahren sind diese Anlagen für einen Betriebszeitraum von 30 Jahren ausgelegt. Dadurch erwartet man niedrigere Strom-Gestehungskosten, die bei der Anlage E-126 EP4 auf einem guten IEC-2-Standort bei 4,5 Cent/kWh liegen sollen. Die jährliche Stromproduktion bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 6,5 m/s wird mit 13 Mio. kWh angegeben.

Die Anlage erbringt bei einem Rotordurchmesser von 127 m eine Leistung von 4,2 MW und ist mit Nabenhöhen von 99 m, 135 m und 159 m lieferbar. Enercon hat den Anlagentyp inzwischen auch für die Windklasse IA zertifiziert.

WEA-Spezialausrüstungen

Enercon Windenergieanlagen werden mit einer speziellen *Sturmregelung* betrieben. Diese ermöglicht einen abgeregelten Anlagenbetrieb bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten. Zahlreiche Stopp-Vorgänge würden zu beträchtlichen Er-

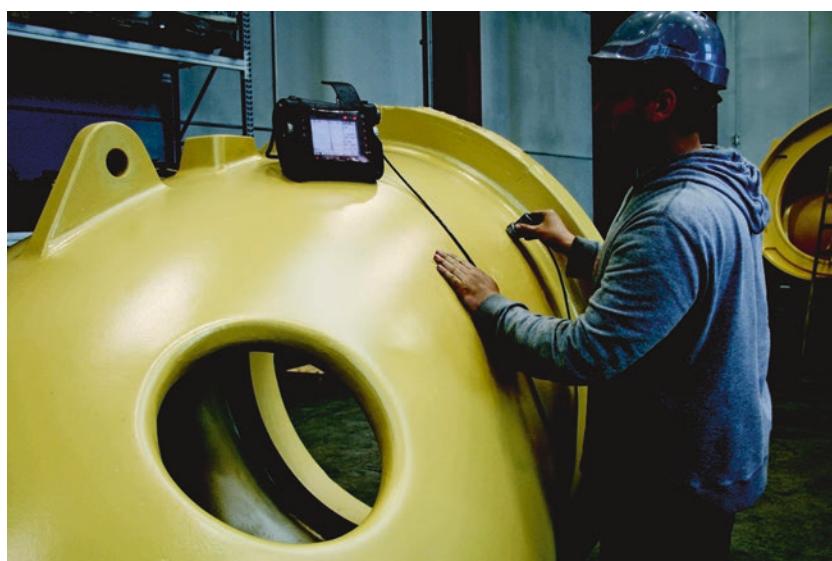


Abb. 2.102 Qualitätssicherung: Ultraschallprüfung eines Maschinenträgers. (Quelle: Enercon GmbH) Flansch-Durchmesser: 1,6 m; Rohgussgewicht: 8 t; Werkstoff: EN-GJS-400-18-LT

tragsverlusten führen; sie können damit vermieden werden. Bei aktiver Sturmregelung wird ab einer für jeden Anlagentyp definierten Windgeschwindigkeit die Drehzahl linear reduziert, was zunächst eine Verminderung der Wirkleistung zur Folge hat. Erst ab einer Windgeschwindigkeit von 34 m/s (als 10-min-Mittelwert) stoppt die Anlage. Bei deaktivierter Sturmregelung stoppt die Windenergieanlage bereits, wenn die Windgeschwindigkeit bei 25 m/s liegt.

Jede Windenergieanlage von Enercon ist serienmäßig mit einem *Eis-Erkennungssystem* ausgestattet, das auf einem eigens entwickelten Leistungskurvenverfahren basiert. Während des Betriebes gleicht die Eis-Erkennung aktuelle Betriebsdaten wie Wind, Leistung und Blattwinkel mit erfassten Langzeit-Mittelwerten ab. Vereist die Anlage, verändern sich ihre aerodynamischen Eigenschaften. Die Anlage wird in Stillstand versetzt und der Enteisungsvorgang eingeleitet.

Die optional verfügbare *Rotorblattheizung* ermöglicht eine Verkürzung der Abtauzeit. Ein an der Blattwurzel des Rotorblattes installiertes Heizgebläse erwärmt im Umluftverfahren die Luft im Rotorblatt. Dabei steigt die Temperatur der Rotorblattfläche über den Gefrierpunkt an und der Eisansatz taut ab. Erfolgt der Betrieb der Blattheizung bei Anlagenstillstand, startet sie nach Abtauen des Eisansatzes automatisch. Sie kann aber auch manuell nach Sichtprüfung der Rotorblätter eingeschaltet werden. Optional kann die Blattheizung an Standorten mit geringem Vereisungs-Potenzial auch bei laufender Anlage betrieben werden. Dünne Eisschichten werden bereits frühzeitig abgetaut, was den Energieertrag verbessert, da Stillstandzeiten entfallen.

Der *Ringgenerator* bildet die Kernkomponente einer Enercon-Anlage. Er besteht aus Rotor und Stator. Der Stator ist der statische Teil des Ringgenerators. Seine Vorteile sind die bewährte getriebelose Antriebstechnologie, der niedrige Verschleiß dank langsam rotierender Maschine, relativ geringe Maschinenlasten durch hohe Drehzahlvariabilität, eine ertragsoptimierte Steuerung und hohe Netzverträglichkeit. Seltene Erden kommen nicht zum Einsatz.

Abb. 2.103 zeigt die Vorbereitung für die spannende Nachbearbeitung einer Statorglocke. Sie ist das Gehäuse, in dem der Generator montiert wird.

Abb. 2.104 zeigt den Prototyp E-101. Die Anlagen sind bereits von weitem an ihrer eleganten tropfenförmigen Gondel zu erkennen (Design von Norman Foster).



Abb. 2.103 Statorglocke im GZO Georgsheil Durchmesser: 4,8 m; Gewicht: 12,8 t; Werkstoff: EN-GJS-400-18-LT. (Quelle: Enercon GmbH)



Abb. 2.104 Prototyp E-101 in Görmin, Mecklenburg-Vorpommern Rotordurchmesser: 101 m; Nabenhöhe: 99 m; Nennleistung 3,05 MW. (Quelle: Enercon GmbH)

2.8 Gestaltung von Gussteilen

2.8.1 Allgemeines

Die Gestaltung eines Gussstücks wird bestimmt vom Gießverfahren und dem davon abhängigen Arbeitsaufwand. Daher beeinflussen auch gießtechnische Überlegungen die konstruktive Gestaltung. Vom Entwurf eines Gussstücks hängen ab die

- Herstellung des Modells,
- anzuwendende Formmethode,
- erforderlichen Kerne,
- Methode des Anschnitts und des Speisens des Gussstücks,
- Putzmöglichkeit,
- Prüfbarkeit und
- Art und Umfang der mechanischen Bearbeitung.

2.8.2 Gestaltungsregeln

- Das Gussstück sollte wegen der einfacheren Modellgestaltung aus geometrischen Grundkörpern zusammengesetzt sein (z. B. Zylinder, Kegel, Kubus, Kugel).
- Ebene Flächen sind nach Möglichkeit zu bevorzugen.
- Los- und Ansteckteile sollten möglichst vermieden werden.
- Wichtig ist die Spannmöglichkeit für die 1. Bearbeitung.
- Zu bearbeitende Flächen müssen gut zugänglich sein (Werkzeugauslauf vorsehen).
- Die beste Form hinsichtlich der Beanspruchung beachten (z. B. bei GJL Zugbeanspruchungen vermeiden).
- Bei schlag- oder stoßartigen Beanspruchungen sollte nicht der spröde GJL verwendet werden.

- Kerne bei Dauerformverfahren nach Möglichkeit vermeiden.
- Kerne sollten einfach gestaltet und sorgfältig gelagert werden.
- Gussstücke aus Gusseisen und (oder) Druckguss sollten gleiche Wanddicken haben.
- Bei Wanddickenänderungen sorge man für allmähliche Übergänge (*Heuverssche Kreismethode*).
- Scharfe Kanten, Kerbungen und Materialanhäufungen möglichst vermeiden.
- Die Rippendicke s_r sollte kleiner als die Wanddicke s_w ($s_r \approx 0,6 \cdot s_w$ bis $s_r \approx 0,8 \cdot s_w$) sein.
- Eingezogene Formen (Unterschneidungen), Ansteckteile am Modell und geschlossene Hohlräume sollte man vermeiden.
- Abweichungen für Maße ohne Toleranzangabe (Allgemeintoleranzen) sind zu beachten.

In den folgenden Beispielen ist immer links die ungünstige, rechts die zweckmäßige Gestaltung dargestellt.

2.8.3 Gießgerechte Gestaltung

(Siehe Abb. 2.105, 2.106, 2.107, 2.108, 2.109, 2.110, 2.111, 2.112, 2.113, 2.114, 2.115, 2.116, 2.117, 2.118, 2.119, 2.120, 2.121, 2.122, 2.123, 2.124, 2.125, 2.126, 2.127, 2.128, 2.129, 2.130 und 2.131)

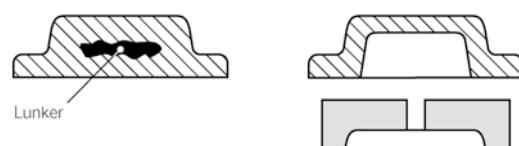


Abb. 2.105 Infolge unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeit erstarrt der flüssige Werkstoff im Inneren einer örtlichen Materialanhäufung später als in den anschließenden dünnen Partien. Da das Volumen der Gusswerkstoffe im flüssigen Zustand größer ist als im festen, bilden sich in Werkstoffanhäufungen Hohlstellen, sog. Lunker

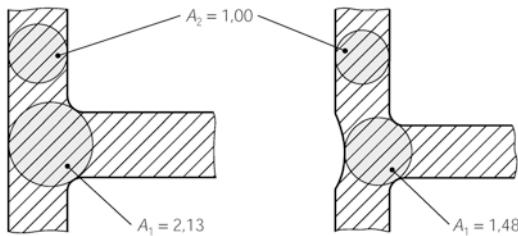


Abb. 2.106 Ein einfaches Hilfsmittel zur Kontrolle von Materialanhäufungen ist die *Heuverssche Kreismethode*. Bei einer gießgerechten Konstruktion soll das Verhältnis (A_1/A_2) jeweils benachbarter einbeschriebener Kreisquerschnitte nahe bei eins liegen

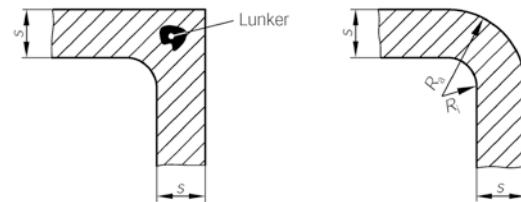


Abb. 2.109 Bei Übergängen mit Rundungen zwischen gleichen Wanddicken sollten sein: $R_i = 0,5 \cdot s$ bis $1,0 \cdot s$ und $R_a = R_i + s$ (sonst Gefahr der Lunkerbildung)

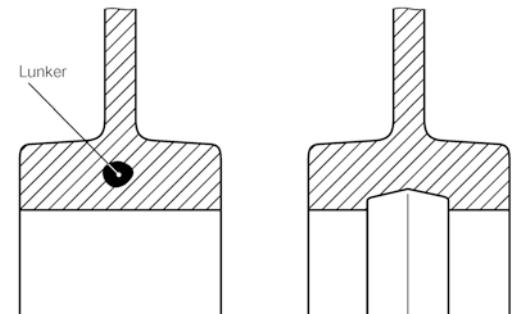


Abb. 2.107 Durch einfache konstruktive Änderungen lassen sich Materialanhäufungen in vielen Fällen ohne großen Mehraufwand schon bei der konstruktiven Gestaltung vermeiden

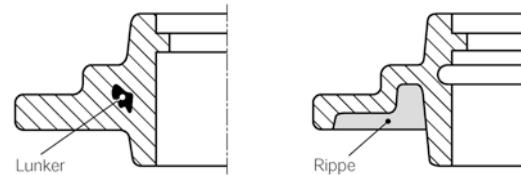


Abb. 2.110 Werkstoffanhäufungen (und damit Lunker) lassen sich häufig auch durch Aussparung und Verrippung vermeiden

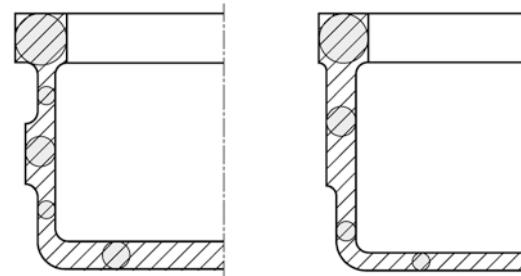


Abb. 2.111 Um Gussstücke aus Werkstoffen mit großer Erstarrungskontraktion (z. B. Stahlguss GS) dicht speisen zu können, sind die Wanddicken besonders sorgfältig auszulegen. Bei einer gießgerechten Konstruktion müssen die Flächen der *Heuversschen Kontrollkreise* zum Speiser hin größer werden (*gelenkte Erstarrung*)

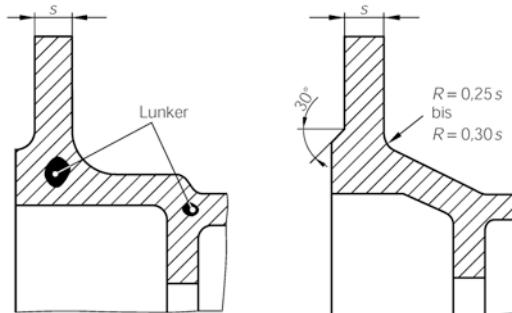


Abb. 2.108 An Übergangsstellen mit zu großen Ab rundungen entstehen Werkstoffanhäufungen (Lunker gefahr). Die Rundungshalbmesser (R) sollen ein Viertel bis ein Drittel der Wanddicke (s) betragen

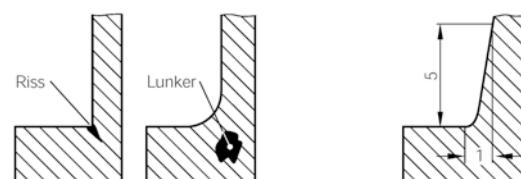


Abb. 2.112 Bei Übergängen von einer dünnen Wand in eine dicke besteht bei einer zu kleinen Ausrundung Rissgefahr, bei zu großer Rundung Gefahr der Lunkerbildung. In diesem Fall ist ein allmählicher Übergang mit einer Steigung von etwa 1:5 vorzusehen

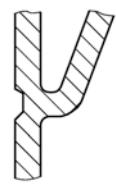
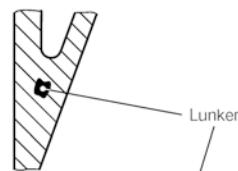
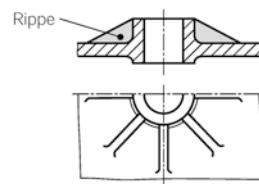
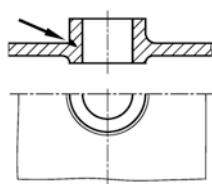


Abb. 2.113 Rippen zwischen Wand und Nabe vermindern die Rissgefahr

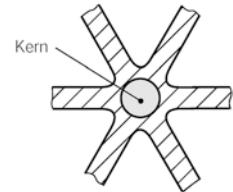
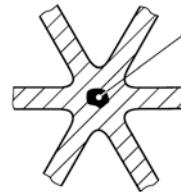
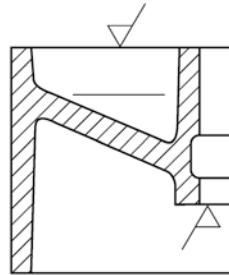
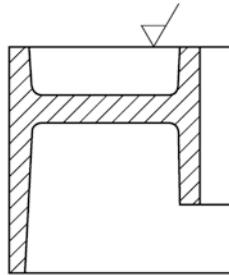


Abb. 2.114 Zum Vermeiden einer Luftblasenbildung – sie erzeugt eine unansehnliche Oberfläche – sollten Scheibenflächen schräg angeordnet werden

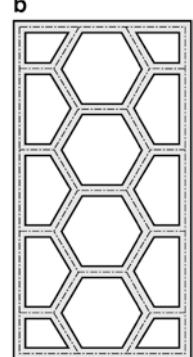
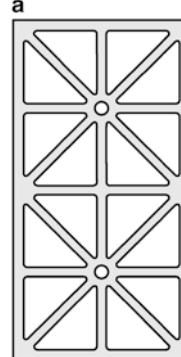
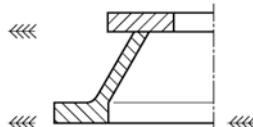


Abb. 2.115 Komplizierte Gussstücke erfordern mehrere Teilungsebenen oder zusätzliche Kerne. Durch eine bessere Gestaltung kann man Teilungsebenen und Kerne einsparen

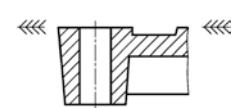
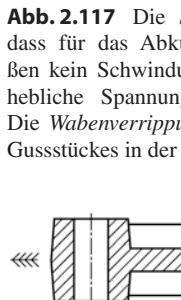


Abb. 2.117 Die Sternverrippung (a) ist derart starr, dass für das Abkühlen des Gussteils nach dem Gießen kein Schwindungsspielraum bleibt und dadurch erhebliche Spannungen auftreten können (Rissgefahr). Die Wabenverrippung (b) behindert das Schwinden des Gussstückes in der Form nur wenig

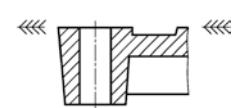
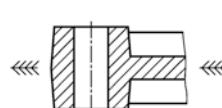


Abb. 2.118 (-2) Teilungsebenen sollten so gelegt werden, dass Flächen, die unbearbeitet bleiben und maßhaltig sein sollen, nicht durch die Formteilung getrennt werden. Man vermeidet dadurch außerdem einen möglichen Versatz

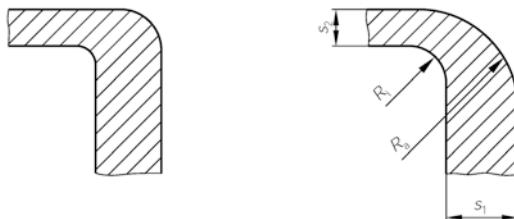


Abb. 2.119 Bei Übergängen mit Rundungen zwischen ungleichen Wanddicken sollten folgende Werte angestrebt werden: $R_1 = (s_1 + s_2)/2$ und $R_a = s_1 + s_2$

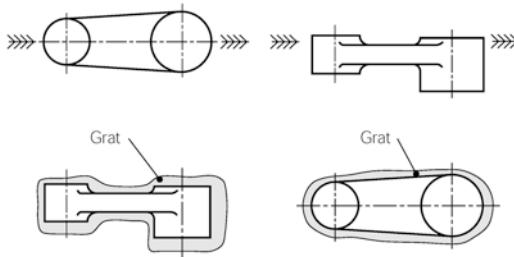


Abb. 2.120 Die Teilungsebene ist so zu legen, dass das Werkstück entgratet werden kann. Liegt die Formteilung unzweckmäßig, so wird das Entgraten erschwert

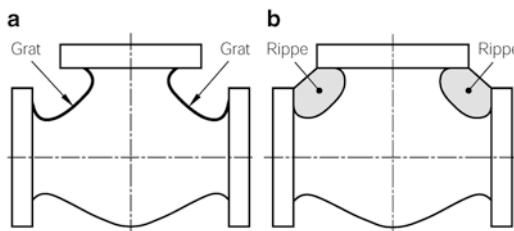


Abb. 2.121 Beim Ventilgehäuse in konventioneller Ausführung (a) sind die Grate zwischen den beiden Flanschen nur schwierig zu entfernen; mithilfe von Rippen (b) werden die Grate nach außen gelegt und lassen sich problemlos entfernen

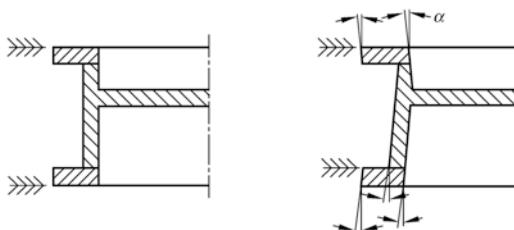


Abb. 2.122 Nach DIN EN 12890 sind die Formschrägen (α) in der Zeichnung in Winkelgraden anzugeben. Bei fehlenden Innenschrägen benötigt man Innenkerne

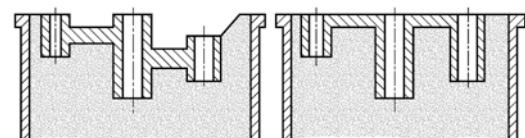


Abb. 2.123 Gebrochene Formteilungsebenen sind möglichst zu vermeiden und durch gerade Teilungsebenen zu ersetzen

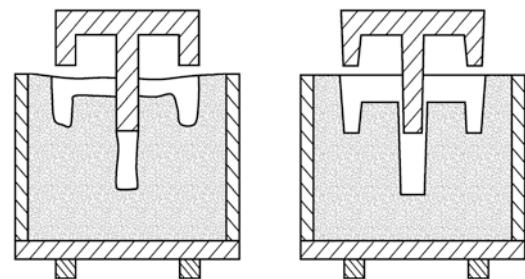


Abb. 2.124 Die Außenflächen des Modells sollten in Ausheberichtung schräg liegen. Sonst lassen sich die Modelle nicht aus der Form heben, ohne dass diese beschädigt werden

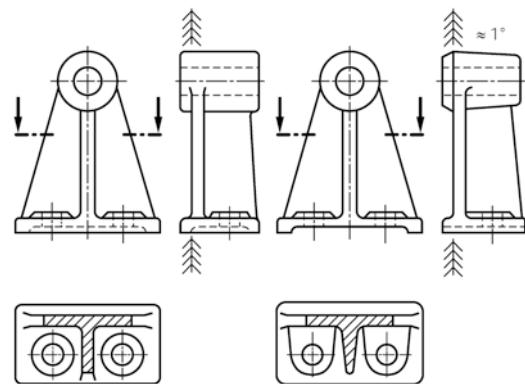


Abb. 2.125 Auch Querrippen und Augen sind so zu gestalten, dass sich die Modelle leicht aus der Form heben lassen (Hinterschneidungen vermeiden, weil sie Ansteckteile erfordern)

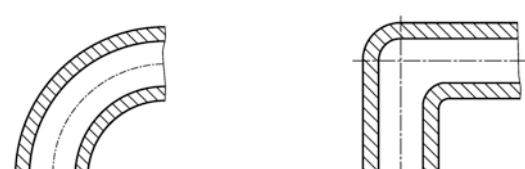


Abb. 2.126 Kerne möglichst einfach gestalten, um den Aufwand bei der Kernherstellung gering zu halten, d. h. die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu verbessern

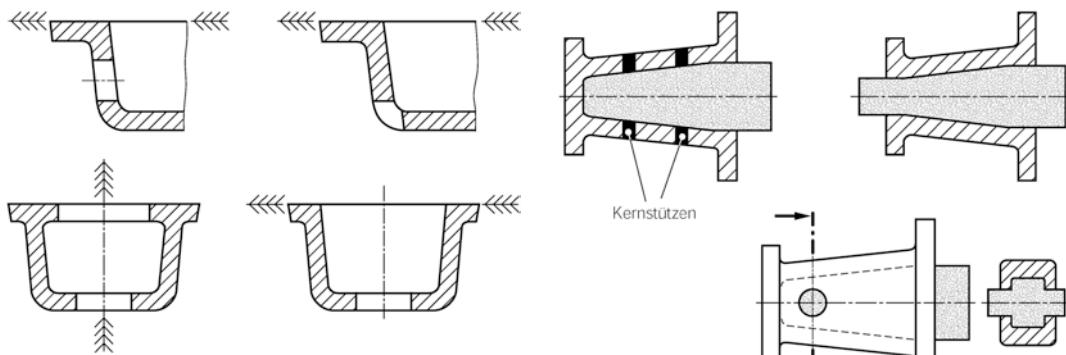


Abb. 2.127 Kerne sind teuer und erschweren das Einformen. Sie sollten nach Möglichkeit vermieden werden. Anzustreben sind offene Querschnitte

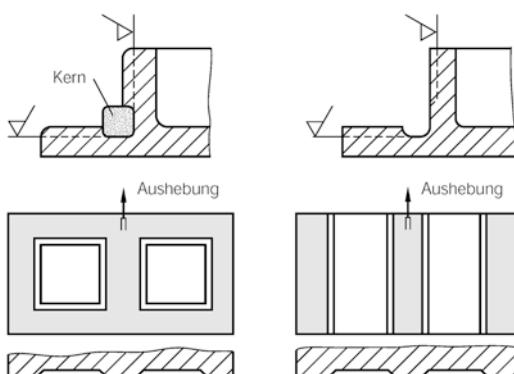


Abb. 2.128 Bearbeitungsleisten werden häufig so gestaltet, dass Kerne eingelegt werden müssen. In vielen Fällen kann auf die Arbeitsleisten verzichtet und ins Volle gearbeitet werden

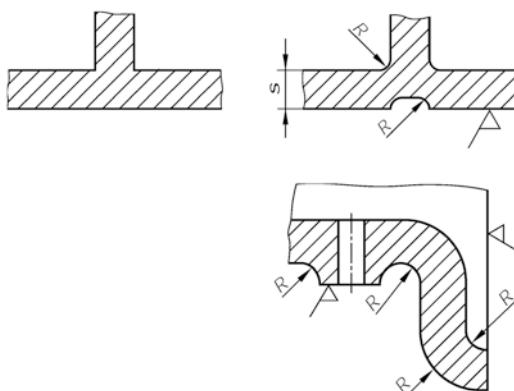


Abb. 2.129 Scharfe Kanten sind zu vermeiden, da sie zu Rissen führen. Die Rundungshalbmesser R sollten ein Drittel bis ein Viertel der Wanddicke s betragen. Nur bearbeitete Flächen bilden mit der rohen Gusswand scharfe Kanten

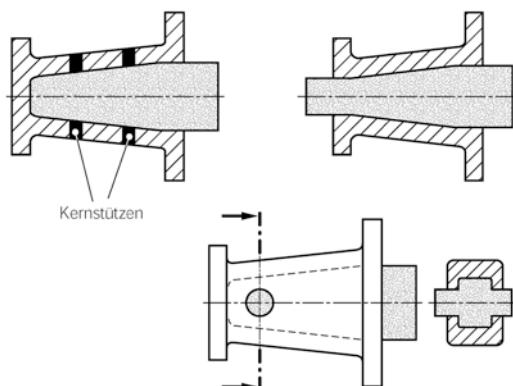


Abb. 2.130 Sind Kerne notwendig, dann müssen sie sorgfältig gelagert werden, weil sie durch das flüssige Metall einen großen Auftrieb erhalten. Einseitige Kernlagerungen sind zu vermeiden, da die Kernstützen zur Bildung von Poren und Fehlstellen beitragen. Eine *zweiseitige* Kernlagerung ist anzustreben

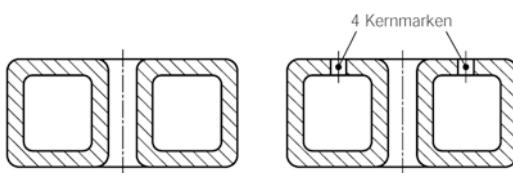


Abb. 2.131 Kerne müssen nach dem Abguss entfernt werden. Hierfür sind ausreichende und genügend große *Putzöffnungen* vorzusehen, die auch zur Kernlagerung (Kernmarken) dienen. Öffnungen mit einem Durchmesser $d < 30$ mm sind für Putzarbeiten unzureichend

2.8.4 Beanspruchungsgerechte Gestaltung

Bei der Konstruktion von Gussteilen müssen die im Betrieb und bei der Bearbeitung auftretenden Beanspruchungen zugrunde gelegt werden. Zug- und Biegebeanspruchungen sollten – besonders bei GJL – zugunsten von Druckbeanspruchungen vermieden werden. Gusswerkstoffe (vor allem GJL!) sind außerdem besonders kerbempfindlich (Abb. 2.132, 2.133, 2.134, 2.135 und 2.136).

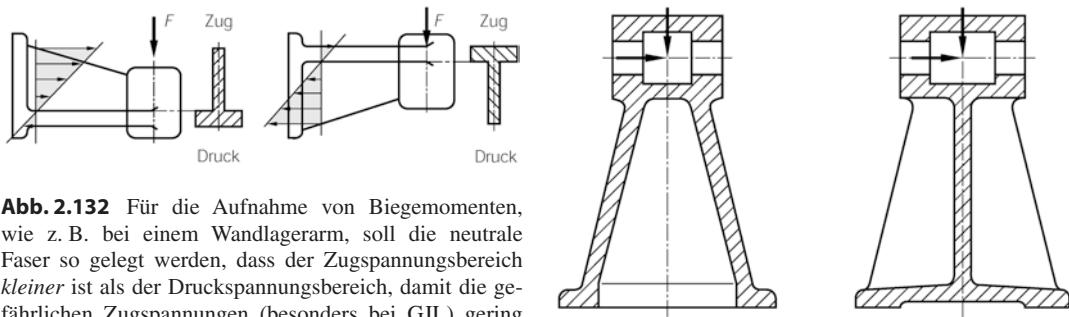


Abb. 2.132 Für die Aufnahme von Biegemomenten, wie z. B. bei einem Wandlagerarm, soll die neutrale Faser so gelegt werden, dass der Zugspannungsbereich *kleiner* ist als der Druckspannungsbereich, damit die gefährlichen Zugspannungen (besonders bei GJL) gering gehalten werden

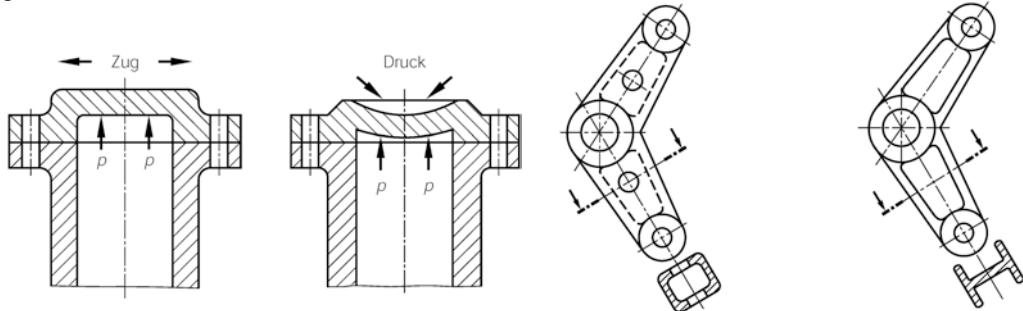


Abb. 2.133 Durch richtige Formgebung kann die in einem Zylinderdeckel durch den Innendruck bewirkte Zugspannung in eine Druckspannung umgewandelt werden

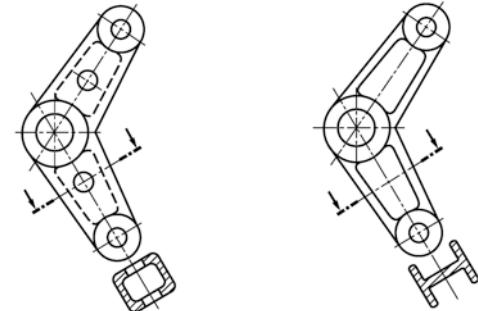


Abb. 2.135 Lagerböcke und Hebel werden in der Regel nicht auf Torsion beansprucht. Deshalb ist hierfür eine offene Rippenbauweise zur Aufnahme der Zug- und Druckkräfte ausreichend. Außerdem sind Hohlprofile extrem steif, d. h., bei einer schlagartigen oder dynamischen Beanspruchung sind sie sehr rissempfindlich

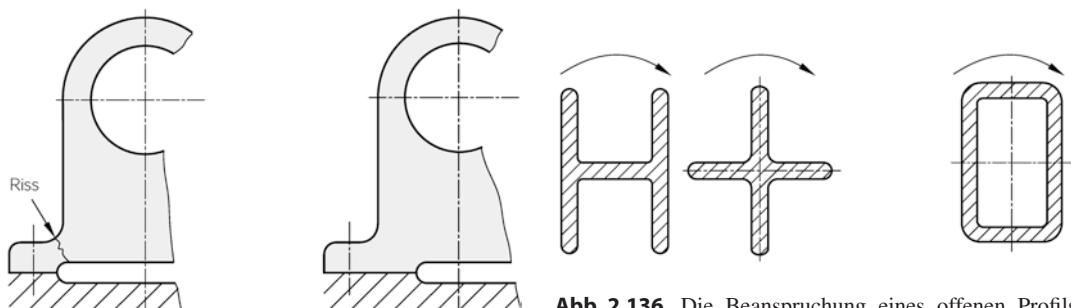


Abb. 2.134 Auch die im Fuß des Lagerbocks auftretende Biegespannung (Gefahr der Rissbildung!) lässt sich mithilfe einer beanspruchungsgerechten Gestaltung erheblich vermindern

Abb. 2.136 Die Beanspruchung eines offenen Profils auf Torsion ist wenig sinnvoll, da man zur Aufnahme der Verdrehkräfte sehr große Querschnitte benötigt. Trotz der teureren Kernarbeit ist in diesem Fall ein Hohlprofil vorteilhafter

2.8.5 Fertigungsgerechte Gestaltung

(Siehe Abb. 2.137, 2.138, 2.139, 2.140, 2.141, 2.142, 2.143, 2.144, 2.145, 2.146, 2.147 und 2.148)

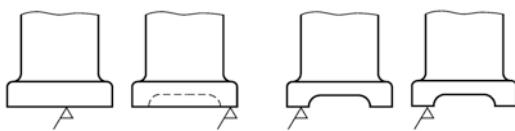


Abb. 2.137 Um Bearbeitungszeit zu sparen, sollten Standflächen von Maschinen so unterteilt werden, dass nur schmale Leisten oder Füße spanend zu bearbeiten sind

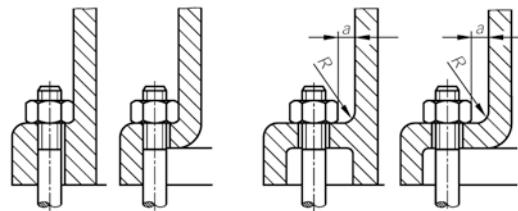


Abb. 2.140 Befestigungsschrauben erfordern ausreichende Wandabstände a , damit sie mit Schraubenschlüsseln angezogen werden können und nicht von den Gussrundungen R behindert werden

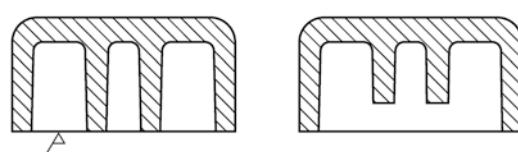


Abb. 2.141 Rippen sollten möglichst niedriger als die Wandung ausgeführt werden, um die Bearbeitung ihrer Stirnflächen zu sparen

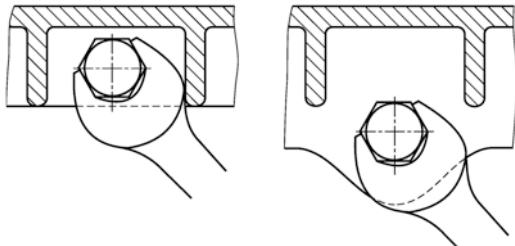


Abb. 2.138 Befestigungsschrauben dürfen nicht an unzugänglichen Stellen, z. B. zwischen Rippen, sondern nur auf freiliegenden Augen oder Flanschen angeordnet werden

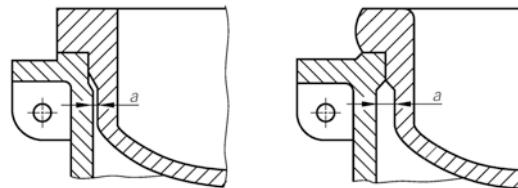


Abb. 2.142 Bei Drehkörpern muss der Drehmeißel auch bei unrunder ausgefallenen Gussstücken (z. B. durch Kernversatz) auslaufen können. Das Maß „ a “ darf nicht zu klein sein (Allgemeintoleranzen beachten)

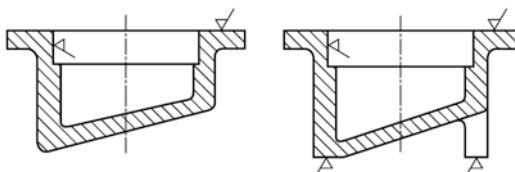


Abb. 2.139 Wichtige Voraussetzung für die nachfolgende spanende Fertigung ist ein gutes und sicheres Spannen des Werkstücks. Gussstücke müssen häufig auf ungeeigneten Flächen aufliegen. In solchen Fällen sind Stützen anzugießen

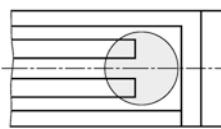
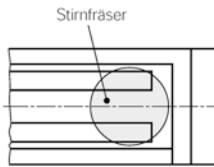
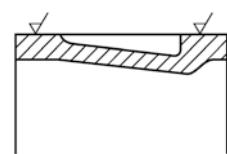
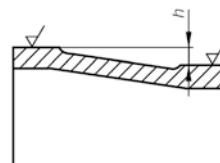
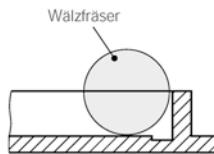


Abb. 2.143 Bei zu bearbeitenden Flächen ist auf einen ausreichenden Auslauf für das verwendete Werkzeug zu achten. In der gezeigten zweckmäßigen Ausführung kann sowohl mit Wälz- als auch mit Stirnfräsern gearbeitet werden

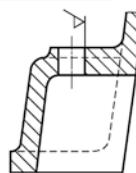
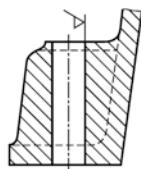
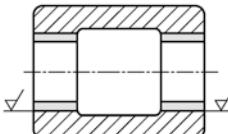
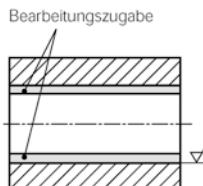


Abb. 2.144 Bei Werkstücken mit langer Bohrung sollte der Kern so gestaltet werden, dass eine durchgehende Bearbeitung des Innendurchmessers nicht nötig ist

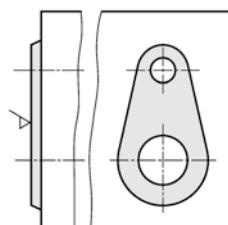
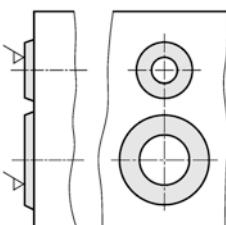


Abb. 2.145 Dicht nebeneinanderliegende Flächen sollte man zu einer zusammenfassen, um die Anschnittsmöglichkeiten beim Spanen zu erweitern

Abb. 2.146 Wenn die Funktion es zulässt, sollten mehrere Bearbeitungsflächen auf einer Höhe liegen ($h=0$), um die Bearbeitung zu vereinfachen. Beim Einsatz von NC-Maschinen kann man darauf verzichten

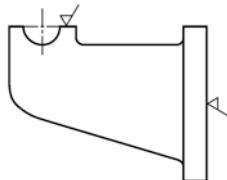
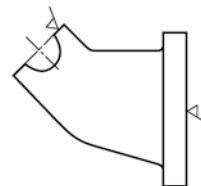


Abb. 2.147 Schräg liegende Bearbeitungsflächen sind zu vermeiden, da die Werkstücke schwieriger zu spannen sind. Bearbeitungsflächen ordne man daher möglichst rechtwinklig zueinander an

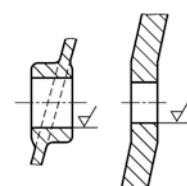
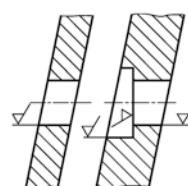


Abb. 2.148 Beim schrägen Anbohren von Flächen brechen die Werkzeuge leicht oder verlaufen. Dem kann durch Umgestaltung der Wände oder durch Anbringen von Augen abgeholfen werden

2.9 Urformen durch Sintern (Pulvermetallurgie)

Die Entwicklung der *Pulvermetallurgie* begann vor etwa 100 Jahren mit Sonderwerkstoffen aus den hochschmelzenden Metallen Wolfram und Molybdän, die schmelzmetallurgisch nicht herstellbar waren. Die daraus entwickelte Fertigungstechnik wurde zunächst ab etwa 1945 auf im flüssigen Zustand nicht mischbare Legierungen wie *Gleitlager* aus Kupfer-Zinn-Blei, *Kontaktwerkstoffe* aus Kupfer-Grafit und *Schneidstoffe* aus Wolframcarbid-Kobalt übertragen. Werkstücke mit einer definiert porigen Struktur für *Dichtungen*, *Filter* und wartungsfreie *Tränklager* wurden durch unterschiedlich starkes Verdichten der Pulver entwickelt.

Heute bieten pulvermetallurgisch hergestellte Sinterteile gegenüber den konkurrierenden Urform- und Umformverfahren wie

- Feinguss und Druckguss,
- grätfreies Schmieden und
- Warm- und Kaltfließpressen

eine Reihe von Vorteilen:

- Der weitgehend mechanisierte Fertigungsablauf führt zu maßhaltigen *Sinterfertigteilen*, die meist nicht weiter bearbeitet werden.
- Der eingesetzte Pulverwerkstoff wird nahezu 100 %ig ausgenutzt, weil Anschnitte, Speiser, Grate und Zugaben fehlen.
- Beim Sintern entsteht keine Schlacke. Das Sinterteil ist deshalb reiner als Guss- oder Schmiedestücke.
- Das sorgfältige Mischen verschiedener Metallpulver führt zu Werkstoffen, die sonst wegen einer Mischungslücke im flüssigen Zustand nicht herzustellen sind.
- Die Erzeugung von *Verbundwerkstoffen* und nicht legierbaren sog. Pseudolegierungen, bestehend aus Metallen und Nichtmetallen, ist möglich.
- In Sinterwerkstoffen treten keine Seigerungen auf.

- Bei Sinterformteilen sind Energieeinsparungen von etwa 50 % gegenüber spanend hergestellten Teilen aus Profilen, Schmiede- oder Gussstücken möglich.
- Porenraum führt zu Gewichtseinsparungen und guten Dämpfungseigenschaften
- Bei ideal gleichmäßiger Dichte weisen Sinterteile richtungsunabhängige (isotrope) mechanische Eigenschaften auf im Gegensatz beispielsweise zu Umformteilen

Diesen Vorteilen stehen allerdings auch heute noch einige Nachteile gegenüber:

- Die Pulver und Pulvergemische sind teuer.
- Man benötigt beim Pressen große Kräfte, große Pressen und hochwertige Presswerkzeuge. Sintern ist also nur für Serien wirtschaftlich.
- Nur einfache Grundkörper (Prismen, Kegel, Quader) ohne Hinterschneidungen und mit möglichst geringem *Höhen/Durchmesser-Verhältnis* sind gut pressbar.
- Mit bestimmten Pulvern oder Pulvermischungen lassen sich porenfreie und schwindungsarme Sinterteile bisher nicht herstellen.

Der Einteilung der Fertigungsverfahren in DIN 8580 entsprechend ist die Pulvermetallurgie der Teil der Metallurgie, der sich auf die Herstellung von Metallpulvern oder Gegenständen durch Formgebungs- und Sinterprozesse bezieht. Die dafür erforderliche Fertigungstechnik, auch *Sintertechnik*¹¹ genannt, umfasst mindestens drei Verfahrensstufen:

- die Pulvererzeugung,
- die Presstechnik und
- das Sintern.

¹¹ Pulverpressen und Sintern 1. IFUM Universität Hannover. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=KwvWVQHdXjU).

2.9.1 Pulvermetallurgische Grundbegriffe

Der Hersteller von Sinterteilen, der meist nicht Pulvererzeuger ist, benötigt möglichst reine Pulver einer vorgegebenen Zusammensetzung. Die Verarbeitungseigenschaften des Pulvers, hauptsächlich die *Pressbarkeit*, das *Sinterverhalten* und die *Schwindung*, müssen gleichbleibend sein.

Für eine Serienfertigung von Sinterteilen muss für die Presseneinstellung zunächst der *Füllfaktor* ermittelt werden. Dieser ist der Rauminhalt des lose eingeschütteten Pulvers, bezogen auf das Volumen des fertigen Presslings. Für den Füllfaktor in einem Werkzeug gilt:

$$\text{Füllfaktor} = \frac{\text{Füllhöhe}}{\text{Fertighöhe}}.$$

Abb. 2.149 verdeutlicht den Zusammenhang. Füllfaktoren zwischen 1,9 und 2,5 sind z. B. bei Eisenpulver mit einem spezifischen Füllvolumen von ungefähr $40 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ und einer Einfülldichte, der *Scheindichte*, von $2,5 \text{ g/cm}^3$ zu erreichen. Für den automatisierten Pressvorgang ist das *Fließverhalten* der Pulver eine wichtige Verarbeitungseigenschaft. Die Pulvermischung soll den Presswerkzeugen aus einem i. Allg. erhöhten Zwischenbehälter möglichst ohne *Entmischung* zufließen.

Das Fließverhalten misst man als Ausflusszeit in Sekunden von z. B. 50 g Pulver aus einem Trichter mit 60° Kegelwinkel und einer Ablaufbohrung von 5 mm Durchmesser. Im Auffangbehälter kann das spezifische Füllvolumen gemessen werden.

Die *Raumerfüllung* des Pulvers und die Fließ- und Presseigenschaften sind hauptsächlich von der Teilchengrößenverteilung des Pulvers, der sog. *Sieblinie*, und von der Teilchenform abhängig. Modellversuche mit Glaskugeln gleicher Größe haben gezeigt, dass die dichteste Kugelpackung, Abb. 2.150a, die maximal mögliche Raumerfüllung, bei losem Einfüllen in ein Gefäß oder Werkzeug nicht von selbst erfolgt. Die Hohlräume und die zu brückenartigen Anordnungen abgestützten Teilchen – angedeutet in Abb. 2.150b – müssen zunächst durch Klopfen, Rütteln oder Stampfen beseitigt werden. Aus dem dadurch entstehenden *Klopfvolumen* ergibt sich eine größere Dichte, die *Klopfdichte*.

Pulver mit unterschiedlicher Korngröße füllen i. Allg. einen Raum besser aus, wie Abb. 2.151 zeigt, als Pulver mit etwa gleicher Teilchengröße. Von der Kugelform sehr abweichende Teilchenformen wie *eckig*, *spratzig* oder *flitterförmig* zeigen keine lineare Beziehung zwischen Sieblinie und Raumerfüllung.

Für Tränklager sind Eisenteilchengrößen von etwa $150 \mu\text{m}$ nötig, um gleichbleibend 25 % Porenraum für das Schmiermittel (Volumengehalt etwa 22 % Öl) zu schaffen.

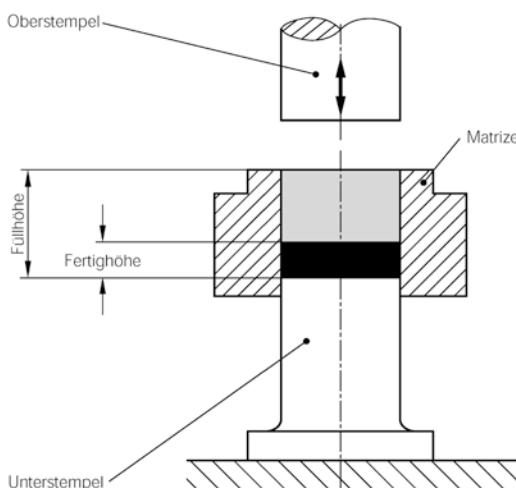


Abb. 2.149 Zum Begriff Füllfaktor am Presswerkzeug zum einseitigen Pressen

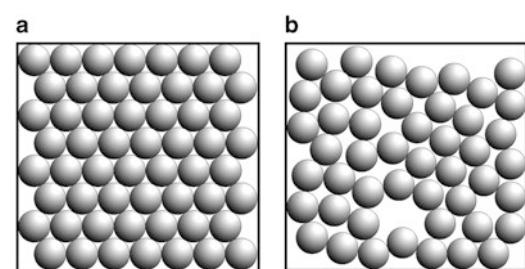


Abb. 2.150 Glaskugelmodell. **a** Dichteste Kugelpackung **b** Brückenbildung

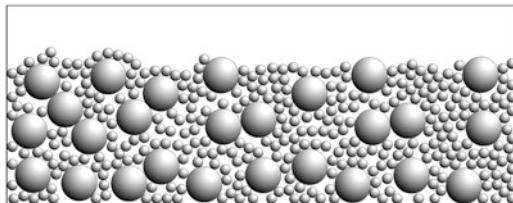


Abb. 2.151 Zum Begriff Raumerfüllung: Glaskugeln mit verschiedenen Durchmessern als Modell

Gesinterte Bronzezahnräder und -ritzel haben als Hauptsiebfaktion Teilchen mit einer Größe von etwa $50\text{ }\mu\text{m}$. Feinstpulvermischungen aus Hartstoffen wie Wolframcarbid oder Bornitrid und Sondermetallen wie Kobalt oder Nickel mit Teilchengrößen unter $5\text{ }\mu\text{m}$ sind nur mit Presshilfsmitteln – dies sind Stearate der Metalle Lithium und Zink sowie synthetisches Mikrowachs – verarbeitbar. Ohne Hilfsstoffe klemmen sie im Werkzeugsatz.

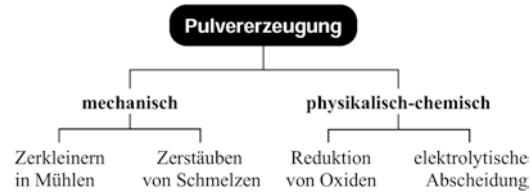
Haufwerke von Teilchen werden allgemein nach DIN EN ISO 3252 nach ihrem mittleren Teilchendurchmesser D wie folgt bezeichnet:

- Granulate: $D > 1\text{ mm}$,
- Pulver: $D < 1\text{ mm}$,
- Kolloide: $D < 1\text{ }\mu\text{m}$.

2.9.2 Pulver-Erzeugung

Durch den Werkstoff, die Art der Herstellung besonders aber durch die Teilchenform und -größe, wird die Verdichtung des Pulvers zu *Presslingen* stark beeinflusst. Die unterschiedlichen Verfahren der Pulverherstellung erzeugen ein typisches Kornspektrum. Mittels Sieben oder bei Feinstpulver mittels Schlämmen teilt man das Korngemenge in Fraktionen auf. Durch sorgfältiges Mischen bestimmter Kornfraktionen wird ein synthetisches Teilchengemisch eingestellt, das sich in vorausgegangenen Pressversuchen als gut verdichtbar erwiesen hat.

Die wichtigsten Verfahren zur Pulvererzeugung können grob in *mechanische* Verfahren und *physikalisch-chemische* Verfahren eingeteilt werden:



Mechanisches Zerkleinern von Metallen und Verbindungen in Mühlen mit Hämmern, Kugeln oder Stampfern ergibt ein Gemenge mit einem Teilchendurchmesser von $50\text{ }\mu\text{m}$ bis herab zum Feinststaub ($5\text{ }\mu\text{m } \varnothing$). Es lassen sich spröde Verbindungen, Carbide, Nitride, Boride, aber auch zähe Metalle, Eisen und Stahl, Aluminium, Bronze sowie Folienabfälle mahlen bzw. zerkleinern. Es wird trocken, unter Schutzgas oder auch nass gemahlen.

Das Zerstäuben einer Metallschmelze durch Pressluft, Druckwasser oder inerte Gase unter Druck wird als Granulieren, Zerstäuben, Verspritzen oder auch Verdüsen bezeichnet. Pulver aus Stahl, Eisen, Chrom-Nickel-Stahl, Magnesium und Nichteisenmetall-Legierungen lassen sich auf diese Weise schnell und wirtschaftlich herstellen.

Eine wichtige Variante zum Erzeugen von nahezu sauerstoff- und kohlenstofffreiem Reineisenpulver ist das Roheisen-Zunder-Verfahren, *RZ-Verfahren* genannt. Gusseisen, aus reinem Stahlschrott und Koks im Kupolofen erschmolzen, wird mit Pressluft über Wasser zerstäubt. Ein Teil des Gussstaubs, der aus Zementit (Fe_3C) besteht, bildet mit der Luft Zunder (Fe_3O_4). Eine Wärmebehandlung bei etwa 1000°C – wie beim historischen Erztempern – reduziert den Zunder durch den Zementitanteil. Es entstehen Reineisenschwamm und ein Gasgemisch aus Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Das poröse *RZ-Pulver* lässt sich sehr gut pressen.

Hochreine Eisen- und Nickelpulver mit gleichmäßigen, kugeligen Teilchen von etwa $0,5$ bis $10\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser werden chemisch nach dem *Carbonylverfahren* erzeugt. Bei etwa 200°C bildet Kohlenmonoxidgas unter Druck mit Eisen und Nickel die flüssigen Carbonyle $\text{Fe}(\text{CO})_5$ sowie $\text{Ni}(\text{CO})_4$. Unter Normaldruck

zerfallen die Verbindungen zu Carbonyleisen, Carbonylnickel und Kohlenmonoxid. Da die Begleitelemente des Eisens und Nickels keine Carbonyle bilden, sind die Pulver hochrein, aber teuer. Magnetwerkstoffe und hochwarmfeste Nickellegierungen für Gasturbinen werden aus *Carbonylpulvern* hergestellt.

Nach dem *Reduktionsverfahren* werden hauptsächlich Wolfram-, Molybdän- und auch ein bedeutender Teil der Eisenpulver erzeugt. Ausgehend von den festen, reinen Oxiden WO_3 , MoO_3 , Fe_3O_4 und Fe_2O_3 wird das Oxidpulver im Wasserstoffstrom bei 900°C reduziert. Die Reduktionspulver sind schwammig und lassen sich gut pressen.

Die elektrolytische Gewinnung von Metallpulvern als poröse, an einer Kathode lose anhaftende Niederschläge hat für Edelmetalle, Kupfer aber auch für Eisen Bedeutung. Aus wässrigen Kupfersalzlösungen wird bei großer Stromdichte Kupfer elektrolytisch an der Kathode abgeschieden. Der bei dieser großen Stromdichte gleichzeitig entstehende Wasserstoff lockert den Niederschlag auf und macht ihn porös schwammartig. Die Kathoden zerkleinert man in Feinmühlen, und das Pulver stellt man auf die gewünschte Sieblinie ein. Die durch das Mahlen erzeugte Kaltverfestigung wird in einer kurzen Rekristallisationsglühung in Anwesenheit von Wasserstoff beseitigt.

Elektrolytisch erzeugte Kupferpulver sind rein und haben sehr gute Press- und Sintereigenschaften. Das elektrolytisch gewonnene Eisenpulver ist billiger als das Carbonyleisenpulver.

2.9.3 Presstechnik

Sinterteile aus Metallpulvern werden nach verschiedenen Verfahren gefertigt. Das einfachste Vorgehen besteht darin, das Pulver in eine Form aus Grafit oder Stahl lose einzufüllen, durch Klopfen oder Vibrieren zu verdichten und die gefüllte Form in einem Ofen zu sintern. Durch *Schütt-sintern* lassen sich unterschiedliche Formteile herstellen. Die einfache Formgebung erlaubt es, z. B. hohe Zylinder und Töpfe wie in Abb. 2.152a, auch mit Gewinden,

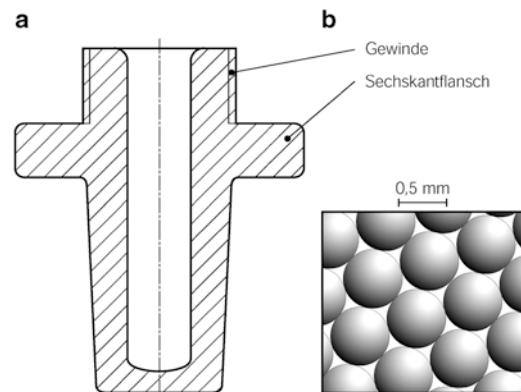


Abb. 2.152 a Bronzefilter mit Sechskantflansch und Gewinde für Ölbrennerdüsen; b durch Schütt-sintern erzeugtes Porenvolumen für Filter

durch einfaches Schütteln und Sintern zu fertigen. Die Größe der Bronzeteilchen kann so eingestellt werden, dass Filterfeinheiten zwischen $200\mu\text{m}$ und $8\mu\text{m}$ Durchmesser, je nach dem gewünschten Filtrierstoff, entstehen, wie Abb. 2.152b zeigt.

Das wichtigste Verfahren ist das Pressen von Pulvern zu sog. *Presslingen* oder *Grünlingen*, die anschließend gesintert werden.

In Pulvern gilt nicht wie in der Flüssigkeitsmechanik das Gesetz der gleichmäßigen Druckfortpflanzung. Pulver sind ganz unterschiedlich verpressbar. Die *Pressbarkeit* ist der Quotient aus der Scheindichte ρ' (Gründichte) und dem Pressdruck p . Es ist ein einfach zu bestimmender Vergleichswert:

$$\text{Pressbarkeit} = \frac{\text{Scheindichte } \rho'}{\text{Pressdruck } p}.$$

Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2.153 für drei verschiedene Pressbedingungen dargestellt. Die Pressbarkeit kann z. B. bei einem konstanten Pressdruck von 60 kN/cm^2 (Kurve 1) bei mechanisch erzeugtem Eisenpulver durch Glühen unter Wasserstoff verbessert werden. Durch mechanisches Zerkleinern werden die Teilchen kaltverfestigt. Nach einer Rekristallisationsglühung (Kurve 2) werden sie bei gleichem Pressdruck stärker verdichtet. Zusätze von 0,5 % Lithiumstearat als Gleitmittel wirken noch stärker (Kurve 3).

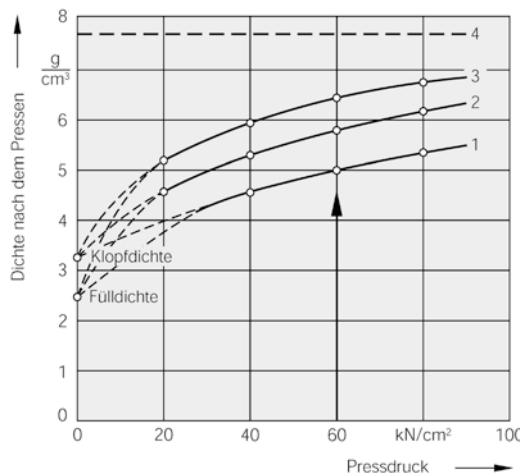


Abb. 2.153 Pressverfahren von Eisenpulver mit Korngrößen kleiner als 0,3 mm (Nach Eisenkolb). **1:** ungeglüht ohne Zusatz **2:** geglüht **3:** mit 0,5 % Lithiumstearat **4:** Dichte des porosen Eisens

Bezieht man die erreichte Gründichte (Schein-dichte) auf die theoretisch mögliche Dichte (Linie 4), erhält man den Begriff *Raumerfüllung*. Für den Pressdruck von 60 kN/cm^2 ergibt sich als Quotient der Schnittpunkte von 3 und 4 eine Raumerfüllung von ca. 83 %, ausgehend von einer Fülldichte von etwa $2,5 \text{ g/cm}^3$ und einer Klopfdichte von etwa $3,2 \text{ g/cm}^3$. Als Faustformel gilt, dass die Höhe der Presslinge den Durchmesser nicht wesentlich überschreiten soll.

Durch Verdichten bei Raumtemperatur, das *Kaltpressen*, soll der Pressling i. Allg. bei niedriger Presskraft eine große Dichte erreichen. Angestrebt wird eine möglichst gleichmäßige, homogene Verdichtung. Durch eine einseitig wirkende Presskraft wie in Abb. 2.149 wird selbst bei hohen Drücken keine gleichmäßige Raumerfüllung erreicht. Die meisten Werkzeuge arbeiten deshalb mit gegenläufig wirkendem Ober- und Unterstempel, wie Abb. 2.154 zeigt. Das Pulver wird bei abgehobenem Oberstempel in die Matrize eingefüllt, durch Vibrieren vorverdichtet und durch gleichzeitigen Druck auf Ober- und Unterstempel beidseitig gegenläufig nach dem *Matrizenabzugsverfahren* verdichtet.

Nach Erreichen der Höchstkraft, die nur 1 bis 1,5 s gehalten wird, fährt zunächst der Oberstempel zurück, während die Matrize durch eine

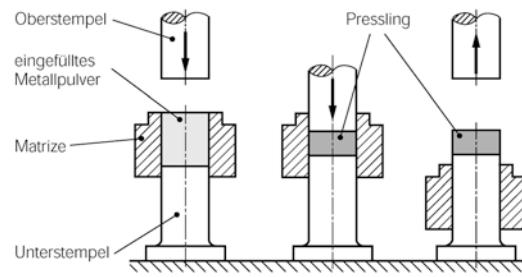


Abb. 2.154 Koaxiales Pressen mit feststehendem Unterstempel nach dem Matrizenabzugsverfahren, schematisch

kleine Hubbewegung den Grünling freilegt. Der Werkzeugaufbau ist auch mit profiliertem Ober- und Unterstempel und mit Lochdorn möglich. Für eine Serienfertigung kann die Taktzeit verkürzt werden, wenn durch einen vom Hauptantrieb unabhängigen Hubantrieb der Matrize mit etwa 5 bis 25 % der Hauptkraft das Freilegen erfolgt. Üblich sind Presskräfte bis 300 kN auf mechanischen und bis 4000 kN auf hydraulischen Pressen. Nur mit großen Pressdrücken bis 100 kN/cm^2 gelingt es beim koaxialen Kaltpressen, ein Porenvolumen von unter 5 % zu erzeugen.

Pressdrücke von 60 kN/cm^2 gelten bei Serienfertigungen als Grenze der Wirtschaftlichkeit. Die Haltbarkeit der Werkzeuge nimmt bei höheren Drücken sehr ab. Zum Verbessern der Maßgenauigkeit, der Oberfläche und der Werkstoffeigenschaften kann nach dem Sintern in einem weiteren Werkzeug koaxial nachgepresst werden. Beim Freilegen erfolgt je nach Dichte und Pulvermischung eine elastische *Rückfederung*, also eine Volumenvergrößerung der Presslinge.

Zusammen mit der *Sinterschwindung*, d. h. der Volumenverminderung beim Sintern, werden Maßabweichungen bis zu $\pm 1,5\%$ gemessen.

Durch *Kalibrieren* in einem speziellen Kalibrierwerkzeug beseitigt man mittels Nachpressen diese Volumenänderungen. Die dabei verbesserten Oberflächen und die durch Kaltverformung erhöhte Festigkeit sind i. Allg. erwünscht.

Durch *Heißpressen* bei erhöhter Temperatur werden Pulversorten verdichtet, die sich wegen ihrer Sprödigkeit kalt nicht pressen lassen, oder

die eine große Dichte erreichen müssen. Es werden auch Kaltpresslinge oder fertige Sinterteile warm nachgepresst (Sinterschmieden), um eine größere Festigkeit und Dichte zu erzielen.

Größere Bedeutung hat das Heißpressen von Aluminiumpulver. Hochsiliciumhaltige Aluminiumpulver mit bis zu 30 % Silicium und Zusätzen von Aluminiumoxid Al_2O_3 sind gut warm pressbar. Gegenüber den Guss- und Knetwerkstoffen sind sie verschleißfester und dispersionshärtbar. Bei Aluminiumlegierungen kann beim Heißpressen ohne Schutzgas gearbeitet werden.

Eine besonders wirksame, aber verhältnismäßig teure Verdichtung ist das *isostatische Pressen* von Pulver. Der Formling wird in einer elastischen Kunststoffhaut allseitig und gleichmäßig isostatisch mittels einer Ölemulsion verdichtet. Nach diesem Verfahren wird Halbzeug aus Metallen hergestellt, das nach dem Sintern durch Spanen seine Form erhält. Hochwarme feste Nickellegierungen, deren Anwendung im Gusszustand durch die große Sprödigkeit begrenzt ist, lassen sich pulvermetallurgisch z. B. zu Feinstfilterbauteilen mit hoher Zähigkeit verarbeiten.

Das Pulver wird unter Vakuum in einen dünnwandigen Feinblechbehälter z. B. in der Gestalt einer einfachen Lochscheibe gefüllt. Nach dem Klopfferdichten wird der Blechbehälter vakuumdicht verschweißt und in einem Autoklaven unter hohem Gasdruck isostatisch heißgepresst. Der Pressling ist homogen verdichtet, praktisch porfrei und wird dem verformten Behälter entnommen. Das teure Schmiedegesenk bei kleinen Stückzahlen entfällt auf diese Weise. Das Rohteil, z. B. für einen Gasturbinenläufer, ist gegenüber dem Schmiedestück maßgenauer und spart Zerspanungsaufwand.

2.9.4 Sinter-Prozess

Ein mechanisches Verklammern der Pulverteilchen beim Pressen erzeugt mithilfe der *Adhäsion* die Grünfestigkeit. Sie kann mittels Sintern erheblich erhöht werden. Beim Glühen

unterhalb der Schmelztemperatur T_S in Kelvin wird ein Zusammenwachsen der Pulverteilchen als Folge von Diffusionsprozessen und Kornneubildung (Rekristallisation) ermöglicht (Sintern). Die Sintertemperatur T_{Sint} beträgt

$$T_{\text{Sint}} \approx \frac{2}{3} \cdot T_S \text{ bis } \frac{3}{4} \cdot T_S .$$

In Pulvergemischen liegt die Sintertemperatur unterhalb des Schmelzpunktes der am höchsten schmelzenden Komponente. In Eisenpulver erfolgt beim Aufheizen zunächst ein Fließen, dann eine *Oberflächendiffusion* an den Berührungsstellen, die bei Sintertemperaturen zwischen 1000 °C und 1250 °C in die *Gitterdiffusion* übergeht, d. h. auch im Inneren der Pulverteilchen erfolgen Platzwechselvorgänge, es bilden sich neue Kristalle. Eine flüssige Phase entsteht aber nicht.

In Zwei- oder Mehrstoffsystemen, z. B. WC und Co, kann die Sintertemperatur so liegen, dass ein Stoff schmilzt und unter schneller *Legierungsbildung* aufgezehrt wird. Dadurch wird das noch vorhandene Restporenvolumen meist stark vermindert.

Beim Sintern reiner Pulver oder Pulvermischungen wird eine geringe *Volumenabnahme* (Schwindung) bis zu 1,5 % beobachtet. Das Ziel der Fertigungstechnik in der Pulvermetallurgie ist das Herstellen maßgenauer Sinterteile in Serien. Das Schwinden beim Sintern hängt in der Hauptsache ab von der

- *Pulverwerkstoffart*
- *Dichte des Presslings*,
- *Sintertemperatur* und
- *Sinterzeit*.

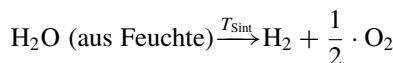
Nur hoch und gleichmäßig verdichtete Presslinge sind beim Sintern *volumenkonstant*. Durch Zusätze von 0,5 bis 2,0 % Kupfer kann bei Eisenpulvern das Schwinden verhindert werden. Notfalls muss der Grüning mit einem Aufmaß gepresst werden.

Sinterzeit und Sintertemperatur sind aufgrund der Diffusionsgesetze in Grenzen veränderbar. Eine wirtschaftlich kurze Sinterzeit von etwa

30 min lässt sich z. B. bei Aluminiumpulver mit einem Porenraum von 5 % mit einer höheren Sintertemperatur von etwa 540 bis 580 °C erreichen.

Die Atmosphäre im Sinterofen wird durch *Schutzgase* neutral oder reduzierend eingestellt. Verwendet werden meist Wasserstoff, Stickstoff, Ammoniak und Spaltgas aus Ammoniak.

Die großen inneren Oberflächen der Grünlinge sind oxidationsempfindlich. Eine Oxidation wird auch unter Schutzgas durch die Feuchte nach der Reaktion



möglich. Hochwertige Sintereteile wie Schnellstahl werden deshalb in *Vakuumöfen* bei einem Gasdruck von 0,05 bar gesintert.

Die mathematische Beschreibung von Sintervorgängen ist noch unbefriedigend, weil Transportvorgänge, Geometrieänderungen und Atmosphäre während des Sinterns von vereinfachten Betrachtungen an Modellen, z. B. den Glas- oder Kupferkugelmodellen, nicht genau erfasst werden können.

Im *Zweiteilchenmodell* wie in Abb. 2.155 sind die wichtigsten Größen zum Beschreiben des Sinterverlaufs die Zentrumsannäherung 2 h als Maß für das Schwinden und der Halsradius x als Maß für den Transportquerschnitt und die Festigkeit der Bindung. Die Abweichungen der besten Näherungsbeziehung zwischen diesen Größen

$$\frac{h}{a} = \frac{x^2}{4 \cdot a^2}$$

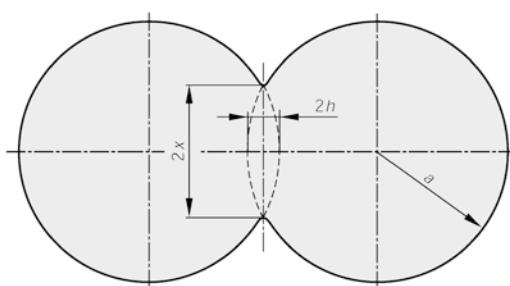


Abb. 2.155 Zweiteilchenmodell zur mathematischen Beschreibung von Sintervorgängen

liegen unter 20 % der theoretisch errechneten Werte. Für gepresste Teilchen gibt es nach *Exner* keinen einfachen Zusammenhang zwischen dem Halsradius und der Zentrumsannäherung.

2.9.5 Verfahren zum Verbessern der Werkstoffeigenschaften

Die verdichteten und gesinterten Formteile werden häufig nach verschiedenen Verfahren weiterverarbeitet, um die Werkstoffeigenschaften der Sintereteile zu verbessern. Beim *Aufkohlen* von Sinterreisen zu Sinterstahl wird der Kohlenstoffgehalt im Sinterteil mittels Aufkohlungsmittel erhöht. Zur Verfügung stehen

- *Gase* (Kohlenmonoxid und Methan),
- *fester Kohlenstoff* (Grafit und Ruß),
- *Salze* (Alkali- und Erdalkalicyanide).

Die Salzschorzen für das flüssige Aufkohlen haben sich bei Sinterteilen nicht bewährt, da Salzreste in den Poren verbleiben, die später das Metall korrodieren.

Das *Aufkohlen* zielt entweder auf ein bestimmtes Ferrit-Perlit-Verhältnis im Sinterstahl oder kann bis zur Bildung von Sekundärzementit in perlitischer Grundmasse geführt werden. Verschleißfeste und harte Funktionsflächen kann man mit einer nachfolgenden Martensithärtung erzeugen, z. B. bei Einstellplatten für Ventile.

Beim Herstellen von *Sinterlegierungen* kann die Legierungsarbeit durch Diffusion oder Schmelzen eines Bestandteils der Pulvermischung erfolgen. Wichtigstes Beispiel ist die *Hartmetallfertigung* aus Wolframcarbid WC und Kobalt Co. Im vereinfachten Zustandsdiagramm wie in Abb. 2.156 ist das System WC–Co im Temperaturbereich von 800 bis 2000 °C dargestellt. Die Feinstpulver-Presslinge aus 94 % Wolframcarbid und 6 % Kobalt werden bei etwa 1400 °C gesintert und gleichzeitig legiert. Dabei wird zunächst durch Diffusion bis zur Sättigung im Punkt „a“ etwa 3 % Wolframcarbid in das Kobaltgitter aufgenommen. Dann bildet sich im Punkt „d“ eine Schmelze aus etwa 80 % Co und

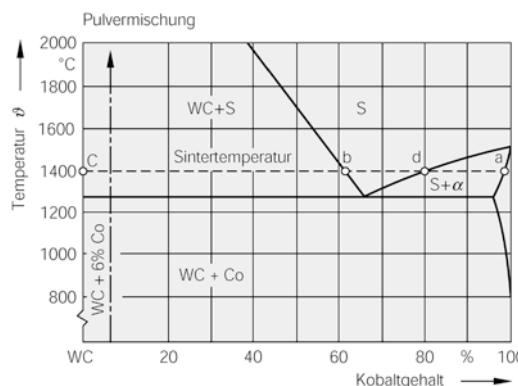


Abb. 2.156 Zustandsschaubild Wolframcarbid-Kobalt.
(Nach Takeda)

20 % WC, die sich bis zum Punkt „b“ mit bis zu 38 % WC anreichert. Dadurch wird alles Kobalt aufgebraucht und das im Überschuss vorhandene Wolframcarbid-Pulver porenfrei benetzt.

Nach dem gesteuerten Abkühlen auf Raumtemperatur besteht das Gefüge aus scharfkantigen Wolframcarbid-Kristallen, eingebettet in Kobalt, weil bei Temperaturen unterhalb von etwa 800 °C beide Stoffe nicht ineinander mischbar sind.

Durch den Sinterprozess und die Legierungsarbeit werden die für Hartmetallwerkzeuge wichtigsten Werkstoffeigenschaften erzielt:

- Warmhärtung und hoher Verschleißwiderstand,
- große Zähigkeit und Schlagfestigkeit.

Aus Pulvermischungen von Metallen mit Nichtmetallen werden Sinterkörper mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt.

Für Brems- und Kupplungsbeläge z. B. presst und sintert man Eisenpulver mit Glasfasern, Grafit und weiteren Zusätzen zu Formteilen.

Die Gebrauchseigenschaften der Sinterformteile lassen sich erheblich verbessern, wenn der Porenraum, das typische Kennzeichen der nicht heiß nachgepressten Sintereteile, durch Tränken mit Flüssigkeiten oder Metallschmelzen gefüllt wird. Untersuchungen haben ergeben, dass bis zu einer Raumerfüllung von etwa 90 % ein labyrinthartig verbundenes Porennetz in Sinterkörpern vorliegt.

Durch Tränken mit Öl oder Fett als flüssige Gleitmittel werden die selbstschmierenden, wartungsfreien Gleitlager mit meist 15 bis 25 % gefülltem Porenraum erzeugt. Die geringe Festigkeit des Sinterkörpers aus Reineisen oder Aluminiumbronze ermöglicht durch anschließendes Kalibrieren eine große Maßgenauigkeit.

Unter Kalibrieren wird das Nachpressen in einem Gesenk im kalten Zustand verstanden. Durch diesen Schritt der Nachverdichtung lässt sich neben der Formtreue auch die Festigkeit steigern. Mechanische Kleinteile für mittlere Beanspruchungen (z. B. Ölpumpenzahnräder, Türgriffmechanik etc.) werden nach dem Kalibrieren ein zweites Mal gesintert.

Mechanische Bauteile für höchste Festigkeitsanforderungen, wie z. B. Pleuel und Gelenkhebel, werden hingegen durch Sinterschmieden gefertigt. Hierbei wird ein vorgesinterter Rohling unter hohen Temperaturen in einem geschlossenen Schmiedegesenk stark verdichtet. Der sintergeschmiedete Werkstoff ist sehr porenaarm (Restporosität < 4,5 %) und erreicht so Festigkeitswerte, die dem porenenfreien, schmelzmetallurgisch hergestellten Werkstoff sehr nahe kommen (Klocke, 2018).

Der Porenraum von Sintereteilen kann durch Tränken mit Kunststoffen, wie z. B. von Epoxidharzen, die bei dem Aushärten eine geringe Volumenzunahme zeigen, vollständig ausgefüllt werden. Hydraulikteile sind bis etwa 200 bar druckdicht und lassen sich nach dem Beizen oder Strahlen galvanisch beschichten, sodass später durch die von innen nachfließende Elektrolytlösung keine Korrosion auftritt.

Tränkkörper aus hochschmelzenden Gerüstwerkstoffen wie Eisen, Wolfram oder Carbide lassen sich auch mit Metallschmelzen füllen. Der Tränkwerkstoff, wie z. B. Silber, Kupfer oder Bronze, wird auf dem vorgesinterten Gerüstkörper im festen Zustand durch einfaches Auflegen oder bei Rohren durch Aufziehen befestigt, wie Abb. 2.157 zeigt.

Bei der nachfolgenden Wärmebehandlung schmilzt der Tränkwerkstoff und wird von den Kapillarkräften je nach Menge örtlich oder durchgreifend im Porenraum verteilt. Die Fertigung von Tränkkörpern mit Metallschmelzen

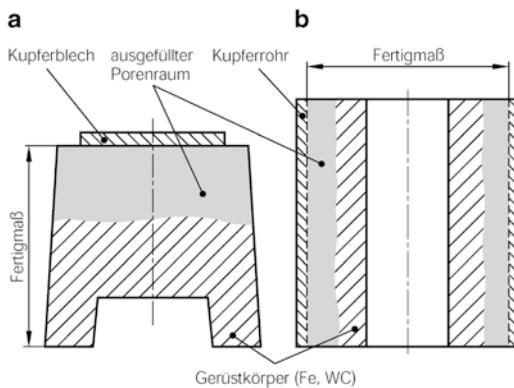


Abb. 2.157 Fertigung von Tränkkörpern: **a** Kontaktstange mit aufgelegtem Kupferblech, nach Wärmebehandlung getränkt; **b** gas- und öldichter Rotor mit aufgezogenem Kupferrohr, nach Wärmebehandlung getränkt

hat für Kontaktwerkstoffe sowie für öl- und gasdichte Sinterteile Bedeutung.

Der Gerüstwerkstoff kann neuerdings auch mit besonderen *Tränklegierungen* in einem Arbeitsgang – d. h. Sintern und Tränken zugleich – während der Wärmebehandlung ausgefüllt werden.

Ein einfacher, aber für viele Sinterteile aus Eisenpulver ausreichender *Korrosionsschutz* besteht in der Behandlung mit überhitztem Wasserdampf in einem Druckgefäß.

Eisen bildet bei Temperaturen über 450°C in Anwesenheit von Wasserdampf genügend schnell eine festsitzende und für viele Zwecke hinreichende verschleißfeste Magnetitschicht (Fe_3O_4). Besonders in der Randzone der Werkstücke werden dadurch die Dichte und damit die Härte erhöht.

2.9.6 Anwendungen

Gemessen am Gesamtverbrauch metallischer Formstücke ist die erzeugte Menge von Sinterformteilen verhältnismäßig gering. Durch die bei pulvermetallurgischen Formgebungsverfahren möglichen Einsparungen von bis zu 60 % beim Rohstoffverbrauch und bis zu 40 % beim

Energieverbrauch – bezogen auf die spanende Fertigung des Werkstücks aus Halbzeugen, Schmiedestücken oder Gussteilen – erwartet man künftig erhebliche Steigerungen.

Die wichtigsten Sinterwerkstoffe sind in Tab. 2.26 an Hand ausgewählter Beispiele den Hauptanwendungen zugeordnet. Die *Hartmetalle* sind die mengenmäßig bedeutendste Gruppe der Sinterwerkstoffe. Weltweit werden bereits mehr als 250.000 t Eisenpulver pro Jahr verpresst. Alle übrigen Sinterwerkstoffgruppen zusammen erreichen nicht diese Größenordnung.¹²

Für die Werkstoffauswahl stehen verschiedene Pulver zur Verfügung, die einen Zugfestigkeitsbereich von 80 N/mm^2 bis ca. 1700 N/mm^2 abdecken. Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften werden stark von der relativen Dichte bzw. der Porosität beeinflusst, Abb. 2.158.

Die Formgebung von Sinterteilen erfolgt überwiegend durch Kaltpressen in verschleißfesten Werkzeugen (Gesenken). Bei der Gestaltung der Pressteile ist darauf zu achten, dass die Werkzeugkosten möglichst gering gehalten werden. Die Berührung von Ober- und Unterstempel muss vermieden werden, Abb. 2.160. Eine Mindestwanddicke von $s = 2 \text{ mm}$ sollte möglichst eingehalten werden (Abb. 2.162). Die Fertigungsgenauigkeit entspricht (ohne Kalibrierung) mindestens der Qualität „mittel“.

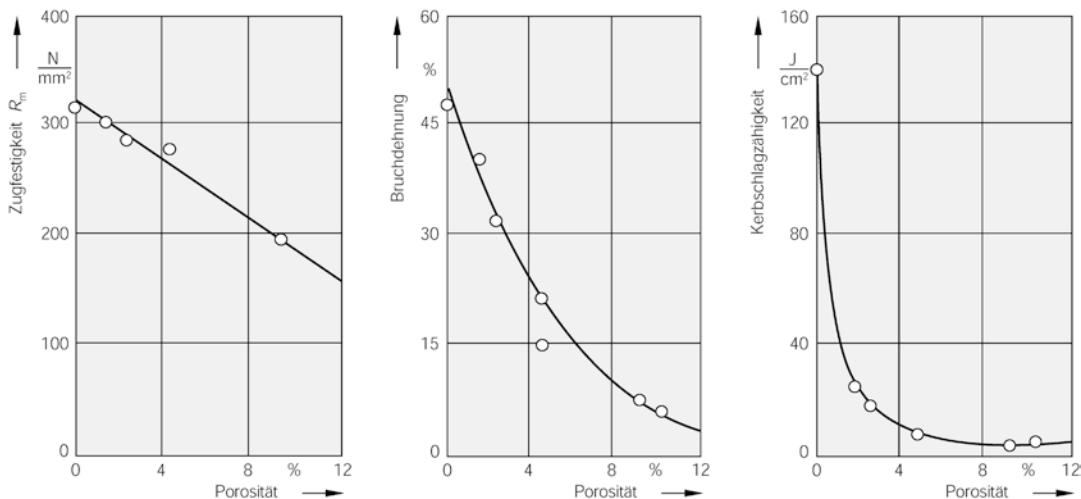
Im Folgenden sind einige wichtige Regeln für die Gestaltung von Sinterteilen zusammengestellt.

- Das Pressteil möglichst im Untergesenk unterbringen.
- Schrägläufende Kanten vermeiden.
- Scharfe Kanten durch Fasen ersetzen.
- Hinterschneidungen vermeiden.
- Verzahnungen mit ausreichend großem Modul ($m > 0,5 \text{ mm}$) versehen.
- Bohrungen mit $d < 2 \text{ mm}$ nachträglich spanend herstellen.

¹²Pulverpressen und Sintern 2 (Master). IFUM Universität Hannover [youtube wissenschaftsfloater](https://www.youtube.com/wissenschaftsfloater).

Tab. 2.26 Sinterteile, nach Werkstoffgruppen mit typischen Beispielen geordnet

Werkstoffgruppe	Anwendungsgebiet	Beispiele
Hartmetalle und Hartstoffe, Carbide der Metalle Wolfram, Tantal, Titan mit Kobalt	Zerspanung auf Werkzeugmaschinen, Werkzeugbau	Schneid- und Wendeplatten, Gewindebohrer, Schneideisen, Messbügel
Sinterreisen und Sinterstahl: unlegiert, niedriglegiert, hochlegiert	Fahrzeug- und Maschinenbau, Waffen- und Haushaltstechnik, Werkzeugbau, Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik	Stoßdämpferkolben, Zahnriemenräder, Einspritzpumpenkeile, Schnecken, Pumpenräder, Ventilführungen, Lehren, Führungsteile, Rändelmuttern und -schrauben
Reibwerkstoffe aus Eisenpulver mit nicht-metallischen Zusätzen, wie z. B. Glas, Grafit	Motorräder und Fahrzeuge, allgemeiner Maschinenbau	Bremsbeläge, Bremsklötze, Kupplungsscheiben, Synchronringe
Metallkohlen-Magnetwerkstoffe für Dauermagnete und Weicheiseenteile	Elektrotechnik und Elektromaschinenbau, Feinwerktechnik	Gleitlager, Führungsringe, Stoßdämpferkolben, Filter, Düsen, Sinterelektroden, Kolbenringe
Hochschmelzende Reinmetalle, wie z. B. Wolfram, Tantal, Molybdän, Kobalt und Nickel, Kontaktwerkstoffe Silber, Kupfer	Elektronische Bauteile, allgemeine Elektrotechnik, Textiltechnik und Vakuumtechnik	Lampendrähte, Elektronenröhren, Schleif- und Gleitkontakte, Schalterteile, Spinddüsen, Kondensatoren
Sinteraluminium und Aluminium-Siliciumpulver mit und ohne Zusatz von Aluminiumoxid	Maschinen- und Fahrzeugbau, Hochleistungsmotorenteile, Luft- und Raumfahrt	Gleitlager und Getriebeteile, warmfeste und aushärtbare Pleuelstangen und Kolben

**Abb. 2.158** Mechanische Eigenschaften von Sinterstahl. (Nach DIN 30910, T1 bis T4, T6: Werkstoff-Leistungsblätter WLB)

- Sehr unterschiedliche Querschnitte sowie kontinuierliche Querschnittsübergänge vermeiden, d. h., Kegel- und Kugelformen durch zylindrische Formen ersetzen.

In den folgenden Beispielen ist immer links die ungünstige, rechts die zweckmäßige Gestaltung dargestellt.

(Siehe Abb. 2.159, 2.160, 2.161, 2.162, 2.163 und 2.164).

(Siehe Abb. 2.165, 2.166, 2.167, 2.168, 2.169, 2.170, 2.171, 2.172, 2.173, 2.174 und 2.175).

2.10 Gestaltung von Sinterteilen

Die Formgebung von Sinterteilen erfolgt überwiegend durch Kaltpressen in verschleißfesten Werkzeugen (Gesenken). Bei der Gestaltung der Pressteile ist darauf zu achten, dass die Werkzeugkosten möglichst gering gehalten werden. Die Berührung von Ober- und Unterstempel muss vermieden werden. Eine Mindestwanddicke von $s = 2$ mm sollte möglichst eingehalten werden. Die Fertigungsgenauigkeit entspricht (ohne Kalibrierung) mindestens der Qualität „mittel“.



Abb. 2.159 Schräglauende Formen sind möglichst zu vermeiden, weil die Stempelherstellung hierfür schwierig ist



Abb. 2.160 Eine Berührung zwischen Ober- und Unterstempel soll vermieden werden. Daher ist in Pressrichtung eine Mantelfläche geringer Höhe ($h > 0,3$ mm) erforderlich. Das Pressteil ist möglichst nur im Untergesenk unterzubringen



Abb. 2.161 Um kräftige Pressstempel zu erhalten, dürfen keine messerscharfen Kanten vorgesehen werden. Außenkanten scharfkantig oder mit Fasen ausführen. Innenliegende Kanten ausrunden

Im Folgenden sind einige wichtige Regeln für die Gestaltung von Sinterteilen zusammengestellt.

- Das Pressteil möglichst im Untergesenk unterbringen.
- Schräglauende Kanten vermeiden.
- Scharfe Kanten durch Fasen o.Ä. ersetzen.
- Hinterschneidungen vermeiden.
- Verzahnungen mit ausreichend großem Modul ($m > 0,5$ mm) versehen.
- Bohrungen mit $d < 2$ mm nachträglich spannend herstellen.
- Sehr unterschiedliche Querschnitte sowie kontinuierliche Querschnittsübergänge sind zu vermeiden, d. h., Kegel- und Kugelformen sollten durch zylindrische Formen ersetzt werden.

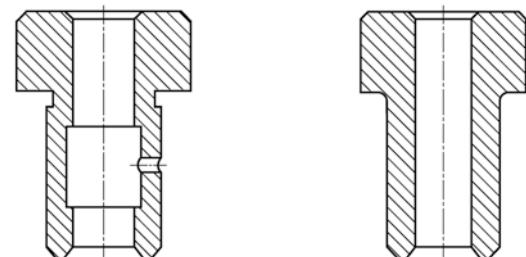


Abb. 2.162 Hinterschneidungen und Zwischenflansche sind zu vermeiden, da sie sehr aufwändig in der Herstellung sind. Einfache Körper sind wirtschaftlicher herzustellen. Erforderliche Nuten, Freistiche u. Ä. müssen spanend gefertigt werden

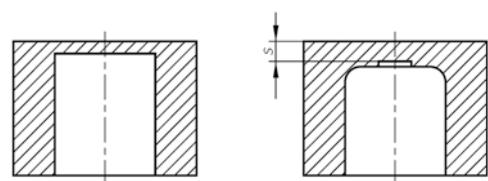


Abb. 2.163 Um ein Aufeinanderschlagen der Gesenkhälfte zu vermeiden, muss eine Wanddicke von mindestens $s = 2$ mm eingehalten werden. Querschnittsübergänge sind mit ausreichenden Rundungen zu versehen, extreme Querschnittsübergänge vermeiden

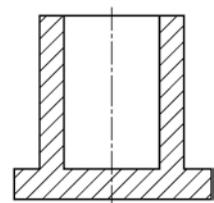
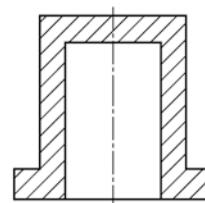
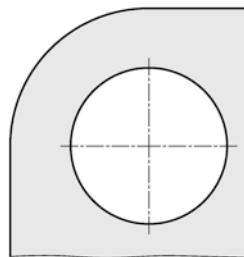
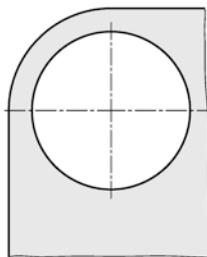


Abb. 2.164 Für eine ausreichende Werkstoffdicke ist zu sorgen; dünnwandige Stellen sind zu vermeiden

Abb. 2.168 Kegelvertiefungen lassen sich schwer herstellen. Besser sind stumpf auslaufende Grundlöcher. Buchsen mit Grundloch lassen sich leichter herstellen, wenn Boden und Flansch auf derselben Seite liegen

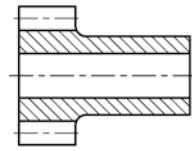
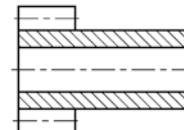
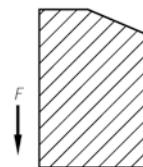
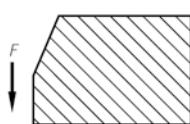


Abb. 2.165 Abschrägungen in Pressrichtung sind bei gedrehter Lage im Gesenk besser herstellbar

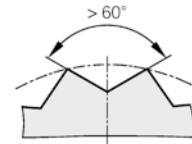
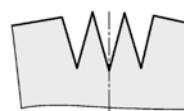


Abb. 2.166 Abgerundete Ausläufe bei abgesetzten Formteilen sind zu vermeiden und durch kantige Anschlüsse zu ersetzen (kostengünstigere Werkzeuge)

Abb. 2.169 Bei Verzahnungen muss der Modul $m > 0,5$ gewählt werden. Verzahnungsausläufe sind nicht bis auf den Buchsengrund zu führen. Riffelungen sollen einen Öffnungswinkel $> 60^\circ$ aufweisen

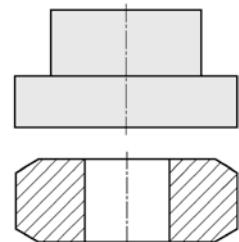
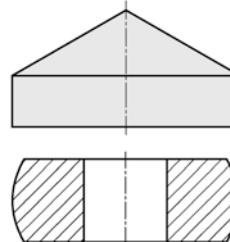
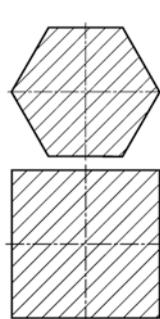
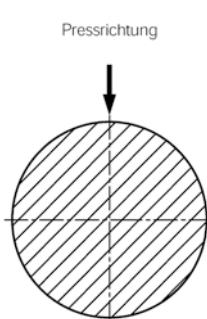


Abb. 2.167 Um bei waagerecht gepressten Sinterstäben eine in Pressrichtung gleichmäßige Dichte zu erhalten, sind runde Querschnitte ungünstig und durch Profile mit ebenen Flächen in Pressrichtung zu ersetzen

Abb. 2.170 Kegel- und Kugelformen ergeben kontinuierliche Übergänge, die schwer herzustellen sind. Sie sind besser durch zylindrische Formen oder Fasen zu ersetzen

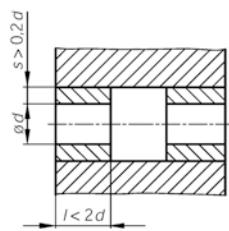
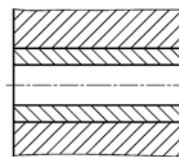
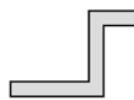
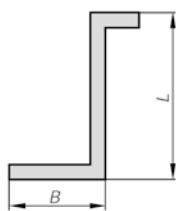


Abb. 2.171 Hohe, dünnwandige Pressteile – d. h. Werkstücke mit extremen Querschnittsverhältnissen ($L/B \gg 1$) sind schwer herstellbar. Günstigere Querschnittsverhältnisse sind anzustreben

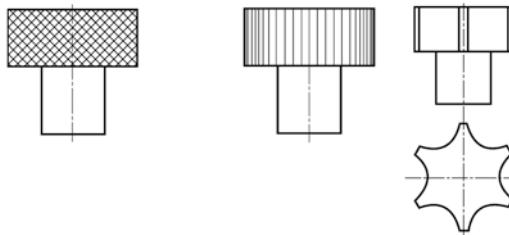


Abb. 2.172 Bei Drehknöpfen und ähnlichen Bedienelementen sind einfache Außenkonturen anzustreben und Kreuzrändelungen zu vermeiden. Längsriffelung ist einfacher herzustellen

Abb. 2.173 Selbstschmierende Lagerbuchsen sollen kurz sein ($l < 2d$). Bei großer Führungslänge sind zwei Buchsen vorzusehen. Die Wanddicke der Buchsen ist mit $s > 0,2d$ auszuführen, um einen genügenden Ölrrorat aufnehmen zu können und eine definierte Passung für die Lagerung zu erhalten

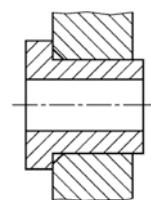
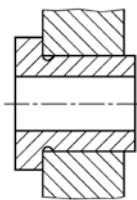


Abb. 2.174 Bei gesinterten Buchsen muss die Freimachung für den Anschlag im Aufnahmeteil liegen

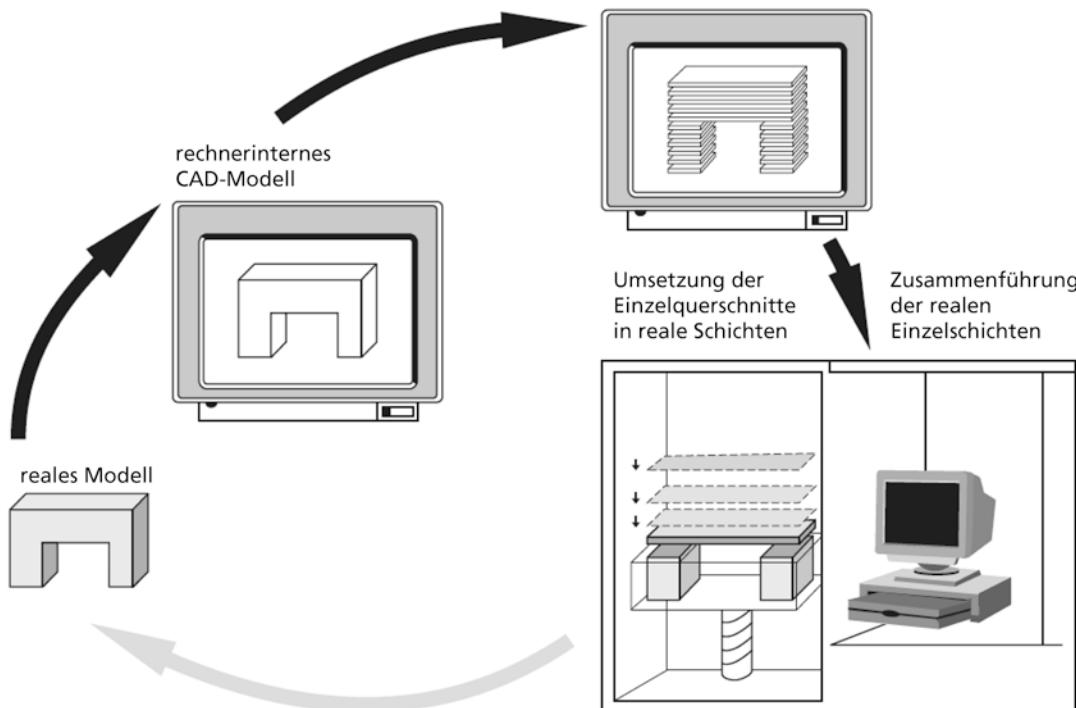


Abb. 2.175 Prinzip der Bauteilerzeugung bei additiven Fertigungsverfahren. (Nach Gebhardt)

2.11 Additive Fertigungsverfahren

Additive oder generative Fertigungsverfahren umfassen die Gruppe der Verfahren, die im Gegensatz zu klassischen spanenden (material-abtragend=substraktiv) Fertigungsverfahren wie Drehen oder Fräsen schichtweise eine fast beliebig gestaltbare Geometrie eines Bauteils oder eines Produkts aufbauen.

Ursprünglich hauptsächlich für die Fertigung von Design- und Funktions-Prototypen eingesetzt, erfahren additive Fertigungsverfahren heute eine weite Verbreitung und können klassische Fertigungsschritte substituieren. Sie finden Einsatz z. B. in der Luft- und Raumfahrtindustrie, in der Werkzeugfertigung, in der Zahntechnik und der Medizin, aber auch in der Architektur und der Archäologie. In der Öffentlichkeit sind diese Verfahren auch unter dem Begriff „Rapid Prototyping“ oder 3D-Druck bekannt geworden. Nach einer Begeisterungswelle zu Beginn des letzten Jahrzehnts sind die Erwartungen inzwischen realistischer, die Maschinen haben einen Reifegrad, der sie industriell einsetzbar macht und die Vielfalt der einsetzbaren Werkstoffe hat stark zugenommen. In Deutschland haben diese Verfahren auch Einzug in den Mittelstand gefunden.

Es werden zudem immer neue Verfahren und entsprechende Maschinen entwickelt, die zum Teil auch zur Umgehung von Schutzrechten eine Vielzahl von Bezeichnungen erhalten, was die Klassifizierung erschwert. Dazu kommen entsprechende neue Werkstoffe und Werkstoffkombinationen, die für die additive Fertigung entwickelt werden und neue Einsatzgebiete ermöglichen.

Aktuelle Trends bei den additiven Fertigungsverfahren sind:

- Multimateriallösungen (Kunststoff-Kunststoff, Kunststoff-Metall, Metall-Metall, Keramik-Metall), die eine weitergehende Funktionsintegration, eine schnellere Produktion und geringere Kosten sowie neue Anwendungen ermöglichen.

- Wesentliche Steigerung der Fertigungs geschwindigkeiten bei Additive Manufacturing.
- Kontinuierliche Prozessüberwachung und Qualitätssicherung der AM-Produkte.
- Die Auswahl von AM-gerechten Bauteilen sowie die AM-gerechte Konstruktion können zunehmend durch Software-Tools unterstützt werden.
- Die Ausbildung von AM-Experten wird strukturiert.
- Noch nicht zufriedenstellend gelöst sind die durchgängige Automatisierung der AM-Fertigung sowie ihre Integration in die gesamte Prozesskette.
- Rechtliche Aspekte (Haftung, geistiges Eigentum) werden diskutiert.
- Arbeitsschutz- und ökologische Aspekte geraten zunehmend in den Fokus.

Erstanwendern sei empfohlen, sich z. B. über das Fraunhofer Kompetenzfeld Additive Fertigung (www.additiv.fraunhofer.de) oder über den Verein Deutscher Ingenieure (www.vdi.de) in den jeweils angebotenen Veranstaltungen zu informieren. Eine weitere Möglichkeit ist die Kontaktaufnahme zu Hochschulen in der Region, die inzwischen über Expertise zu additiven Fertigungsverfahren verfügen und beim Einstieg in die Thematik behilflich sein können. Zudem sind im Internet eine Vielzahl von Videos zur Erläuterung der unterschiedlichen Verfahren, Werkstoffe und Möglichkeiten der AM zu finden. Das Überangebot macht die Auswahl der geeigneten Videos allerdings schwierig; oft finden sich auf den Webseiten der bekannten Anbieter Einstiegsvideos. Der Kontakt zu den kommerziellen Dienstleistungsanbietern sowie den Maschinenherstellern sollte dann der nächste Schritt sein.

Es ist empfehlenswert, das entsprechende Know How im eigenen Unternehmen aufzubauen und Fertigungs- sowie Konstruktions spezialist:innen durch den Besuch von entsprechenden Qualifizierungsmaßnahmen weiterzubilden. So kann das Potenzial der additiven

Verfahren im Unternehmen besser erkannt und dann auch realisiert werden.

Je nach Anwendungszweck der erzeugten Produkte kann unterschieden werden in

- Rapid Prototyping (Herstellung von Konzept- oder Design-, Geometrie- und Funktionsmodellen, die insbesondere hinsichtlich des Materials und der Oberflächenqualität nicht einem Endprodukt entsprechen),
- Rapid Tooling (Herstellung von Vorrichtungen, Werkzeugen und Formen),
- Rapid Manufacturing (Herstellung von einzelnen kundenspezifischen Endprodukten in Einzel- oder Kleinstserien),
- Additive Manufacturing (Herstellung von Serienprodukten).

Dazu kommen Anwendungen u. a. in der Kunst, im Hobby-Bereich sowie in Bildung und Ausbildung schon vom jüngsten Alter an.

Für alle Verfahren ist ein vollständiges 3D-CAD-Modell absolute Voraussetzung (Abb. 2.176). Dieses rechnerinterne Modell entsteht entweder im Entwurfsprozess oder durch Laserscannen eines realen Bauteils und an-

schließende Aufarbeitung der Daten. Die Geometriedaten des 3D-CAD-Modells werden üblicherweise in einem geeigneten Datei-Format an den Prozess übergeben. Diese 3D-Dateien enthalten die Geometriedaten, können aber auch die Farben, das Material sowie Texturen etc. enthalten. Beispiele für diese Datei-Formate sind STL, 3MF, AMF und OBJ. STL ist das älteste und bekannteste Datei-Format.

Im STL-Format (Standard Transformation Language) werden die Flächen des Modells als Dreieck-Facetten approximiert. Je feiner die Facettenierung erfolgt, desto genauer wird das Bau teil im Prozess abgebildet, allerdings erhöhen sich die Datenmenge und damit die erforderliche Rechenleistung.

Fast alle Anbieter von CAD-Systemen und Maschinenhersteller bieten Schnittstellen für das STL-Format an. Trotz aller Beschränkungen ist das STL-Format ein Quasi-Standard geworden. Modelle im STL-Format lassen sich mit sogenannten STL-Viewern im Rechner überprüfen und für die Zwecke der generativen Fertigung analysieren, ohne dass die eigentlichen Produktdaten außer Haus gegeben werden müssen. Dies wird als ein großer Vorteil des STL-

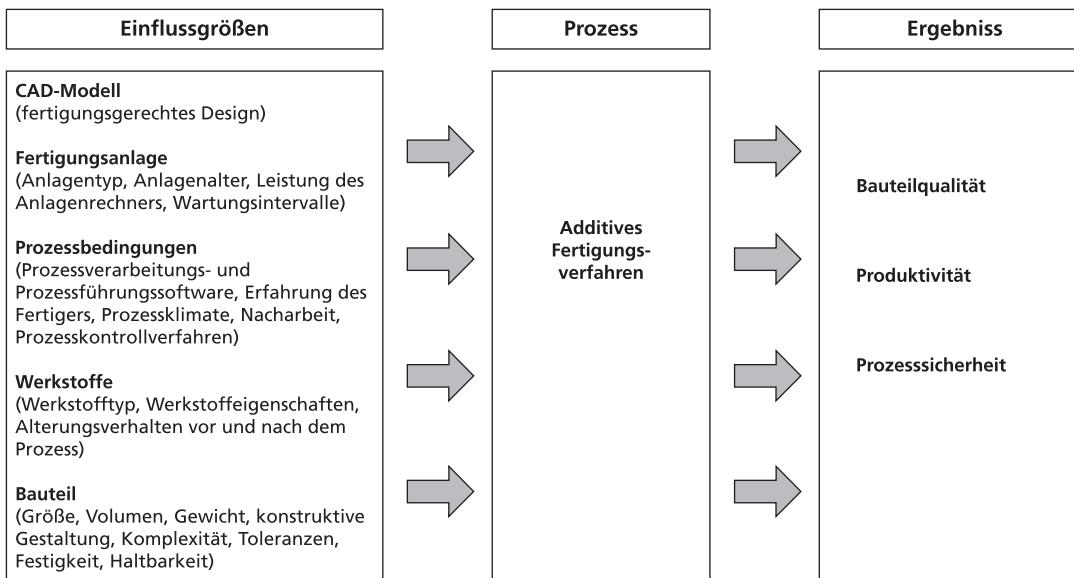


Abb. 2.176 Einfluss- und Zielgrößendarstellung (VDI 3405)

Formats angesehen, wenn die eigentliche Fertigung bei einem externen Dienstleister geschieht. Aufgrund der einfach beschriebenen Geometrie können Modelle im STL-Format in jedem Maßstab hergestellt (skaliert) werden. Allerdings ist es im STL-Format nicht möglich, Farben, Werkstoffe und Texturen darzustellen. Auch ist die Überprüfung des Modells, z. B. auf Geschlossenheit der Strukturen, kaum möglich.

Das OBJ-Format eignet sich insbesondere für mehrfarbige Produkte und Bauteile mit hohen Genauigkeitsanforderungen. Die Werkstoff-eigenschaften werden in einer MTL-Datei abgelegt, die referenziert werden muss. Das OBJ-Format wird von weniger Maschinenanbietern unterstützt als das STL-Format, ist aber sehr verbreitet.

Das AMF-Format (Additive Manufacturing File) ist mit dem Ziel entwickelt worden, das STL-Format mit seinen Schwächen zu ersetzen. Es ist XML-basiert und erlaubt die Speicherung von Farben, Werkstoffen, Texturen, etc. und ist schneller in der Verarbeitung. AMF wurde 2013 als ISO Standard definiert, wahrscheinlich zu früh. 2020 ist eine Überarbeitung als ISO Standard erschienen: ISO/ASTM 52915:2020. In diesem Format sind nun z. B. auch sicherheits-relevante Daten zum Prozess zu speichern. Noch ist nicht abzusehen, ob das AMF-Format wirklich STL ablösen wird.

2015 hat ein Konsortium führender Akteure der additiven Fertigung, angeführt von Microsoft, mit der Entwicklung des 3MF-Formats (3D Manufacturing File) begonnen, das ebenfalls XML-basiert ist und im Prinzip die gleichen Vorteile wie AMF aufweist. Wie bei AMF ist noch nicht abzusehen, ob sich 3MF als STL 2.0 durchsetzen wird.

Basierend auf den nun in diesen oder anderen, weniger verbreiteten Formaten vorliegenden Modell-Daten müssen verfahrens- und maschinenspezifische Entscheidungen getroffen und Ergänzungen vorgenommen werden. Entscheidungen betreffen z. B. die „Aufbau-richtung“, da nur in der x-y-Ebene eine genaue Konturengebung erfolgen kann. In der z-Richtung verbleibt jedoch ein Stufeneffekt durch die Schichtung. Weitere Entscheidungen be-

treffen die erforderliche Schichtdicke, die für die Genauigkeit des Bauteils und die Gesamtdauer des Prozesses bestimmt ist. Ergänzungen be treffen die Stützstrukturen, die für einige der Verfahren erforderlich sind. Deren Generie rung erfolgt (halb-)automatisch. Zudem kön nen mit Software-Unterstützung massive Wandstrukturen gegebenenfalls durch Waben-Strukturen ersetzt werden, sodass Aufbau-Zeit, Materialeinsatz und Gewicht verringert werden können, ohne die Stabilität einzubüßen.

Danach werden die Informationen mit einem i. Allg. herstellerspezifischen Slice-Programm weiterverarbeitet, d. h. es werden die Daten für die Konturen der einzelnen Schichten erzeugt. Im Anschluss erfolgen die Prozessvorbereitung und die maschinenspezifische Einstellung der Parameter und die eigentliche schichtweise Fertigung der Bauteile. Diese müssen im Anschluss gesäubert und verfahrensabhängig nachbe arbeitet werden.

Die Einfluss- und Zielgrößendarstellung für den Prozess (Abb. 2.177) zeigt die Vielfalt der Parameter, die zu beachten sind. Es muss be tont werden, dass additive Fertigungsverfahren oft durchaus schwerer zu beherrschen sind als die Anlagenhersteller suggerieren. Vielfach ist für ein optimales Prozessergebnis Erfahrungs wissen, eine umfangreiche Prozessüberwachung

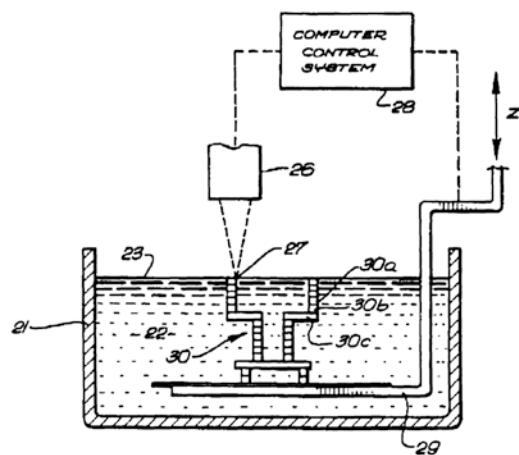


Abb. 2.177 Auszug aus US-Patent 4575330 von Charles Hull (1986): Prinzip Stereolithografie

sowie auch eine entsprechende Gestaltung der Bauteile erforderlich.

Die Wirtschaftlichkeit der Verfahren ist, ebenso wie die Ökobilanz im Vergleich zu den konventionellen Technologien, noch wenig erforscht. Aufgrund der z. T. hohen Energieeinbringung in den Prozess könnte es sein, dass sich eine verbesserte Nachhaltigkeit erst über den gesamten Lebenszyklus des Produkts darstellen lässt.

Bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit im Vergleich ist zum einen der Aspekt der Diskontinuität der Verfahren zu beachten; ein oder mehrere Produkte werden im Bauraum der Maschinen gefertigt und alle stehen erst nach Abschluss des gesamten Prozesses (Maschinenvorbereitung, Fertigung, Entfernung der Stützen, Postprocessing etc.) zur Verfügung. Fehler während der Bearbeitung können nur schwer erkannt und nicht korrigiert werden. Zum anderen hängt die weitere Bearbeitung der Bauteile (Oberflächenfinish etc.) nicht nur vom Prozess ab, sondern auch vom jeweils verwendeten Werkstoff und der Geometrie, sodass ein Wirtschaftlichkeitsvergleich schwierig ist.

Seit 2009 wurden die grundlegenden generativen Verfahren in der VDI-Richtlinie 3404 beschrieben, die Ende 2014 von der VDI Richtlinien-Reihe 3405 abgelöst wurde:

- Stereolithografie (SL),
- Laser-Sintern (LS) und Strahlschmelzen (LBM),
- Elektronen-Strahlschmelzen (EBM©),
- Fused Layer Modeling/Manufacturing (FLM) oder Fused Deposition Modeling (FDM),
- Multi-Jet Modeling (MJM) und PolyJet Modeling (PJM),
- 3D-Drucken (3DP),
- Layer Laminated Manufacturing (LLM) oder Laminated Object Manufacturing,
- Digital Light Processing (DLP),
- Thermotransfer-Sintern (TTS).

Die internationale DIN EN ISO/ASTM 52900 bedeutete im Jahr 2018 eine Verwirrung in den Begriffen; die VDI Richtlinie und die DIN Norm arbeiten mit unterschiedlichen Bezeichnungen

für die AM-Verfahren. Zudem gibt es auch die Verfahrensbezeichnungen durch die Hersteller, die zum Teil als Warenzeichen geschützt sind. Da die großen Anbieter inzwischen oftmals Maschinen für unterschiedliche AM-Verfahren anbieten, müssen sich Erst-Anwender sehr gründlich informieren, um geeignete Verfahren zu eruieren.

Als Hilfestellung werden die AM-Verfahren im Folgenden trotz der oft vorhandenen Ähnlichkeiten im Ablauf nach den Werkstoffen unterschieden und mit den gebräuchlichen, oft proprietären Bezeichnungen aufgeführt sowie den grundlegenden Verfahren zuzuordnen versucht (nach formnext):

Metallische Werkstücke

- Metall im Pulverbett: SLM (Selective Laser Melting) mit Laser-Energie [2.11.2]; EBM (Electron Beam Melting) mit der Energie des Elektronenstrahls; MBJ (Metal Binder Jetting) durch Aufbringen von Bindemittel
- Aufgeschmolzenes Metall (analog Auftragschweißen): LENS (Laser Engineering Net Shape) und MIG (Metal-Inertgas)-Schweißen
- Metallisches Filament durch Extrusion: FDM (Fused Deposition Modeling)
- Lösemittel mit Metallpartikeln: NPJ (Nano Particle Jetting)
- Pulverpartikel in einem Gasstrom aufbringen (Kaltgasspritzen)

Kunststoff-Werkstücke

- Kunststoff im Pulverbett: SLS (Selective Laser Sintering) mit Laser Energie [2.11.2]; MJF (Multi Jet Fusion) mit Infrarot-Wärmequelle und Bindern mit unterschiedlichen Eigenschaften
- Extrusion: FDM (Fused Deposition Modeling) mit Filament als Ausgangsmaterial; AKF (Arburg Kunststoff-Freiformen) mit Granulat als Ausgangsmaterial
- Aufbringen von Materialtropfen: MF (Material Jetting)
- Photopolymerisation: SLA (Stereo Lithography) Aushärtung durch Laser-Energie, DLP (Direct Light Processing) Aushärtung durch Lichtenergie

Werkstücke aus sonstigen Materialien

- Extrusionsverfahren: CFF (Continuous Filament Fabrication) Verstärkungsfasern mit Filament; PEM (Paste Extrusion Modeling) mit beliebigen pastösen Material
- Bindemitteltropfen: BJ (Binder Jetting) für Keramik, Sand oder Gips z. B. für den Formenbau
- Wachstropfen: DOD (Drop on Demand)
- Laminiertes Blattmaterial: SDL/LOM (Selective Deposition Lamination/Laminated Object Manufacturing)

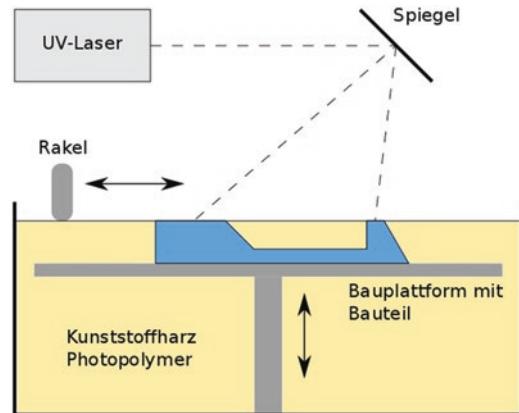


Abb. 2.178 Stereolithografie – Funktionsprinzip (www.netzkonstrukteur)

Die Stereolithografie ist das älteste generative Fertigungsverfahren, es wurde 1987 von Charles Hull mit dem von ihm gegründeten Unternehmen 3D Systems in den Markt eingeführt (Abb. 2.177).

In einem Behälter mit flüssigem photoaktiven Kunststoff werden durch gezieltes Einwirken von ultraviolettem Laserlicht beliebig geformte Werkstücke schichtweise aufgebaut. Der UV-Laser wird durch eine Optik gebündelt und über die Scannerspiegel auf die Arbeitsfläche (Flüssigkeitsoberfläche) des Behälters mit dem flüssigen Kunststoff gelenkt (Abb. 2.178). Dort wird eine dünne Schicht vernetzt, d. h. durch den Laser-Strahl gehärtet. Anschließend wird das Werkstück mit der Plattform durch die Hubeinrichtung um eine Schichtdicke abgesenkt, danach kann die nächste Schicht, die durch Überlappung mit der vorherigen verbunden ist, vernetzt werden. Nach Fertigstellung des letzten Querschnitts fährt die Trägerplattform zusammen mit dem gefertigten Modell aus der Flüssigkeit heraus in die obere Endstellung. Der überflüssige Kunststoff tropft ab und das Werkstück kann zusammen mit der Plattform entnommen werden. Dieses Verfahren wird zunehmend auch „Über-Kopf“ durchgeführt, d. h. das Bauteil wird von unten belichtet und wächst dementsprechend nach unten in den Behälter.

Die durch Polymerisation vernetzten Bauteile werden anschließend mittels UV-Licht

ausgehärtet. Je nach Kontur der Bauteile müssen Stützstrukturen vorgesehen werden, die nach dem Prozess manuell entfernt werden (Abb. 2.179 und 2.180).

Die Stereolithographie zeichnet sich dadurch aus, dass sehr feine Strukturen (dünne Wandstärken) bei guten Oberflächen erzielt werden können (Abb. 2.181).

In einem sehr speziellen Stereolithographieverfahren (3M) ist es auch möglich, PTFE-(Teflon-)Bauteile zu produzieren, die insbesondere in der pharmazeutischen und biotechnologischen Industrie und Forschung Verwendung finden können. PTFE konnte aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften als Werkstoff für die additive Fertigung bisher nicht eingesetzt werden.



Abb. 2.179 SL-Bauteile mit Stützstrukturen (3dhubs)



Abb. 2.180 Beseitigung der Stützstrukturen am SL-Turbinenschaufel-Prototyp (3dhubs)



Abb. 2.181 SL-Bauteile (Stecker, Autoleuchte, originalgroßer Prototyp eines Armaturenbretts; 3dsystems)

2.11.2 Laser-Sintern und Strahlschmelzen

Das Lasersintern ist kein klassischer Sinterprozess in dem Sinn, dass Pulverteilchen unter hoher Temperatur bei hohem Druck über längere Zeit ineinander diffundieren. Vielmehr werden beim Lasersintern Pulverpartikel aufgeschmolzen und zu einer Schicht verbunden.

Verwendet werden Kunststoff-Pulver und Metall-Pulver, zunehmend auch Keramikwerkstoffe. Als Strahlquelle dient ein Laser bzw. ein Elektronenstrahl.

Das Verfahrensprinzip ist in Abb. 2.182 dargestellt. Der Arbeitsraum der Maschine wird vor Beginn des Prozesses unter Stickstoff (Kunststoff), Schutzgas (Metall) oder Vakuum (Metall, Strahlschmelzen) aufgeheizt. Neben der eigent-

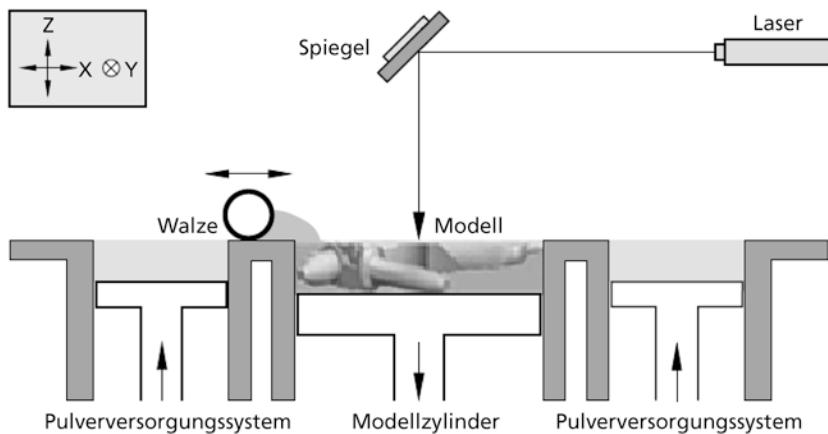


Abb. 2.182 Laser-Sintern – Funktionsprinzip

lichen Arbeitsplattform sind ein oder zwei Vorratsbehälter mit Pulver angeordnet. Nach dem Aufheizen wird z. B. durch eine Walze aus dem Vorratsbehälter eine Schichtdicke des Materials auf der Arbeitsplattform aufgebracht. Der Laserstrahl schmilzt entsprechend der vorgegebenen Kontur das Pulver auf. Wenn die Kontur in dieser Schicht aufgeschmolzen ist, wird die Arbeitsplattform gemäß der Schichtdicke abgesenkt und die nächste Schicht Pulver wird aufgetragen.

Kunststoff-Bauteile können mit diesem Verfahren ohne Stützstrukturen hergestellt werden, da das nicht aufgeschmolzene Pulver stützt. Metallische Bauteile benötigen i.a. Strukturen, die die entstehende Wärme zur Vermeidung von Bauteilverzug direkt in die Arbeitsplattform abführen.

Nach Abschluss des Aufbaus des Bauteils wird die Maschine kontrolliert und langsam abgekühlt. Das Bauteil wird aus dem Pulverbett entnommen (Abb. 2.183 und 2.184).

Außer der eigentlichen Maschine gehören noch weitere Komponenten zu einer Lasersinter- oder Strahlschmelzanlage: Pulveraufbereitungsstation, Reinigungsstation, Aufbewahrung für die Pulver-Werkstoffe.

Die mit diesem Verfahren erzeugten metallischen Bauteile zeigen ein ähnliches Festigkeitsverhalten wie die entsprechenden Schmiedeteile.

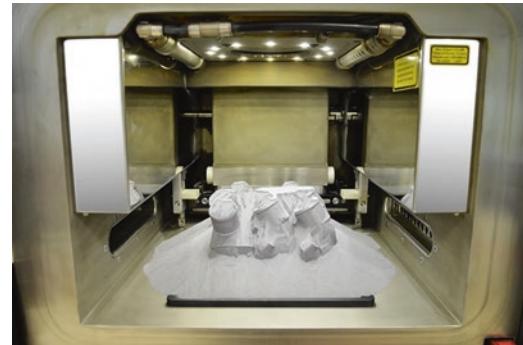


Abb. 2.183 Bauraum des Laserdruckers, in dem eine metallische Thermostatabdeckung durch selektives Laserschmelzen (SLM) entstanden ist (Daimler AG)



Abb. 2.184 Qualitätsgeprüfte komplexe metallische Ersatz- und Sonderbauteile (Daimler AG)

Das Laser-Sintern und Strahlschmelzen von Metallen hat großes Wachstumspotenzial, immer mehr metallische Werkstoffe werden von den Maschinenherstellern und Anwendern qualifiziert. Insbesondere in der Luft- und Raumfahrtindustrie (Abb. 2.185), in der Automobilindustrie, für den Werkzeugbau und in der Dental-Industrie (Abb. 2.186) wird dieses Verfahren zunehmend eingesetzt.

Um das Laser-Sintern und Strahlschmelzen von Metallen einzusetzen, müssen neben den Anlagen auch die vorbereitenden und die nachfolgenden Prozesse stärker standardisiert und qualitätsgesichert werden. Zur Vorbereitung gehören die Pulverprüfung (Verteilung, Form, Fließfähigkeit des Korns, Reinheit des Werkstoffes, Restfeuchtigkeit) und die Validierung der CAD-Daten. In den Anlagen müssen die Prozesse sicher und robust ablaufen, wozu eine verbesserte Prozessüberwachung erforderlich ist. Für die Nachbereitung der Bauteile ist eine Werkstoffprüfung vorzusehen (Abb. 2.187). Daneben müssen die Oberflächen oft noch nachgearbeitet werden, gerade bei Funktions-



Abb. 2.185 Serienproduktion von Hubschrauber-Teilen (MetalFAB1, tctmagazine.com)

flächen. Dies ist für die komplexen herstellbaren Außen- und Innenkonturen ein oft schwieriges fertigungstechnisches Problem.



Abb. 2.186 Zahnprothetik (www.bego-medical.de)



Abb. 2.187 Mit dem Laser-Sintern hergestellte Zugstäbe zur Qualifizierung von metallischen Pulvern (FhG-IPK)

Das Elektronenstrahlschmelzen (EBM – Electron Beam Melting) wird insbesondere für die Luftfahrtindustrie und für orthopädische Implantate (Abb. 2.188) eingesetzt. Die eher rauhe Oberfläche dieser Teile ist in der Orthopädie

oft vorteilhaft, da es das „Einwachsen“ der Implantate erleichtern kann.

2.11.3 Fused Layer Modeling/ Manufacturing oder Fused Deposition Modeling

Seitdem das grundlegende Patent für dieses Verfahren 2009 ausgelaufen ist, hat sich FDM oder FLM enorm verbreitet, sowohl in der industriellen Fertigung als auch im Hobby-Bereich und in Schulen, Hochschulen und in vielen Anwendungen außerhalb der industriellen Fertigung.

Bei diesem Verfahren ist das thermoplastische Ausgangsmaterial strang- oder fadenförmig (Filament) und wird auf Rollen angeliefert. Dieses Material wird in einer beheizten Düse aufgeschmolzen und aus dem aufgeschmolzenen und dann ausgehärteten Material wird das Bauteil aufgebaut (Abb. 2.189). Zusätzlich können über eine zweite Düse, so weit erforderlich, Stützstrukturen aus einem an-

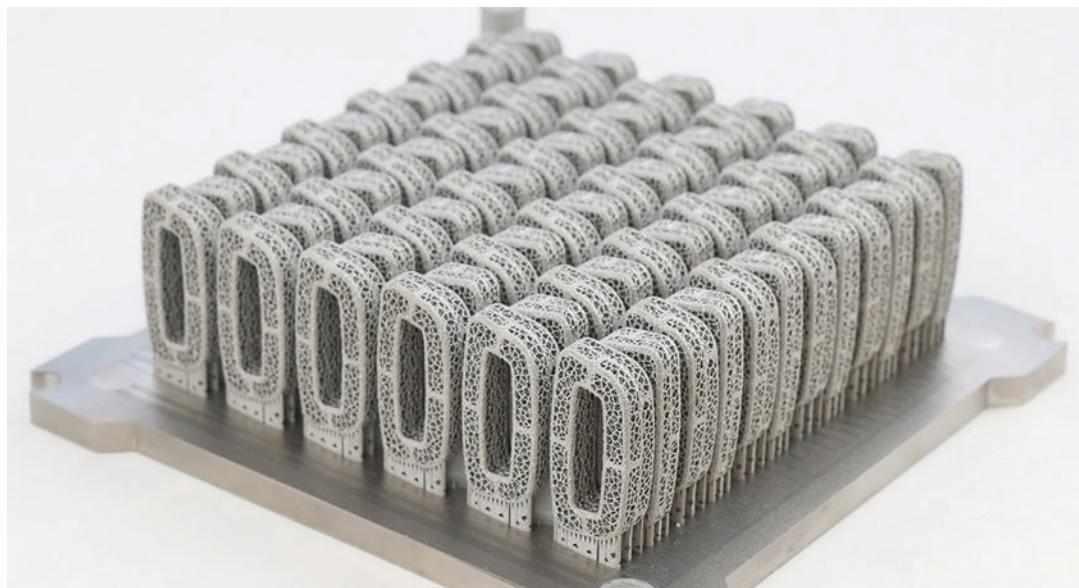


Abb. 2.188 Patientenspezifische orthopädische Implantate, hergestellt im EBM-Verfahren (GE Additive)

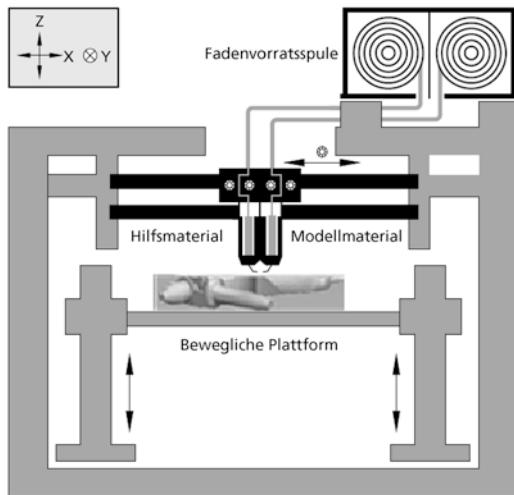


Abb. 2.189 Fused Layer Modeling/Manufacturing oder Fused Deposition Modeling – Funktionsprinzip

deren, wasserlöslichen Material aufgebaut und nach dem Prozess in Wasser oder in einer wässrigen Lösung entfernt werden. Ebenso möglich ist die Kombination von unterschiedlichen Materialien oder Farben in einem Bauteil. Der Bauraum ist beim FDM-Verfahren nicht durch die

Fokussierbarkeit eines Lasers beschränkt, sodass es eine große Vielfalt von Maschinen für unterschiedliche Produktgrößen gibt. Zudem werden immer mehr Materialien für diese Maschinen angeboten, sodass es möglich ist, unterschiedliche Produkteigenschaften zu generieren und so die Anwendungsmöglichkeiten des FDM-Verfahrens zu erweitern. Anwendungsbeispiele sind in Abb. 2.190, 2.191 und 2.192 gegeben.

FDM war ursprünglich nur möglich mit Kunststoffen. Als FDM-Verfahren bezeichnet werden können jedoch auch die Prozesse der Firmen Markforged und Desktop Metal, die in Filament bzw. Stabform eingebettete metallische Werkstoffe in Pulverform einsetzen. Die Umhüllung wird in einem zweiten Schritt aus dem Bauteil „gewaschen“. Das entstehende „Braunteil“ wird in einem weiteren Prozess-Schritt gesintert und es entsteht ein metallisches Bauteil. Die Software der Hersteller kalkuliert dabei auch die entstehende Schrumpfung mit ein.

FDM-Verfahren mit eingebetteten Glasfaser- oder Carbon-Fasern sind ebenfalls verfügbar. Die so entstehenden Bauteile können gezielt in ihrer Festigkeit gestaltet werden.



Abb. 2.190 Montage von FDM-gefertigten Kupplungsschürzen an Ulmer Straßenbahnen (Siemens Mobility, Stratasys)



Abb. 2.191 FDM-gefertigte Vorrichtung zum direkten Einsatz (stratasys.com)



Abb. 2.192 Greifer in der Lebensmittelindustrie (Schubert, Ultimaker)

Neben den industriell eingesetzten Anlagen gehört das Open-Source Projekt RepRap (**r**e**p****l****i**c**t****i**c**r** **p**rototyp**e**r; reprap.org) zu dieser Verfahrensgruppe. RepRap ist in den letzten Jahren überraschend populär geworden; mithilfe von kompletten Anleitungen aus dem

Internet (Abb. 2.193 und 2.194) oder kommerziell erhältlichen Baukästen können sich Interessierte eine Maschine zur Herstellung von individuellen Produkten „basteln“ (ab ca. 500 €). Die RepRap-Bewegung ist Teil der Maker-Kultur, die sich u. a. rund um FabLabs gestaltet und



Abb. 2.193 RepRap Prusa i3 von Josef Prusa (GPL; Prusajr)

deren Ziel es ist, mit einfachen Mitteln technische Probleme zu lösen.

Es gibt inzwischen mehrere hundert kommerzielle Anbieter kleiner Maschinen nach diesem Verfahrensprinzip (Abb. 2.195); in Deutschland werden 3D-Drucker schon ab wenigen hundert Euro bei Versandhändlern angeboten.

Nach einem vergleichbaren Prinzip (lagenweiser Auftrag von flüssigem Material, das sich nach dem Auftragen aushärtet) arbeiten Food-

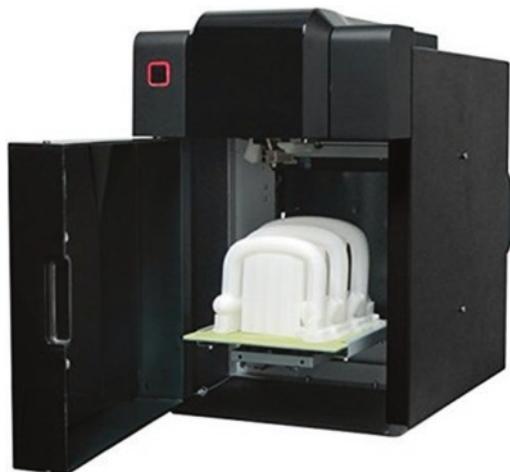


Abb. 2.195 Kleine FDM-Maschine PP3DP UP Mini 3D-Drucker (3dmensionals.de)



Abb. 2.194 RepRap Delta-Typ K200 (GPL, HE3D)



Abb. 2.196 Schokoladen-Dekoration (3dbyflow.com)



Abb. 2.197 Lebensmittel-Drucker (3dbyflow.com)

Printer (Abb. 2.196, Abb. 2.197). Ebenfalls nach diesem Prinzip arbeiten die ersten Entwicklungen, um Häuser vor Ort zu drucken, z. B. Apis Cor (Abb. 2.198, Abb. 2.199).

Dieser Verfahrensgruppe kann auch das AKF-Verfahren (Arburg Kunststoff-Freiformen) zugerechnet werden, das mit verfügbaren Granulaten arbeitet und die Produkte tropfenweise aufbaut, sodass die Dichte und die Schichtdicke im Prozess variiert werden können und Materialkombinationen möglich sind (Abb. 2.200).

2.11.4 Multi-Jet Modeling und PolyJet Modeling

Die beiden Verfahren werden herstellerabhängig unterschiedlich bezeichnet, sind vom Verfahrensprinzip aber vergleichbar. Beim Multi-Jet Modeling (auch Multi-Jet Printing) und PolyJet Modeling (auch PolyJet-3D-Druck) wird ein granulierte thermoplastisches Material oder Wachs aufgeschmolzen und über beheizte, linienförmig angebrachte Düsen in einem Druckkopf auf die vertikal bewegte Arbeitsplattform aufgebracht. Stützmaterial kann über separate Düsen eingebracht werden. Das Material wird ggfs. durch UV-Licht unmittelbar nach dem Auftragen ausgehärtet (Abb. 2.201).

Bei diesen Verfahren kann der Druckkopf mit den Düsen die gesamte Breite des Bauraums abdecken, sodass der Prozess relativ schnell abläuft. Da mit diesem Verfahren sehr feine Strukturen erzeugt werden können, wird es auch in der Schmuckherstellung eingesetzt (Wachsaußenschmelzverfahren/Feingießen, Abb. 2.202).

Es gibt für diese Verfahrensgruppe unterschiedliche Werkstoffe, u. a. auch gummiartige (Abb. 2.203 und 2.204).



Abb. 2.198 Roboter zum Drucken von Häusern (apis cor)



Abb. 2.199 Baustelle mit im Druck befindlichen Haus (apis cor)



Abb. 2.200 Funktionsbauteil mit Dichtlippe (AKF)

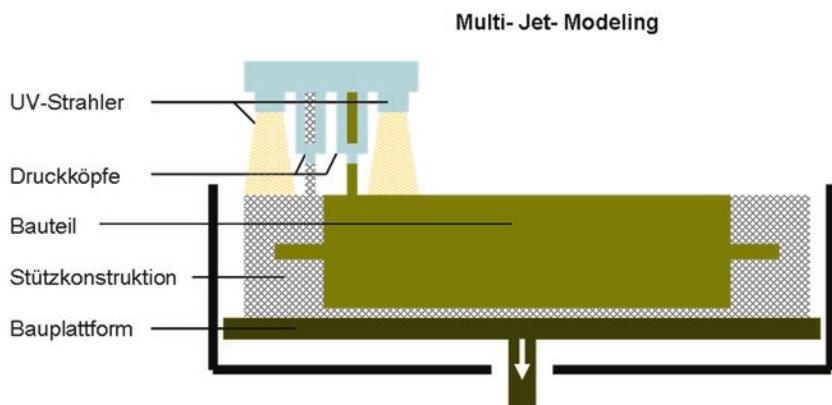


Abb. 2.201 Multi-Jet Modelling (medfab.de)



Abb. 2.202 Schmuckstücke, hergestellt mit Wachsaußschmelzverfahren auf der Basis von MJM-Modellen (Sculpteo)



Abb. 2.203 Pumpen-Teil (stratasys.com)



Abb. 2.204 Materialkombination ABS und gummiartig für Prototyp (stratasys.com)

2.11.5 3D-Drucken

Obwohl zunehmend alle additiven Fertigungsverfahren unter dem Oberbegriff 3D-Drucken zusammengefasst werden, ist dieses Verfahren mit seinen Spezifika als eigenes Verfahren in der VDI 3405 festgelegt.

Das 3D-Drucken arbeitet mit pulverförmigem Ausgangsmaterial, welches durch punktförmiges Einbringen von Bindemitteln über einen Druckkopf selektiv verklebt wird oder im Fall von Polymer als Ausgangsmaterial copolymerisiert wird (Abb. 2.205). Das Bindemittel kann auch eingefärbt sein; in diesem Fall entspricht das Verfahren dem farbigen Tintenstrahldrucken. Das Bauteil muss i. A. zur Erhöhung der mechanischen Belastbarkeit nachbehandelt werden.

Industriell eingesetzt werden 3D-Printer, die auch mit sehr großen Bauräumen (bis $4000 \times 2000 \times 1000$ mm, Voxeljet) erhältlich sind, insbesondere für die Erstellung von Sand- und Kunststoffgussformen und Schalungselementen für den Betonbau (Abb. 2.206).

Das 3D-Drucken eignet sich gut für den Einsatz unter Office-Bedingungen und durch die leichtmögliche Einfärbung der Bauteile für die Lehre (Erstellen von Anschauungsmodellen, Abb. 2.207) und in der Architektur (Abb. 2.208).

Hewlett Packard (HP) hat 2016 seine additive Technologie vorgestellt, die von HP als Multi

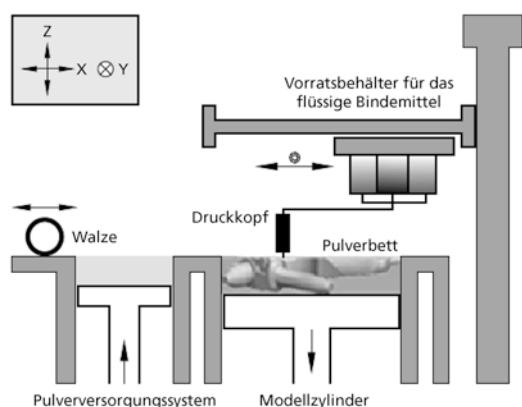


Abb. 2.205 3D-Drucken – Funktionsprinzip



Abb. 2.206 Formhälfte einer Gussform für einen Zylinderkopf (Voxeljet)



Abb. 2.207 Anschauungsmodell (www.zprinter.de)



Abb. 2.208 Architektur-Modell (www.zprinter.de)



Abb. 2.209 Funktionsbeispiel Multi Jet Fusion (Hewlett Packard)

Jet Fusion bezeichnet wird. Bei diesem Verfahren wird mittels eines „Tintenstrahl“-Druckkopfes und zwei speziellen Binderflüssigkeiten (Agents) in das Pulverbett gedruckt. Die beiden Binderflüssigkeiten verfügen über unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten. Die wärmeleitfähige Flüssigkeit bindet dabei das eigentliche Objekt, während die andere Flüssigkeit als thermischer Hemmer fungiert und an den Rändern des Objekts aufgetragen wird. Infrarot-Energiequellen über dem Druckbett verschmelzen die jeweilige Schicht. Der Einsatz der zweiten wärmehemmenden Flüssigkeit sorgt für scharfe Kanten und eine gute Oberflächenqualität. HP bietet diese Technologie in Produktionssystemen an, die die Produktivität bei kontinuierlicher additiver Fertigung wesentlich erhöhen können (Abb. 2.209).

2.11.6 Layer Laminated Manufacturing

Laminierverfahren benutzen laminierte Papier- oder Kunststofffolien mit thermisch aktivierbaren adhäsiven Oberflächen, die auf die vorangegangene Schicht mithilfe von heißen Walzen geklebt werden (Abb. 2.210). Laser, Messer oder Wasserstrahl schneiden die Konturen aus und schneiden auch das verbleibende Material so ein, dass es während oder nach dem Prozess leicht zu entfernen ist. Möglich sind auch sog. Green Tapes mit gebundenem Pulver (z. B. Ke-

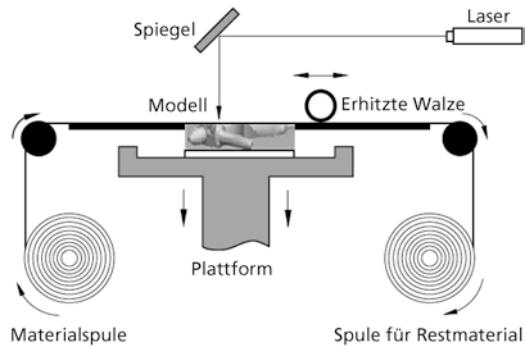


Abb. 2.210 Layer Laminated Manufacturing – Funktionsprinzip

ramik); das Bauteil muss anschließend an den Prozess gesintert werden.

Laminierverfahren sind i. a. günstig hinsichtlich des Materials und können ohne weitere Arbeitsschutzmaßnahmen überall durchgeführt werden. Die Bauteile aus Papier-Material können nach dem Prozess wie Holz weiterbearbeitet werden.

Zu den LLM-Verfahren gehört auch das Verfahren des irischen Unternehmens Mcor, das mit normalem Druckerpapier arbeitet und die Modelle während des Aufbaus auch farbig gestaltet. In diesem Fall werden die Papierblätter jeweils geklebt und entsprechend geschnitten. Das Verfahren zeichnet sich durch Preiswürdigkeit, Einsetzbarkeit im Büro sowie durch eine relativ hohe Genauigkeit der Modelle aus (Abb. 2.211).

Die Mcor-Technologie wird vom Unternehmen cleangreen3d weitergeführt.

2.11.7 Digital Light Processing

Dieses Verfahren entspricht der Stereolithographie; es wird anstelle eines UV-Lasers eine Dunkelkammerleuchte (Projektor) verwendet. Dieses Verfahren nutzt die DLP-Technologie (Digital Light Projector) von Texas Instruments, deren Kernstück ein Chip aus bis zu 2 Mio. schwenkbar angeordneter, mikroskopisch kleiner Spiegel ist. Die Lichtquelle projiziert über die Spiegel das Licht an die Stellen, an denen



Abb. 2.211 Anwendungsbeispiele (Mcor)



Abb. 2.212 Produktbeispiele (Moonray)

das Material (Photopolymer-Flüssigharze) ausgehärtet werden soll. Auf diese Weise wird pro Schritt jeweils die ganze Kontur belichtet.

Ähnlich wie SL wird DLP oft dazu eingesetzt, um sehr detaillierte Kunstwerke oder nicht-funktionelle Prototypen zu erstellen sowie für die Herstellung von Formen für Feingussanwendungen (Abb. 2.212).

2.11.8 Thermotransfer-Sintern (TTS)

Dieses Verfahren entspricht dem Laser-Sintern mit dem Unterschied, dass die Energie nicht

über einen Laser, sondern durch einen beheizten Druckkopf eingebracht wird (Druck- und Wärmeenergie). Aktuell scheint diese Technologie nicht mehr auf dem Markt angeboten zu werden.

2.11.9 Digital Light Synthesis (DLS)

DLS (ehemals Continuous Liquid Interface Production oder Printing – CLIP) ist ein additives Verfahren, das noch keinen Eingang in die Struktur der VDI 3405 gefunden hat. Es handelt sich um einen photochemischen Prozess, der zwischen Licht und Sauerstoff balanciert, um schnell Objekte zu produzieren. Er funktioniert, indem Licht durch ein sauerstoffdurchlässiges Fenster in einen Behälter mit UV-härtbarem Harz projiziert wird. Durch die Folge der projizierten UV-Bilder härtet das Photopolymer aus und die Bauplattform zieht das Objekt nach oben.

DLS-Teile zeichnen sich im Anschluss an die erforderliche Nachbearbeitung durch glatte Oberflächen ohne die für additive Verfahren übliche Stufenstruktur aus und haben gute mechanische Eigenschaften (Abb. 2.213).



Abb. 2.213 Maßgefertigte Schuhsohlen nach dem DLS-Verfahren (adidas.com/futurecraft, Carbon)

2.11.10 Entwicklungen

Neue Materialien

Die Mehrzahl der Materialien, die heute (noch) mit additiven Fertigungsverfahren eingesetzt werden, wurde für konventionelle Fertigungsverfahren entwickelt, sodass es durch die Prozessrandbedingungen der additiven Fertigung zu unerwünschten Effekten (Anisotropie, hohe Eigenspannungen) kommen kann. Mit den additiven Fertigungsverfahren ist es aber möglich, gewünschte Werkstoffeigenschaften gezielt einzustellen sowie neuartige Werkstoffe herzustellen. Gearbeitet wird dabei zurzeit u. a. an der Entwicklung metallischer Gläser, verschleißfester Werkstoffe, Metallmatrix-Kompositmaterialien, durch Nanopartikel modifizierte Pulverwerkstoffe.

Softwaretools

Durch die Entwicklung von neuen Softwaretools gibt es inzwischen an vielen Stellen der Prozesskette umfangreiche Unterstützung. Beispiele dafür sind:

- Lösungen für die Aufbereitung von 3D-Scans,
- Simulationssoftware (Verzugskompensation, Eigenspannungsanalyse)
- Identifikation von Bauteilen mit Potenzial für die additive Fertigung

- Software für die Autonome Konstruktion und das Generative Design, um Produkte optimal für die additive Fertigung zu gestalten,
- Prozess- und Qualitätsoptimierungssoftware
- Software-Werkzeuge zur Vorbereitung des Fertigungsprozesses
- Software-Werkzeuge für das Postprocessing
- Berechnung von Schwing- und Ermüdungsfestigkeit bei kleinen Losgrößen.

Arbeitssicherheit

Die additiven Verfahren sind hinsichtlich der Arbeitssicherheit jeweils sehr unterschiedlich zu bewerten, sodass es keine standardisierte Beurteilung geben kann und wohl auch nicht für alle Verfahren geben wird.

Bezogen auf die Pulver-Technologien ist zu beachten, dass Pulverpartikel lungengängig sein können. Entsprechende Grenzwerte sind zu beachten. Aktuelle Anlagen verfügen über relativ geschlossene Systeme zur Pulverbefüllung und -aufbereitung. Dazu kommt bei Pulverwerkstoffen der Explosionsschutz. Entsprechende Normen müssen noch erarbeitet werden. Bei einigen Verfahren werden chemische Binder und Harze in noch nicht bekannten Kombinationen eingesetzt. Auch dabei sind die gesundheitlichen Folgen noch zu untersuchen.

Umso wichtiger ist es, dass sich die Verantwortlichen in den Unternehmen intensiv, ggf. mit den entsprechenden Fachkräften, mit allen Dokumenten zu den Maschinen und Materialien beschäftigen und sie auf Fragen der Arbeitssicherheit hin zu analysieren. Dabei sind jeweils Analogien zu bekannten Verfahren und Materialien zu bedenken und aktiv die dafür verwendeten Richtlinien zu beachten.

Ausbildung

Der Deutsche Verband für Schweißen und verwandte Verfahren – DVS – hat in der Fachgruppe (FG) 4.13 „Ausbildung in der Additiven Fertigung“ den Lehrgang „Fachkraft für Additive Fertigungsverfahren nach DVS“ erarbeitet, der seit Juni 2018 in den Fachrichtungen „Kunststoffe“ und „Metall“ an-

geboten wird. Die Ausbildung zur Fachkraft richtet sich an Facharbeiter, Meister, Techniker, und Ingenieure.

Zudem wird auch die Weiterbildung zur Geprüften Industrietechniker/in (IHK) Fachrichtung Additive Fertigung angeboten.

Ein EU-Programm (CLLAIM) über die [European Federation for Welding, Joining and Cutting](#) (EWF) bietet seit Ende 2019 auf zwei Niveaus ein europäisches Ausbildungssystem für die additive Fertigung an.

Zudem werden von vielen Bildungsträgern Weiterbildungsmodule angeboten. Hierbei ist dringend auf die Praxisnähe, d. h. die Qualität des Technikums, zu achten.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Die technischen Möglichkeiten und die damit verbundenen Geschäftsmodelle werfen rechtliche Fragen insbesondere hinsichtlich der Produkthaftung und der Frage der Nutzungsrechte auf. Viele dieser Fragen können (noch) nicht geklärt werden, sollten aber in den Unternehmen bedacht werden:

- Wie kann bei individualisierten Produkten in Stückzahl „1“, bei denen die klassischen Möglichkeiten der Qualitätssicherung nicht möglich ist, die Sorgfalt bei der Herstellung nachgewiesen werden?
- Das Produktionswissen der Bauteilhersteller, ihr Produktions-Know How, ist weniger wichtig für die Eigenschaften der Endprodukte. Dagegen werden die digitalen Daten der Bauteile und deren Schutz immer wichtiger. Es muss sowohl ausgeschlossen werden, dass die Daten in der Cloud manipuliert werden (Sabotage) als auch dass die Daten ausspioniert werden. Die Gefahr von Produktpiraterie könnte noch größer werden.
- Viele der Bauteile werden von den Kunden entwickelt und dann von den Dienstleistern unter den Gesichtspunkten der jeweiligen Verfahren optimiert, oftmals in einem engen iterativen Prozess. Es ist zu klären, wem das Produkt bzw. dessen Daten gehören und wie die Nutzungsrechte verteilt werden. Auch hier ist die Haftungsfrage zu beantworten.

Die neue Richtlinie VDI 3405 Blatt 5.1 – Rechtliche Aspekte der Prozesskette wendet sich an Anbieter von additiven Fertigungsanlagen, Konstrukteure für additiv zu fertigende Bauteile, Fertigungsdienstleister und die Auftraggeber für entsprechende Produkte und Dienstleistungen. „Die Richtlinie hilft, rechtliche Implikationen bei der Durchführung von Aufträgen zu erkennen und gibt Hinweise für eine Vertragsgestaltung, die die Vertragsintention rechtskonform abbildet. Die Richtlinie wendet sich auch an Juristen, die sich mit Rechtsfragen einer weitgehend digitalen Fertigungskette allgemein und speziell mit den spezifischen Besonderheiten des additiven Fertigungsprozesses beschäftigen. Die Richtlinie vermittelt den notwendigen technischen Hintergrund, um juristisch relevante Technikaspekte geeignet zu bewerten.“

Marktentwicklung

Die Einsatzgebiete, die einzelnen Verfahren, die Werkstoffe sowie die Maschinen und deren Hersteller haben sich in den vergangenen drei Jahren sehr dynamisch entwickelt, wie Befragungen des VDI und von Ernest & Young zeigen. Aktuell haben nach den Analysen von Ernest & Young 63 % der befragten deutschen Unternehmen Erfahrung mit additiven Fertigungsverfahren auf, 2016 waren es nur 37 %. Allerdings liegt Deutschland damit gegenüber Südkorea (81 %) und China (78 %), aber auch z. B. England und Frankreich (je 74 %) zurück.

Weitere 12 % beabsichtigen die Verwendung in naher Zukunft. Weltweit wenden 65 % aller befragten Unternehmen diese Technologien an (2016: 24 %). Weitere 18 % beabsichtigen dies.

Im Geschäftsjahr 2018 lag der weltweite Gesamtumsatz im Bereich des Additive Manufacturing mit rund 9 Mrd. US\$ um 40 % über dem Vorjahresniveau. Für die nächsten Jahre wird mit einem weiteren enormen Anstieg gerechnet.

Noch sind Kunststoffe die am häufigsten eingesetzten Materialien (72 % weltweit), gefolgt von Metallen (49 %). Die befragten Unternehmen erwarten, dass zukünftig der Metall-An teil deutlich zunehmen wird.

Die befragten Unternehmen setzen derzeit in erster Linie auf eigene Lösungen: 40 % der befragten Unternehmen haben eigene Maschinen für die additive Fertigung im Haus, 26 % wenden sich an externe Anbieter. 56 % der Unternehmen erwarten, dass künftig im eigenen Haus additiv gefertigt wird, nur 32 % wollen dafür mit externen Dienstleistern zusammen arbeiten.

Der VDI (Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren 2020) listet auf, welche Wirtschaftszweige schon heute additive Fertigungsverfahren einsetzen (jeweils mit Erläuterungen und Beispielen in Klammern):

- Luft- und Raumfahrtindustrie (Leichtbau),
- Werkzeug- und Formenbau (Einzelstücke und Kleinserien stehen schneller zur Verfügung),
- Elektro- und Elektronikindustrie (komplexe Kühlstrukturen),
- Automobilindustrie (Rennwagen, Funktionsprototypen, Ersatzteile),
- Gießereitechnik (Sandgusskerne und -formen, verlorene Modelle für den Feinguss),
- Automatisierungstechnik, Maschinen- und Anlagenbau (Einzelteile, komplett „montierte“ Funktionsteile),
- Montagetechnik (Montagehilfsmittel),
- Implantate (Knie-, Hüft- u. a. orthopädische Implantate),
- Medizinische Hilfsmittel (Hörmittel, Prothesen),
- Dentaltechnik (schon sehr umfangreich eingesetzt für Brücken, Kronen, Schienen),
- Medizinische Ausbildung und Operationsvorbereitung (Modelle des OP-Bereichs),
- Spielwarenindustrie (3D-Nachbildung von Avataren, 3D-Selfies),
- Architektur (Modelle, Bau von Häusern),
- Film (Automodelle, Straßenszenen),
- Kunst und Schmuck,
- Lebensmittelindustrie (individuell gefertigte Schokoladen),
- MINT-Unterricht (interdisziplinär und im Team Produkte erfinden *und* fertigen).

Auch acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften) hat sich, zusammen mit den

deutschen Akademien der Wissenschaften, mit der additiven Fertigung auseinandersetzt. Sie identifizieren die Akteure der Wertschöpfungsnetze, die sich im Zusammenhang mit der additiven Fertigung entwickeln:

- Werkstoffhersteller (hier engagieren sich zunehmend auch die großen Unternehmen wie Alcoa, DuPont, Eastman und Evonik neben Spezialanbietern, sodass die Maschinenhersteller zunehmend auf Kooperation setzen und von ihren proprietären Materialien abgehen),
- Komponentenhersteller (für Baugruppen der Maschinen, z. B. Laser, Steuerungen),
- Hersteller von Messtechnik (Zerstörungsfreie Messtechnik, In-Process-Messen),
- Maschinenhersteller (neben sehr großen Anbietern gibt es eine Vielzahl von kleinen Unternehmen mit Nischen-Angeboten),
- Anbieter von Software zur Datenaufbereitung (für die unterschiedlichen Verfahren und Maschinen müssen die 3D-Daten aufbereitet werden),
- Online-Shops (als Dienstleister oder als Vermittler zu Dienstleistern; Entwickler können ihre Arbeiten auf die Portale hochladen, die Kunden können diese skaliert in verschiedenen Materialien fertigen lassen, z. B. shapeways, sculpeo),
- Dienstleister (als Auftragsfertiger, oft auch mit Engineering Know How),
- Vermittler (oft als Plattformen zwischen Endkunden und Fertigungsdienstleistern, z. B. 3DHubs),
- Technologieanwender (Unternehmen, die Bauteile für den eigenen Bedarf herstellen).

Diese Wertschöpfungsnetze werden unterstützt von Forschungsinstituten, Hochschulen, Standardisierungsgremien, Informationsplattformen und Beratungsunternehmen (z.B. Wohlers Associates).

Noch ist unklar, welche Geschäftsmodelle sich mit der Weiterentwicklung der additiven Fertigung durchsetzen werden. McKinsey sieht eine mögliche Verkürzung der Wertschöpfungs-

kette, wobei die Materialhersteller und die Produktentwickler die wesentlichen Treiber sein sollen. Das Unternehmen Carbon vermarktet seine Maschinen wie Software („Hardware as a Service“). Acatech geht von mehreren möglichen Entwicklungen aus. Gemeinsam ist allen Annahmen über die zukünftige Entwicklung die Einschätzung eines großen Wachstumspotenzials (Wohlers: +30% pro Jahr) für den industriellen Bereich.

Ergänzendes und weiterführendes Schrifttum

- 3D-Drucker-Übersicht, aktuell gehalten wird: <https://3druck.com/3d-drucker-liste/>
- *Acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.)*, 2016: Additive Fertigung, München.
- *Avetik C. et al.: How 3-D printing will transform the metals industry*. McKinsey, 2017 (<http://www.mckinsey.com/>)
- Bargel, H.-J.: Werkstoffkunde, 13. Aufl. Springer Vieweg, Berlin 2022
- Beuth Verlag, 2014 ff.: VDI Richtlinie 3405: Additive Fertigungsverfahren, Berlin.
- *Beaman, J.J. u. a.: Rapid Prototyping: Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1997
- *Deutsche Windguard: Status des Windenergieausbaus an Land*, 1. Halbjahr 2021
- *Deutsche Windguard: Status des Offshore-Windenergieausbaus*, 1. Halbjahr 2021
- DIN 29531: Luft- und Raumfahrt; Gußstücke aus Al- u. Mg-Legierungen; Techn. Lieferbedingungen; Nicht für Neukonstruktionen, 1990-09
- DIN EN 10021: Allgemeine technische Lieferbedingungen für Stahlerzeugnisse, 2007-03
- DIN EN 10213: Stahlguss für Druckbehälter, 2008-01
- DIN EN 10283: Korrosionsbeständiger Stahlguss, 2010-06
- DIN EN 12890: Gießereiwesen – Modelle, Modelleinrichtungen und Kernkästen zur Herstellung von Sandformen und Sandkernen, 2000-06
- DIN EN 1559: Gießereiwesen – Technische Lieferbedingungen, 2011-05
Teil 2: Zusätzliche Anforderungen an Stahlgussstücke, 2014-12
- DIN EN 1560: Gießereiwesen – Bezeichnungssystem für Gusseisen – Werkstoffkurzzeichen und Werkstoffnummern, 2011-05
- DIN EN 1561: Gießereiwesen – Gusseisen mit Lamellengraphit, 2012-01
- DIN EN 1562: Gießereiwesen – Temperguss, 2012-05
- DIN EN 1563: Gießereiwesen – Gusseisen mit Kugelgraphit, 2019-04
- DIN EN 16482: Gießereiwesen – Gusseisen, Strangguss, 2014-09
- DIN EN 1706: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gussstücke – Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften, 2013-12
- *DVS-Arbeitskreis: „Fügetechnik für die Windenergie“*, Düsseldorf 2017
- *Fachverband Pulvermetallurgie: Sinterwerkstoffe, Werkstoff-Leistungsblätter und technische Lieferbedingungen*. Berlin, Köln: Beuth-Vertrieb 2000
- *Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung: www.generativ.fraunhofer.de*
- Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion, München 2016
- Hasse, S. (Hrsg.): Gießerei-Lexikon 19. Aufl., Fachverlag Schiele u. Schön, Berlin 2008
- *Herfurth, K., N. Ketscher, u. M. Köhler: Gießereitechnik kompakt*. Giesserei-Verlag GmbH, Düsseldorf 2005
- *Herfurth, K.: Stranggießen von Gusseisen (VDG)*. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=QWzXWzIjyfA)
- *Huppmann, W.: Metallographic Atlas of Powder Metallurgy*. Verlag: Metal Powder Industry 1990
- ISO 16112: Gusseisen mit Vermiculargrafit – Klassifikation, 2006-08

- Klocke, F.: Fertigungsverfahren 5 – Gießen und Pulvermetallurgie. 5. Auflage, VDI Buch, Springer Vieweg-Verlag, Berlin, Wiesbaden 2018
- Kumke, Martin: *Fertigungsgerechtes Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Springer fachmedien, Wiebaden 2018
- Kühn, M. u. T. Klaus: Windenergie: Rückenwind für eine zukunftsfähige Technik. S. 14/22 In: Erneuerbare Energie, 3. Aufl. (Hrsg.: T. Bührke u. R. Wengenmayr). Wiley–VCH Verlag 2012
- Lexikon der deutschen Weltmarktführer, Hrsg. F. Langenscheidt u. B. Venohr. Köln 2010
- Richter, H.: Das Prinzip Sandguß; Gießen Großgußstücke; Gießen in Dauerformen. [youtube wissensfloater](#)
- Sahm, P. R., I. Egry u. T. Volkmann: Schmelze, Erstarrung, Grenzflächen. Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden 1999
- Schal, W.: Fertigungstechnik 2. Verlag Handwerk und Technik, Hamburg 1995
- Schatt, W., B. Kieback u. K.-P. Wieters: Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe. 2. Aufl. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- Taschenbuch der Gießerei-Praxis. Fachverlag Schiele u. Schön, Berlin (erscheint jährlich)
- *VDI-Richtlinie 3405: Additive Fertigung – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Beuth Verlag, Berlin 2014-12
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure, 2019: Additive Fertigung. Statusreport.
- *VDI – Verein Deutscher Ingenieure: Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren*, Düsseldorf, 2016.
- *Windblatt* – Enercon Magazin für Windenergie 01-2014
- Wohlers, T.: Wohlers Report 2019 – 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report (www.wohlersassociates.com)
- Zeitschrift Gießerei. Gießerei-Verlag, Düsseldorf
- Zentrale für Gussverwendung ZGV im Deutschen Gießereiverband: Herausgeber und Verlag, Düsseldorf. Jährlich vier Hefte der Zeitschrift *Konstruieren und Gießen* berichten aus allen industriellen Bereichen über konstruktions-, verarbeitungs- und anwendungsbezogene Fragen zum Thema „Guss“. Diese hervorragend gestaltete und redigierte Fachzeitschrift ist auch für Studierende besonders gut geeignet.



Umformen

3

Alfred Herbert Fritz

Zusammenfassung

Beim Umformen werden die Stoffteilchen in eine andere Zwischen- oder Fertigteilform verschoben, ohne dass der Stoffzusammensetzung verloren geht. Die Masse bleibt demnach ebenfalls unverändert. Die Einteilung der Verfahren richtet sich nach DIN 8582 nach den wirksamen Spannungen in der Umformzone. So gehören zum Druckumformen das Walzen von Profilen und Blechen, die Schmiedeverfahren Frei- und Gesenkformen sowie das Strang- und Fließpressen. Zum Zugdruckumformen zählen das Drahtziehen, das Tiefziehen von Hohlkörpern aus Blech sowie die Drückverfahren für rotationssymmetrische Hohlkörper. Beim Zugumformen wirkt vorwiegend eine Zugbeanspruchung zum Längen, Weiten und das Streckziehen von Busdächern oder Flugzeugteilen. Eine größere praktische Bedeutung haben auch die Biegeverfahren. Ein besonderer Abschnitt behandelt das Innen-Hochdruck-Umformen (IHU) für die integrierte Bauteilherstellung für die Kfz-Industrie. Wegen der weiterhin angestrebten Minimierung von Kosten, Gewicht und Schadstoff-Emissionen bei Kraft-

fahrzeugen wurde der Abschnitt der sog. Geübten Nockenwellen (durch Umformen hergestellt) aktualisiert.

3.1 Einteilung und Vorteile der Umformverfahren

Unter Umformen versteht man nach DIN 8580, eine gegebene Roh- oder Werkstückform in eine bestimmte andere Zwischen- oder Fertigteilform zu überführen. Dabei werden die Stoffteilchen so verschoben, dass der Stoffzusammensetzung und die Masse unverändert bleiben. Das Umformen bezeichnete man früher auch als *plastische* oder *bildsame Formgebung*.

Die *Einteilung* der Umformverfahren erfolgt entsprechend DIN 8582 unter dem Gesichtspunkt der wirksamen Spannungen in der Umformzone in die fünf Beanspruchungsgruppen Druck-, Zugdruck-, Zug-, Biege- und Schubumformen.

Abb. 3.1 vermittelt einen Überblick über die Einteilung der Fertigungsverfahren. Die Gruppen sind in den Normen DIN 8583 bis 8587 nach den Kriterien der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, der Werkzeug- und der Werkstückgeometrie gegliedert. Sie umfassen 18 Untergruppen mit etwa 230 Grundverfahren. Häufig werden auch Verfahrenskombinationen eingesetzt. Es können zwei oder mehrere Grundverfahren gleichzeitig oder

A. H. Fritz (✉)
Berlin, Deutschland
E-Mail: fritz.herbert@t-online.de

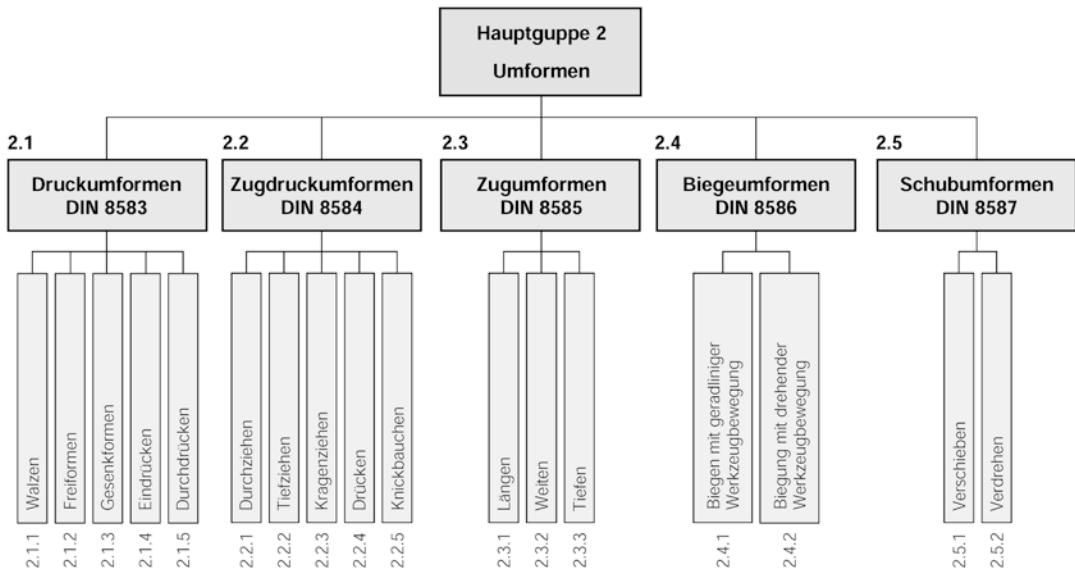


Abb. 3.1 Unterteilung der Fertigungsverfahren der Umformtechnik in Untergruppen nach DIN 8582

nacheinander in einem Arbeitsgang durchgeführt werden. Ein Arbeitsgang ändert in einem einzelnen Schritt die Form und (oder) die Stoffeigenschaften. Aus einer Übersicht über die Umformverfahren wie in Abb. 3.2 gehen der jeweilige Ausgangs- und Endzustand des Werkstücks hervor.

- Das Umformen kann bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden. Die Ausgangstemperatur des Werkstücks beeinflusst sowohl den Umformverlauf als auch die Werkstück-Stoffeigenschaften. Dabei kann eine bleibende oder nur beim Umformvorgang feststellbare vorübergehende Festigkeitssteigerung auftreten. Für die Bedürfnisse der Praxis unterteilt man die Umformverfahren nach DIN 8582 bis 8587 in: *Kaltumformen*: Umformen ohne Anwärmen des Rohlings, *Warmumformen*: Umformen mit Anwärmen des Rohlings¹.

Umformverfahren, bei denen sowohl kalt als auch warm umgeformt wird, sind z. B. das Walzen, Fließpressen und Prägen. Eine Einteilung der Umformverfahren nach der geometrischen Rohlingsform (z. B. Stangenabschnitt oder Blech) führt zu der Unterscheidung *Massiv-* und *Blechumformung*.

Vorteile der Umformverfahren sind

- bessere *Werkstoffausnutzung*; die modernen Verfahren des Umformens erlauben in besonderen Fällen die Fertigung von einbaufertigen Teilen. Gegenüber der spanenden Bearbeitung sind Werkstoffeinsparungen von 10 bis 50 % möglich.
- Einsparen von *Fertigungszeit*; Umformmaschinen ermöglichen ein höheres Ausbringen durch verkürzte Haupt- und Nebenzeiten. Die Erhöhung der Pressenhubzahl, der Einsatz automatisierter Zuführ- und Entnahmeverrichtungen sowie die Mehrmaschinenbedienung führen zu einer Einsparung von Fertigungszeit bis zu 30 %.
- Steigerung der *Werkstückqualität*; die Maßgenauigkeit und Oberflächengüte der Erzeugnisse können verbessert werden durch Kombinieren von Umformprozessen mit

¹Als Warmumformen wurden früher die Verfahren bezeichnet, bei denen die Umformtemperatur über der Rekristallisationstemperatur des Werkstückstoffs lag. Oberhalb der Rekristallisationstemperatur T_{Rk} tritt keine Verfestigung des Werkstoffs ein.

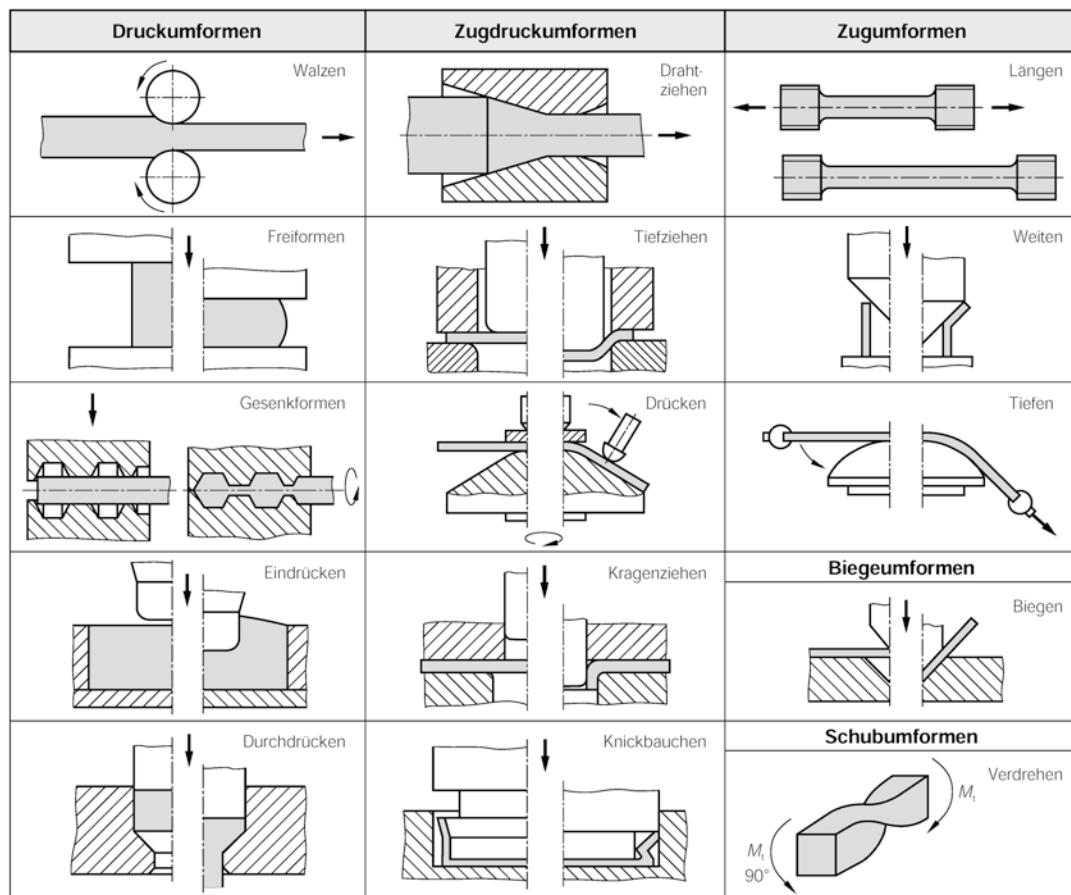


Abb. 3.2 Beispiele für Umformverfahren, eingeteilt nach überwiegender Beanspruchung in der Umformzone. Im jeweils linken Bildteil ist die Ausgangsform, im rechten Bildteil die Endform des Werkstücks dargestellt

Endbearbeitungsverfahren. Mit einigen Umformverfahren lassen sich sehr kleine Toleranzen einhalten. Zum Beispiel kann beim Fließpressen eine Wanddickenabweichung bei 600 mm Durchmesser von bis zu $\pm 0,01$ mm und beim Oberflächenfeinwalzen eine Rauheit bei Stahlteilen bis zu $Rz = 0,2$ mm erreicht werden.

- Erhöhung der *Werkstückstoff-Festigkeit*; bei mehreren Verfahren des Kaltumformens kann eine solche Festigkeitssteigerung vorteilhaft ausgenutzt werden. Beim Kaltfließpressen steigt die Härte des eingesetzten Stahls bis zu 120 % und beim Oberflächenfeinwalzen (je nach Umformgrad) bis zu 40 %. Dadurch können preiswerte Stähle mit gerin-

gerer Festigkeit als Rohling eingesetzt werden.

- Eine höhere Gestaltfestigkeit und eine verringerte Kerbwirkung lassen sich bei Umformteilen mit nicht angeschnittenem Faserverlauf erreichen.

3.2 Grundlagen der Umformtechnik

Für die Anwendung der Umformtechnik ist der kristalline Aufbau der Metalle von grundlegender Bedeutung. Das kleinste Bauelement eines Kristalls ist die *Elementarzelle* (Abb. 3.3). In Metallen findet man meist drei Grundformen:

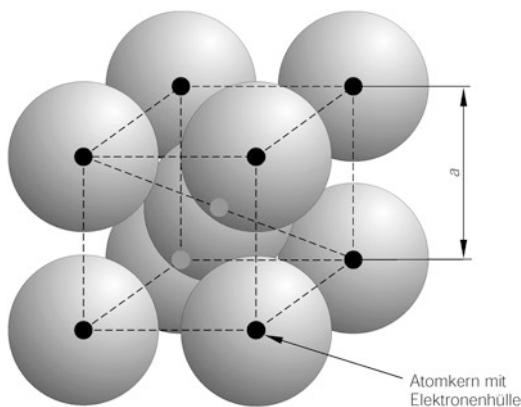


Abb. 3.3 Anordnung von Atomen in einer kubisch-raumzentrierten Elementarzelle (Gitterabstand bei α -Eisen: $a = 287 \cdot 10^{-9}$ mm)

die kubische, die tetragonale und die hexagonale Elementarzelle. Beim Erstarren einer Schmelze (Abschn. 2.2 Gießen) ordnen sich die Elementarzellen nahezu parallel an und bilden feste Bereiche, die immer größer werden. Wenn sich alle Zellen gegenseitig berühren, ist die Schmelze erstarrt. Auf einer feingeschliffenen Oberfläche kann man durch eine geeignete Ätzung mit chemischen Mitteln das Gefüge der einzelnen Kristallkörper und ihre Korngrenzen sichtbar machen. Man erkennt unter dem Mikroskop eine Struktur etwa entsprechend Abb. 3.4.

Die unregelmäßigen Körper mit zueinander statistisch regellos orientierten Zellen sind die *Kristallite* oder *Körner*. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Metalle werden durch die Lage und die Durchmesser der Atome, deren Abstand voneinander und durch die Verteilungsdichte im Atomgitter bestimmt. Die Eigenschaften eines Kristallits sind daher richtungsabhängig, also *anisotrop*. Im Verbund eines Vielkristalls gleichen sich die Vorzugsrichtungen statistisch aus; die Eigenschaften sind daher *quasi-isotrop*.

Bei der plastischen Formänderung von Metallen werden große Gitterbereiche von Elementarzellen gegeneinander um endliche Strecken verschoben. Dieses Verschieben oder *Gleiten* erfolgt bevorzugt parallel zu den am dichtesten gepackten Gitterebenen, verdeutlicht in Abb. 3.5. Die Ebenen sind bei kubisch-raumzentrierten (krz) Metallen (z. B. α -Eisen, Wolfram, Chrom) die Flächen des sog. Rhombendodekaeders. Bei Metallen mit kubisch-flächenzentriertem (kfz) Gitter (z. B. γ -Eisen, Aluminium, Kupfer, Nickel) sind es die Flächen des Oktaeders. Bei Metallen mit hexagonalem (hdP) Gitter (wie z. B. Zink, Magnesium) sind die Basisflächen am dichtesten mit Atomen besetzt. Entlang dieser Ebenen setzt die Gleitung oder *Translation* ein.

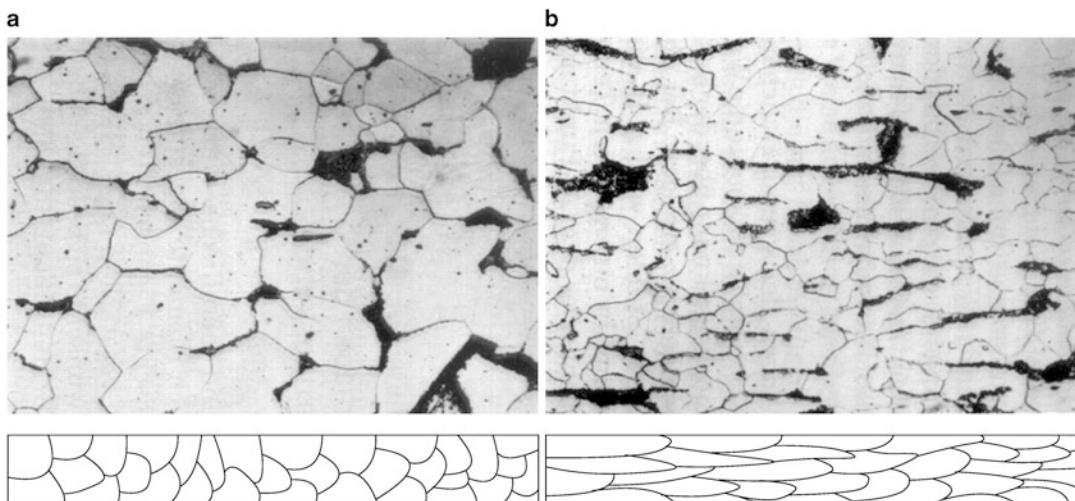


Abb. 3.4 Aus Kristalliten aufgebautes Gefüge eines Metalls: **a** Vielkristall im Ausgangsgefüge, **b** Gefüge nach der Umformung

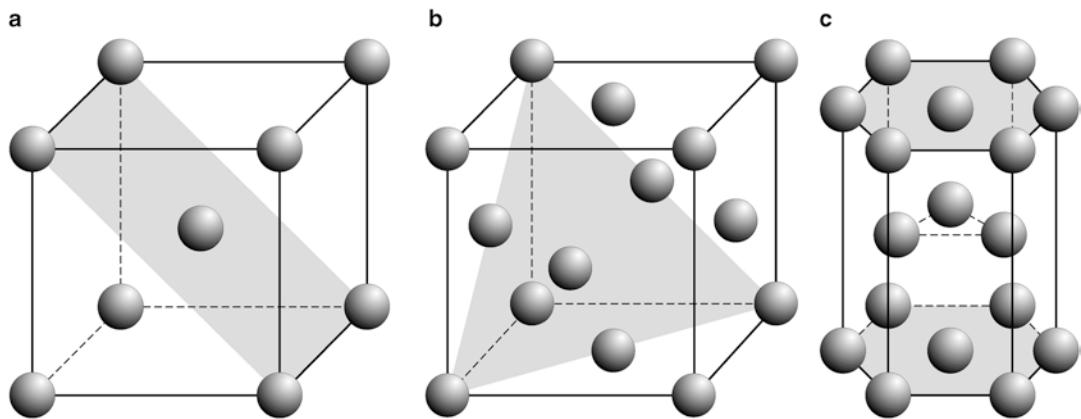


Abb. 3.5 Elementarzellen von Metallen mit den am dichtesten mit Atomen besetzten Gitterebenen. **a** kubisch-raumzentriertes Gitter (α -Eisen, Wolfram, Chrom) **b** kubisch-flächenzentriertes Gitter (γ -Eisen, Aluminium, Kupfer, Nickel) **c** hexagonales Gitter (Zink, Magnesium)

Bei einem Vielkristall, der aus zahlreichen Kristalliten mit unregelmäßigen Korngrenzen besteht, haben die Gleitebenen unterschiedliche Orientierung (Abb. 3.4). Das Gleiten setzt in diesem Fall richtungsunabhängig ein, da immer zur Beanspruchungsrichtung günstig liegende Gleitsysteme vorhanden sind. Eine große Anzahl von Kristalliten befindet sich aber auch in solchen Lagen, in denen ein Gleiten in der Kraftrichtung nicht möglich ist. Daher ist der Umformwiderstand eines vielkristallinen Metallstücks viel größer als derjenige eines Einkristalls.

Auf alle Fälle wird das Gleiten in einem Kristallit durch Versetzungen begünstigt.

3.2.1 Versetzungen

Versetzung sind linienförmige Baufehler im Metallgitter. Man unterscheidet die zwei Formen Stufen- und Schrauben-Versetzung. Erstere kann man sich als einen Rand von Gitterebenen denken, die blind im Kristall enden, Abb. 3.6. Ihr Symbol ist ein auf den Kopf gestelltes großes T.

Bei Schraubenversetzungen sind die Gitterebenen schraubenförmig verzerrt, Abb. 3.7.

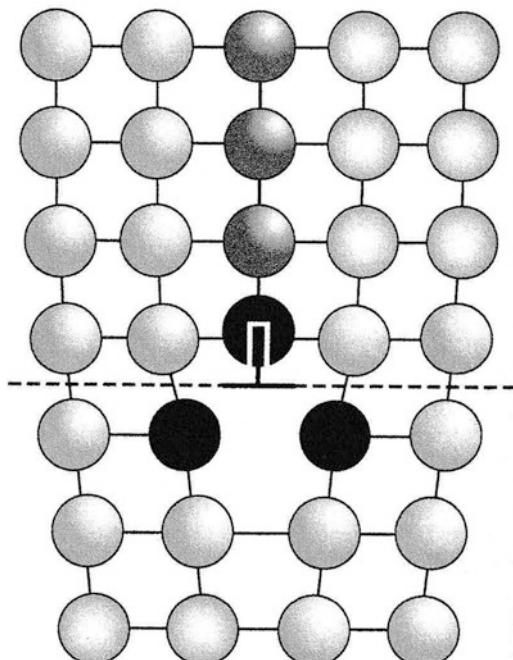


Abb. 3.6 Stufenversetzung. (Quelle: Bargel: Werkstoffkunde, Springer Vieweg, 13. Aufl. 2022)

Als **Versetzungsdichte** wird die Häufigkeit der Versetzungen bezeichnet. Sie wird in Linieneinheit je Volumeneinheit gemessen. In einem weichgeglühten Metall kann sie 10^6 mm/mm^3 betragen.

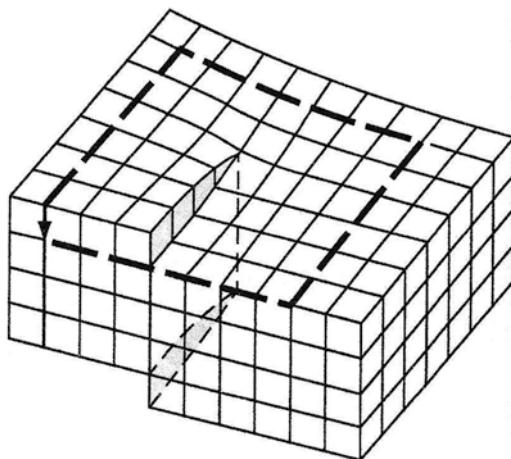


Abb. 3.7 Schraubenversetzung. (Quelle: Bargel: Werkstoffkunde, Springer Vieweg, 13. Aufl. 2022)

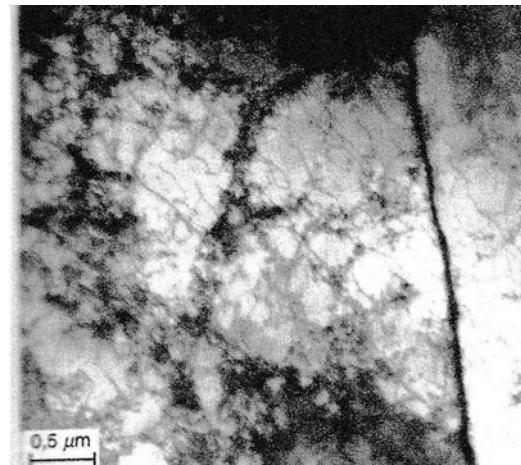


Abb. 3.8 Versetzungsnetzwerk in Stahl nach Dauerschwingbeanspruchung bei 400 °C. (Quelle: Bargel: Werkstoffkunde, Springer Vieweg, 13. Aufl. 2022)

Das entspricht $10^8/\text{cm}^2$ in der üblichen Bezeichnung der Metallphysik. Beim Kaltumformen kann der Wert auf $10^{12}/\text{cm}^2$ ansteigen (Bargel: Werkstoffkunde, 13. Aufl. 2022).

Durch den relativ geringen Kraftaufwand zum Bewegen der Versetzungen ergibt sich die gute Umformbarkeit der Metalle. Die sog. Kaltverfestigung ergibt sich durch die neuen, beim Umformen entstehenden Versetzungen, die sich gegenseitig behindern. Man spricht sogar von einem Versetzungsnetzwerk, Abb. 3.8.

Die gegenseitige Beeinflussung der Spannungsfelder von Versetzungen führt oft zu einer Übereinander-Reihung gleichartiger Stufenversetzungen. Als Folge ergibt sich eine flächenhafte Gitterstörung, die sog. Kleinwinkelkorngrenze, Abb. 3.9.

Ihr Energiegehalt kann bis zu $0,3 * 10^{-6}\text{ J/mm}^2$ betragen. Vielfach ist auch die Bezeichnung Subkorgrenze üblich, weil der Kristall durch sie in Teilbereiche (Subkorn mit $< 1\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser) aufgeteilt wird. Falls ein Kristall bei seinem Wachstum (Erstarrung aus der Schmelze oder Rekristallisation) auf einen anderen trifft, bilden die Gitterebenen untereinander meist größere Winkel. Die entstehenden Grenzflächen heißen Großwinkel-Korngrenzen, Abb. 3.10.

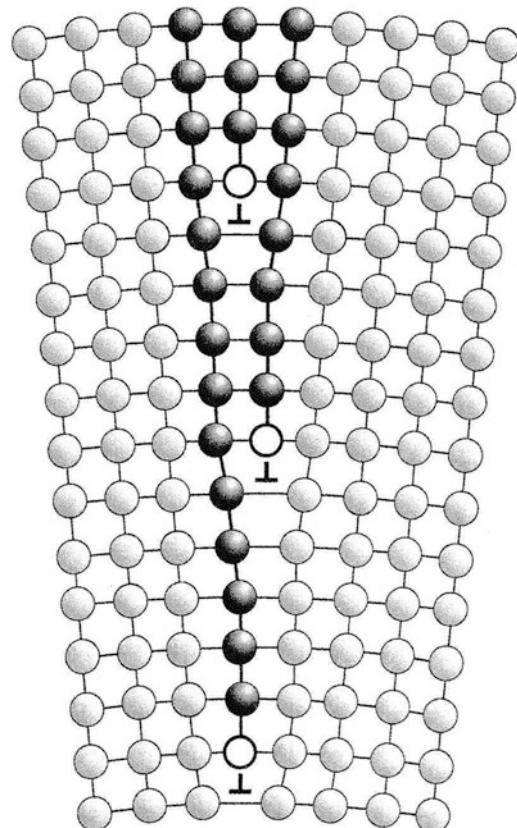


Abb. 3.9 Kleinwinkelkorngrenze. (Quelle: Bargel: Werkstoffkunde, Springer Vieweg, 13. Aufl. 2022)

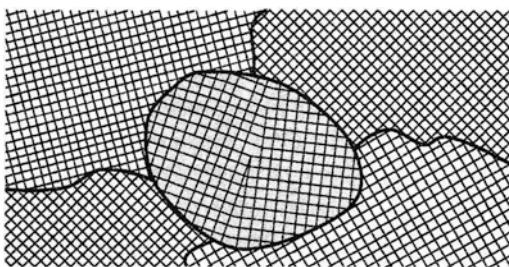


Abb. 3.10 Großwinkelkorngrenzen, mittleres Korn durch Kleinwinkelkorngrenzen in Mosaikblöckchen unterteilt

Verzerrungsfreie **Zwillingsgrenzen** bilden sich unter bestimmten Bedingungen. Zwillinge findet man meist innerhalb eines Korns, sie haben einen sehr kleinen Energiegehalt. Dabei sind die benachbarten Gitterbereiche spiegel-symmetrisch zur Zwillingsgrenze angeordnet, Abb. 3.11.

Ein weiterer flächenhafter Fehler ist der sog. **Stapelfehler** in der Reihenfolge der dichtest gepackten Gitterebenen. Nachfolgend sind die Energiewerte für die verschiedenen Grenzflächen von Kupfer-Kristallen gegenübergestellt (Nach Bargel: Werkstoffkunde, Springer Vieweg 13. Aufl. 2022).

• Zwillingsgrenze	$0,03 * 10^{-6} \text{ J/mm}^2$
• Stapelfehler	$0,16 * 10^{-6} \text{ J/mm}^2$
• Kleinwinkelkorngrenze	$0,25 * 10^{-6} \text{ J/mm}^2$
• Großwinkelkorngrenze	$0,50 * 10^{-6} \text{ J/mm}^2$
• Freie Oberfläche	$1,60 * 10^{-6} \text{ J/mm}^2$

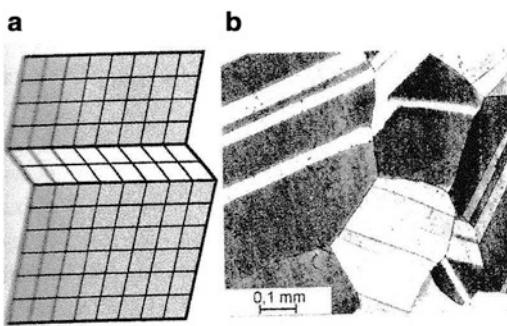


Abb. 3.11 Zwillingsbildung innerhalb eines Kristalls (a) und Zwillinge in geglähter Zinnbronze (b). (Quelle: Bargel: Werkstoffkunde, Springer Vieweg, 13. Aufl. 2022)

3.2.2 Fließkurven

Wenn man die erforderliche Kraft F auf die Wirkungsfläche S bezieht, erhält man die mechanische Spannung σ_z . Bei Gleitverformung heißt sie Schubspannung τ . Nach den Regeln der Mechanik ergibt sich bei jeder äußeren Belastung in den Schnittebenen unter 45° zur Belastung eine maximale Schubspannung τ_{\max} , die halb so groß ist, Abb. 3.12.

Die Schubbeanspruchungen erzeugen Winkeländerungen des Gitters. Bei Wegnahme von kleinen Belastungen gehen diese Verformungen zurück, sie waren also nur **elastisch**.

Bei Überschreitung eines kritischen Wertes τ_0 bewegen sich die Atome sprunghaft auf den nächsten Gitterplatz und verbleiben dort. Es handelt sich nun um eine **plastische** Verformung, Abb. 3.13.

Diese vereinfachte Darstellung soll mit der Versetzungsbewegung untermauert werden, Abb. 3.14.

Bei a) sieht man eine Stufenversetzung im Gitter, wo die Atomabstände AB und BC gleich sind. Durch eine Schubspannung wird das Gitter verzerrt (bei b). Das gestörte Gleichgewicht der Bindungskräfte führt zu einer geringen

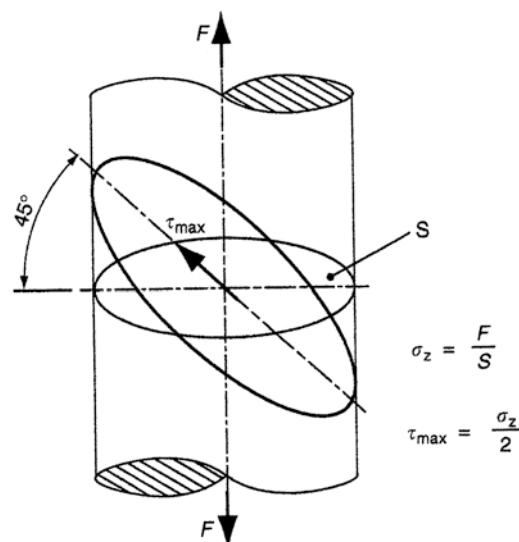


Abb. 3.12 Normal- und Schubbeanspruchung bei einachsiger Zugbeanspruchung. (Quelle: Bargel: Werkstoffkunde, Springer Vieweg, 13. Aufl. 2022)

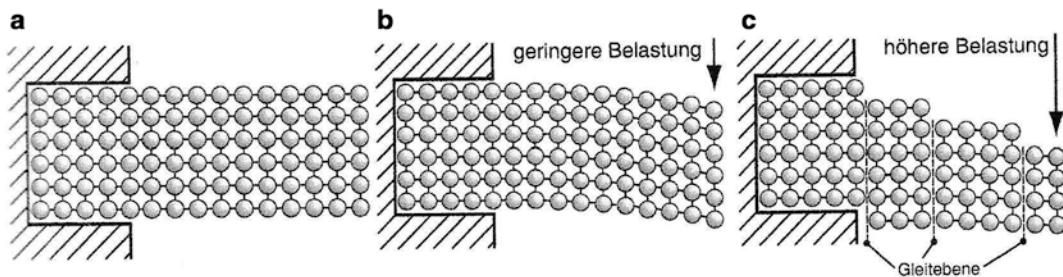


Abb. 3.13 Verformungen eines Biegestabes: **a** unverformt, **b** elastisch verformt, **c** elastisch und plastisch verformt

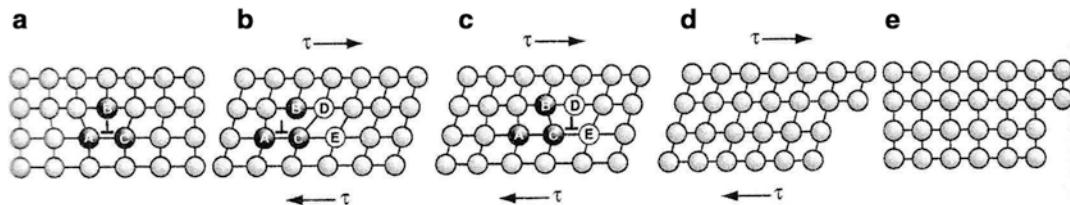


Abb. 3.14 Plastische Verformung durch Versetzungsbewegung. (Quelle: Bargel: Werkstoffkunde, Springer Vieweg, 13. Aufl. 2022)

Verlagerung der Atome CDE (bei c). Da die Schubspannung bestehen bleibt, wandert die Versetzung weiter und bildet am Ende des Kristalls eine Stufe (d u. e).

Im viel-kristallinen Metall ergeben sich für die Weiterbewegung der Versetzungen Behinderungen, beispielsweise an den Korngrenzen mit ihrem hohen Energiegehalt. Die Versetzung wird an den Korngrenzen aufgehalten und bewirkt einen Versetzung-Stau. Andere Hindernisse sind z. B. Ausscheidungen im Gefüge, Abb. 3.15.

Die Spannung zum Bewegen einer Versetzung ist um mehrere Zehnerpotenzen kleiner als τ_0 . Die Ursache sind die immer vorhandenen weiteren Fehlstellen im Gitter. Die Stufenbildung an der freien Oberfläche ergibt Gleitlinien und Gleitlinienbänder. Diese sind die Ursache für das Mattwerden vorher glänzender Metalloberflächen, die oft beim Verformen sehr grobkörniger Werkstoffe auftreten (Bargel: Werkstoffkunde, Springer Vieweg, 13. Aufl. 2022).

Für das Berechnen der Umformvorgänge hat man *Kenngrößen der Formänderung* definiert. Während des Umformvorgangs bleibt das Volumen des umgeformten Körpers annähernd

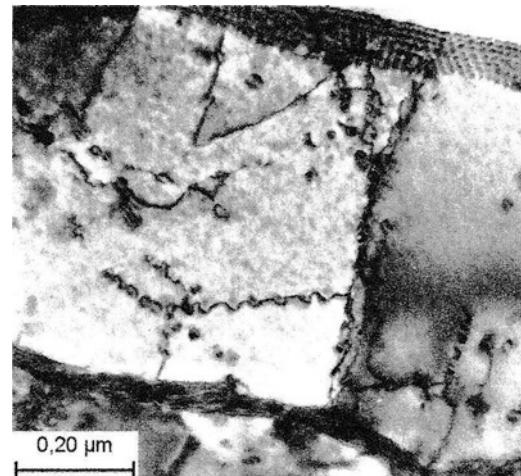


Abb. 3.15 Versetzungslinie an Ausscheidungen in einem nitrierten Kohlenstoffstahl. (Quelle: Bargel: Werkstoffkunde, Springer Vieweg, 13. Aufl. 2022)

gleich. Wird ein Quader mit den Ausgangsabmessungen h_0 , b_0 und l_0 auf die Endabmessungen h_1 , b_1 und l_1 wie in Abb. 3.16 gestaucht, so gilt die Beziehung

$$V = h_0 b_0 l_0 = h_1 b_1 l_1 = \text{konst.} \quad (3.1)$$

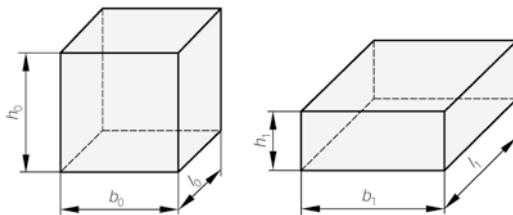


Abb. 3.16 Gestrauchter Quader mit idealisierter Geometrie nach dem Umformen

Die Größe von Formänderungen kann in verschiedener Weise angegeben werden:

- Unter der **absoluten Formänderung** versteht man den Unterschied der geometrischen Abmessungen vor und nach der Umformung (Höhenabnahme, Breitenabnahme, Längenabnahme):

$$\Delta h = h_1 - h_0; \Delta b = b_1 - b_0; \Delta l = l_1 - l_0.$$

- Bei der **bezogenen Formänderung** wird die absolute Formänderung zu den Ausgangsabmessungen ins Verhältnis gesetzt (bei positivem Vorzeichen „Dehnung“, meist in % angegeben):

$$\varepsilon_h = \frac{h_1 - h_0}{h_0}; \varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0}; \varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0}.$$

- Das **Formänderungsverhältnis** ist das Verhältnis der geometrischen Abmessungen vor und nach dem Umformen (Stauchgrad, Breitungsgrad, Streckgrad):

$$\gamma = \frac{h_1}{h_0}; \beta = \frac{b_1}{b_0}; \lambda = \frac{l_1}{l_0}.$$

- Der **Umformgrad** ist das logarithmische Verhältnis:

$$\varphi_h = \ln \frac{h_1}{h_0}; \varphi_b = \ln \frac{b_1}{b_0}; \varphi_l = \ln \frac{l_1}{l_0}.$$

Der Umformgrad wird bei der Ermittlung des *Kraft- und Arbeitsbedarfs* benötigt. Formänderungen treten nicht allein in einer Richtung auf. Beim Strecken eines Zugstabs wird sein Querschnitt gleichzeitig abnehmen; beim Stauchen eines Bolzens vergrößert sich der Durchmesser. Für alle Berechnungen des erforder-

lichen Kraftbedarfs ist stets der Vergleichsumformgrad φ_v (Größtbetrag von φ) einzusetzen. Der Satz von der Volumenkonstanz lässt sich mit Hilfe des Umformgrads formulieren: Die Summe der orthogonalen Umformgrade ist gleich null:

$$\varphi_h + \varphi_b + \varphi_l = 0. \quad (3.2)$$

Aufgrund des kristallinen Aufbaus zeigen die metallischen Werkstoffe ein proportionales Verhalten im Spannung-Dehnung-Schaubild bis zur *Fließgrenze* (*Hooke-Gerade*). Die elastische Verformung entsteht durch reversible Gitterdehnungen und Gitterstauchungen. Beim Fließbeginn gleiten große Gitterbereiche irreversibel ab.

Die bevorzugten Gleitebenen stimmen bei homogenen Werkstoffen mit der Richtung der maximalen Schubspannung überein. Durch die im Werkstoff in großer Anzahl enthaltenen eindimensionalen Gitterdefekte (Versetzungen) setzt der Fließbeginn bei wesentlich niedrigeren Schubspannungen ein als bei idealem Gitteraufbau. Für einen dreiaxisigen Spannungszustand kann in Anlehnung an *Mohr* ohne Berücksichtigung der mittleren Hauptnormalspannung die *Fließbedingung* definiert werden:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2 \tau_{\max} = \sigma_v \quad (3.3)$$

mit σ_v als der einachsigen Vergleichsspannung. Diese wird nach unterschiedlichen *Festigkeitshypthesen* (*Fließbedingungen*) berechnet und zwar nach der Normalspannungshypothese, der Schubspannungshypothese nach *Tresca* (s. (Gl. 3.3)) und der Gestaltänderungsenergie-Hypothese (GEH) nach *v. Mises*.

Der Einfluss ein- und mehrachsiger Spannungszustände auf den Verlauf der Schubfließgrenze τ_F und der Schubfestigkeit τ_B geht aus Abb. 3.17 hervor. Darin sind die *Mohr'schen Spannungskreise* für den Fließbeginn dargestellt. Der jeweilige Abstand zwischen τ_F und τ_B ist ein Vergleichsmaß für das plastische Formänderungsvermögen.

Oberhalb des Schnittpunkts S der beiden Kenngrößen ist im Bereich mehrachsiger Zugspannungen mit Trennbruchgefahr zu rechnen. Unter mehrachsigen Druckspannungszuständen

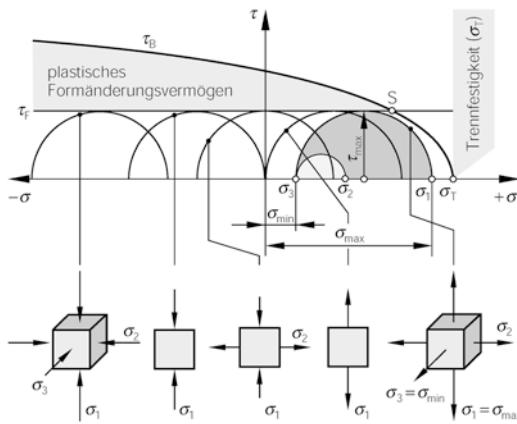


Abb. 3.17 Mohr'sche Spannungskreise und Grenzfestigkeiten für unterschiedliche Hauptnormalspannungszustände

wird ein größeres Umformvermögen erreicht als unter Zugspannungszuständen. Im Grenzfall können mehrachsige Zugspannungen verformungslose Trennbrüche auslösen.

Im Spannung-Dehnung-Schaubild nach Abb. 3.18 tritt beim Werkstoff Stahl (mit verhältnismäßig wenig Kohlenstoff) eine ausgeprägte obere Streckgrenze R_{eH} auf. Wird beim Zugversuch die der Zugprobe aufgezwungene Verlängerung ΔL kontinuierlich gesteigert, so erhöht sich die messbare Kraft F_i und damit die Zugspannung $\sigma = F_i/S_0$. Am Höchstlastpunkt ist die Nennzugfestigkeit R_m des Werkstoffs erreicht; im Zugversuch kommt es infolge von Instabilitäten zur Einschnürung, bei weiterer Dehnung zum Bruch. Die Spannung σ ist eine fiktive Größe, da sie stets auf den Ausgangsquerschnitt S_0 der Zugprobe bezogen wird.

Die wahre Spannung $k_f = F_i/S_i$ wird *Fließspannung* genannt. Der Verlauf der Fließspannung k_f in Abhängigkeit vom Vergleichsumformgrad etwa wie in Abb. 3.19 heißt Fließkurve und ist für unterschiedliche Werkstoffe von der Höhenlage und dem Verfestigungsanstieg abhängig. Für die meisten in der Umformtechnik angewendeten Metalle und Metallegierungen sind die Fließkurven in den Arbeitsblättern VDI 5-3200 und VDI 5-3201 festgelegt.

Fließkurven lassen sich einfacher handhaben, wenn sie durch eine mathematische Beziehung

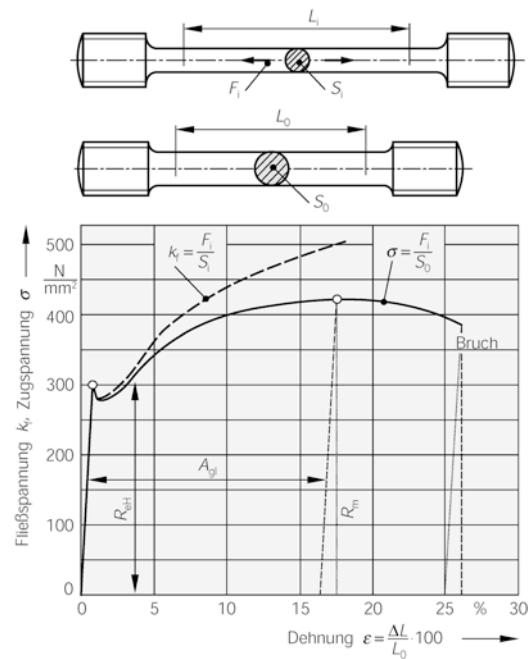


Abb. 3.18 Spannung-Dehnung-Schaubild für S235 (St 37), aufgenommen beim Zugversuch nach DIN EN 10002-1. σ Zugspannung ($\sigma = F_i/S_0$) k_f Fließspannung ($k_f = F_i/S_i$) R_{eH} obere Streckgrenze ($R_{eH} = F_{eH}/S_0$) R_m Zugfestigkeit ($R_m = F_{max}/S_0$) L_0 Ausgangs-Messlänge, $\Delta L = L_i - L_0$ (Verlängerung) S_0 Ausgangs-Querschnitt S_i Querschnitt bei Belastung F_i A_{gl} Gleichmaßdehnung

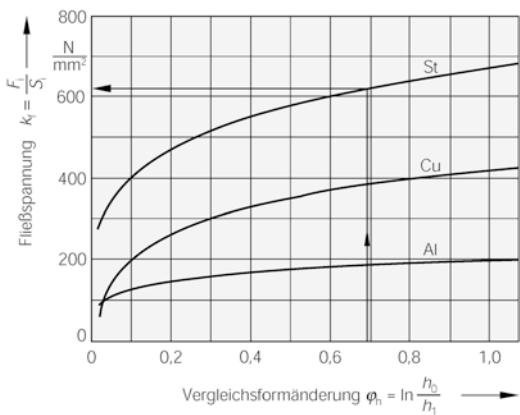


Abb. 3.19 Fließkurven von Stahl [unlegierter Einsatzstahl C10E (Ck 10)], Kupfer und Aluminium Beispiel: Für die Stauchung auf die halbe Ausgangshöhe ergibt sich ein Vergleichsumformgrad $\varphi_v = 0,69$; die dazugehörige Fließspannung für Stahl beträgt $k_f = 620 \text{ N/mm}^2$

näherungsweise erfasst werden. Zwischen φ und ϵ besteht der Zusammenhang²:

$$\varphi = \ln(1 + \epsilon). \quad (3.4)$$

Für kleine Werte von $|\epsilon| < 0,2$ sind beide Kenngrößen etwa gleich groß.

Zur mathematischen Beschreibung von Fließkurven wurden (nach Ludwik u. a.) Potenzfunktionen vorgeschlagen. Für unlegierte und niedriglegierte Stähle sowie für Leichtmetalle gilt beim Kaltumformen für die Fließspannung im Bereich $\varphi = 0,2$ bis $\varphi = 1,0$ die Beziehung

$$k_f = C\varphi^n. \quad (3.5)$$

Für die Konstanten C und n gelten nach Rehle folgende Zusammenhänge:

$$C = R_m(e/n)^n, \quad (3.6)$$

$$n = \varphi_{gl}. \quad (3.7)$$

Hierin bedeuten:

n Verfestigungsexponent,

R_m Zugfestigkeit,

e Basis der natürlichen Logarithmen,

φ_{gl} Umformgrad bei der Gleichmaßdehnung im Zugversuch

Fließkurven, die sich nach (Gl. 3.5) annähern lassen, sind in doppellogarithmischer Darstellung der Fließspannung k_f in Abhängigkeit vom Umformgrad φ eine Gerade. Der Verfestigungsexponent n ergibt sich als $\tan \alpha$ des Anstiegswinkels dieser Geraden.

Die Fließkurve selbst kann aus dem Zugversuch nach DIN EN 10002-1 bis zur Gleichmaßdehnung A_{gl} ermittelt werden, die man aus den Werten für R_m , A_{10} und A_5 näherungsweise berechnen kann:

$$n = \varphi_{gl} = \ln(1 + A_{gl}) = \ln(1 + 2A_{10} - A_5). \quad (3.8)$$

Aus vorverfestigten Proben, die z. B. durch Walzen oder Drahtziehen zu mehr als $\varphi \approx 0,4$ um-

²Nach Definition ergibt sich die wahre Dehnung oder der Umformgrad φ aus:

$$\varphi = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0} = l_0 \frac{\ln \frac{l_1}{l_0} + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \epsilon)$$

geformt wurden, lässt sich im Zugversuch die Fließspannung ermitteln. Die Spannung-Dehnung-Schaubilder solcher Zugproben zeigen fast keinen Dehnungsbereich mehr, sodass die Zugfestigkeit R_m der Fließspannung k_f entspricht.

Im Stauchversuch kann die Fließkurve bis zu Vergleichsumformgraden von $\varphi > 1,0$ ermittelt werden. Beim Stauchen zwischen ebenen Bahnen wird die gleichmäßige Breitung an den Berührungsflächen infolge der Reibung behindert. Die Probe verliert ihre zylindrische Gestalt und baucht entsprechend Abb. 3.20 aus: Kurze Zylinderproben nehmen Tonnenform an, schlanke Proben bauchen an den Enden aus. Dadurch kann keine homogene Umformung erfolgen, der Spannungszustand ist nicht mehr einaxsig. Um dies zu vermeiden, werden die Stauchflächen poliert und geschmiert, Kunststofffolien als Zwischenlage benutzt, oder es wird der Kegelstauchversuch angewendet. Dabei sind Stauchbahnen und Probenstirnflächen kegelig ausgebildet. Die dadurch entstehenden Radialspannungen sollen gerade so groß werden, dass sie die Reibscherspannungen aufheben. Dies ist der Fall, wenn zwischen dem Neigungswinkel α der Kegelflächen und der Reibungszahl μ die Beziehung

$$\mu = \tan \alpha \quad (3.9)$$

besteht. Für Stahl bei Raumtemperatur und bei guter Schmierung gilt $\alpha = 1,5^\circ$; hierbei kann man den Umformgrad noch mit guter Näherung aus der mittleren Probenhöhe errechnen.

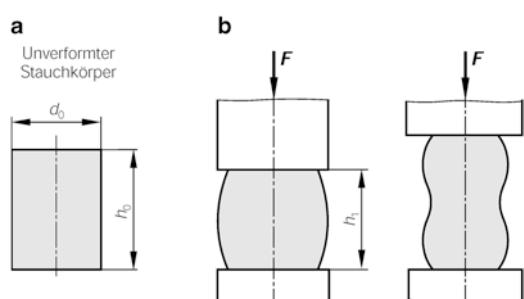


Abb. 3.20 Ausbauchung bei zylindrischen Stauchkörpern: a kurze Probe mit $h_0/d_0 = 1,0$ b schlanke Probe mit $h_0/d_0 = 2,5$

Der Kegelstauchversuch eignet sich auch für die Fließkurvenermittlung an Blechen. Dabei werden die geschichteten Proben in einer Spannhülse zentriert und nach geringer Belastung frei weiter gestaucht. Der Spannungsverlauf wird durch die Trennschichten der Bleche nicht gestört.

Solange der Spannungszustand im Zug- oder Stauchversuch näherungsweise als einachsig angesehen werden kann, gilt für die Formänderungsfestigkeit oder Fließspannung

$$k_f = \frac{F}{A_0} \cdot e^\varphi; \quad (3.10)$$

hierbei bedeuten F die gemessene Umformkraft, A_0 die Fläche vor der Umformung und

$$\varphi = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad \text{bzw.} \quad \varphi = \ln \frac{h_1}{h_0}.$$

Mit Hilfe der Fließkurven können *Umformkräfte* und *Umformarbeiten* berechnet werden.

Nach Lösungsansätzen der elementaren Plastizitätstheorie ergibt sich zum verlustfreien Umformen eines nicht verfestigten Werkstoffes die ideelle Umformarbeit zu

$$W_{id} = V \int_0^{\varphi_1} k_f d\varphi = V k_f \varphi_1. \quad (3.11)$$

Hierin bedeutet:

V umgeformtes Werkstoffvolumen,
 k_f Fließspannung des Werkstückstoffs,
 φ Umformgrad

Bei verfestigten Werkstoffen ist eine mittlere Fließspannung k_{fm} als Integralwert einzusetzen:

$$k_{fm} = \frac{1}{\varphi_1} \int_0^{\varphi_1} k_f d\varphi. \quad (3.12)$$

Näherungsweise kann auch der arithmetische Mittelwert der Fließspannungen vor und nach der Umformung aus der Fließkurve berechnet werden:

$$k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{fl}}{2} \quad (3.13)$$

Bei den Umformverfahren in der Praxis bewirken zusätzliche Verluste durch Reibung, innere Schiebungen im Werkstoff, Biegung u. ä. eine im Vergleich zu (Gl. 3.11) größere Umformarbeit:

$$W_{ges} = \frac{W_{id}}{\eta_F}. \quad (3.14)$$

Außer den Näherungsansätzen zur Abschätzung dieser Verluste muss besonders bei komplexer Werkstückgeometrie der *Umformwirkungsgrad* η_F experimentell bestimmt werden ($\eta_F = 0,4$ bis $\eta_F = 0,8$). Dieser ist abhängig von der äußeren Reibung an den Werkzeugflächen, der Art des Umformverfahrens, dem umgeformten Werkstoff, der Werkstückgeometrie und dem Stofffluss. Häufig wird er aus dem Verhältnis ideelle Umformkraft F_{id} zur tatsächlich erforderlichen Umformkraft F_{ges} bestimmt:

$$\eta_F = \frac{F_{id}}{F_{ges}}. \quad (3.15)$$

Diese Beziehung gilt allerdings nur für statioäre Vorgänge; bei allen anderen Umformvorgängen muss statt mit F_{ges} mit einer mittleren Kraft nach

$$\bar{F} = W_{ges}/s \quad (3.16)$$

mit s als dem Umformweg gerechnet werden.

Hinsichtlich der *Kraftwirkung* ist es zweckmäßig, die Umformverfahren in solche mit *unmittelbarer* und solche mit *mittelbarer* Kraftwirkung zu unterteilen. Bei den Umformverfahren mit unmittelbarer Kraftwirkung, wie z. B. beim Stauchen, Recken und Walzen, wirkt die äußere Kraft in der Hauptumformrichtung. Für eine idealisierte, verlustfreie Umformung ergibt sich die senkrecht zur gedrückten Fläche s erforderliche ideelle Umformkraft F_{id} :

$$F_{id} = A_1 k_f. \quad (3.17)$$

Hierbei ist A_1 die augenblickliche Querschnittsfläche senkrecht zur Kraft und k_f die augenblickliche Fließspannung des Werkstoffs.

Für Umformverfahren mit *mittelbarer* Kraftwirkung, wie z. B. für das Voll-Vorwärts-Fließpressen, Stab- und Drahtziehen sowie Tief-

ziehen, muss zusätzlich der Umformgrad berücksichtigt werden:

$$F_{\text{id}} = A_1 k_{\text{fm}} \varphi_1. \quad (3.18)$$

In dieser Gleichung ist A_1 der Endquerschnitt, k_{fm} die mittlere Fließspannung (gemittelt zwischen k_{f0} am Anfang und k_{f1} am Ende des Vorgangs) und φ_1 der Umformgrad am Ende der Umformung. Die tatsächlich erforderliche Kraft lässt sich mit Hilfe des Umformwirkungsgrads η_F berechnen. Entsprechende Beispiele werden bei den einzelnen Verfahren erläutert.

Die Fließspannung und damit die Fließkurvencharakteristik hängt in großem Maße von der Umformtemperatur ab, wie Abb. 3.21 zeigt. Je höher die Umformtemperatur ist, desto niedri-

ger ist die (Warm-) Fließspannung bei konstanter Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi} = d\varphi/d\tau$, und um so flacher ist der Verfestigungsanstieg der Fließkurven.

Besonders dann, wenn die Temperatur so hoch ist, dass eine Rekristallisation während des Umformprozesses ablaufen kann, nimmt der Gleitwiderstand auf den Kristallebenen erheblich ab. Bei diesem zeitabhängigen Prozess wird die auftretende Verfestigung sofort wieder rückgängig gemacht. Mit einer zweckmäßigen Temperaturlösung kann auch ein bestimmtes Gefüge erzielt werden (z. B. feinkristallines Grobblech).

Während beim Kaltumformen vor allem der Umformgrad φ die Form der Fließkurve beein-

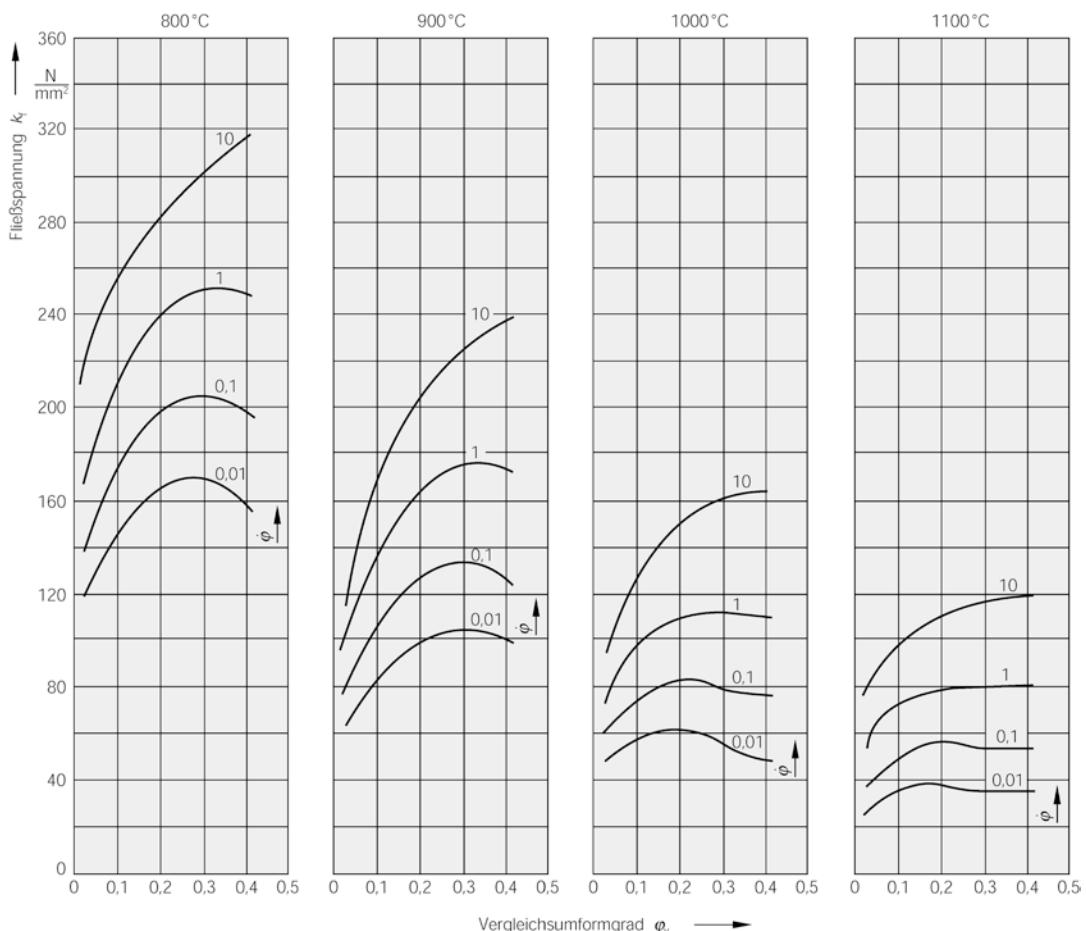


Abb. 3.21 Warmfließkurven bei verschiedenen Temperaturen für Stahl C 45, Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi} = d\varphi/dt$ in s^{-1} . (Nach H.-G. Müller)

flusst, ist für das Warmumformen die *Umformgeschwindigkeit* $\dot{\varphi}$ von ausschlaggebender Bedeutung. Eine größere Umformgeschwindigkeit behindert die Rekristallisation während des Umformens oder macht sie sogar unmöglich. Abb. 3.22 zeigt als Beispiel für den Umformgrad $\varphi = 0,3$ die Fließspannungen k_f für den Stahl C 45 (nach H.-G. Müller). Je höher die Umformtemperatur ist, desto steiler verläuft die Kurve.

Bei $\dot{\varphi} = 10 \text{ s}^{-1}$ fließt der Stahl C 45 bei einer Umformtemperatur von 1100°C erst bei der dreifachen Fließspannung im Vergleich zu $\dot{\varphi} = 0,01 \text{ s}^{-1}$. Das Werkstück hat bei dem schnelleren Umformvorgang eine höhere Festigkeit als ein gleiches Werkstück bei 900°C , das langsam umgeformt wird ($\dot{\varphi} = 0,01 \text{ s}^{-1}$).

Der Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf die Fließspannung kann mit sogenannten *Plastometern* ermittelt werden. Diese Maschinen er-

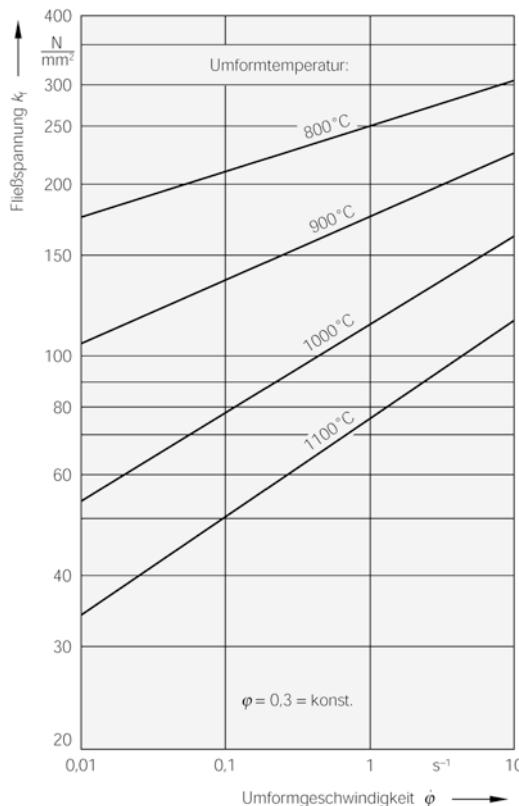


Abb. 3.22 Fließspannung k_f für den Stahl C 45 in Abhängigkeit von der Umformgeschwindigkeit

lauben z. B. ein Stauchen mit konstanter Umformgeschwindigkeit. Da bei homogener Umformung nach der Gleichung

$$\dot{\varphi} = d\varphi/d\tau = v_{wz}/h \quad (3.19)$$

von der Werkzeuggeschwindigkeit v_{wz} und der augenblicklichen Probenhöhe h abhängt, wird bei Plastometern die Stauchbahngeschwindigkeit hydraulisch oder mechanisch nach entsprechenden Kurvenscheiben gesteuert.

3.3 Druckumformen

Bei den Verfahren für das Druckumformen wird der plastische Zustand im Werkstoff durch ein- oder mehrachsige Druckspannungen hervorgerufen. Nach DIN 8583 gehören dazu die *Walzverfahren* (Halbzeugherstellung und sog. Stückwalzverfahren). Die Freiform- und Gesenkformverfahren umfassen die Druckumformverfahren mit gegeneinander bewegten Werkzeugen. Diese können die Form des Werkstücks gar nicht oder nur teilweise (*Freiformen*) bzw. zu einem wesentlichen Teil oder völlig umfassen (*Gesenkformen*)

Beim Eindrücken dringt das Werkzeug in das Werkstück ohne oder mit einer Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück entlang der Oberfläche ein.

Den Durchdrückverfahren kommt in der Umformtechnik eine sehr große Bedeutung zu. Das Verjüngen und das Fließpressen werden zur Herstellung einzelner Werkstücke angewendet (z. B. Radbefestigungsschrauben). *Strangpressen* dient vorwiegend der Herstellung von Halbzeug (Hohl- und Winkelprofile aus Aluminiumlegierungen).

3.3.1 Walzen

3.3.1.1 Definition und Einteilung nach DIN 8583

Das Verfahren ist definiert als stetiges oder schrittweises Druckumformen mit sich drehen-

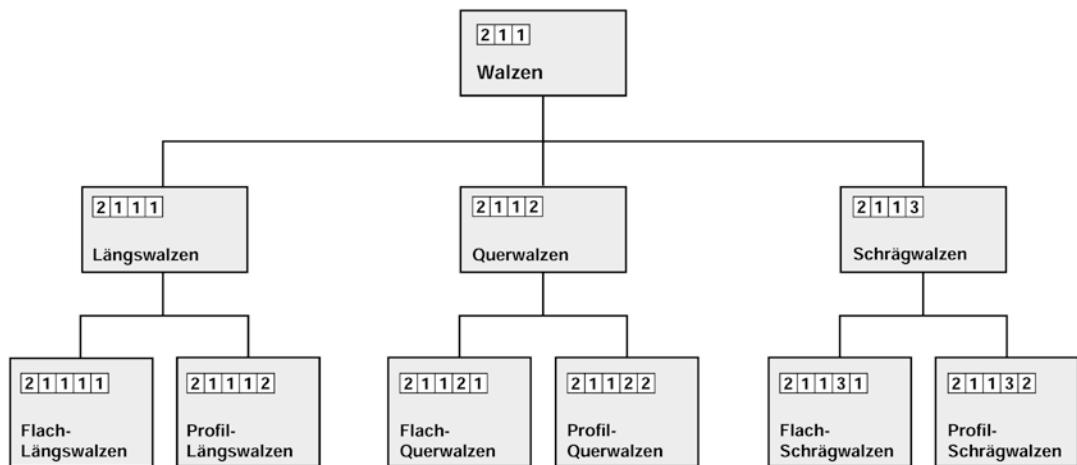


Abb. 3.23 Einteilung der Walzverfahren nach DIN 8583

den Werkzeugen (Walzen). Beim Walzen von Hohlkörpern werden mitunter auch Gegenwerkzeuge (z. B. Dorne, Stopfen, Stangen) verwendet. Die Walzen können entweder angetrieben oder vom Walzgut mitgeschleppt werden. In Sonderfällen werden an Stelle einer oder mehrerer Walzen anders geformte Werkzeuge verwendet, z. B. hin- und hergehende Backen beim Gewindewalzen.

Im Ordnungssystem der Druckumformverfahren nach DIN 8583 unterscheidet man Längs-, Quer- und Schrägwälzen, wie die Übersicht Abb. 3.23 zeigt. Beim **Längswalzen** wird das Walzgut senkrecht zu den Walzenachsen ohne Drehung durch den Walzspalt bewegt. Es tritt als Strang aus den gegensinnig umlaufenden Walzen aus. Der Strang mit gleichbleibendem Querschnitt ist meist Halbzeug, das weiter verarbeitet wird. Die Erzeugnisse können nach ihrer Geometrie in Flach- und Profilprodukte unterteilt werden. Die Werkzeuge heißen dementsprechend *Flach-* bzw. *Profilwalzen*, wie in Abb. 3.24 angedeutet.³

Nach diesen Walzverfahren können auch Hohlkörper hergestellt werden. Hervorzuheben sind das Walzen von Vierkantrohren und die Rohrherstellung nach dem Pilgerschrittverfahren.

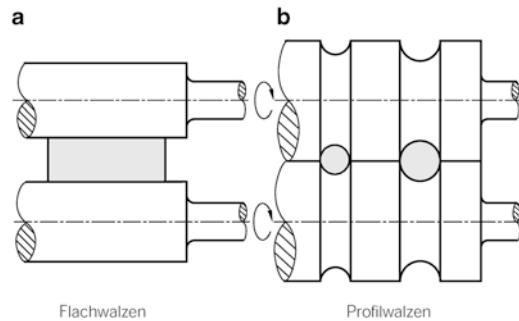


Abb. 3.24 Walzeneinheiten beim Längswalzen

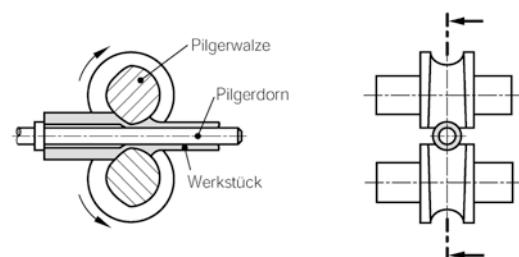


Abb. 3.25 Pilgerschrittwalzen zum Erzeugen nahtloser Rohre (Mannesmann-Verfahren)

Das *Pilgerschrittwalzen* dient zum Erzeugen dünnwandiger nahtloser Rohre. Hierbei erfolgt das Umformen abschnittsweise durch Strecken der dickeren Rohrwand über einem Dorn wie in Abb. 3.25. Üblicherweise wird beim Warm-

³Walzen von Schienen, Fa. Voestalpine AG. [youtube-wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=JyfjwvIwzqo).

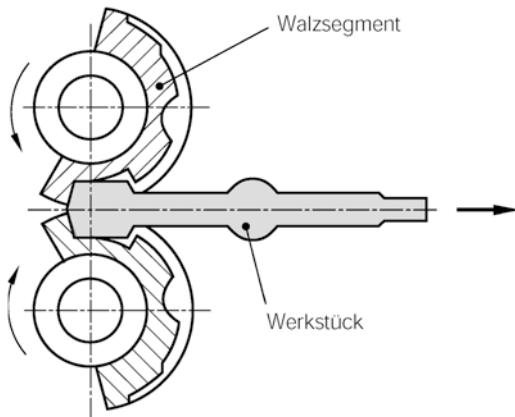


Abb. 3.26 Reckwalzen zum Erzeugen von Formteilen (Massenverteilung für Gesenkschmiede-Rohlinge)

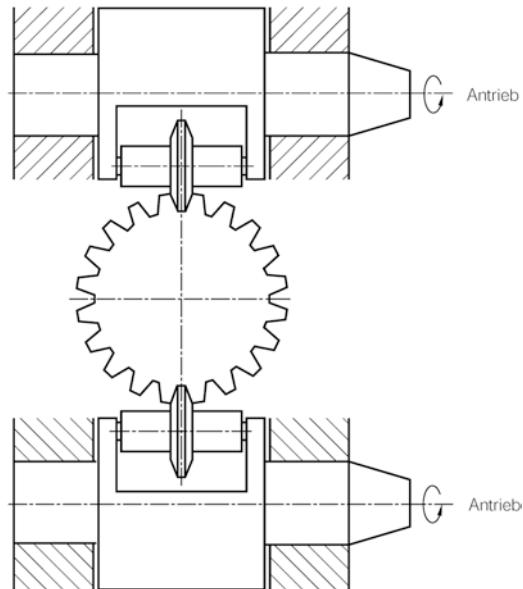


Abb. 3.27 Planetenwalzverfahren für Vielkeilwellen (Grob-Verfahren)

walzen ein zylindrischer Dorn, beim Walzen bei Raumtemperatur ein kegeliger Dorn benutzt.

Das *Reckwalzen* ist ein Profil-Längswalzen von Vollkörpern, bei dem der austretende Querschnitt nicht konstant bleibt. Die Walzen, entsprechend Abb. 3.26, sind so ausgebildet, dass sich der Profilquerschnitt in Umfangsrichtung stetig oder sprunghaft ändert. Das Verfahren wird häufig angewendet, um für das Schmieden im Gesenk Zwischenformen mit günstiger Massenverteilung herzustellen.

Das Prinzip des Längswalzens kann auch als Planetenwalzverfahren angewendet werden. Abb. 3.27 zeigt die Arbeitsweise. Zwei angetriebene Walzköpfe rotieren gegenläufig; an ihrem Umfang sind planetenartig die Profilwalzen gelagert. Diese zeigen ein Profil, das der Lückenform des zu erzeugenden Werkstücks entspricht. Sie treffen bei jeder Umdrehung gleichzeitig auf dem Werkstück auf. Dieses dreht sich schrittweise weiter, sodass nach einer vollständigen Umdrehung die gesamte Anzahl der Zähne am Umfang ausgewalzt ist. Diesem Bewegungsablauf ist eine Vorschubbewegung des Werkstücks in Längsrichtung überlagert.

Beim **Querwalzen** rotiert das Walzgut ohne Vorschubbewegung zwischen gleichsinnig umlaufenden Walzen um die eigene Achse. Auch bei diesem Druckumformverfahren unterscheidet man das Querwalzen von Vollkörpern

wie in Abb. 3.28 und von Hohlkörpern entsprechend Abb. 3.29.

Beim *Walzen von Ringen* werden geschlossene Hohlkörper hergestellt, deren Umfang sich ständig vergrößert.

Zum Profil-Querwalzen von Vollkörpern gehört das *Gewindewalzen*, das Abb. 3.30 zeigt. Falls die Genauigkeitsanforderungen nicht zu hoch sind, ist das Walzen von Gewinden häufig wirtschaftlicher als eine spanende Gewindeherstellung. Es wird als Kaltumformverfahren mit

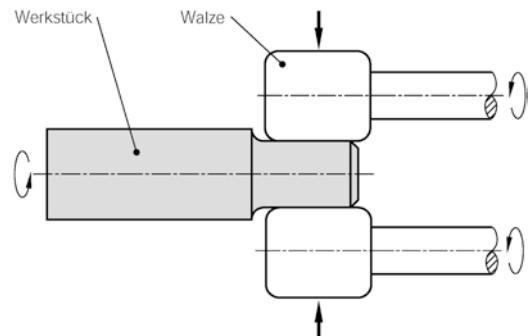


Abb. 3.28 Querwalzen von Vollkörpern für das Glattwalzen im Einstechverfahren

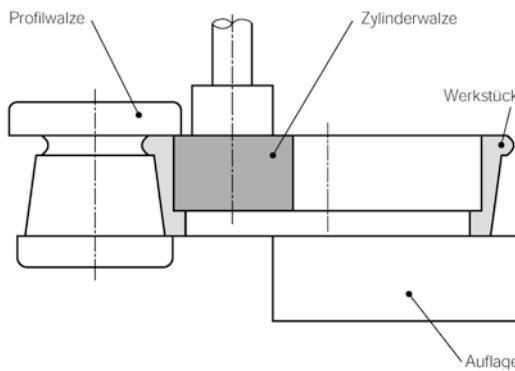


Abb. 3.29 Querwalzen von Hohlkörpern für das Walzen von Eisenbahnrädern

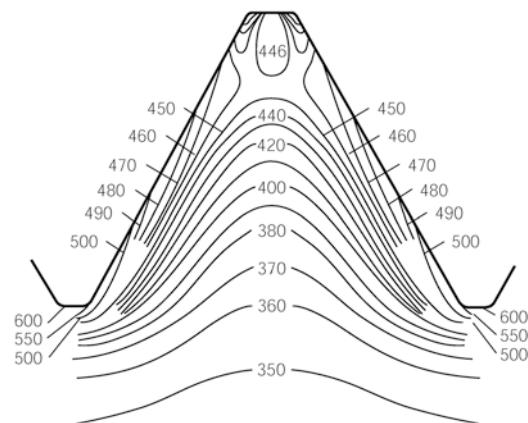


Abb. 3.31 Härteverteilung nach dem Gewindewalzen (Gewinde M8, vergüteter Chrom-Vanadium-Stahl; Kernhärte 340 HV 0,1)

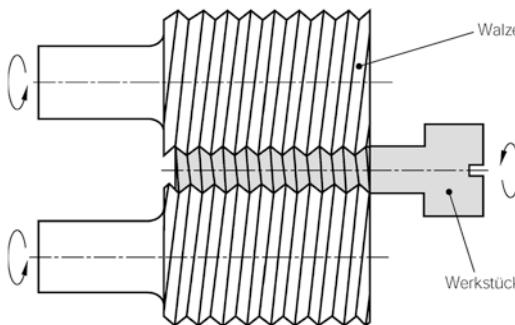


Abb. 3.30 Profil-Querwalzen von Vollkörpern für das Gewindewalzen im Einstechverfahren

Werkstoffen durchgeführt, deren Zugfestigkeit R_m unter 1200 N/mm^2 liegt und deren Mindestbruchdehnung A_5 8 % beträgt. Die gewalzten Gewinde (sowie Schnecken, Rillen, Rändelungen und Verzahnungen) haben folgende Vorteile:

- Stark verfestigte Gewindeflanken,
- nicht unterbrochener Faserverlauf,
- pressblank Oberfläche,
- erhöhte Dauerfestigkeit,
- ausreichende Genauigkeit,
- erhebliche Werkstoffeinsparung gegenüber dem Spanen,
- minimale Fertigungszeit auf Automaten.

Die vom Kern in Richtung der äußeren Randzonen ansteigende Härteverteilung eines gewalzten Gewindes geht aus Abb. 3.31 hervor. Auf den äußeren Gewindeflanken tritt eine weitere

Härtesteigerung beim Erzeugen der pressblanken Oberfläche auf. Im Gegensatz zu den anderen Verfahren der spanlosen Zahnradherstellung (Schmieden, Pressen, Strangpressen, Fließpressen), deren gemeinsames Merkmal das Kopieren der Werkstückform von einer Negativform des Werkzeugs ist, kann das Walzen von Gewinden und Verzahnungen kinematisch mit dem Wälzfräsen verglichen werden. Das Umformen erfolgt allmählich; die erforderlichen Maximalkräfte sind bedeutend niedriger als beim gleichzeitigen Umformen eines ganzen Zahnkranzes.

Hinsichtlich der Werkzeuganordnung beim Gewindewalzen müssen verschiedene Verfahren unterschieden werden. Das älteste Verfahren, das in der Automobilzulieferindustrie weit verbreitet ist, verwendet als Umformwerkzeuge Flachbacken, siehe Abb. 3.32. Der Schraubenrohling wird zwischen den flachen Backen gewalzt. Diese enthalten das Gewindeprofil unter dem Winkel der Gewindesteigung. Das Gewinde ist nach 1,1 Überrollvorgängen auf dem parallelen Backenabschnitt fertiggeformt.

Bei runden Werkzeugen muss das Gewindeprofil ebenfalls unter dem Steigungswinkel des Gewindes angebracht sein, wenn die Drehachsen von Werkstück und Werkzeug zueinander parallel stehen. Dies ist beispielsweise beim Radial-Gewindewalzverfahren der Fall, das Abb. 3.33 verdeutlicht. Dabei liegt das

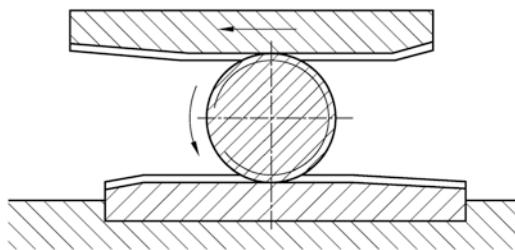


Abb. 3.32 Flachbackenwerkzeuge für das Erzeugen von Gewinden oder Vielkeilwellen (Roto-Flo-Verfahren)

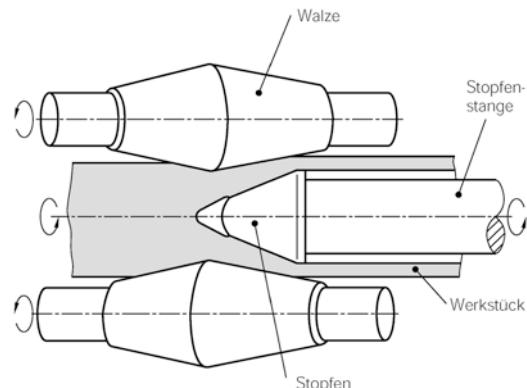


Abb. 3.34 Schrägwälzen mit doppelkegeligen Walzen (Stopfenwalzwerk zur Rohrherstellung)

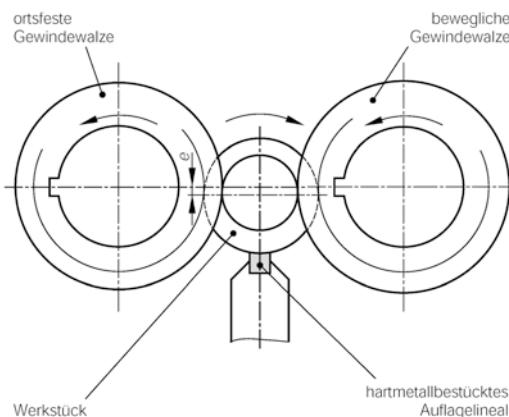


Abb. 3.33 Gewindewalzen mit einseitiger radialer Zustellung. e = Exzentrizität des Werkstückmittelpunktes

Werkstück auf einem hartmetallbestückten Auflagelineal, das den Werkstückmittelpunkt um das Exzentrizitätsmaß e unterhalb der Walzenachsen fixiert. Die bewegliche Gewindewalze wird durch eine hydraulische Vorrichtung radial gegen das Werkstück und die ortsfeste Gewindewalze zugestellt. Dieses Verfahren ist bis zu einer Gewindelänge von etwa 120 mm geeignet.

Längere Gewinde müssen im *Axialverfahren* hergestellt werden. Hierbei wird das Werkstück gleichzeitig beim radialem Zustellen der Gewindewalzen axial vorgeschoben. Die Vorschubgeschwindigkeiten liegen zwischen 80 mm/min und 200 mm/min. Im Durchlaufverfahren sind nach diesem Walzprinzip Gewindestangen mit „endlosen“ Gewinden herstellbar.

Beim **Schrägwälzen** sind die Walzenachsen entsprechend Abb. 3.34 gekreuzt. Dadurch entsteht ein Längsvorschub in dem um seine

Längsachse rotierenden Werkstück. Das Werkstück wird im Walzspalt durch Anlageleisten und eine Führungswalze (nicht im Bild gezeigt) gehalten. Die doppelkegeligen Arbeitswalzen sind unter einem Kreuzungswinkel von 3° bis 6° angeordnet, sodass das Werkstück schraubenförmig in Vorschubrichtung über die Stopfenstange bewegt wird. Infolge des Kegelwinkels verengt sich der Walzspalt; dies führt zu einer Stauchung des Werkstoffes mit seitlichem Ausweichen. Die radialen Zugspannungen verursachen im Zusammenwirken mit dem ständigen Wechsel der Beanspruchungsrichtung ein Aufreißen des Werkstücks im Kern. Der rotierende Stopfen glättet das Rohrinnere und bewirkt eine präzise Wanddickenauswalzung im Querwalzteil des Walzspalts.

Schrägwälzverfahren werden auch mit scheiben- und kegelförmigen Walzen bei der Rohrherstellung sowie mit zylinderförmigen Walzen beim *Glattwalzen* von Rohren und Stäben wie in Abb. 3.35 eingesetzt. Beim Gewindewalzen im Durchlaufverfahren können schräggestellte Profilwalzen mit in sich geschlossenen Gewindefurchen eingesetzt werden; dies verbilligt die Werkzeugherstellung. Abb. 3.36 zeigt das Prinzip.

3.3.1.2 Verhältnisse im Walzspalt

Zur Konstruktion von Walzwerken und deren Antrieben ist es notwendig, die Walzkräfte,

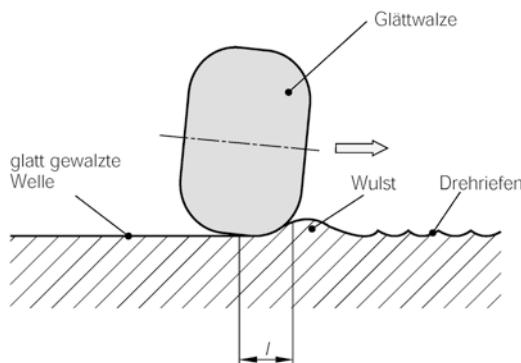


Abb. 3.35 Schräggestellte Glättwalze zum Einebnen von Drehriften; erreichbare Rauheit $R_z \approx 0,5\text{mm}$. l = Länge der Eindruckmarke

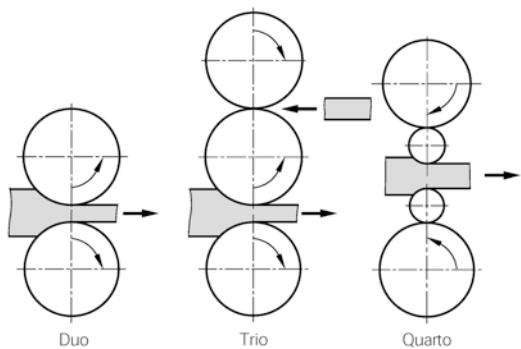


Abb. 3.37 Walzenanordnung in Walzgerüsten (schematisch)

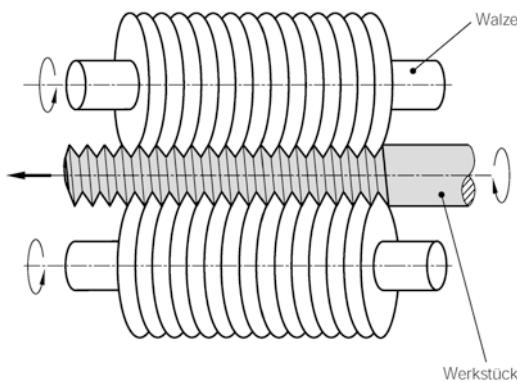


Abb. 3.36 Schräggestellte Profilwalzen zur Gewindeherstellung (Durchlaufverfahren für Endlosgewinde)

Walzmomente, den Arbeitsbedarf und die Walzleistungen vorausberechnen. Dazu müssen die Verhältnisse im Walzspalt betrachtet werden; dies geschieht am übersichtlichsten an Walzen für die Flachmaterialherstellung.

Die im Stahlwerk abgegossenen Blöcke (Blockguss von Einzelstücken) oder *Stranggussbrammen* (kontinuierlicher Endlosguss) werden mit zylindrischen oder leicht balligen Walzen zu Grobblech, Warmbreitband und dieses dann weiter zu Kaltband, z. B. zu Karosserieblech mit 2050 mm Breite und 0,7 mm Dicke, ausgewalzt. Die Anordnung der Walzen kann paarig sein (Duo), aus drei (Trio) oder vier Walzen (Quarto) bestehen, wie aus Abb. 3.37 hervorgeht.

In neueren Walzanlagen sind die einzelnen Walzgerüste hintereinander aufgestellt und bilden kontinuierlich arbeitende *Walzstraßen*, z. B. Warmbreitbandstraßen mit sieben Quarto-Gerüsten im Abstand von 1,5 m. Dadurch werden die Walzzeiten erheblich verkürzt sowie engere Maßtoleranzen, größere Fertigungslängen, höhere Walzgeschwindigkeiten und höhere Leistungen erreicht. Erforderlich sind aber lange Werkshallen bis zu 400 m Länge und der Einsatz von Gleichstrommotoren mit einer präzisen Regelungstechnik für die von Gerüst zu Gerüst zunehmende Bandgeschwindigkeit (z. B. 30 m/s bei Warmbreitband mit der Endwalztemperatur von 900 °C).

Ein großer Teil der Walztechnik beruht auf Erfahrung. In den letzten Jahren konnten jedoch viele Vorgänge durch plastizitäts-theoretische Betrachtungen erfasst werden. An dieser Stelle soll nur kurz die sog. *elementare Walztheorie* erläutert werden.

Die grundlegenden Bezeichnungen sind an Hand der Walzspaltgeometrie beim Flachwalzen, siehe Abb. 3.38, zu erkennen:

- Der *Walzspalt* ist der Raum zwischen den Walzen, der durch die Verbindungslienien EE'/AA' und die Walzgutbreite b_m begrenzt wird.
- Die *Walzebene* wird durch die Fläche gebildet, die durch die Walzenachsen gelegt werden kann. (Sie verläuft durch die Auslaufpunkte des Walzguts A und A').

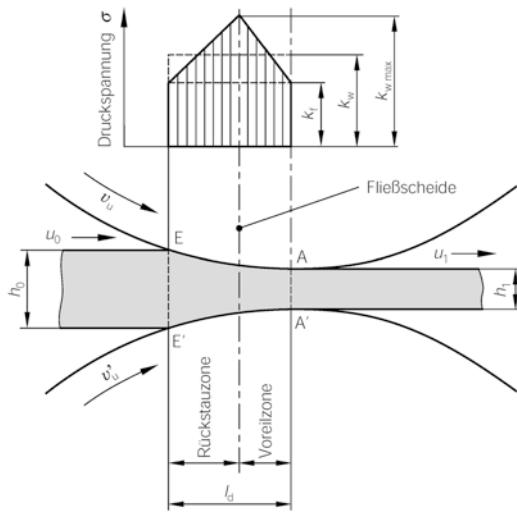


Abb. 3.38 Verhältnisse im Walzspalt beim Flachwalzen (schematisch). u_0 Einlaufgeschwindigkeit u_1 Auslaufgeschwindigkeit des Walzguts h_0 Ausgangsdicke h_1 Enddicke des Walzguts v_u Umfangsgeschwindigkeit der Walzen l_d gedrückte Länge E Einlaufpunkt an der Walze A Auslaufpunkt an der Walze k_f Fließspannung k_w Umformwiderstand $k_{w\max}$ maximaler Umformwiderstand

- Als *gedrückte Länge* l_d bezeichnet man die Projektion des Walzbogens EA auf die gedachte Mittellinie des Walzguts. Die gedrückte Fläche $A_d = l_d b_m$ ist die Projektion der Berührungsfläche zwischen Walzgut und Walzen. Die mittlere Breite des Walzguts ergibt sich aus $b_m = (b_0 + b_1)/2$.
- Die *Walzenöffnung* ist der kleinste Abstand AA' zwischen den Walzen in der Walzebene und wird durch die Anstellung der Walzen verändert. Der Walzensprung wird durch die Nachgiebigkeiten im Walzgerüst verursacht, er ist eine Vergrößerung der Walzenöffnung beim Durchgang des Walzguts.
- Die *elastische Abplattung* der Walzen führt zu einer Vergrößerung des Walzenradius R .

In Abb. 3.38 läuft das Walzgut mit der Ausgangshöhe h_0 und der Einlaufgeschwindigkeit u_0 in den Walzspalt ein. Es wird auf die Endhöhe h_1 gewalzt und verlässt das Gerüst mit der Auslaufgeschwindigkeit u_1 . Im Walzspalt stimmt bei näherungsweiser Betrachtung der Vorgänge nur in einer Ebene die Walzgutgeschwindigkeit

u_m mit der Umfangsgeschwindigkeit der Walzen v_m überein. Diese Ebene wird *Fließscheide* genannt.

Vor der Fließscheide (in Durchlaufrichtung gesehen) liegt die *Rückstauzone*. In diesem Bereich ist die Geschwindigkeit des Walzguts kleiner als die Walzenumfangsgeschwindigkeit v_u . In der *Voreilzone* zwischen Fließscheide und Walzspaltauslauf ist die Walzgutgeschwindigkeit um etwa 3 bis 6 % größer als v_u .

Im oberen Teilbild von Abb. 3.38 sind die *Spannungsverhältnisse* im Walzspalt dargestellt. Der Walzdruck entspricht dem Walzspalteintrund -auslauf der Fließspannung k_f . Bedingt durch die Reibungsbehinderung an den Walzenflächen steigt der Druck bis zur Fließscheide an. Der mittlere Druck k_w lässt sich mit der Beziehung $k_w = k_f/\eta_F$ abschätzen.

Für das *Greifen des Walzguts* ist die Reibung von großem Einfluss. Abb. 3.39 a verdeutlicht die Greifbedingungen im Walzspalt. Zur Aufrechterhaltung des Walzvorgangs muss eine Fließscheide im Walzspalt vorhanden sein. Vor der Fließscheide (von der Einlaufseite her gesehen) wird das Walzgut durch die Walzen mitgezogen, dahinter zieht das Walzgut die Walzen mit. Ein Greifen ist möglich, wenn der Walzwinkel α kleiner als der Reibungswinkel ρ ist. Grundsätzlich gilt

$$\tan \alpha = \mu \leq \tan \rho, \quad (3.20)$$

mit dem Walzwinkel $\alpha \approx \sqrt{\Delta h/R}$.

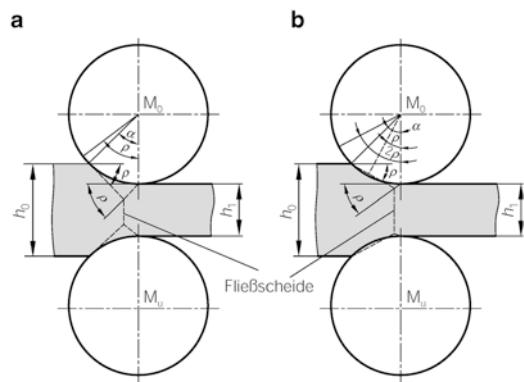


Abb. 3.39 Winkelverhältnisse im Walzspalt beim Flachwalzen: **a** Greifen des Walzgutes **b** Durchziehen des Walzgutes

Das Greifvermögen ist abhängig von der

- *Walzguttemperatur*, d. h. mit steigender Temperatur θ sinkt die Reibungszahl, z. B. von $\mu = 0,5$ bei $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $\mu = 0,25$ bei $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, der
- *Walzengeschwindigkeit* (von $\mu = 0,6$ bei $1,75\text{ m/s}$ auf $\mu = 0,5$ bei $3,5\text{ m/s}$ für $\theta = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) und von der
- *Oberfläche*, d. h. gegossene, raue Walzen greifen besser als geschmiedete, glatte.

Nachdem die Walzen das Walzgut gegriffen haben, spricht man vom *Durchziehen*. Die Winkel ändern sich, wie Abb. 3.39b zeigt. Der Normaldruck auf das Walzgut verteilt sich längs des Eingriffsbogens, die Resultierende kann bei $\alpha_0/2$ angesetzt werden. Damit ergibt sich unter Berücksichtigung des *Coulomb'schen* Reibgesetzes $F_R = \mu F_N$ die Beziehung

$$\tan \alpha/2 \leq \mu = \tan \rho . \quad (3.21)$$

Hieraus folgt die Durchziehbedingung $\alpha \leq 2\rho$, d. h., der Eingriffswinkel α ist kleiner als der doppelte Reibungswinkel. Beim Walzen kann der Eingriffswinkel also doppelt so groß sein wie beim Greifen. Man versucht daher in der Praxis, den Walzgutfang anzuspitzen, oder das Walzgut zu beschleunigen, um Greifen zu erzwingen. Auch durch partielle Kühlung kann die Reibungszahl am Walzgutfang heraufgesetzt werden, infolgedessen vergrößert sich der Eingriffswinkel.

Die Theorie des Flachwalzens gilt in erster Linie für breitungsfreies Walzen. In Wirklichkeit aber tritt beim Walzen auch eine *Breitung* des Walzguts ein. Von Einfluss auf die Breitung sind.

- die Geometrie des Walzspalts,
- der Werkstoff und seine Temperatur,
- die Geschwindigkeit und
- die Reibung, z. B. gilt für das Walzen von Stahl im Bereich $\theta = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\mu = 1,05 - 0,5 \cdot \frac{\theta}{1000} - 0,0056 \cdot v_u . \quad (3.22)$$

Die Reibung beeinflusst beim Warmwalzen ebenfalls erheblich die *Kinematik des Stoffflusses*.

Dies verdeutlicht Abb. 3.40. Die Geschwindigkeitsverhältnisse sind am Beispiel des breitungsfreien Warmbandwalzens dargestellt. Da die Walzguthöhe h in Walzrichtung ständig kleiner wird, muss die Walzgutgeschwindigkeit u in der gleichen Richtung ständig zunehmen. Theoretisch gäbe es nur einen einzigen Punkt im Walzspalt, an dem sich Walzgut und Walze gleich schnell bewegen. Dies ist die schon erläuterte Fließscheide. In Wirklichkeit bildet sich aber eine breitere *Haftzone* aus, da der Werkstofffluss inhomogen verläuft. Die Ausdehnung der zwischen den beiden Gleitzonen liegenden Haftzone nimmt mit wachsender Reibung zu. Dadurch kann der Einfluss der Geschwindigkeitszunahme in der Voreilzone vernachlässigt werden.

Mit $\omega = 2\pi n_w / 60$ lässt sich aus der Walzendrehzahl n_w und dem Walzwinkel α die mittlere

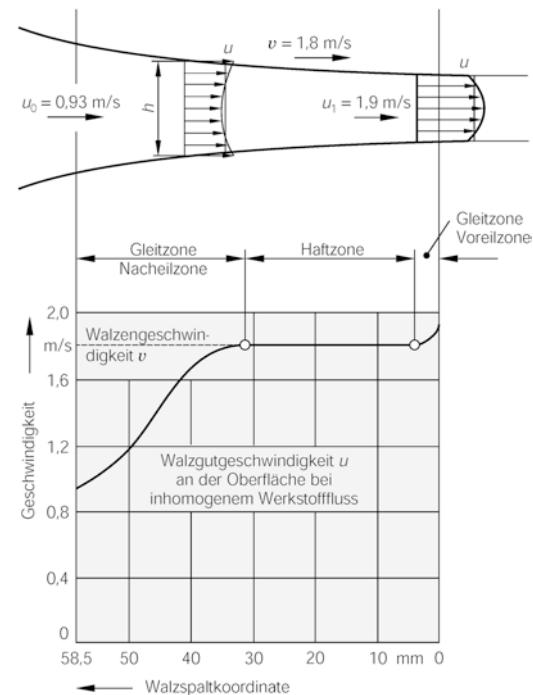


Abb. 3.40 Geschwindigkeitsverteilung im Walzspalt nach Pawelski; Warmbandwalzung bei $= 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, Eintrittshöhe $h_0 = 20\text{ mm}$, Austrittshöhe $h_1 = 9,8\text{ mm}$, Walzenradius $R = 325\text{ mm}$, abgeplatteter Radius $R' = 335\text{ mm}$ $v = \text{Walzengeschwindigkeit}$, $u = \text{Walzgutgeschwindigkeit}$

Umformgeschwindigkeit ermitteln, nach der die gültige Warmfließkurve (Abb. 3.11) ausgesucht werden muss:

$$\dot{\varphi}_m = \frac{\omega}{\alpha} \cdot \varphi_1 \quad \text{in s}^{-1}. \quad (3.23)$$

Beim Warmwalzen von Grobblechen gilt $\dot{\varphi}_m = 0,1 \text{ s}^{-1}$, beim Blockwalzen $\dot{\varphi}_m = 1$ bis 10 s^{-1} , beim Bandwalzen $\dot{\varphi}_m = 10$ bis 300 s^{-1} und beim Drahtwalzen $\dot{\varphi}_m = 1000 \text{ s}^{-1}$.

In Abb. 3.41 ist der Verlauf der Fließspannung k_f und der Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ in Abhängigkeit von der Walzspaltkoordinate x dargestellt. Es ergibt sich ein $\dot{\varphi}$ -Maximum innerhalb des Walzspalts. Die Fließspannung k_f ist beim Warmwalzen in stärkerem Maße von der Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ als vom Vergleichsumformgrad abhängig. Deshalb ergibt sich im Walzspalt zur Austrittsseite hin ebenfalls ein Abfall von k_f .

3.3.1.3 Kraft- und Arbeitsbedarf beim Walzen

Die vertikal ansetzende Walzkraft F_w , die als Resultierende der Normalspannungen über dem den Werkstoff stauchenden Walzenbogen wirkt,

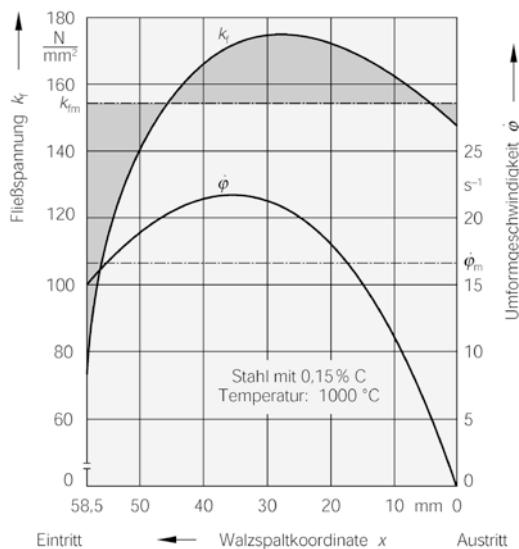


Abb. 3.41 Verlauf der Fließspannung k_f und der Umformgeschwindigkeit längs des Walzspalts, Warmbandwalzung. (Nach K.-H. Weber)

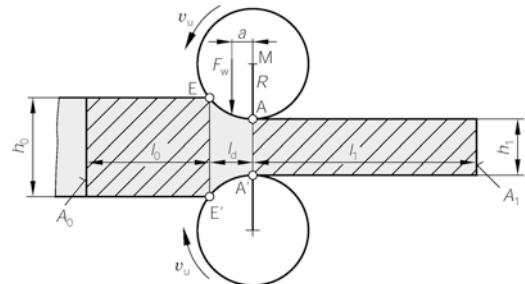


Abb. 3.42 Vertikale Walzkraft F_w

a Hebelarm (halbe gedrückte Länge l_d) M Walzenmittelpunkt R Walzenradius ($R = D/2$) h_0 Ausgangshöhe h_1 Endhöhe l_0 Ausgangslänge eines Volumenabschnitts l_1 Endlänge eines Volumenabschnitts A_0 Ausgangsfläche des Walzguts A_1 Endfläche des Walzguts

greift mit dem Hebelarm a vom Walzenmittelpunkt an, Abb. 3.42. Sie wird berechnet aus:

$$F_w = A_d k_w = A_d \frac{k_f}{\eta_F}. \quad (3.24)$$

Die gedrückte Fläche A_d ergibt sich aus der mittleren Breite b_m und der sog. gedrückten Länge l_d zu

$$A_d = b_m l_d = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot \sqrt{R \Delta h}. \quad (3.25)$$

Als Hebelarm a kann näherungsweise die halbe gedrückte Länge l_d angesetzt werden. Dies setzt eine konstante Normaldruckverteilung über die ganze gedrückte Länge voraus, was beim Kaltwalzen oft nicht exakt zutrifft. Vor- und Rückzüge mindern die Druckverteilung in Abb. 3.38 und verschieben die Fließscheide zur Einlauf- oder Auslaufebene. Die Druckverteilung hängt auch vom Walzenradius R und der Stichabnahme Δh ab. Mit zunehmendem R und Δh wächst auch l_d an, und damit nehmen die Reibung und der Umformwiderstand k_w zu.

Man kann dies in der Rechnung durch größere Werte für den Hebelarm a berücksichtigen:

- $a = 0,4 l_d$ beim Kaltwalzen,
- $a = 0,5 l_d$ beim Warmwalzen von Rechteck-Querschnitten,
- $a = 0,6 l_d$ für runde Profile (Abb. 3.24b),
- $a = 0,7 l_d$ für geschlossene Kaliber, siehe Abb. 3.43

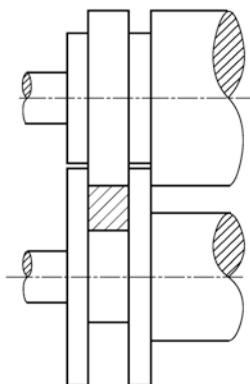


Abb. 3.43 Geschlossenes Kaliber ohne Möglichkeit der Gratbildung

Mit der vertikalen Walzkraft ist das Moment jeder Walze $M = F_w a$ und die Leistung P

$$P = 2 M \omega = b_m \Delta h v_u \frac{k_f}{\eta_F} \quad (3.26)$$

3.3.2 Schmieden

Schmieden gehört zu den Warmumformverfahren; die wichtigsten Verfahrensvarianten sind das *Freiformen* und das *Gesenkschmieden*. Außer diesen herkömmlichen Verfahren werden das Warmstauchen, das Feinschmieden und das Schmiedewalzen eingesetzt. Für das Nachbearbeiten von Schmiedestücken wendet man zum Erzielen hoher Genauigkeiten das Warmkalibrieren und das Kaltprägen an.

Schmiedbare Stähle haben einen Kohlenstoffgehalt zwischen 0,05 % und 1,7 %. Die Schmiedetemperatur ist abhängig von der Stahlsorte. Je nach Kohlenstoffgehalt wandelt sich im Stahl die Struktur bei bestimmten Temperaturen von der kubisch-raum-zentrierten α -Modifikation (Ferrit) in das kubisch-flächen-zentrierte γ -Eisen um. Das entstehende Gefüge bezeichnet man als *Austenit*. Es ist u. a. durch eine sehr gute Verformbarkeit gekennzeichnet.

Stähle werden im austenitischen Zustand warm umgeformt, weil die γ -Modifikation des Raumgitters der Eisenatome und der darin gelöste Kohlenstoff eine Umformung begünstigen.

3.3.2.1 Freiformschmieden

Beim Freiformschmieden wird ohne begrenzende Werkzeuge aus dem Rohling die gewünschte Endform erzeugt, hierbei kann der Werkstoff zwischen den Werkzeugen frei fließen. Die Fertigform entsteht durch geeignete Führung des Werkstücks und der Werkzeuge.

Freiformen wird oft als Vorstufe für das Gesenkenschmieden angewendet. Für bestimmte Arbeiten der Einzelfertigung ist es noch heute gebräuchlich.

Die Umformung geschieht meist zwischen Amboss und Hammer mit verschiedenen Formhämmern und Vorschlaghämmern.

Das Freiformen stellt meist eine Kombination der drei Grundarbeitsvorgänge Stauchen, Strecken und Breiten dar. Dazu kommen weitere Fertigungsschritte wie z. B. Lochen, Schlitzen, Absetzen, Schrotten.

Das *Stauchen* ist der einfachste Schmiedevorgang (Abb. 3.16). Bei diesem Umformen zwischen zwei ebenen Werkzeugflächen wird die freie Ausbreitung des Werkstoffs nur durch die Reibung an den Werkzeugflächen behindert. Dies führt zum Ausbauchen des Werkstücks. Ist der Stauchkörper schlank, bilden sich die Ausbauchungen zunächst nahe den Enden aus. Werkstücke mit einer Höhe von etwa dem dreifachen Durchmesser knicken beim freien Stauchen erfahrungsgemäß aus. Will man bei derartigen Werkstücken eine Verdickung an einer bestimmten Stelle erzeugen, so muss der Stab an dieser Stelle erwärmt werden. Eine Anwendung dieses Prinzips ist das *Elektrostauchverfahren*, siehe Abb. 3.44. Vor der Stauchplatte a befindet sich eine bewegliche Klemmelektrode b, die den zu stauchenden Stangenabschnitt c führt. Eine elektrische Widerstandsheizung f erwärmt das Werkstück auf die Umformtemperatur. Die Druckkraft wird durch den Stauchstempel d aufgebracht.

Das *Streckschmieden* ist der häufigste Schmiedevorgang. Im Gegensatz zum Stauchen wird hierbei jeweils nur ein kleiner Teil des Werkstückvolumens umgeformt. Um ein Werkstück zu recken (oder zu strecken), müssen wie in Abb. 3.45a viele kleine Einzelstauchungen

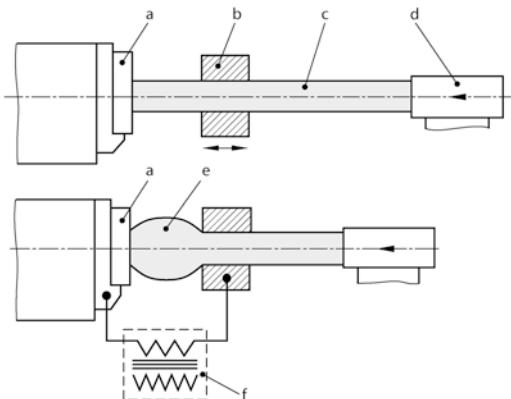


Abb. 3.44 Elektrostauchen von Rundstäben. **a** Stauchplatte **b** Klemmelektrode **c** Stangenabschnitt (Rohling) **d** Stauchstempel **e** Endform des Werkstückes **f** Widerstandsheizung

mit schmalen Werkzeugbahnen durchgeführt werden, die dabei senkrecht zur Streckrichtung angeordnet sind. Nach dem Prinzip des kleinsten Zwangs fließt der Werkstoff in Richtung der kleineren Reibungsbehinderung, d. h. über die ballige Druckfläche ab und verlängert dabei das Werkstück. Auf der gestauchten Oberfläche bleibt durch die balligen Werkzeugformen eine Struktur mit Querrillen zurück. Durch Umsetzen des Werkstücks um 90° wird in einem nachfolgenden Arbeitsgang die Oberfläche geglättet. Die längere Seite der Hammerbahnen (Ober- bzw. Untersattel) bedeckt mehrere Rillenkämme zugleich und glättet die wellige Fläche, wie Abb. 3.45b zeigt.

Die gewünschte Verlängerung des Werkstücks ist mit einer meist unerwünschten Breitung verbunden. Deshalb wird das Schmiedestück nach jedem Schlag um 90° gewendet, um die Breitung zurückzuschmieden. Der bei jedem einzelnen Hammerschlag oder Pressenhub erzielte Umformgrad hängt von der Geschwindigkeit und Masse des Pressenstößels und der gedrückten Fläche A_d unter den Werkzeugen ab. Die Breite des Rohlings wird durch Stauchen quer zum Faserverlauf oder Wenden vergrößert.

Beim *Breiten* sind die Längsachsen von Werkzeug und Werkstück parallel angeordnet. Die im Abb. 3.46 erkennbare flache Rillen-

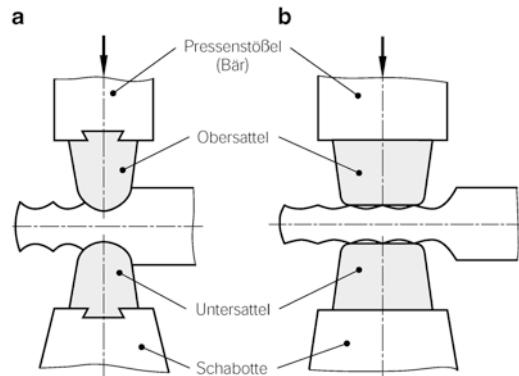


Abb. 3.45 Streckschmieden: **a** Recken **b** Glätten

struktur wird auf der umgeformten Oberfläche zum Schluss mit einem flachen Werkzeug geglättet. Ein einseitiges Breiten quer zur Faserrichtung in größerem Ausmaß sollte vermieden werden, weil dabei leicht Risse entstehen.

Dickwandige Rohre werden nicht ausgebohrt, sondern durch Strecken über einem Dorn hergestellt. Dabei geht man von einem zylindrisch vorgeschiemdeten Rohling aus, der nach dem Warmlochen auf einen Dorn genommen wird. Abb. 3.47 verdeutlicht das Verfahren. Der Dorn wirkt als Amboss, und das senkrecht zur Dornachse angeordnete schmale Werkzeug bewirkt ein Verlängern des Rohrs. Eine erwünschte Aufweitung des Rohrs wird anschließend in einem Arbeitsgang mit parallel zur Dornachse eingesetzter Hammerbahn wie in Abb. 3.48 bewirkt. Nach jedem Schlag oder Pressvorgang wird der Dorn mit dem Rohr etwas gedreht.

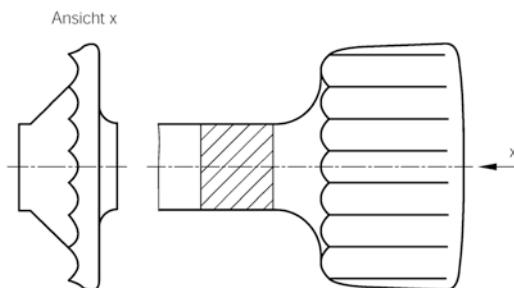


Abb. 3.46 Breiten eines Vierkantquerschnitts durch Freiformen

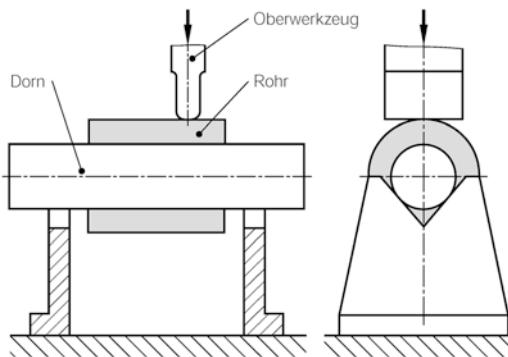


Abb. 3.47 Streckschmieden von Rohren über Dorn

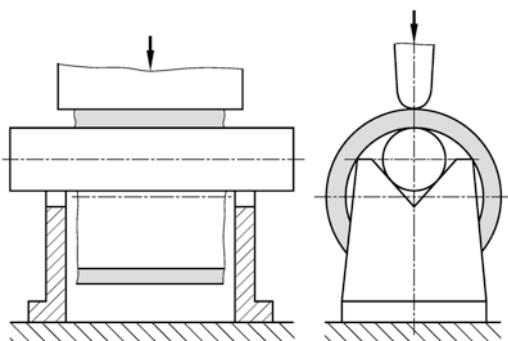


Abb. 3.48 Aufweiten von Rohren (Vergrößern des Umfangs)

Beim *Lochen* wird in das erwärmte Schmiedestück ein Volldorn getrieben; dies ist aus Abb. 3.49 ersichtlich. Dabei weichen die Werkstoffteilchen zunächst seitlich aus und fließen bei weiterem Vordringen des Dorns an diesem entlang nach oben. Ist der Dorn etwa bis zur Hälfte eingetrieben worden, wird das Werkstück gewendet und von der anderen Seite gegen gelocht. Höhere Werkstücke können mit einem Hohldorn entsprechend Abb. 3.50 gelocht werden. Dabei erreicht man eine bessere zylindrische Lochform.

Durch *Schroten* trennt man überflüssigen Werkstoff vom Schmiedestück. Wenn scharfe Absätze beim Schmieden erzeugt werden sollen, wird der Werkstoff an der abzusetzenden Stelle zunächst eingeschroten und anschließend auf die gewünschte Dicke geschmiedet.

Weitere Verfahren beim Freiformen sind das *Biegen* und das *Verdrehen*.

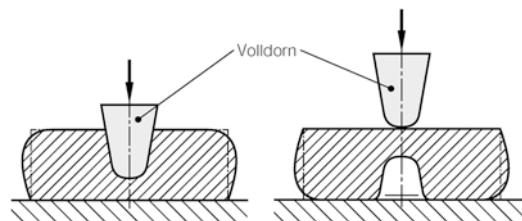


Abb. 3.49 Lochen mit Volldorn

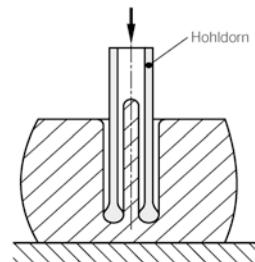


Abb. 3.50 Lochen mittels Hohldorn

Als *Arbeitsschritte* ergeben sich beim Freiformschmieden.

- das Erwärmen des Rohblocks im Schmiedeofen,
- das Abtrennen des Blockkopfes mit Lunker und Seigerung, mitunter auch des Blockfußes, siehe Abb. 3.51,
- das Stauchen und Durchschmieden des Rohblocks,
- die spezielle Formgebung in den vorgesehenen Umformstufen etwa entsprechend Abb. 3.52, evtl. mit Zwischenerwärmung,
- das Abkühlen des Rohlings in der Kühlgrube
- und die Wärmebehandlung.

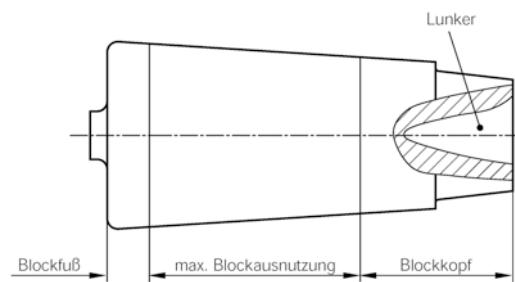


Abb. 3.51 Blockeinteilung beim Freiformschmieden

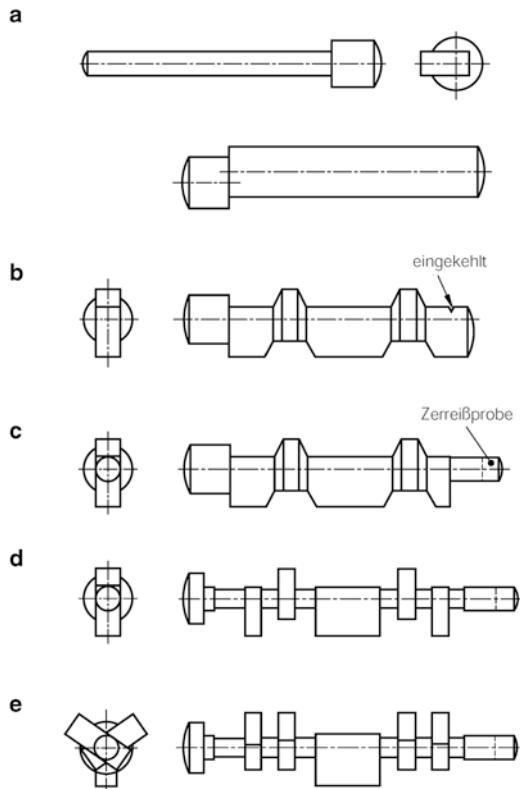


Abb. 3.52 Einzelschritte beim Schmieden einer großen Kurbelwelle

Die Aufheizgeschwindigkeit muss besonders bei großen Schmiedestücken sorgfältig überwacht werden, damit keine Spannungsrisse auftreten. Bis zu etwa 650 °C muss sehr langsam erwärmt werden, z. B. mit Aufheizgeschwindigkeiten von 30 °C/h. Danach kann man wesentlich schneller bis auf die Schmiedetemperatur zwischen 900 °C und 1100 °C aufheizen. Bei großen Stücken kann das Durchwärmten mehrere Stunden dauern. Das Schwindmaß beim Schmieden von Stahl beträgt 1 % bis 1,5 %. Die Toleranzen beim Freiformen sind verhältnismäßig grob.

Freiformschmieden kann sowohl auf Schmiedehämmern als auch auf -pressen erfolgen. Der *Schmiedehammer* wirkt mit einem Schlagimpuls auf das Schmiedestück. Bei größeren Werkstücken reicht aber die Durchschmiedung oft nicht bis in die Kernzone. Deshalb werden für sehr große Werkstücke Pressen eingesetzt.

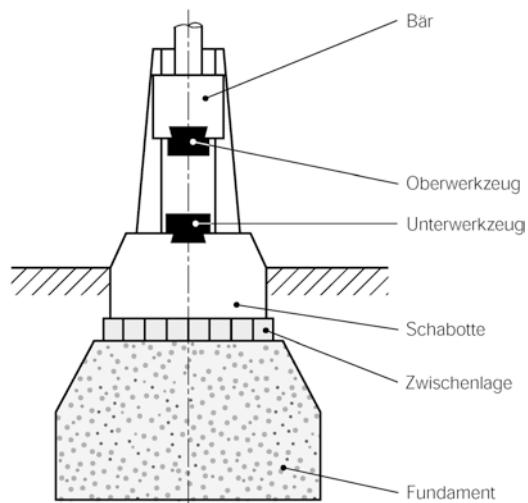


Abb. 3.53 Aufbau eines Schmiedehammers

Mit Luft angetriebene Hämmere sind wegen ihrer einfachen Bauart und der guten Steuermöglichkeit weit verbreitet. Die maximale Bärmasse kann bis zu 1,6 t betragen. Abb. 3.53 zeigt die Arbeitsweise eines Schmiedehammers. Der Wirkungsgrad des Hammers wird von der stoßenden Bärmasse und der gestoßenen Masse (Unterwerkzeug mit der Schabotte) bestimmt. Die Schabotte ruht auf einem Fundament mit elastischer Zwischenlage. Die in den Boden eingeleiteten Fundamentschwingungen und Körperschallanteile können erheblich sein, so dass Umweltschutzprobleme zu berücksichtigen sind. In neuerer Zeit werden deshalb statt der Hämmere bevorzugt Schmiedepressen eingesetzt.

Schmiedepressen können wasser- oder ölydraulisch betrieben werden. Je nach Bauart kann man weiter in Säulen- und Ständerpressen unterteilen. Die weit verbreiteten Säulenpressen können als Laufholm- oder Laufrahmenpressen mit zwei oder vier Säulen versehen sein. Auf letzteren kann man Rohblöcke bis zu 300 t Masse verarbeiten. Der typische *Arbeitsablauf* ist wie folgt:

- Im Leerhub wird das Werkzeug auf das Schmiedestück aufgesetzt;
- im Arbeitshub wird der Druck erhöht und der Umformschritt durchgeführt;

- beim Rückzug wird der Laufholm hinaufgezogen,
- der Laufholm wird in seiner oberen Lage schwebend gehalten.

Zum Verringern der Nebenzeiten (Heranbringen des Schmiedeblocks, Vorschub- und Drehbewegungen) werden *Schmiedemanipulatoren* eingesetzt. Der Manipulator ist eine fahrbare Schmiedezange und wird entweder frei beweglich oder schienengebunden betrieben. Die Ausnutzung der Schmiedeanlagen kann dadurch bis auf 85 % der Betriebszeit heraufgesetzt werden. Infolge der besseren Ausnutzung der Blockhitze ergibt sich eine Einsparung an Primärenergie.

3.3.2.2 Gesenkschmieden

Gesenkschmieden ist Umformen von vorwärmten Metallen mit gegeneinander bewegten Hohlformen, den Gesenken. Dem Werkstoff werden durch Ober- und Untergesenk die Fließrichtung und die Form vorgeschrieben.

Das Gesenkschmieden wird für Massenteile (z. B. Werkzeuge, Fahrzeugteile und Bestecke) eingesetzt. Als Vorteile sind die geringe Einsatzmasse, der günstige Faserverlauf im Werkstück (dadurch bessere Festigkeitseigenschaften) und die geringe zusätzliche spanende Bearbeitung zu nennen. Die Kosten für die Einrichtungen, Gesenke und Wärmequellen sind dagegen verhältnismäßig hoch. Die Fertigungstoleranzen (DIN EN 10243) sind beim Schmieden im Gesenk erheblich geringer als beim Freiformschmieden.

Gesenkformstücke⁴ können Massen von einigen Gramm bis zu mehreren Tonnen haben. Typische Werkstückarten sind:

- Maschinenteile (Scheiben, Nabenschenkel, Pleuel),
- Normteile (Schrauben, Bolzen, Muttern, Nieten),
- Werkzeuge (Zangen, Scheren, Hämmer, Schraubenschlüssel),
- Blechteile (Besteckteile, Beschlagteile).

Nach der Form des Rohlings lassen sich die Verfahren einteilen in:

- Gesenkschmieden von der Stange,
- Gesenkschmieden vom Spaltstück,
- Gesenkschmieden vom Stück.

Beim *Gesenkschmieden von der Stange* wird eine Stange von etwa 2 m Länge an einem Ende auf Schmiedetemperatur erhitzt und im Gesenk geschmiedet. Die Umformstufen sind in Abb. 3.54 zu erkennen. Das fertige Teil trennt man in gleicher Hitze durch den letzten Arbeitshub von der Stange ab. Das Verfahren wird vorwiegend für Werkstücke in besonders lang gestreckter Form mit Massen bis zu 3 kg und Stangendurchmessern bis zu 50 mm angewendet. Bei diesem Verfahren entfällt das umständliche Spannen des Stücks in einer Schmiedezange.

Beim *Gesenkschmieden vom Spaltstück* werden überwiegend kleine, flache Werkstücke hergestellt. Abb. 3.55 lässt erkennen, dass aus einem Grobblechabschnitt die Ausgangsform durch Flächenanschluss nahezu verlustlos als Spaltstück abgeschnitten wird. Der Faserverlauf

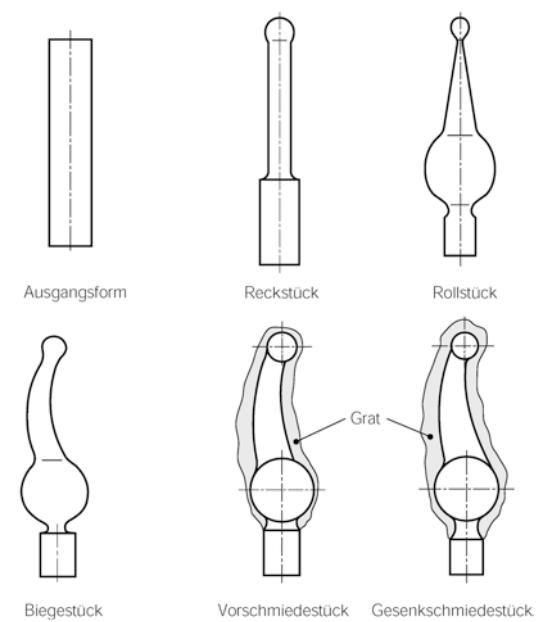


Abb. 3.54 Gesenkschmieden von der Stange

⁴Gesenkformen. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=wIjyfJLcOgA).

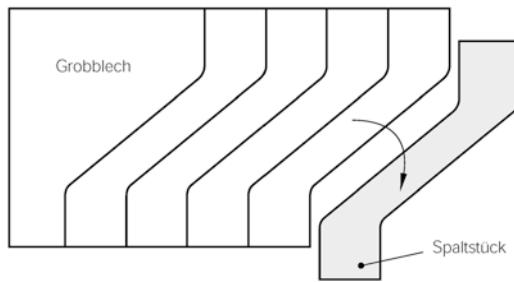


Abb. 3.55 Spaltstückherstellung für Gesenkschmiedeteile

bleibt nicht ungestört erhalten, dies kann u. U. für die Biegeweichsfestigkeit nachteilig sein. Die Zwischenformen stellt man ähnlich wie beim Schmieden von der Stange oder wie beim Gesenkschmieden vom Stück her.

Das *Gesenkschmieden vom Stück* wird bei großen oder schwer zu schmiedenden Werkstücken oder bei erhöhten Genauigkeitsanforderungen angewendet. Ausgangsform ist ein abgescherter oder abgesägter Stangenabschnitt. Langgestreckte Werkstücke werden meist quer zur Walzrichtung umgeformt, prismatische und scheibenförmige vorwiegend in der Walzrichtung (Längsschmieden).

Beim Gesenkschmieden unterscheidet man grundsätzlich drei Arbeitsvorgänge, die meist kombiniert werden: Stauchen, Breiten und Steigen. Abb. 3.56 erläutert dies im Einzelnen. Das *Stauchen* ist ein Verringern der Anfangshöhe bei

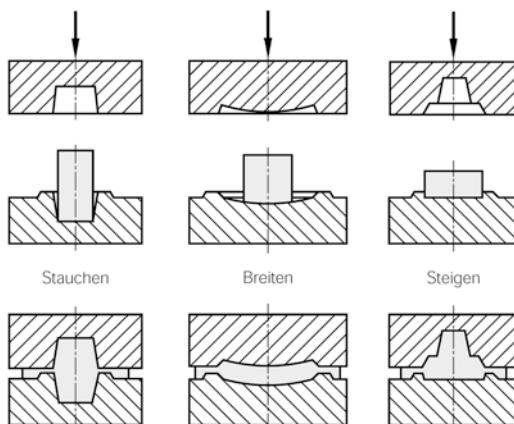


Abb. 3.56 Gesenkschmieden vom Stück (mit Hauptarbeitsgängen)

geringer Breitung ohne große Gleitvorgänge an den Gesenkwänden. Der Werkstoff fließt vorwiegend in Richtung der Arbeitsbewegung. Beim *Breiten* muss der Werkstoff längere Gleitwege quer zur Arbeitsbewegung zurücklegen. Das *Steigen* erfolgt vorzugsweise entgegen der Arbeitsbewegung, teilweise rechtwinklig dazu. Das Ausfüllen von Vertiefungen (Zapfenschmieden) erfordert längere Gleitwege, wobei stärkerer Gesenkverschleiß auftritt.

Genaue Angaben über Bearbeitungszugaben, Kanten- und Dornkopfrundungen, Hohlkehlen sowie Außen- und Innenschrägen von Gesenkschmiedestücken sind der Norm DIN 7523-2, zu entnehmen. Der *Grat* am Gesenkschmiedeteil ist erforderlich, um eine vollständige Gesenkfüllung sicherzustellen. Die Graticke s und das Gratiabverhältnis b/s nach Abb. 3.57 richten sich nach der Projektionsfläche A_s im Gesenk und dem jeweiligen Arbeitsvorgang. Richtwerte für die Gratausführung sind in Tab. 3.1 enthalten.

Zwecks einwandfreier Abgratung soll der Grat immer an der Linie des größten Werkstückumfangs liegen, wie Abb. 3.58 zeigt. Für die Gesenkfertigung ist zu beachten, dass Werkstückkanten nicht mit Teilungsebenen zusammenfallen dürfen.

Genauschmieden wird für Werkstücke mit geringen Bearbeitungszugaben und Maß-, Form- und Lagetoleranzen angewendet. Dazu gehören die Verfahren *Gratlos-Schmieden*, *Kalibrieren*, *Prägen*. Hierfür müssen sehr genaue Gesenke mit hoher Oberflächengüte verwendet werden. Zum Nacharbeiten ist dann vielfach nur noch Schleifen erforderlich. Als Rohlinge werden Profilwalzstahl, Strangpressmaterial oder ge-

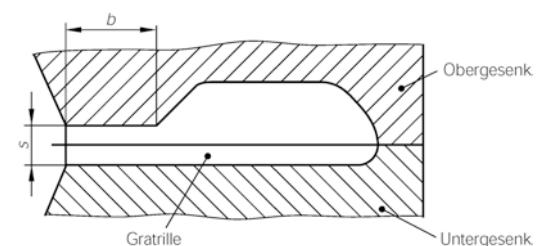
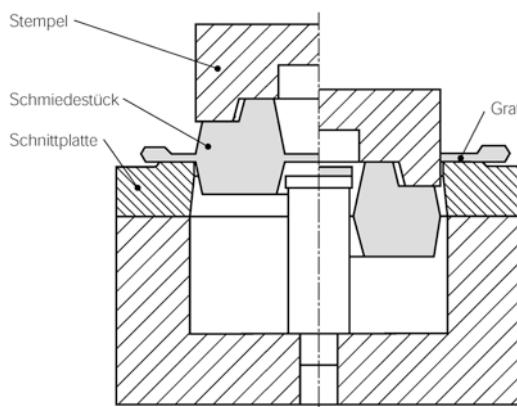
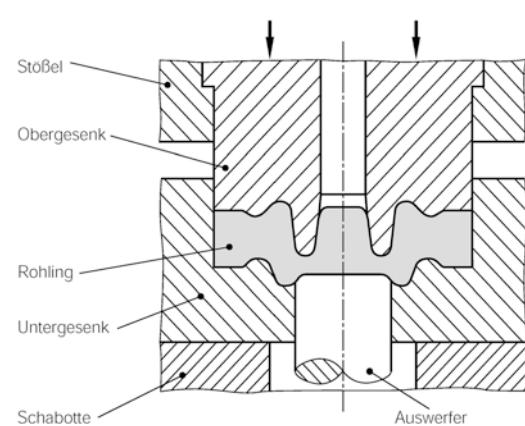


Abb. 3.57 Gratgesenk mit Gratriille zur Aufnahme von überschüssigem Werkstoff. s Graticke b Breite des Gratsteges

Tab. 3.1 Richtwerte für die Gratausführung. (Nach K. Lange)

Schmiedestück-Projektionsfläche in Gratebene (ohne Gratbahn) A_s	Gratdicke s	Gratverhältnis (b = Breite des Gratsteges)		
		Stauchen	Breiten	Steigen
mm ²	mm			
bis 1800	0,6	8	10,0	13,0
1800 bis 4500	1,0	7	8,0	10,0
4500 bis 11200	1,6	5	5,5	7,0
11200 bis 28000	2,5	4	4,5	5,5
28000 bis 71000	4,0	3	3,5	4,0
71000 bis 180000	6,3	2	2,5	3,0
180000 bis 450000	10,0	1	2,0	2,5

**Abb. 3.58** Entgraten und gleichzeitiges Lochen eines Gesenkenschmiedestücks (Auswerferstifte nicht gezeichnet)**Abb. 3.59** Werkzeug zum Genauschmieden von Zahnrädern ohne Grat

zogene bzw. geschälte Stäbe eingesetzt. Das Volumen des Rohlings sollte genau dem Fertigteil entsprechen. Die Schnittflächen müssen rechtwinklig zur Längsachse liegen. Genauschmiedestücke werden auf Reibrad-Spindelpressen oder Kurbelpressen hergestellt. Schmiedehämmer sind wegen ihrer Schlagwirkung und des zu großen Spiels in der Bärführung weniger gut geeignet.

Erhebliche Einsparungen an Werkstoff und Bearbeitungszeit machen das Verfahren bei der Herstellung von z. B. Zahnrädern, Zahnleisten und Turbinenschaufeln wirtschaftlich. Abb. 3.59 zeigt einen Werkzeugaufbau zum Genauschmieden von Zahnrädern. Der überschüssige Werkstoff kann im mittleren Teil des Obergesenks (sog. „Kompensator“) aufsteigen und wird durch Löchen entfernt.

3.3.2.3 Kraft- und Arbeitsbedarf beim Schmieden

Vor der Wahl der geeigneten Umformmaschine muss die größte auftretende Umformkraft bestimmt werden. Bei mechanischen Pressen ist dies zur Vermeidung von Überlastungen wichtig. Bei hydraulischen Pressen kann mit dieser Feststellung abgeschätzt werden, ob die Pressen-Nennkraft ausreicht, das Schmiedestück einwandfrei auszuschmieden.

Die zum Schmieden erforderliche Umformkraft ist

$$F = A_d k_{we} \quad (3.27)$$

A_d ist die gedrückte Fläche als Projektion der Schmiedestückfläche senkrecht zur Kraftrichtung und k_{we} der Umformwiderstand am Ende des Umformvorgangs.

Die für das Stauchen geltende Gl. (3.27) gilt sinngemäß auch für das Recken und Breiten, allerdings erhöht der mit der Umformzone verbundene Werkstoff die Spannungen. Nach Siebel errechnet sich die Kraft beim Recken zu

$$F = A_d k_f \left(1 + \frac{\mu l}{2h} + \frac{h}{4l} \right). \quad (3.28)$$

Hierbei bedeuten:

- h Höhe des Schmiedestücks,
- l Länge des Stempels oder Sattels

Beim Gesenkschmieden kann der Umformwiderstand am Ende der Umformung k_{we} bis zu zwölftmal so hoch sein wie der Anfangswert. Dies ist abhängig von der jeweiligen Form des Gesenks, von der Temperatur des Werkstücks und von der Umformgeschwindigkeit. Aus diesem Grund ist eine Vorausberechnung des Umformwiderstandes sehr schwierig. Daher wurden für verschiedene gestaltete Formen Arbeitsschaubilder wie in Abb. 3.60 erstellt, aus denen man den Kraft- und Arbeitsbedarf ermitteln kann.

Die erforderliche Umformarbeit muss für das Gesenkschmieden auf arbeitsgebundenen Maschinen (Hämmer, Pressen mit Schwunggrad) bekannt sein, damit der Arbeitsschritt vollständig durchgeführt werden kann. Berechenbar ist die Umformarbeit W aber nur für das Stauchen zwischen ebenen Bahnen (Freiformen):

$$W = V \varphi_h k_{fm} / \eta_F. \quad (3.29)$$

Für den Umformwirkungsgrad η_F ergeben sich dabei je nach Umformgrad φ_h , Zustand der Stauchbahnen, Verzunderung u. a. Einflüssen Werte zwischen $\eta_F = 0,6$ bis $\eta_F = 0,9$. Diese Werte nehmen beim Gesenkschmieden infolge der Form- und Grateinflüsse bei einfachen Teilen auf $\eta_F = 0,4$ und bei sehr komplizierten Formen mit Grat sogar bis auf $\eta_F = 0,2$ ab.

Für genauere Bestimmungen der Kraft- und Arbeitswerte sind Vorversuche zur Korrektur der Schautafeln in Abb. 3.60 unerlässlich.

Beispiel zu Abb. 3.60

Aufgabe Ein Schmiedeteil entsprechend Form 6 soll unter einem Gegenschlaghammer hergestellt

werden (Ausgangsdurchmesser $d_0 = 29$ mm). Gegeben sind die Schmiedetemperatur 1200°C , die Geschwindigkeit des Hammers $v = 6,66$ m/s, die Anfangshöhe $h_0 = 60$ mm sowie die Endhöhe $h_1 = 22$ mm.

Lösung

Die anfängliche Umformgeschwindigkeit beträgt $\dot{\varphi}_0 = (6660 \text{ mm/s})/(60 \text{ mm}) = 111 \text{ s}^{-1}$. Nach Kurt Lange kann die mittlere Umformgeschwindigkeit für Hämmer mit 0,9, für Spindelpressen mit 0,35, für Hydraulische Pressen mit 1,5 und für Kurbel- bzw. Exzenterpressen mit 0,5 der jeweiligen Anfangsgeschwindigkeiten angesetzt werden. Demnach beträgt die mittlere Umformgeschwindigkeit für das ausgewählte Beispiel $\dot{\varphi}_m = 0,9 \cdot 111 \text{ s}^{-1} = 100 \text{ s}^{-1}$.

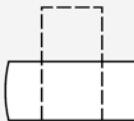
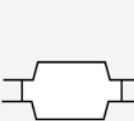
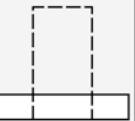
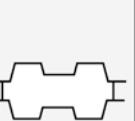
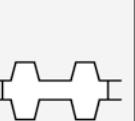
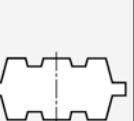
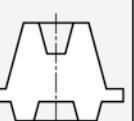
Aus Feld 1 ergibt sich damit ein Peilstrahl ins Feld 2; aufgrund der Form 6 wird hier ein mittlerer Umformwiderstand von $k_{wm} = 400 \text{ N/mm}^2$ abgelesen. In Feld 3 ergibt sich für den Umformgrad $\varphi_h = \ln(h_1/h_0) = \ln(22/60) \approx -1$ der Peilstrahl ins Feld 4: Bei einem Volumen $V = \frac{\pi}{4} d_0^2 \cdot h_0 \approx 40.000 \text{ mm}^3$ ist $W = 16 \text{ kNm}$. Nach diesem Arbeitsbedarf kann die Presse ausgesucht werden.

3.3.3 Eindrücken

Zu den Eindrückverfahren zählen das *Prägen*, das die Oberfläche eines Werkstücks reliefartig verändert, und das *Einsenken* zum Herstellen eines Gesenks. Es handelt sich in beiden Fällen um eine Kaltumformung.

Beim Prägen unterscheidet man das *Hohlvom Vollprägen*. Beim erstenen Verfahren bleibt die Werkstückdicke annähernd gleich, beim zweiten wird sie gezielt verändert, wie Abb. 3.61 zeigt.

Das Glattprägen ist eine Umformung zum Verbessern der Oberfläche eines Werkstücks durch geringes Kaltstauchen. Die Werkzeugflächen müssen feingeschliffen oder geläppt sein. Wenn man beim Stauchvorgang höhenbegrenzende Anschläge einsetzt, dann spricht man vom *Maßprägen*. Hierdurch werden Dickenunterschiede an Gesenkschmiedeteilen

Form 1	Form 2	Form 3	Form 4	Form 5	Form 6	Form 7
						
Stauchen $h_0/d_0 \approx 1,5$ $\varphi_n \approx 0,4$	Stauchen im Gesenk ohne Gratbildung	Stauchen $h_0/d_0 \approx 1,5$ $\varphi_n \approx 0,6$	Stauchen im Gesenk ohne Gratbildung	Stauchen im Gesenk mit leichter Gratbildung	Gesenkschmieden einfacher Teile mit Grat	Gesenkschmieden verzwickelter Teile mit Grat

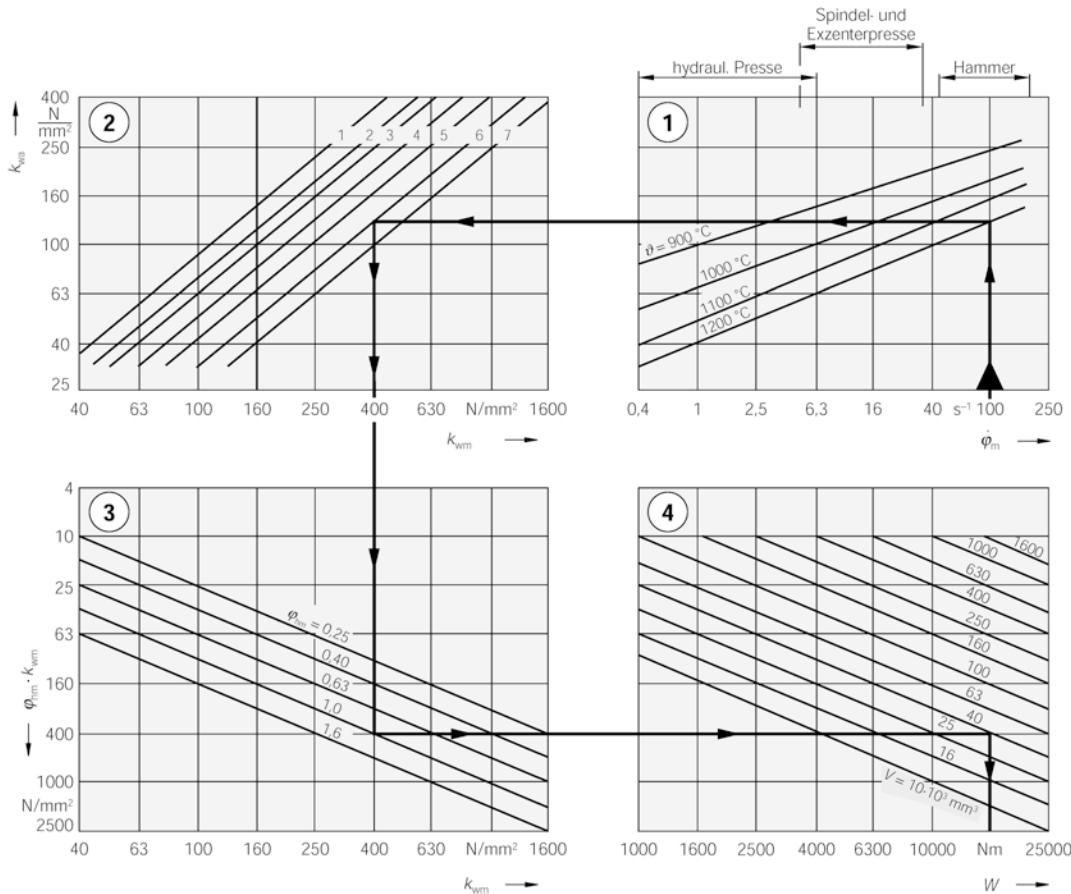


Abb. 3.60 Nomogramm zur Ermittlung des Arbeitsbedarfs W für rotationssymmetrische Schmiedeteile aus niedriglegiertem Stahl. (Nach K. Lange)

beseitigt. Ein Beispiel hierfür zeigt Abb. 3.62. Diese Nachbearbeitung wird meist auf Kniehebelpressen durchgeführt, die am unteren Totpunkt bei kleinen Wegen sehr große Kräfte aufbringen können. Durch Mehrfachprägen ist eine Maßgenauigkeit bis $\pm 0,025$ mm erreichbar. Bei

ringförmigen Werkstücken ist die ISO-Qualität IT 8 zu erzielen.

Die Umformkraft ergibt sich nach (Gl. 3.27). Anhaltswerte für den Umformwiderstand k_{we} am Ende des Prägevorgangs gehen aus Tab. 3.2 hervor. Je schärfer die Kanten ausgeprägt werden

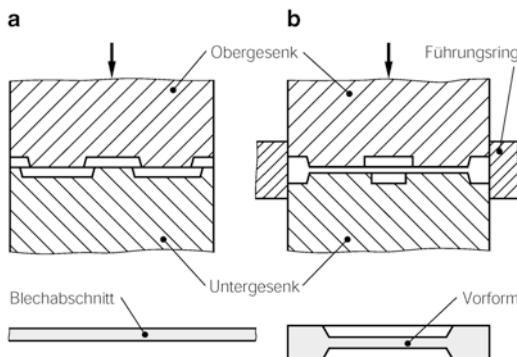


Abb. 3.61 Prägewerkzeuge und Rohlinge: **a** Hohlprägen ohne Dickenänderung (z. B. für Nummerierung von Kfz-Fahrgestellen) **b** Vollprägen mit Führungsrings (z. B. für das Münzprägen)

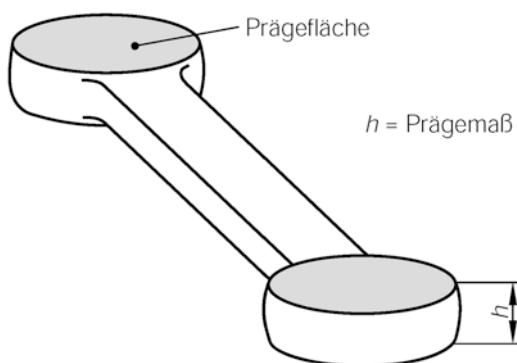


Abb. 3.62 Maßprägen an einem entgrateten Gesenk-schmiedeteil

Tab. 3.2 Formänderungswiderstand k_{we} am Ende des Prägvorgangs

Werkstoff	Hohlprägen k_{we}	Vollprägen k_{we}
	N/mm ²	N/mm ²
Aluminium 99 %	50 bis 80	80 bis 120
Al-Legierungen	80 bis 150	120 bis 350
Kupfer, weich	200 bis 300	800 bis 1000
CuZn37	200 bis 300	1500 bis 1800
Nickel, rein	300 bis 500	1600 bis 1800
Neusilber	300 bis 400	1800 bis 2200
Stahl USt 12	300 bis 400	1200 bis 1400
Chrom-Nickel-Stahl	600 bis 800	2500 bis 3200

sollen, desto höher ist der Wert für k_{we} anzusetzen. Beim Vollprägen legierter Stähle werden die Gesenke bis nahe an ihre Zugfestigkeit belastet.

Einsenken ist nach DIN 8583 das Eindrücken von Formwerkzeugen in ein Werkstück zum Erzeugen einer genauen Innenform. Auf diese Weise können z. B. Gesenke sehr wirtschaftlich hergestellt werden, da die erhabene Form eines Einsenkstempels spanend billiger herzustellen ist als eine hohle Gravur. Auf ölhdraulischen Einsenkpressen wird ein Einsenkstempel mit sehr geringer Geschwindigkeit in das Werkstück eingedrückt, wie Abb. 3.63 verdeutlicht. Das seitliche Ausweichen des Werkstoffes verhindert man durch einen Halterung.

Die auftretenden Druckspannungen können Werte bis zu 3000 N/mm² erreichen, die höchsten Nennkräfte von Einsenkpressen liegen bei 32.000 kN. Um die auftretende Reibung möglichst klein zu halten, werden die Werkzeugflächen verkupfert und mit Molybdänsulfid (MoS_2) geschmiert. Nach der Richtlinie VDI 3170 beträgt die erforderliche Druckspannung das 4,5-fache der Fließspannung k_f . Dieser Wert wird der jeweiligen Fließkurve bei maximalem Umformgrad φ_{\max} entnommen. Die Größe φ_{\max} kann näherungsweise berechnet werden:

$$\varphi_{\max} = 0,33 \frac{t}{d} - 0,01; \quad (3.30)$$

t ist die **Einsenktiefe** und d der Stempeldurchmesser in Millimeter. Die zum Kalteinsenken erforderliche Druckkraft beträgt

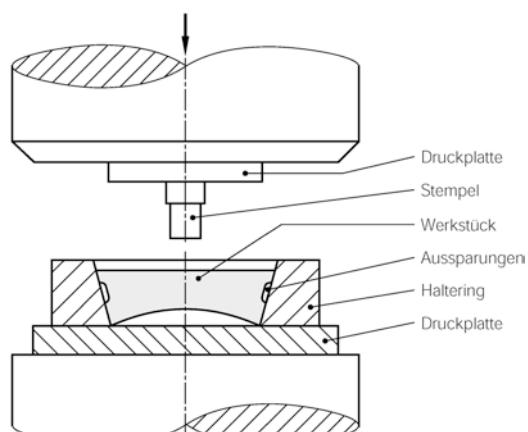


Abb. 3.63 Kalteinsenken zur Herstellung eines Hohl-gesenks

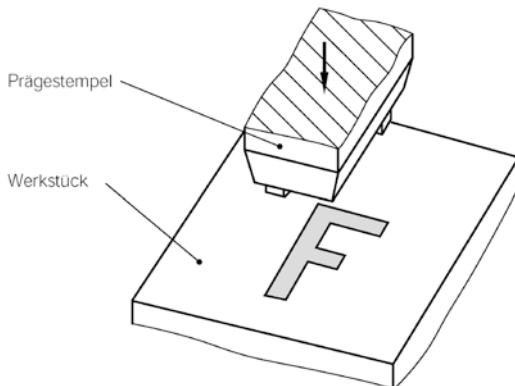


Abb. 3.64 Einprägen mittels Prägestempel

$$F = 4,5 k_f \frac{\pi}{4} d^2. \quad (3.31)$$

Zu den Eindrückverfahren mit geradliniger Bewegung gehört außer den eben besprochenen auch das Körnen mittels Körnerspitze, *Lochen mittels Hohldorn* (Abb. 3.50) und das Einprägen von Zeichen mittels Prägestempel entsprechend Abb. 3.64.

Eine andere Gruppe von Eindrückverfahren arbeitet mit umlaufender Bewegung des Werkzeugs. Dazu gehören das *Walzprägen*, *Rändeln* und *Kordeln* sowie das *Gewindefurchen*. Einige dieser Möglichkeiten zeigt Abb. 3.65.

Durch *Warmeinsenken* können die Verfahrensgrenzen des Kalteinsenkens erheblich erweitert werden. Beispielsweise kann die Einsenkgeschwindigkeit von 0,003 bis 0,2 mm/s beim Kalteinsenken auf 2,5 mm/s bei Schmiedepressen erhöht werden. Oft lassen sich auch Schmiedehämmer ($v = 4 \text{ m/s}$ bis $v = 6 \text{ m/s}$) einsetzen. Genauigkeit und Oberflächengüte sind geringer als beim Kalteinsenken. Das Verfahren wird zur Herstellung von Schmiede- und Pressgesenken eingesetzt. Der Stempel muss um das Schwindmaß α des Werkstückstoffs größer hergestellt werden. Eingesenkte Werkzeuge haben gegenüber spanend hergestellten Gesenken den Vorteil des ungestörten Faserverlaufs. Die Standzeit ist etwa dreimal höher. Ein Einsenkstempel kann zum Herstellen von etwa 100 Gesenken verwendet werden.

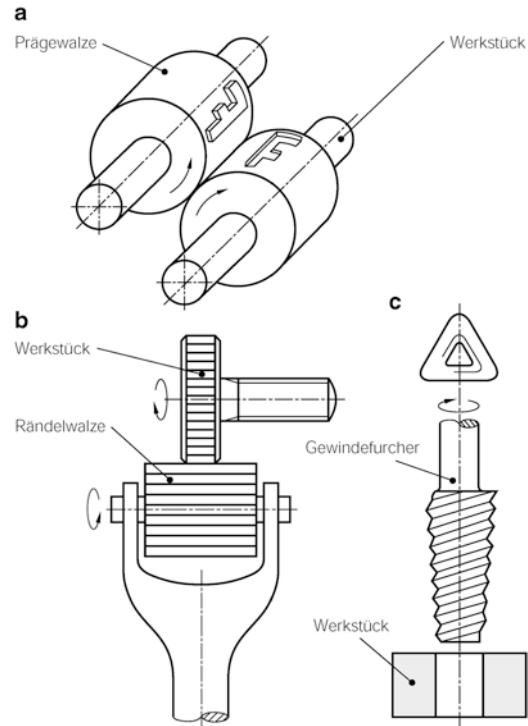


Abb. 3.65 Eindrücken mit umlaufender Werkzeugbewegung: **a** Walzprägen, **b** Rändeln, **c** Gewindefurchen von Innengewinden

3.3.4 Durchdrücken

Durchdrücken ist Druckumformen eines Werkstücks durch formgebende Werkzeugöffnungen hindurch. Die wichtigsten Verfahren sind das Strangpressen und das Fließpressen.

3.3.4.1 Strangpressen

Beim *Strangpressen* wird ein aufgeheizter Block in einem Presszylinder (Blockaufnehmer) durch einen Stempel unter hohen Druck gesetzt, wie es Abb. 3.66 zeigt. Der Werkstoff beginnt zu fließen und tritt durch die Matrizenöffnung als Strang mit der Austrittsgeschwindigkeit v_l aus.

Wenn die dem Pressstempel vorgelagerte Pressscheibe kleiner als der Durchmesser des Presszylinders ist, bleibt eine Schale stehen. In diesem Fall wird der Block vor dem Einlegen nicht geschmiert, der Werkstoff wird beim Auspressen abgesichert.

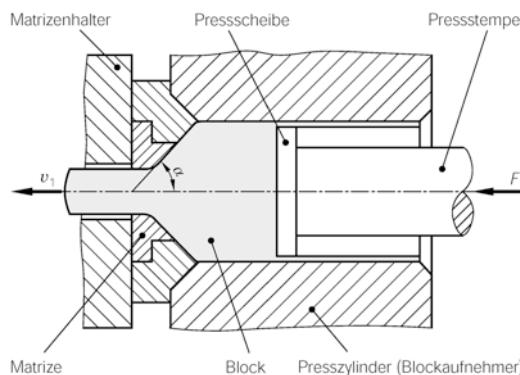


Abb. 3.66 Voll-Vorwärts-Strangpressen mit Schale. F Presskraft α halber Öffnungswinkel der Matrize v_1 Austrittsgeschwindigkeit des Strangs

Mittels Strangpressen können Halbzeuge bis 20 m Länge hergestellt werden. Die Möglichkeiten zum Herstellen unterschiedlicher *Profilformen* sind sehr zahlreich, wie Abb. 3.67 erkennen lässt. Im Gegensatz zum Walzverfahren sind auch hinterschnittene Querschnitte und Hohlprofile herstellbar. Aus Abb. 3.68 geht hervor, dass die Strangpresse für Hohlprofile doppelte Antriebsmechanismen aufweisen muss, weil der Block zunächst gelocht und dann über dem stehenbleibenden Lochdorn ausgepresst wird.

Zum Strangpressen eignen sich besonders alle gut umformbaren (zähe, verformbare) Werkstoffe, z. B. Aluminium und seine Legierungen sowie Kupfer, Nickel, Zink, Zinn, Blei und deren Legierungen. Einige gebräuchliche Strangpresswerkstoffe mit dem Temperaturbereich, in dem sie verpresst werden, zeigt Abb. 3.69.

Das *Stahl-Strangpressen* ist erst in den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts gelungen. Nach dem *Ugine-Séjournet*-Verfahren wird dabei Glas bestimmter Zusammensetzung als Schmierstoff verwendet. Der auf Presstemperatur erwärmte Stahlblock wird zunächst in Glaspulver gewälzt, und vor die Matrizenöffnung legt man eine Scheibe aus gepresstem Glas. Beim Auspressen schmilzt das Glas und übernimmt die Rolle des Schmierstoffs. Gleichzeitig schützt es Matrize und Stempel vor zu hoher Erwärmung und die Blockoberfläche vor zu schneller Abkühlung. Da kein Verzundern

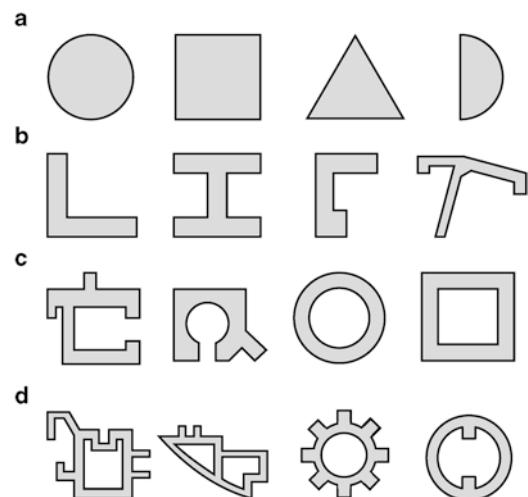


Abb. 3.67 Durch Strangpressen hergestellte Profile: **a** runde und eckige Vollprofile **b** symmetrische und unsymmetrische Winkelprofile **c** offene und geschlossene Hohlprofile **d** komplizierte Profilrohre

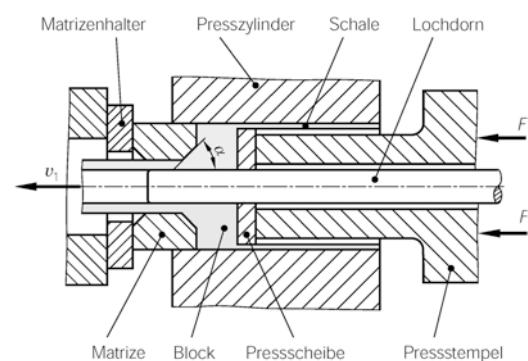


Abb. 3.68 Hohl-Vorwärts-Strangpressen. F Presskraft α halber Öffnungswinkel der Matrize v_1 Austrittsgeschwindigkeit des Hohlprofils

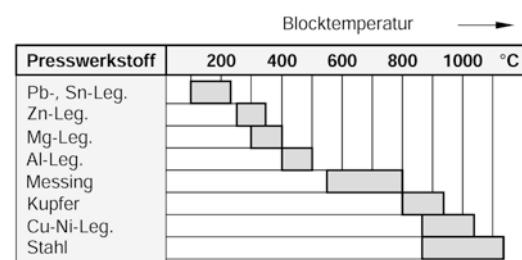


Abb. 3.69 Strangpresswerkstoffe mit den Bereichen üblicher Verarbeitungstemperaturen

des Blocks auftreten kann, entfällt auch die Reibwirkung des Zunders in der Matrize. Zurzeit werden in der Bundesrepublik Deutschland Stahlprofile hergestellt, die sich in einen Kreis von 150 mm Durchmesser einzeichnen lassen. Die kleinste Wanddicke beträgt etwa 3,5 mm, der Mindestdurchmesser der Hohlprofile etwa 20 mm. Bei kleineren Wanddicken oder Durchmessern wäre die Werkzeugbeanspruchung übermäßig hoch.

Für die Konstruktion einer Matrize muss man vom *Profilquerschnitt* wie in Abb. 3.70 ausgehen. Danach werden Presse und Aufnehmer sowie Matrzentyp ausgewählt. Für die Festlegung des Presszylinder-Durchmessers d_z gilt der Maximalwert für den profilumschreibenden Kreis

$$d_u \max = 0,85 d_z. \quad (3.32)$$

Als vorteilhafter Wert gilt aber $d_u = 0,6 d_z$.

Aus wirtschaftlichen Gründen wird oft mehrsträngig gepresst, wie Abb. 3.71 andeutet. Mit Rücksicht auf einen möglichst gleichmäßigen *Werkstofffluss* bevorzugt man symmetrische Anordnungen. Da die Matrzentendurchbrüche so angeordnet sein sollen, dass der Flächenschwerpunkt in der Matrizenmitte liegt, werden bei un-

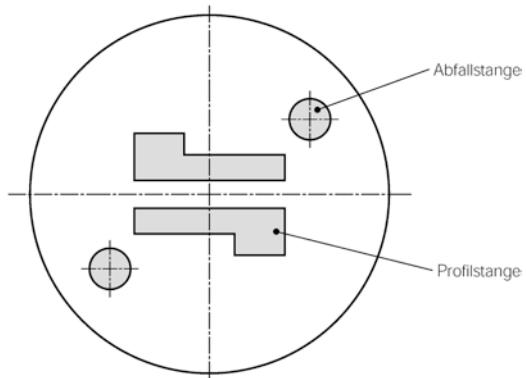


Abb. 3.71 Matrize für unsymmetrische Profilstangen sowie runde Abfallstangen zum Ausgleich des Stoffflusses

symmetrischen Profilstangen häufig runde Abfallstangen mitgepresst. Das Ziel dieser Maßnahme ist es, möglichst gerade austretende Stränge zu erhalten.

Je nach Strangpresswerkstoff und Profilform stehen verschiedene Matrzentypen zur Auswahl. Am häufigsten verwendet man die Flachmatrize mit einem Öffnungswinkel $2\alpha = 180^\circ$. Für NE-Schwermetalle und Stahl werden konische Matrizen (Abb. 3.66 und 3.68) eingesetzt (Öffnungswinkel $2\alpha = 90^\circ$).

Der Stofffluss beim *Voll-Vorwärts-Strangpressen* führt bei Flachmatrizen ($2\alpha = 180^\circ$) zu vier unterschiedlichen Fließtypen. Abb. 3.72 vermittelt eine Übersicht. Der *Fließtyp S* ist ein idealisiertes Modell. Er tritt bei homogenem Strangpresswerkstoff auf, wenn eine sehr kleine Reibung eine praktisch unbehinderte Werkstoffbewegung entlang aller Grenzflächen zulässt. Der *Fließtyp A* zeigt sich bei homogenem Werkstoff, wenn nur an der Matrizenstirnfläche eine bestimmte Reibung auftritt. Der *Fließtyp B* tritt bei homogenen Werkstoffen auf, wenn eine nennenswerte Reibung an allen Kontaktflächen vorhanden ist. Der *Fließtyp C* ist kennzeichnend für Blöcke mit ungleicher Verteilung der plastischen Eigenschaften (Phasenänderungen in den Randzonen oder ungleiche Temperaturverteilung) sowie mit sehr großer Reibung. Im letzten Pressdrittel ergeben sich meist Werkstofftrennungen durch das unterschiedliche Fließverhalten.

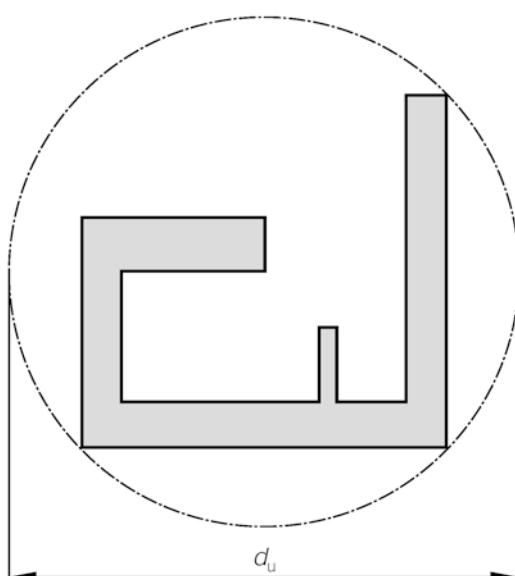


Abb. 3.70 Zur Festlegung von Matrize und Presszylinder. d_u Durchmesser des profilumschreibenden Kreises

Fließtyp	S	A	B	C
Werkstoffart	homogen	homogen	homogen	inhomogen
Werkstoff-Beispiel	theoretisch	Pb, Al mit Schmierung	Cu, Al, Al-Legierungen	Mg, α - und β -Ms
Reibung	keine	gering	stark	stark

Abb. 3.72 Einteilung der Fließtypen beim axial-symmetrischen Voll-Vorwärts-Strangpressen. (Nach Dürrschnabel)

Die *Qualität der Matrizen* ist sowohl für die Maßhaltigkeit des Strangs als auch zum Erzielen glatter und sauberer Oberflächen von Bedeutung. Letzteres gilt besonders dann, wenn Strangpressprofile für dekorative Zwecke benötigt werden (sog. Elokal-Qualität). Kratzer und Riefen in den Reibflächen der Matrizen durchbrüche, d. h. eine oxidierte Aluminium-Oberfläche sowie ungenügendes Beseitigen der festklebenden Pressrückstände führen zu erheblichen Oberflächenmängeln.

Herstellungsbedingte *Pressfehler* sind im Einzelnen:

- Trichterbildung am Strangende bei zu geringem Pressrest (Presslunker),
- Materialtrennung im letzten Drittel des Strangkerns (sog. Zweiwachsbildung),
- Innenrisse und sog. Holzfaserbruch infolge zu kalter Innenschichten,
- Schalen- oder Dopplungsbildung durch Verunreinigungen in der Oberfläche des Produktes (Oxidschichten der Rohteile, Schmierstoff),
- Aufreißen des Strangs in Umfangsrichtung (Tannenbaumfehler) infolge Warmbrüchigkeit bei zu großer Umformgeschwindigkeit,
- Blasenbildung durch örtliche Aufschmelzungen (v - oder T -Werte zu hoch),

- Längsrisse auf der Rohroberfläche durch zu starke Abkühlung der Außenschicht,
- Poren und Riefen durch Aufschweißungen am Werkzeug,
- Oberflächenfehler, die durch die Strang-Leitschienen verursacht werden,
- streifiges Gefüge als Folge zu niedriger Presstemperatur,
- Gefügeungleichmäßigkeit über die Stranglänge durch Blockabkühlung,
- Grobkornbildung mit Abnahme der Festigkeitswerte und Korrosionsfestigkeit sowie erhöhte Neigung zur Rissbildung beim Abschrecken.

Der *Kraft-Weg-Verlauf* beim Strangpressen von Vollprofilen ist schematisch in Abb. 3.73 dargestellt. Die Kraft zeigt für das Vorwärtsstrangpressen zunächst einen großen Anstieg, weil zum Pressbeginn der eingesetzte Block, dessen Außendurchmesser geringfügig kleiner als der Presszylinder-Durchmesser war, aufgestaucht wird. Nach Abschluss dieses instationären Anlaufvorgangs nimmt die Presskraft stetig ab, da die Reibung zwischen Block und Aufnehmer linear mit der Blocklänge abnimmt. Die Neigung dieses Bereiches hängt vom verwendeten Schmierstoff ab. Zum Ende des Strangpressvorgangs ergibt sich ein Kraftanstieg, da der Stempel in die vor der Matrize liegende Umformzone eindringt, den Werkstofffluss stört und zusätzliche innere Schiebungen hervorruft.

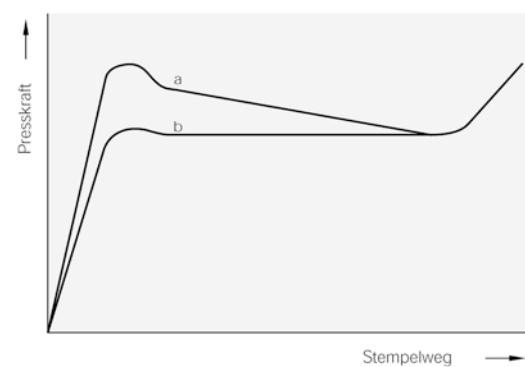


Abb. 3.73 Schematischer Kraft-Weg-Verlauf beim Strangpressen: **a** Voll-Vorwärts-Strangpressen **b** Voll-Rückwärts-Strangpressen

Beim Rückwärts-Strangpressen, bei dem ein hohler Stempel den ausgepressten Strang aufnimmt, fehlt die Relativbewegung zwischen Block und Aufnehmer. Die Presskraft hat einen geringeren Anfangswert und bleibt annähernd konstant.

Zum Schmieren können beim Strangpressen von Nichteisenmetallen alle Hochdruckschmierstoffe verwendet werden, die einen zusammenhängenden Schmierfilm ergeben und den Temperaturen standhalten. Auf die Glasschmierung beim *Ugine-Séjournet*-Verfahren zum Strangpressen von Stahl wurde bereits hingewiesen.

Eine wichtige Voraussetzung für die wirtschaftliche Fertigung von Strangpressprodukten ist die zweckmäßige Auslegung einer *Auslaufeinrichtung* hinter der Pressanlage. Sie muss das Pressgut möglichst dicht hinter der Matrize selbsttätig annehmen und unter leichtem, einstellbarem Zug führen können. Auf diese Weise wird ein Richteffekt ausgeübt und ein Verdrallen und Ablaufen des Profils von der Auslaufbahn vermieden. Bei mehrsträngigem Pressen mit einer Auszieheinrichtung ergibt sich als weiterer Vorteil das gleichmäßige Austreten aller Stränge.

Für die Errechnung des *Kraftbedarfs* kann zunächst angenommen werden, dass die Umformung zum Strang ausschließlich in der kegeligen Umformzone vor der Matrize stattfindet. Hierzu wird die Umformkraft F_U benötigt:

$$F_U = A_0 \frac{k_f}{\eta_F} \varphi_{\text{ges}}. \quad (3.33)$$

Der Gesamtumformgrad beträgt $\varphi_{\text{ges}} = \ln |(zA_1/A_0)|$ mit z als der Anzahl der Stränge, A_1 als dem Austrittsquerschnitt und A_0 als dem aufgestauchten Blockquerschnitt. Die Reibkraft F_R zwischen Block und Presszylinder beträgt

$$F_R = \mu k_f d_z \pi h. \quad (3.34)$$

Dabei ist d_z der Zylinderdurchmesser und h die jeweilige Blockhöhe. Die Gesamtkraft ergibt sich aus $F_{\text{ges}} = F_U + F_R$ zu

$$F_{\text{ges}} = A_0 \frac{k_f}{\eta_F} \cdot \varphi_{\text{ges}} + \mu k_f d_z \pi h. \quad (3.35)$$

Wird mit Schale gepresst, muss die Reibspannung μk_f zwischen Block und Aufnehmerwandung durch die Schubfließspannung $k = k_f/2$ des Werkstoffs ersetzt werden.

Der Umformwirkungsgrad η_F liegt bei der Warmumformung bei $\eta_F = 0,2$ bis $\eta_F = 0,6$. Bei nicht runden Strängen wird zusätzlich ein Formfaktor eingeführt, der die höheren Fließwiderstände in der Form berücksichtigt. Dieser Formfaktor kann bis 1,5 betragen. Ergibt sich nach der Berechnung, dass die erforderliche Kraft F_{ges} nicht zur Verfügung steht, kann der Anwender folgende Maßnahmen treffen:

- Eine Maschine mit höherer Nennkraft beschaffen,
- einen kleineren Blockdurchmesser verwenden,
- mit verkleinerter Blocklänge arbeiten,
- bei erhöhter Umformtemperatur strangpressen,
- die Reibung verkleinern,
- größere Ausgleichsstränge vorsehen.

Das *Quer-Strangpressen* ist ein Sonderverfahren, bei dem der Werkstoff *quer* zur Wirkrichtung fließt. Hiernach können beispielsweise Tiefseekabel mit einem biegsamen Bleimantel umhüllt werden, wie es Abb. 3.74 verdeutlicht. Zum Einsetzen eines neuen Blocks muss der Fertigungsprozess kurz unterbrochen werden.

3.3.4.2 Fließpressen

Fließpressen ist das Durchdrücken eines zwischen Werkzeugteilen aufgenommenen Werkstücks mittels Stempel durch eine Düse. Es ist ein Massivumformverfahren, bei dem metallische Werkstoffe meist bei Raumtemperatur durch große Druckspannungen in Radial- und Axialrichtung zum Fließen gebracht werden.

Der Werkstoff wird durch eine Bohrung in der Matrize, im Stempel oder durch einen Spalt zwischen Matrize und Stempel verdrängt. Als Rohlinge dienen Scheiben, Stangenabschnitte oder Vorpresslinge, die durch Ändern des Querschnitts ihre Form erhalten.

Das *Kalffließpressen* hat sich aus der Verarbeitung von Tuben und Hülsen entwickelt.

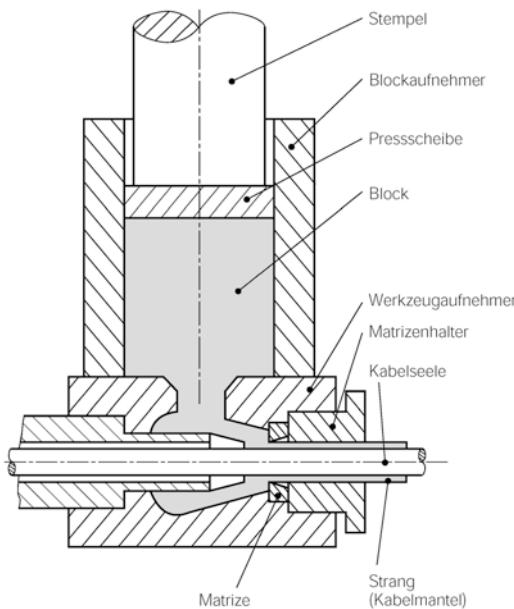


Abb. 3.74 Quer-Strangpressen zum Herstellen von ummantelten Tiefseekabeln (schematisch)

Zu deren Herstellung wurden zunächst nur sehr weiche Metalle, später auch Zink, Aluminium und Kupfer verwendet. Im Jahre 1934 gelang es erstmals, auch Stahl kaltfließzupressen. Die anfänglichen Schwierigkeiten bezüglich der Standzeit der Werkzeuge und der Oberflächenbeschaffenheit der Werkstücke konnten durch Schmierstoffe behoben werden. Besonders geeignet für dieses Verfahren ist eine chemische Vorbehandlung der Rohlinge mit einer Phosphatschicht (sog. *Bondern*). Nach dem Werkstofffluss lassen sich grundsätzlich drei Verfahren wie in Abb. 3.75 unterscheiden:

Rückwärts-Fließpressen ist das gegenläufige Umformen eines Werkstücks in Bezug auf die Maschinenwirkrichtung. Der Werkstoff fließt entgegen der Stempelbewegung. Das Verfahren wird hauptsächlich zum Herstellen von Hülsen und Näpfen angewendet; somit ist das fertige Werkstück meist ein einseitig offener Hohlkörper (Abb. 3.75a). *Vorwärts-Fließpressen* ist gleichläufiges Umformen eines Werkstücks in Bezug auf die Maschinenwirkrichtung. Der Werkstoff fließt in Richtung der Stempelbewegung (Abb. 3.75b). Es können axialsymmetrische Voll- und Hohlkörper erzeugt werden.

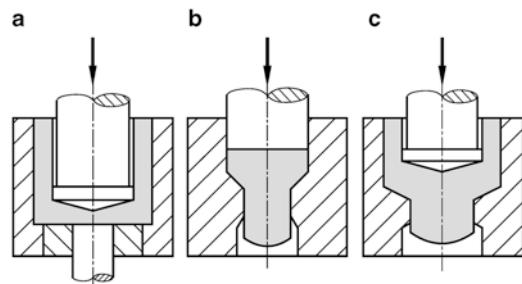


Abb. 3.75 Prinzipdarstellung der wichtigsten Fließpressverfahren nach DIN 8583. **a** Napf-Rückwärts-Fließpressen **b** Voll-Vorwärts-Fließpressen **c** Gemischt-Fließpressen

Gemischt-Fließpressen ist die Kombination beider genannter Verfahren. Der Werkstoff fließt mit und entgegen der Stempelbewegung (Abb. 3.75c). In einem Arbeitsgang können daher komplizierte Formen, etwa entsprechend Abb. 3.76, hergestellt werden, auch mit unterschiedlichen Wanddicken.

Als *Fließpress-Werkstoffe* eignen sich die meisten Nichteisenmetalle sowie niedrig-

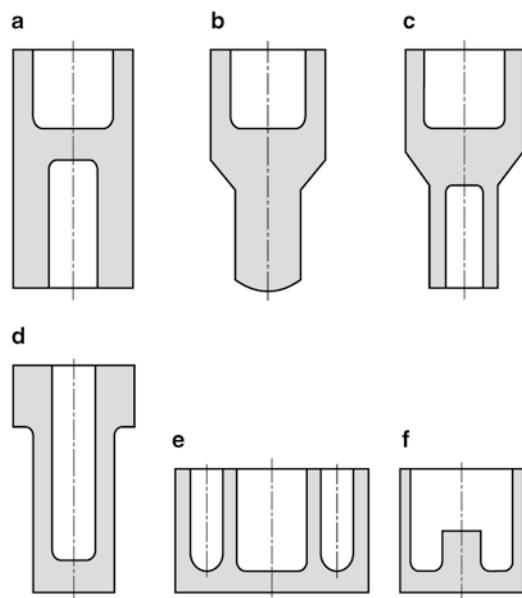


Abb. 3.76 Verfahrenskombinationen für Fließpress-Hohlkörper: **a** Napf-Vorwärts mit Napf-Rückwärts **b** Voll-Vorwärts mit Napf-Rückwärts **c** Hohl-Vorwärts mit Napf-Rückwärts **d** Napf-Vorwärts mit Flanschanstauchen **e** Napf-Rückwärts mit Napf-Rückwärts **f** Voll-Rückwärts mit Napf-Rückwärts

gekohlte und niedriglegierte Stähle (Cr, CrMn). Stähle mit Korngrößen von 9 bis 7 nach der ASTM-Korngrößen-Richtreihe⁵ eignen sich besonders gut. Von den Nichteisenmetallen sind Sn, Zn, Cu sowie die gut kaltumformbaren Legierungen Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg und Al-Mg-Mn für das Fließpressen geeignet (Korngröße 6 bis 4 nach ASTM).

Die *Schmierung* ist für das Verfahren von ausschlaggebender Bedeutung. Da die Reibarbeit nahezu die Hälfte der gesamten Umformarbeit betragen kann, werden vom Schmierstoff niedrige Reibung, ausreichende Druckbeständigkeit, gute Oberflächenhaftung, Zusammenhalt auch bei starker Oberflächenvergrößerung und das Verhindern von Kaltschweißstellen gefordert.

Für Nichteisenmetalle werden in der Praxis mineralische Öle und Fette sowie Metallstearate eingesetzt. Bei Stahl muss eine Trennschicht zwischen Werkstück und Werkzeug vorhanden sein. Am besten hat sich das Phosphatieren (Schichtdicke 5 bis 10 µm) bewährt. Als Schmierstoff können dann Natronseife, Molybdänsulfid oder Grafit eingesetzt werden. Für nichtrostende Stähle hat sich dagegen eine Oxalatschicht als Schmierstoffträger oder ein metallischer Überzug (Cu, Pb, Sn, Zn) bewährt.

Zum Erzielen einwandfreier Werkstücke sind Oberflächenzustand und Volumen des Rohlings maßgebend. Als Ausgangsrohlinge können Platinen (Blechausschnitte), Stangenabschnitte (abgeschert oder gesägt) und Vorpresslinge verwendet werden. Je nach den Anforderungen an das Pressteil wird Walzstahl, gezogener oder geschälter Werkstoff eingesetzt. Erreichbare Werkstückgenauigkeiten im Durchmesser liegen bei IT 13 bis IT 8. Die Oberfläche kann eine Rauheit von $R_z = 6,3 \mu\text{m}$ erreichen. Fließgepresste Teile haben hervorragende Festigkeits- und Dauerfestigkeitswerte. Ursache ist die Kaltverfestigung im Zusammenwirken mit dem nicht angeschnittenen Faserverlauf. Dadurch können Stähle mit niedriger Festigkeit für höher be-

anspruchte Teile eingesetzt werden, ohne dass vergütet werden muss.

Weitere *Vorteile* des Kaltfließpressens sind die große Stoffeinsparung gegenüber dem Spannen und auch gegenüber vielen anderen Umformverfahren (z. B. dem Warm-Gesenkschmieden) sowie die hohe Mengenleistung selbst bei schwierigen Formteilen. Der Hauptabnehmer für Fließpressteile ist die Automobilindustrie. Die Produktion nimmt in der Bundesrepublik Deutschland und in den USA jährlich um etwa 12 % zu.

Wirtschaftliche Stückzahlen sind:

Mindestmenge	Werkstückmasse
10.000	1 bis 20 g
5000	20 bis 500 g
3000	0,5 bis 10 kg

Die Standzeit der Werkzeuge kann zwischen 10.000 und 20.000 Pressungen liegen. Geometrische Grenzwerte für fließgepresste Hohlkörper sind:

Länge	5 bis 1200 mm,
Außendurchmesser	5 bis 150 mm,
Wanddicke	0,5 bis 50 mm,

Mindestwanddicke:

bei Aluminium $\geq 0,1 \text{ mm}$.

Der *Werkstofffluss* beim Fließpressen kann durch Versuche mit geteilten Rohlingen und an Hand der auf der Teilungsebene eingebrachten Liniennetze wie in Abb. 3.77 ermittelt werden. Es ist vorteilhaft, wenn die Rohteile dem Matrizenwinkel entsprechend vorgeformt werden. Der Werkstofffluss wird vorwiegend durch die Werkzeuggeometrie und den Reibzustand beeinflusst.

Die *Kraftwirkungen* beim Voll-Vorwärts-Fließpressen lassen sich an Hand von Abb. 3.78 erläutern: Der Stangenabschnitt wird von der Querschnittsfläche A_0 auf den Austrittsquer schnitt A_1 vermindert. Der größte Umform-

⁵ASTM: American Society of Testing Materials.

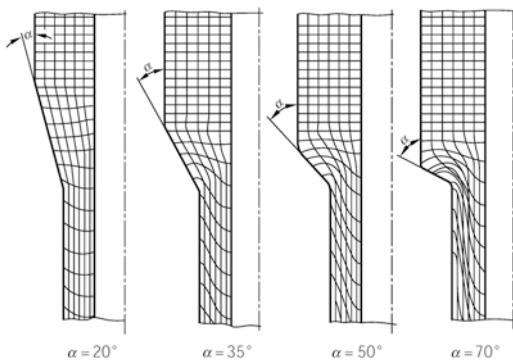


Abb. 3.77 Werkstofffluss beim Hohl-Vorwärts-Fließpressen bei verschiedenem Neigungswinkel α (Matrizenöffnungswinkel = 2α)

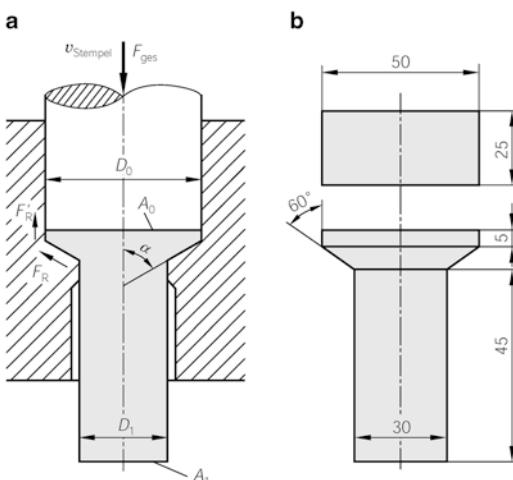


Abb. 3.78 a) Zur Kraftwirkung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen b) Berechnungsbeispiel zum Voll-Vorwärts-Fließpressen

grad, bei dessen Betrag die Fließspannung k_f der Fließkurve entnommen wird, ist

$$\varphi_g = |\ln(A_1/A_0)|.$$

Berechnungsbeispiel zu Abb. 3.78b

Gegeben

Ausgangsdurchmesser	$D_0 = 50 \text{ mm}$
Enddurchmesser	$D_1 = 30 \text{ mm}$
Ausgangshöhe	$h_0 = 25 \text{ mm}$
Endhöhe	$h_1 = 45 \text{ mm}$

Neigungswinkel

$$\alpha = 60^\circ \approx 1 \quad (\text{im Bogenmaß})$$

Reibungszahl

$$\mu = 0,1 \text{ (geschätzt)}$$

Kopfhöhe

$$h_k = 5 \text{ mm}$$

Zu berechnen ist die erforderliche Umformkraft F_{ges} .

Lösung

$$\varphi_g = \left| \ln \frac{A_1}{A_0} \right| = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{50^2}{30^2} = \ln 2,78 = 1,02.$$

Der Fließkurve für Stahl (Abb. 3.9) wird die dazugehörige Fließspannung $k_{f1} = 670 \text{ N/mm}^2$ entnommen. Mit dem Wert $k_{f0} = 270 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich aus der grafischen Mittelung $k_{fm} = 580 \text{ N/mm}^2$. Somit ist die Umformkraft nach (Gl. 3.36)

$$\begin{aligned} F_{\text{ges}} &= 1963,5 \cdot 580 \cdot 1,02 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{1,02} + \frac{0,1}{0,5 \cdot 0,87} \right)^N \\ &\quad + \pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot 0,1 \cdot 270 \text{ N} \\ &= 1,16 \cdot 10^6 \cdot (1 + 0,65 + 0,23) \text{ N} + 21.205,75 \text{ N} \\ &= 22 \text{ MN}. \end{aligned}$$

Nach diesem Kraftbedarf kann die Presse ausgesucht werden.

Die Umformkraft für das *Vorwärts-Fließpressen* setzt sich aus Teilkräften zusammen, nämlich aus der jeweiligen Kraft für die ideelle Umformung F_{id} , für die innere Schiebung F_{Sch} , für die Verluste im Matrizentrichter durch Reibung F_R und für die äußere Zylinderreibung F'_R :

$$\begin{aligned} F_{\text{ges}} &= F_{id} + F_{Sch} + F_R + F'_R \\ &= A_0 k_{fm} \varphi_g \left(1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\varphi_g} + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \pi D_0 h_k \mu k_{f0}. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Die Umformarbeit lässt sich über die Umformleistung berechnen:

$$\dot{W} = F_{\text{ges}} \cdot v_{\text{Stempel}} \quad \text{bzw.} \quad W = \dot{W} \cdot t. \quad (3.37)$$

Beim *Rückwärts-Fließpressen* kann der für die Pressenauswahl und Auslegung der Werkzeuge benötigte Kraftbedarf zweckmäßigerweise nach Abb. 3.79 aus folgender Modellvorstellung hergeleitet werden: In einem ersten Schritt wird

nur das Stauchen unter dem Stempel mit dem Durchmesser D_1 von der Rohlingshöhe h_0 auf die Bodenhöhe h_1 betrachtet. Hierfür lässt sich nach Siebel ansetzen:

$$F_{\text{Stauch}} = \frac{\pi}{4} D_1^2 k_{\text{fl}} \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{D_1}{h_1} \right). \quad (3.38)$$

In einem zweiten gedachten Schritt wird der Ringzylinder auf seine Wanddicke s umgeformt. Hierfür gilt:

$$F_{\text{Zylinder}} = \frac{\pi}{4} D_1^2 k_{\text{f2}} \left[1 + \frac{h_1}{s} \left(0,25 + \frac{\mu}{2} \right) \right]. \quad (3.39)$$

Die Gesamtkraft für das Hohl-Rückwärts-Fließpressen beträgt dann:

$$\begin{aligned} F_{\text{ges}} &= F_{\text{Stauch}} + F_{\text{Zyl}} = A_1 k_{\text{fl}} \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{D_1}{h_1} \right) \\ &\quad + A_2 k_{\text{f2}} \left[1 + \frac{h_1}{s} \left(0,25 + \frac{\mu}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.40)$$

Berechnungsbeispiel zu Abb. 3.79

Gegeben

$$D_0 = 50 \text{ mm},$$

$$D_1 = 35 \text{ mm},$$

$$h_0 = 28 \text{ mm},$$

$$h_1 = 10 \text{ mm},$$

$$\text{Napfhöhe } H = 45 \text{ mm},$$

$$\text{Wanddicke } s = \frac{50-35}{2} \text{ mm} = 7,5 \text{ mm},$$

$$\text{Reibbeiwert } = 0,1 \text{ (geschätzt)}$$

Lösung Der Umformgrad unter dem Stempelboden beträgt:

$$\varphi_1 = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln 2,8 = 1,03.$$

Für diesen Wert müsste die Fließspannung k_f der Fließkurve entnommen oder aber berechnet werden. Für C10E (Ck 10) ergibt eine Berechnung nach (Gl. 3.5):

$$k_f = C \cdot \varphi^n = 690 \cdot \varphi^{0,2519} \text{ N/mm}^2.$$

Das ergibt mit φ_1 :

$$k_{\text{fl}} = 695 \text{ N/mm}^2.$$

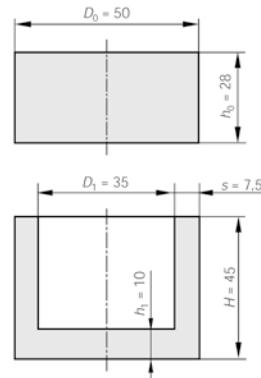


Abb. 3.79 Berechnungsbeispiel für das Napf-Rückwärts-Fließpressen

Die Formänderung für den Hohlzylinder des Wandbereichs ergibt sich zu

$$\varphi_2 = \varphi_1 \left(1 + \frac{D_1}{8 \cdot s} \right) = 1,03 \left(1 + \frac{35}{8 \cdot 7,5} \right) = 1,63.$$

Die dazugehörige Fließspannung k_f errechnet sich zu

$$k_{\text{f2}} = 690 \cdot \varphi_2^{0,2519} \text{ N/mm}^2 = 780 \text{ N/mm}^2$$

Somit ist die Gesamtkraft nach (Gl. 3.40)

$$\begin{aligned} F_{\text{ges}} &= 962 \cdot 690 \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,1 \frac{35}{10} \right) \text{ N} \\ &\quad + 962 \cdot 780 \left[1 + \frac{10}{7,5} \left(0,25 + \frac{0,1}{2} \right) \right]^{\text{N}} \\ &= 1791 \text{ kN} = 1,8 \text{ MN}. \end{aligned}$$

Dieser Kraftbedarf dient der Pressenauswahl.

Im Vergleich zu Warmumformverfahren sind die Beanspruchungen der Werkzeuge beim *Kaltfließpressen* besonders hoch. Abb. 3.80 zeigt einen Werkzeugsatz für das Napf-Rückwärts-Fließpressen. Die Umformkraft wirkt in axialer und radialer Richtung auf das Werkzeug. Axiale Druckspannungen werden vom Werkzeug auf die Presse übertragen und ohne große Schwierigkeiten abgeleitet. Die radiale Komponente wirkt dagegen als Innendruck auf die Innenwand des hohlen Werkzeugs (Matrize oder Aufnehmer). An dieser Stelle entstehen große Zugspannungen, die das Werkzeug auseinanderreißen können. Daher werden oft vor-

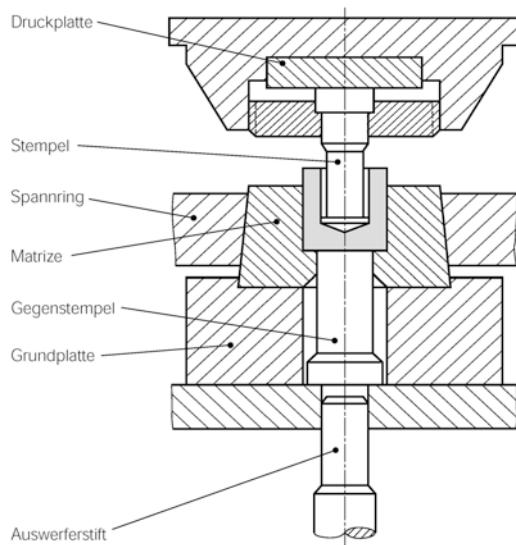


Abb. 3.80 Werkzeugsatz für das Napf-Rückwärts-Fließpressen; Matrizenausführung ohne Schrumpfing

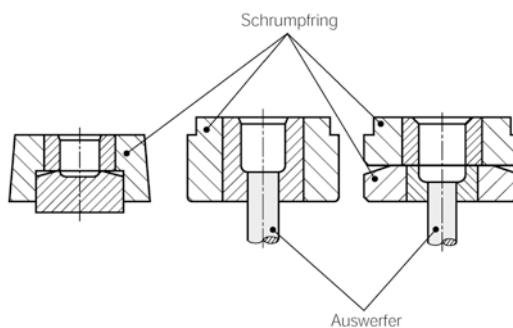


Abb. 3.81 Beispiele für die Pressbüchsengestaltung mit Schrumpfing beim Napf-Rückwärts-Fließpressen

gespannte Werkzeugsätze verwendet, etwa wie Abb. 3.81 zeigt. Als Richtwerte für die Anzahl der Armierungsringe kann angegeben werden:

Innendruck p_i N/mm ²	Anzahl der Ringe	Durchmesserver- hältnis d_a/d_i
Bis 1000	0	4 bis 5
1000 bis 1600	1	4 bis 5
1600 bis 2000	2	5 bis 6

Die Werkzeugform beeinflusst die Höhe der Umformkräfte. Die Stempel-Wirkseitenform kann verschieden ausgeführt werden; Abb. 3.82

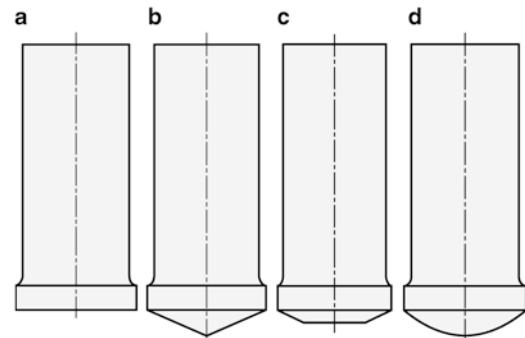


Abb. 3.82 Stempel-Wirkseitenformen für das Hohl-Rückwärts-Fließpressen **a** flach, **b** kegelig, **c** Kegelstumpf, **d** kugelig

zeigt eine Auswahl. Flache Stempel sind zwar am einfachsten herzustellen, bewirken aber wegen des Werkstoffgleitens unter hohen Flächenpressungen höhere Reibkräfte. Stempel mit kegeliger Wirkseite (Abb. 3.82b, c) zeigen je nach ihrem Kegelwinkel 2α geringere bezogene Stempelkräfte. Wegen der geforderten kleinen Unterschiede in der Bodendicke des Produktes wird mit Kegelwinkeln von $2\alpha = 160^\circ$ bis $2\alpha = 170^\circ$, gearbeitet. Stempel mit kugeliger Wirkseite haben die kleinsten Reibungsverluste, sind aber mit Rücksicht auf die Werkstückgeometrie selten einsetzbar.

Für Stempelformen zum Hohl-Vorwärts-Fließpressen gibt es ebenfalls mehrere Ausführungsbeispiele, wie aus Abb. 3.83 hervorgeht. Beim Stempel mit festem Dorn (Abb. 3.83b)

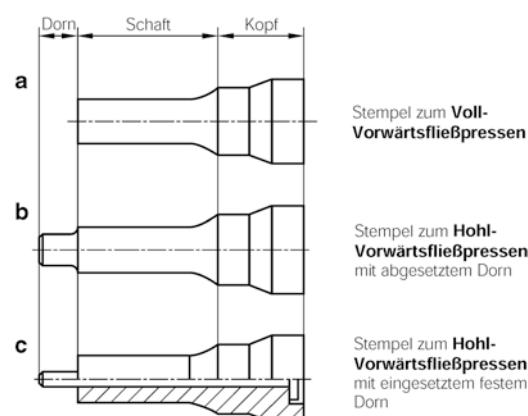


Abb. 3.83 Stempelformen für das Vorwärts-Fließpressen

soll das Verhältnis Dornlänge/Durchmesser 1,5 sein. Der Übergangsradius zwischen Stempel und Dorn muss möglichst groß gewählt werden (wegen hoher Spannungskonzentrationen). Der eingesetzte feste Dorn (Abb. 3.83c) wird verwendet, wenn mit kegeligem Dorn eine schwächer kegelig ausgeführte Bohrung erzeugt werden soll. Wenn vorgesehen ist, den Hohlstempel auch als Abstreifer einzusetzen, kann ein federnder beweglicher Dorn im Hohlstempel angeordnet werden.

Als *Werkzeugmaschinen* zum Fließpressen dienen mechanische weggebundene Pressen (Kurbel-, Exzenter-, Kniehebelpressen). Sie können in stehender oder liegender Bauart als Einstufen- oder Mehrstufenpressen ausgeführt werden. Außerdem werden auch hydraulische Pressen eingesetzt.

Beispiele für die maximale Nennkraft sind

Kurbelpressen $F_N = 25 \text{ MN}$,
Kniehebelpressen (einstufig) $F_N = 32 \text{ MN}$,

Mehrstufenpressen

mechanische $F_N = 14 \text{ MN}$,
hydraulische Pressen $F_N = 40 \text{ MN}$

Auch größere Einheiten wären technisch zu realisieren; sie sind jedoch derzeitig nicht wirtschaftlich einsetzbar.

3.4 Zug-Druck-Umformen

Bei dieser Verfahrensgruppe wird der plastische Zustand durch zusammengesetzte Zug- und Druckbeanspruchung erzeugt. Nach DIN 8584-1 gehören hierzu die technischen Fertigungsverfahren *Durchziehen* als Draht- und Stabziehen, *Tiefziehen* von Blechen zu Hohlkörpern und deren weitere Umformung mit Verringern des Durchmessers, *Drücken* von Hohlkörpern und deren Formänderung durch Weiten oder Verengen sowie das *Kragenziehen* und *Knickbauchen*.

Das Kragenziehen wird häufig in Verbindung mit dem Lochen im Behälterbau an-

gewendet. Dabei muss der gelochte Behälter (z. B. für Hochspannungs-Schaltanlagen) mit Schweißbrennern erhitzt werden, um ein ausreichend leichtes Fließen des Werkstoffs zu ermöglichen. Die in den Behälter einzuschweißenden Rohrstutzen können dann kostengünstig längs einer Kreisbahn von Schweißautomaten eingeschweißt werden. Die aufwendige Fugenvorbereitung bei elliptischen Schnitten kann entfallen.

3.4.1 Draht- und Stabziehen

Alle Durchziehverfahren haben nach DIN 8584 das gemeinsame Merkmal, dass das Rohteil durch eine in Ziehrichtung verengte, formgebende düsenförmige Matrize hindurchgezogen wird. Dabei unterscheidet man das *Gleitziehen* als Durchziehen von Voll- und Hohlkörpern durch ein feststehendes Ziehwerkzeug – z. B. Zieheisen, siehe Abb. 3.84 – vom *Walzziehen*, bei dem der Ziehring durch ein drehbar gelagertes Ziehrollenpaar ersetzt wird (vgl. Abb. 3.14b), Längswalzen von Profilquerschnitten).

Das *Draht- und Stabziehen* wird zum Herstellen von meist kreisringförmigen Vollprofilen verwendet. Es ist ein Gleitziehverfahren zur Halbzeug- und Drahtherstellung. Dazu werden warmgewalzte Rohteile als Stabmaterial entzündert und an einem Ende angespitzt. An dieser sog. Angel greift die Ziehzange an.

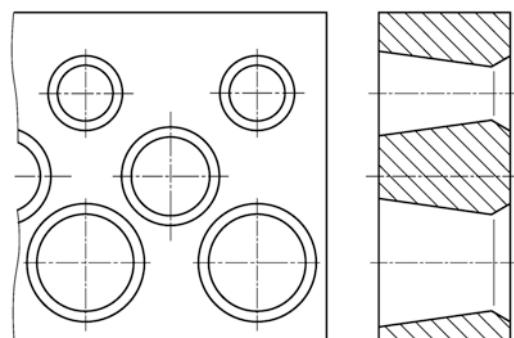


Abb. 3.84 Zieheisen (aus chromlegiertem Stahl) zum stufenweisen Reduzieren des Drahdurchmessers. Der Innenraum des Werkzeugs heißt Ziehhohle

Als Schmierstoffe werden häufig Zwischenschichten auf der Basis von Kalk, Borax, Phosphat oder Oxalat verwendet. Wie bei anderen Umformverfahren soll hier der Schmierstoff eine geringere Reibung bewirken, gute Trenneigenschaften in der Wirkfuge haben, temperaturbeständig sein und glatte Werkstückoberflächen ermöglichen. Der Schmierstoff muss weiterhin druckbeständig, leicht aufzubringen und gut zu entfernen sein. Wegen der Sicherheitsbestimmungen am Arbeitsplatz dürfen keine gesundheitsschädigenden oder belästigenden Gase oder Rauchschwaden auftreten. Ehe der Schmierstoffträger aufgebracht wird, muss man eine metallisch reine Oberfläche erzeugen. Stahlwerkstoffe werden deshalb mechanisch oder chemisch entzundert.

In der Drahtindustrie ist das *Kälken* noch weit verbreitet, da Kalk die letzten Reste der Beizsäure neutralisiert und später beim Ziehen mit organischen Ziehfetten verseift. Wird *Borax* an Stelle von Kalk als Schmierstoffträger verwendet, ergibt sich durch die größere Haftfähigkeit eine bessere Oberflächenfeinheit.

Auch Alkali und Seifen können als Schmierstoffträger eingesetzt werden. Eine besondere Bedeutung haben die *Phosphatierverfahren* (Bondern) beim Gleitziehen von höhergekohlttem Stahldraht mit hohen Ziehgeschwindigkeiten und Umformgraden erlangt.

Als **Schmierstoff** selbst werden Petroleum, Rüböl, Mineralöle, Seifenemulsionen, teilweise mit MoS₂- und Grafit-Zusatz (*Nassschmierstoff*) sowie Bienenwachs, Talg, Kalkmischungen und Metallseifen, wie Al-, Ca-, Zn-Stearate (*Trockenschmierstoff*) verwendet. Als Richtwerte für die Reibungszahl kann bei Rüböl $\mu = 0,05$ für Hartmetall- und $\mu = 0,10$ für Stahl-Ziehringe angegeben werden.

Für Stahl-Ziehringe beträgt die Standmenge etwa 2000 kg Draht je Durchgang. Bei *Hartmetallwerkzeugen* kann sie auf das 30- bis 200-fache gesteigert werden. Ziehsteine aus Hartmetall – Abb. 3.85 zeigt die Anordnung – sind in DIN 1547 genormt. Bis zu einem Öffnungs-Durchmesser von $d_1 = 0,3$ mm werden die Hartmetallziehsteine gleich mit der Bohrung gesintert. Geschliffen und poliert wird da-

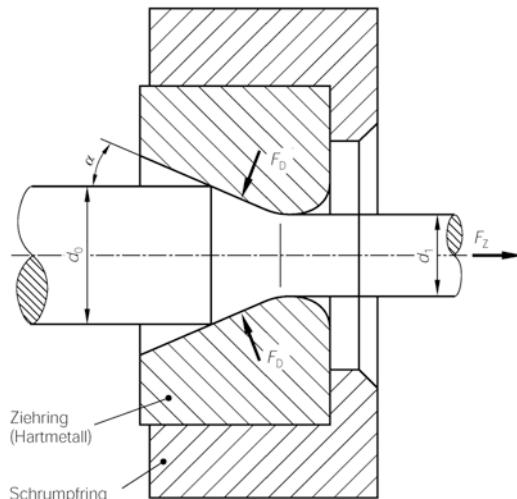


Abb. 3.85 Ziehstein aus Hartmetall mit Schrumpfing aus Stahl d_0 Ausgangsdurchmesser des Drahts d_1 Enddurchmesser des Drahts α halber Kegelwinkel des Ziehhols F_z Ziehkraft F_D Druckkraft

nach mit Diamantpulver oder Borcarbid verschiedener Körnung.

Fein- und Feinstdrähte mit 1,5 mm bis zu 5 μm Durchmesser werden häufig mit *Diamant-Ziehsteinen* gezogen. Die Fertigung dieser verschleißfesten Werkzeuge erfolgt in einer Kombination von mechanischen, chemischen, elektrischen und elektrolytischen Verfahren. Der Poliereffekt wird durch eine feinabgestimmte Funkenerosion im Ziehhol erreicht, wie in Abb. 3.86 erläutert ist.

Der Ziehvorgang erfolgt in mehreren Stufen. Die mögliche Formänderung je Stufe ist durch die Belastbarkeit des Kraft-Einleitungsquerschnitts A_1 begrenzt⁶. Man kann je Zug unter Berücksichtigung der Kaltverfestigung $\varphi_{\max} = 0,2$ bis $\varphi_{\max} = 0,5$ ansetzen.

Beim Ziehen von Stahl muss nach fast jedem Zug eine Zwischenglühung erfolgen.

Dicke Stäbe mit $d_0 = 16$ mm sowie Rohre und Profile werden auf *Ziehbänken* gezogen. In Industrie-Betrieben ist die Kettenziehbank

⁶Die Ziehkraft F_z soll aus Sicherheitsgründen 70 % des Wertes $A_1 \cdot R_m$, der Abreißbedingung bei mittelbarem Kraftangriff, nicht überschreiten.

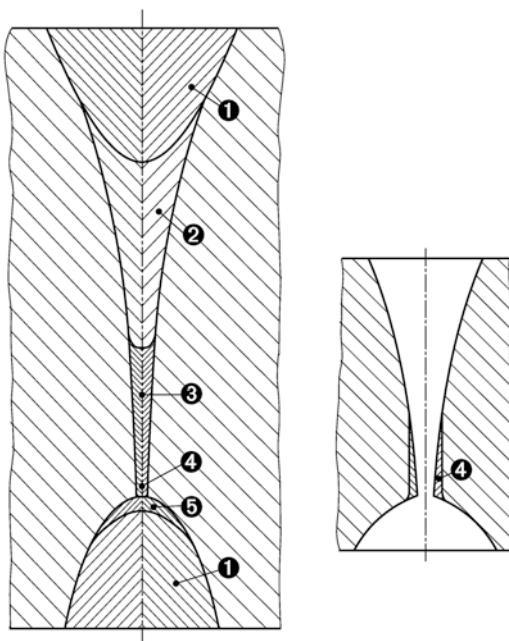


Abb. 3.86 Arbeitsgänge am Diamant-Ziehstein (nach O. Fritsch). ① Bearbeitung chemisch (Ausbrennen mit Sauerstoff) ② mechanisch-elektrisch ③ elektrolytisch ④ elektrisch durch Funkenerosion ⑤ mechanisch-elektrisch

weit verbreitet, die mit einhakbarem Kettenwagen arbeiten. Ziehmaschinen mit zwei gegengläufig bewegten Ziehwagen ermöglichen einen kontinuierlichen Ziehprozess. Bei *Mehrfach-Drahtziehmaschinen* wird der von der Haspel ablaufende Draht nach Durchlaufen der Ziehdüse auf der angetriebenen Ziehtrommel aufgewickelt. Es erfolgt ein sog. Endlos-Ziehen, schematisch dargestellt in Abb. 3.87.

Die *Temperaturerhöhung* beim Gleitziehen entsteht durch die fast zu 90 % in Wärme umgesetzte Umformarbeit. Eine Festigkeitsabnahme kann sich aufgrund der Erwärmung in der Umformzone nicht negativ auswirken, weil die Ziehgeschwindigkeiten im Vergleich zu den meisten anderen Umformverfahren mit über 60 m/s sehr hoch sind.

Nach Siebel und Kobitzsch kann nach der elementaren Plastizitätstheorie ausreichend genau eine adiabatische mittlere Temperaturerhöhung in °C für homogen umgeformte Volumenelemente angegeben werden:

$$\Delta T = k_{fm} \frac{1}{c\rho} \ln \frac{A_0}{A_1}. \quad (3.41)$$

Hierin sind:

c spezifische Wärmekapazität des Werkstoffs,
 ρ Dichte des Werkstoffs.

Die *Reibung* zwischen Ziehhol und Drahtoberfläche entlang der Umformzone bewirkt eine zusätzliche Temperaturerhöhung in der Randzone des Drahtes. Man kann eine parabolische Temperaturverteilung in Richtung auf die Drahtachse annehmen. Je schneller gezogen wird, desto höher wird die Oberflächentemperatur entlang der Umformzone, weil die abgeleitete Reibungswärme auf ein geringeres Volumen konzentriert bleibt. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnungen, gemessen über den Querschnitt, bleiben *Eigenspannungen* im Draht zurück.

Der *Kraftbedarf* beim Draht- und Stabziehen ist am einfachsten für den Fall des runden Voll-

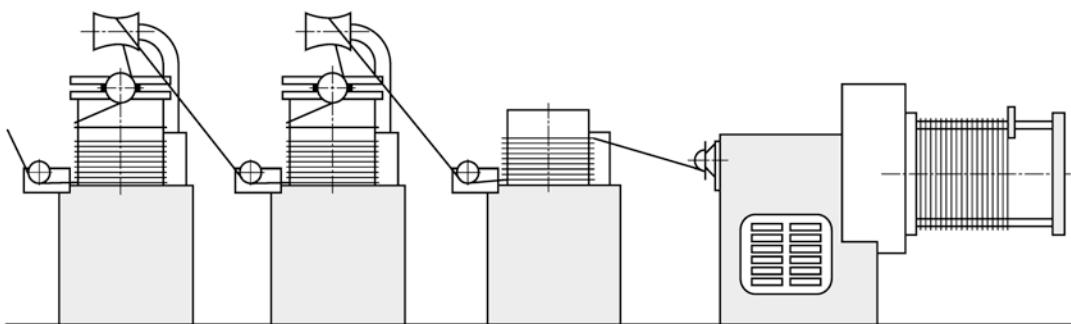


Abb. 3.87 Schematische Darstellung einer Mehrfach-Drahtziehmaschine (Block-Ziehmaschine)

strangziehens herzuleiten. Die Zugkraft F_Z in Abb. 3.85 erzeugt im Querschnitt A_1 die Zugspannung $\sigma = F_Z/A_1$. Infolge der im Ziehtrichter auftretenden Druckspannungen werden die Volumenelemente gleichzeitig in der Umformzone in radialer Richtung gestaucht. Die ideelle Umformkraft ist bei mittelbarer Kraftwirkung

$$F_{id} = A_1 k_{fm} \varphi \quad \text{in N.} \quad (3.42)$$

Die mittlere Fließspannung k_{fm} muss berücksichtigt werden, weil in Richtung auf den Ziehholaustritt eine zunehmende Verfestigung auftritt. Den Wert für k_{fmax} muss man beim größten Umformgrad

$$\varphi_{max} = \left| \ln \frac{A_1}{A_0} \right| = 2 \left| \ln \frac{d_1}{d_0} \right|$$

aus der Fließkurve für den jeweiligen Werkstoff entnehmen.

Die Reibung längs der kegeligen Düsenwand beträgt

$$F_R = \mu F_N \approx \mu k_{fm} A_1 \varphi. \quad (3.43)$$

Die Ziehkraft muss die axiale Komponente der Reibkraft überwinden:

$$F'_R = \mu F_N \frac{1}{\tan \alpha} = \mu k_{fm} A_1 \varphi \frac{1}{\tan \alpha}. \quad (3.44)$$

Der halbe Kegelwinkel α der Ziehdüse beeinflusst nicht nur die Reibung, sondern auch den Kraft- und Arbeitsbedarf für Schiebungsverluste am Ein- und Austritt in die Umformzone

$$F_S = k_{fm} A_1 \frac{2}{3} \tan \alpha. \quad (3.45)$$

Da die Winkel an Ziehdüsen verhältnismäßig klein sind ($\alpha = 10^\circ$ bis $\alpha = 15^\circ$), kann näherungsweise $\tan \alpha$ dem Bogenmaß gleichgesetzt werden.

Damit ergibt sich die Gesamtziehkraft zu

$$F_{ges} = F_{id} + F'_R + F_S = k_{fm} A_1 \left[\varphi \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right]. \quad (3.46)$$

Daraus lässt sich nach Siebel der optimale Neigungswinkel berechnen:

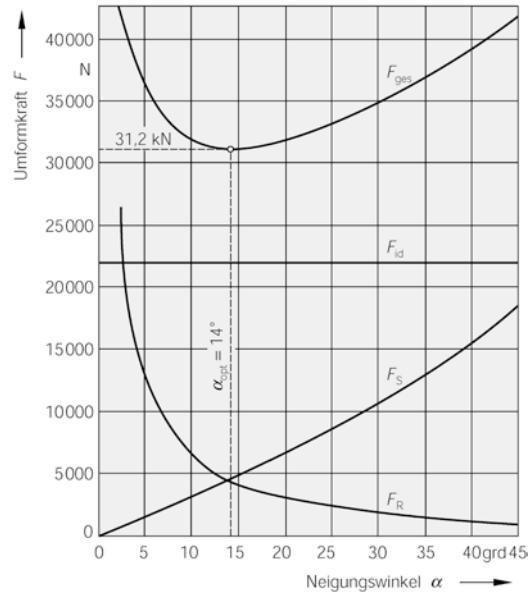


Abb. 3.88 Umformkraft F in Abhängigkeit vom Neigungswinkel α . (Nach K. Grüning)

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{2}{3} \mu \varphi}. \quad (3.47)$$

Er ergibt sich auch aus der grafischen Darstellung der Kräfte, siehe Abb. 3.88.

Berechnungsbeispiel zu Abb. 3.88

Berechnungsbeispiel für das Gleitziehen eines Stahlrohrs aus dem Stahl Ck 10 mit den Abmessungen 20×2 mm. Das Rohr soll auf $d_1 = 12$ mm und $s_1 = 0,8$ mm umgeformt werden. Als Reibungszahl ist $\mu = 0,05$ angenommen. Der maximale Umformgrad sei auf $\varphi_{max} = 0,6$ festgelegt. Es ergeben sich drei Züge mit den Gesamtkräften $F_{ges1} = 22,2$ kN, $F_{ges2} = 20,3$ kN und $F_{ges3} = 11,1$ kN.

3.4.2 Gleitziehen von Rohren

Rohre können nach zwei Verfahren, dem Hohl-Gleitziehen und dem Gleitziehen über festen Stopfen, entsprechend Abb. 3.89 gefertigt werden. Beim Hohl-Gleitziehen befindet sich im Inneren des Rohres kein Werkzeug, sodass die Umformung dort frei erfolgen kann. Je nach

den geometrischen und technologischen Verhältnissen kann die Wanddicke s größer werden, gleich bleiben oder sich verringern. Wegen der freien Umformung zeigt die Innenoberfläche eine größere Rauheit als die Außenoberfläche. Die Krafteinleitung erfolgt wie bei allen Durchziehverfahren über den Werkstückwerkstoff. Die Umformung wird in erster Linie durch tangentiale Stauchung und axiale Dehnung bewirkt, so dass nach dem Fließkriterium von *Tresca* gilt

$$\sigma_z - \sigma_t = k_f. \quad (3.48)$$

Die Axialspannung σ_z steigt in der Umformzone von null am Werkstoffeintritt bis auf den Endwert am Werkstoffaustritt an. Die Drucktangentialspannung σ_t bewirkt zusammen mit der Axialspannung die Umformung, während die Radialspannung σ_r an der Innenseite des Rohrs gleich null ist. Auch in der Rohrwandung können keine großen Werte von σ_r auftreten, weil sich das Rohr nach innen frei verformen kann.

Beim *Gleitziehen über festen Stopfen* muss zusätzlich zu der ideellen Umformarbeit, der Reibungsarbeit an der Schulter des Ziehrings und an der Ziehringrundung die Reibungsarbeit am Dorn berücksichtigt werden. In der Praxis werden beim Rohrziehen gleichzeitig der Durchmesser und die Wanddicke verringert (Abb. 3.89). Es handelt sich also um eine Kombination des Hohlgleitziehens mit dem Stopfengleitziehen.

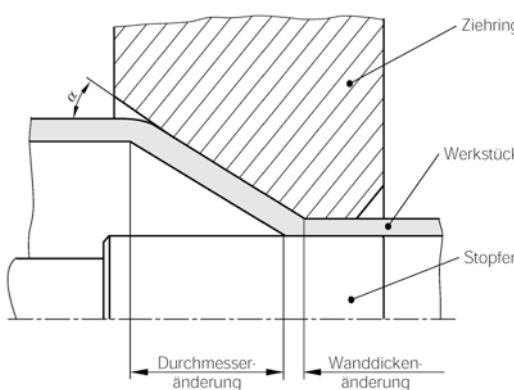


Abb. 3.89 Gleitziehen von Rohren über festen Stopfen mit Verringern von Durchmesser und Wanddicke. α Neigungswinkel der Ziehringöffnung

Zur Berechnung der Umformkräfte kann der Umformgrad durch Abstrecken $\varphi_{\max G}$ ungefähr dem Umformgrad der Wanddicke φ_s gleichgesetzt werden:

$$\varphi_{\max G} \approx \varphi_s = \ln \frac{s_0}{s_1}. \quad (3.49)$$

Der Gesamtumformgrad setzt sich aus der Wanddickenänderung und der Durchmesseränderung zusammen:

$$\varphi_{\text{ges}} \approx \varphi_s + \varphi_d. \quad (3.50)$$

Zwecks weiterer Vereinfachung der Kraft- und Arbeitsberechnung kann angesetzt werden, dass die mittlere Fließspannung beim Gleitziehen und beim Hohlziehen gleiche Werte erreicht.

3.4.3 Abstreckziehen von Hohlkörpern

Das Abstreckziehen wird zum Vermindern der Wanddicke von hülsenförmigen Hohlkörpern mit Boden verwendet. Diese Stückgutteile sind entweder tiefgezogen oder fließgepresst und haben immer einen Boden, mit dem das Werkstück mittels eines Stempels durch einen oder mehrere *Abstreckringe* gezogen wird, wie Abb. 3.90 zeigt. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen wird man versuchen, in einem einzigen Arbeitsgang einen möglichst hohen Umformgrad zu erreichen. Wenn aber die Spannung in der umgeformten Napfwand die Zugfestigkeit übersteigt, tritt ein Versagen durch *Bodenreißer* auf. Der Abstreckwinkel α beeinflusst in starkem Maße die Bodenkraft, die für dieses Versagen maßgebend ist. Die Bodenkraft wird um so geringer, je kleiner der Abstreckwinkel ist. Für kleine Winkel α wird die Bodenkraft sehr klein. Die Differenz zwischen der vom Stempel aufzubringenden Umformkraft F_{St} und der Bodenkraft F_B ist die vom Stempel auf die Napfwand übertragene Reibkraft F_{RSt} . Für kleine Winkel wird nahezu die gesamte Umformkraft mittels Haftreibung übertragen.

Mit abnehmendem Abstreckwinkel α kann der maximale Umformgrad φ_{\max} größer gewählt werden. Allerdings nimmt mit kleiner-

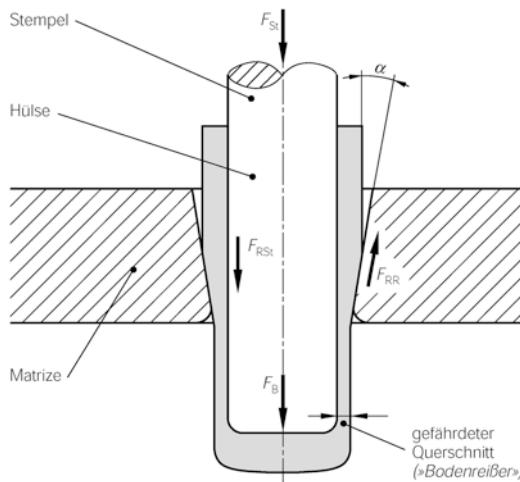


Abb. 3.90 Abstreckziehen von Hohlkörpern α Abstreckwinkel F_{st} Stempelkraft F_{rs} Stempelreibkraft F_{rr} Ringreibkraft an der Matrize F_b Bodenkraft

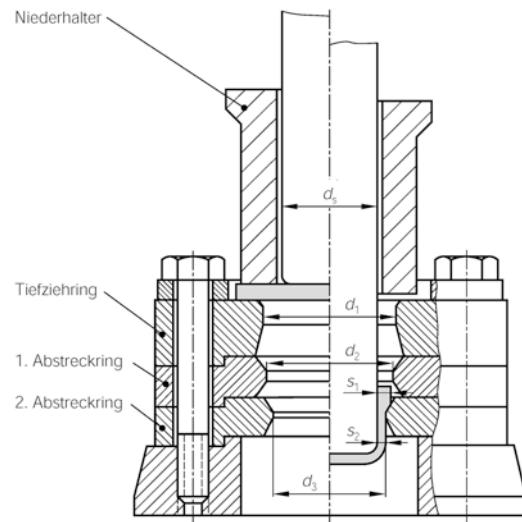


Abb. 3.91 Werkzeug zum kombinierten Tiefziehen bzw. Abstreckziehen (nach G. Oehler, W. Panknin u. H. Hoffmann). d_s Stempeldurchmesser d_1 Durchmesser des Tiefziehrings d_2 Durchmesser des ersten Abstreckrings d_3 Durchmesser des zweiten Abstreckrings s_1 Wanddicke nach dem ersten Abstrecken s_2 Wanddicke nach dem zweiten Abstrecken

rem α auch die Umformkraft F_{st} zu, die damit verbundene Erhöhung der Radialspannung erfordert die Verwendung armerter Ziehringe mittels eines Schrumpfverbandes. Als Vorteile des Abstreckgleitziehens gegenüber dem Fließpressen ergeben sich kleinere Umformkräfte und geringe Werkzeugspannungen. Die *Wanddicken-Genauigkeit* ist sehr groß. Allerdings können Dickenunterschiede, die von der Vorform her vorhanden sind – z. B. die *Zipfelbildung* infolge Anisotropie des Werkstoffes – nicht völlig ausgeglichen werden. Die Oberflächenrauheit wird gegenüber den Ausgangswerten beim Abstreckziehen vermindert. Mit steigender Querschnittsabnahme werden die Napfoberflächen glatter und zugleich auch deutlich homogener.

Da in den meisten Fällen lange Hülsen zu fertigen sind, werden Pressen mit großem Hub benötigt. Der Hub muss mindestens die doppelte Länge der Hülse aufweisen. Mechanische Pressen sollten so ausgelegt sein, dass ihr Kraftmaximum der höchsten auftretenden Ziehkraft entspricht. Hydraulische Pressen eignen sich besser für das Gleitziehen, sie sind aber für die Getränkedosenfertigung viel zu langsam (z. B. 800 bis 1200 Dosen je Minute in Mehrfachlinien).

Vielfach wird mit kombinierten Werkzeugen gleichzeitig tiefgezogen und abgestreckt. Abb. 3.91 zeigt die Arbeitsweise. Bei der Getränkedosenherstellung befinden sich beispielsweise im Tiefziehwerkzeug unter dem eigentlichen Ziehring drei weitere Abstreckringe mit kleinerem Durchmesser, sodass der Außen-durchmesser von d_1 auf d_2 und im zweiten Abstreckring auf d_3 verringert wird. Hierbei berechnet man den Umformgrad aus der Wanddickenverringerung. Wegen der Kaltverfestigung erhält die Dose eine größere Festigkeit im abgestreckten Wandbereich. Die Dosenwanddicke kann zur Zeit bis auf $S_{min} = 0,182$ mm verringert werden. Die zum Abstrecken erforderliche Kraft setzt sich aus der eigentlichen Umformkraft und den Reibverlusten zusammen, die überschlägig im Umformwirkungsgrad η_F zusammengefasst werden können. Somit wird die Abstreckkraft je Abstreckring berechnet zu

$$F_{AZ} = \frac{k_{fm}}{\eta_F} A_Z \varphi_s. \quad (3.51)$$

Der Umformwirkungsgrad beträgt $\eta_F \approx 0,35$. Der Umformgrad φ_s kann auch aus den Abmessungen vor und nach dem Abstreckziehen des Zargenquerschnitts A_Z berechnet werden [$\varphi_s = \ln(A_1/A_2)$].

3.4.4 Tiefziehen

Das Tiefziehen zählt zu den wichtigsten Verfahren des Blechumformens. Es bildet die Grundlage für die Massenfertigung von Werkstücken für die verschiedensten Anwendungsbereiche, wie z. B. Feuerzeuggehäuse, Teile für Automobilkarosserien, Haushaltsgeräte sowie Blechteile des Maschinen- und Apparatebaus. Nach DIN 8584-1 wird das Tiefziehen wie folgt definiert: *Tiefziehen* ist Zugdruckumformen eines Blechzuschnitts – je nach Werkstoff auch einer Folie oder Platte, eines Ausschnitts oder Abschnitts – zu einem Hohlkörper, ohne beabsichtigte Veränderung der Blechdicke.

Es kann auch ein Hohlkörper zu einem Hohlkörper mit kleinerem Umfang tiefgezogen werden. Dann spricht man vom Tiefziehen im Weiterschlag. Das *Tiefziehen im Erstzug* (früher „*Tiefziehen im Anschlag*“ genannt), ist schematisch in Abb. 3.92 dargestellt. Beim Tiefziehen handelt es sich um ein Verfahren der mittelbaren Krafteinleitung. Die erforderliche Ziehkraft F_{St} wird vom Stempel auf den Ziehteilboden übertragen und von der Napfwand, der sog. Zarge, in den Flansch weitergeleitet. Der zwischen Ziehring und Niederhalter liegende *Flansch* entspricht der Formgebungszone dieses Umformverfahrens. Die Grenze der Verformung ist erreicht, wenn die Bodenzone die zur Umformung des Flansches erforderliche Kraft nicht mehr übertragen kann und der Boden abreißt (Bodenreißer). Dies bedeutet, dass beim Tiefziehen das Gleichgewicht der erforderlichen Ziehkraft F_{St} und der übertragbaren Kraft betrachtet werden muss, die maximal der Bruchlast F_{Br} entsprechen kann:

$$F_{St} \leq F_{Br}. \quad (3.52)$$

Die dazugehörigen Spannungen ergeben sich nach Division durch den fiktiven Zargenquerschnitt $A_Z = \pi(d_0 + s_0)s_0$ zu

$$\sigma_Z = \frac{F_{St}}{A_Z} \leq \frac{F_{Br}}{A_Z} \quad (3.53)$$

Die erforderliche Ziehspannung σ_Z setzt sich zusammen aus der ideellen Ziehspannung σ_{id} für die verlustfreie Umformung, den Reibspannungen σ_R , die an Ziehring und Niederhalter auftreten, sowie aus der Rückbiegespannung σ_{rb} zum Rückbiegen des gebogenen Bleches im Auslauf der Ziehringgrundung:

$$\sigma_Z = \sigma_{id} + \sigma_R + \sigma_{rb}. \quad (3.54)$$

Damit kann der *Umformwirkungsgrad* für das Tiefziehen berechnet werden:

$$\eta_F = \frac{dW_{id}}{dW_{ges}} = \frac{F_{id}}{F_{St}} = \frac{\sigma_{id}}{\sigma_Z} \quad (3.55)$$

Der Umformwirkungsgrad beim Tiefziehen liegt im Allgemeinen zwischen $\eta_F = 0,5$ bis $\eta_F = 0,8$.

Wenn der Stempel in den Ziehring eintaucht, wird die Ronde in den Ziehring hineingezogen (Abb. 3.92). Der Ausgangsdurchmesser D_0 verkleinert sich ständig, bis er über verschiedene Stadien von D dem Stempeldurchmesser d_0 unter Berücksichtigung der Blechdicke s_0 entspricht. Dabei bewirkt die maximale Zieh-

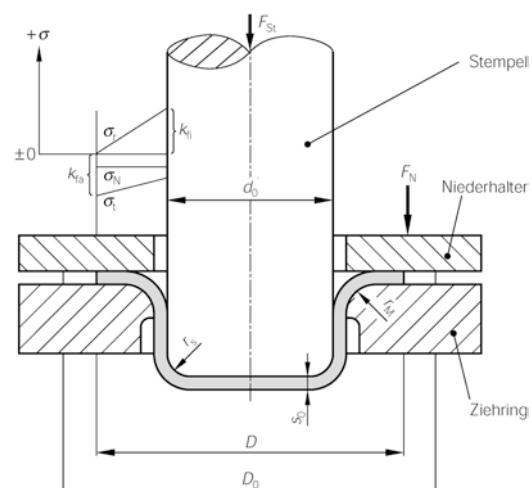


Abb. 3.92 Tiefziehen im Erstzug und schematische Darstellung des Spannungsverlaufs in der Umformzone (Flanschbereich) F_{St} Stempelkraft F_N Niederhalterkraft d_0 Stempeldurchmesser D_0 Zuschnittsdurchmesser (Ronde) D augenblicklicher Flanschdurchmesser r_s Stempelradius ($\approx 0,15 \cdot d_0$) r_M Ziehringradius ($\approx 8 \cdot s_0$)

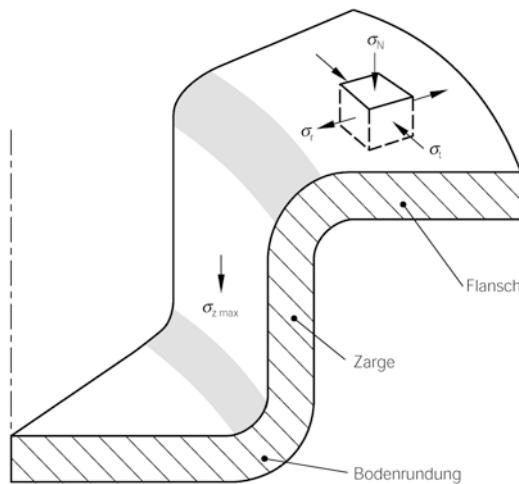


Abb. 3.93 Auf ein Volumenelement im Flansch einwirkende Spannungen beim Tiefziehen. σ_N Niederhalterdruckspannung σ_t tangentiale Druckspannung σ_r radiale Zugspannung $\sigma_{z \max}$ maximale Zugspannung in der Zarge

spannung $\sigma_{z \max}$, die an der Ziehringrundung umgelenkt wird, wie in Abb. 3.93 eine radiale Zugspannung σ_r auf ein Volumenelement, das in der Umformzone des Flansches liegt. Durch die Verengung der im Flansch liegenden Sektoren des Blechzuschnitts ergeben sich die tangential wirkenden Druckspannungen σ_t . Der Flansch neigt dann besonders bei dünnen Blechen zum Ausknicken bzw. zur *Faltenbildung*. Dieser unerwünschte Effekt wird vermieden, wenn der Niederhalter mit ausreichender Kraft auf den Flansch gepresst wird. Die zum Vermeiden von Falten benötigte Druckspannung σ_N ist von dem Werkstückstoff, der relativen Blechdicke und dem Ziehverhältnis $\beta_0 = D_0/d_0$ abhängig. Diese Druckspannung liegt zwischen 1,25 N/mm² für Aluminiumlegierungen und 2,5 N/mm² für Tiefziehstahl. Nach Siebel gilt für die erforderliche Niederhalterkraft F_N

$$F_N = A_N \sigma_N = A_N \frac{R_m}{400} \left[(\beta_0 - 1)^2 + \frac{d_0}{200 \cdot s_0} \right] \quad (3.56)$$

Es bedeuten:

- A_N vom Niederhalter geklemmter Flansch,
- σ_N Niederhalterdruckspannung,
- β_0 Ziehverhältnis,

- d_0 Stempeldurchmesser,
- s_0 Ausgangsblechdicke,
- R_m Zugfestigkeit des Werkstückstoffs.

Nach W. Pankin wird die *maximale Ziehkraft* $F_{St \max}$, die aus dem Diagramm Abb. 3.94 entnommen werden kann, mit Hilfe des Umformwirkungsgrads η_F berechnet:

$$F_{St \max} = \pi d_m s_0 \left[1,1 \frac{k_{fm}}{\eta_F} \left(\ln \frac{D_0}{d_0} - 0,25 \right) \right]. \quad (3.57)$$

Hierin sind:

- d_m mittlerer Napfdurchmesser mit Berücksichtigung der Wanddicke s_0 ,
- s_0 Fließspannung im Flansch (näherungsweise $k_{fm} = 1,3 R_m$).

Das Ziehverhältnis $\beta_0 = D_0/d_0$ kennzeichnet die Größe der Umformung. Beim Überschreiten des Grenzziehverhältnisses $\beta_{\max} = D_{0 \max}/d_0$ erfolgt am Übergang vom Napfboden zur Zarge der sog. „Bodenreißer“. Überschlägig ergibt sich für die Bodenabreißkraft

$$F_{Br} \approx \pi d_m s_0 R_m. \quad (3.58)$$

Das Grenzziehverhältnis hängt von der Blechdicke s_0 , der Werkzeuggeometrie und dem Werkstoff ab. Besonders stark ist der Einfluss der senkrechten Anisotropie, der durch den *R-Wert* ausgedrückt wird (s. Abschn. 3.5.4). Je höher

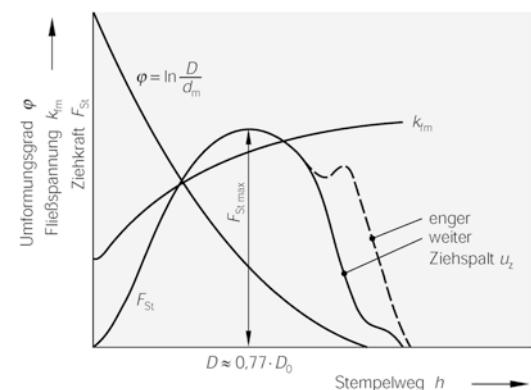


Abb. 3.94 Kraft-Weg-Verlauf sowie Umformgrad und dazugehörige Fließspannung beim Tiefziehen im Anschlag. D_0 Ausgangsdurchmesser der Ronde D jeweiliger äußerer Flanschdurchmesser

der R -Wert, desto größer ist β_{\max} . Eine Folge der ebenen Anisotropie R_{\max} des Bleches ist aber auch die *Zipfelbildung*: Die Napfhöhe ist über dem Umfang nicht konstant, sondern in den Richtungen mit hohem R -Wert groß (Zipfel) und in den Richtungen mit kleinem R -Wert gering („Tal“ in der Napfwand). Für einige Tiefziehbleche sind praxisübliche Werte für Ziehverhältnisse im Erst- und Weiterzug in Tab. 3.3 angegeben.

In Bezug auf die *Umformgrade* im Tiefziehteil muss die Kontinuitätsbedingung erfüllt sein:

$$\varphi_r + \varphi_t + \varphi_n = 0. \quad (3.59)$$

Unmittelbar nach dem Aufsetzen des Stempels auf die Platine ist die Umformung zunächst auf die Ringfläche im Ziehspalt zwischen Stempel und Ziehring sowie auf den späteren Boden des Ziehteils beschränkt. Mit zunehmendem Stempelweg wird dieser Bereich einem Streck-

Tab. 3.3 Werkstoffe zum Tiefziehen; erreichbares Ziehverhältnis β_0 und übliche Schmierstoffe. (Nach Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 24. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, New-York, Heidelberg, 2014)

Werkstoff	$R_{p0,2}$	R_m	Erreichbares Ziehverhältnis			Schmierstoff	
			Erstzug	1. Weiterzug			
				ohne	mit		
	N/mm ²	N/mm ²	Zwischenglühen				
Unlegierte weiche Stähle DC01 (U St 12) DC03G1 (U St 13) DC04 (RR St 14)	≤ 280 ≤ 250 ≤ 220	270 bis 410 270 bis 370 270 bis 350	1,9 2,0 2,1	1,2 1,25 1,3	1,6 1,65 1,7	In Wasser emulgierbare Öle mit bei wachsender Beanspruchung steigendem Seifen- bzw. Feststoffanteil. Für gebonderte Bleche genügt Kalkmilch bzw. Seifenwasser mit Grafit. Ziehfolien.	
Nichtrostende Stähle ferritisch: X8Cr17 austenitisch: X15CrNiSi25-20	270 185	450 bis 600 500 bis 700	1,55 2,0	— 1,2	1,25 1,8		
Hitzebeständige Stähle ferritisch: X10CrAl13 austenitisch: X15CrNiSi25-20	295 295	500 bis 650 590 bis 740	1,7 2,0	1,2 1,2	1,6 1,8	Wasser-Grafit-Brei oder dickere Mischung aus Leinöl-Bleiweiß mit 10 % Schwefel, Natrium-Palmitat.	
Nickellegierung NiCr20Ti (Nimonic 75)	195 bis 440	685 bis 880	1,7	1,2	1,6		
Kupfer: Cu-DHP (SF-Cu) sauerstofffrei	< 140	215 bis 255	2,1	1,3	1,9		
Cu-Zn-Legierung (Ms) CuZn40 F35 CuZn37 F30 CuZn28 F28 CuZn10 F24 (Tombak) CuNi12Zn F24 (Neusilber)	< 235 < 195 < 155 < 135 < 295	345 295 bis 370 275 bis 350 235 bis 295 340 bis 410	2,1 2,1 2,2 2,2 1,9	1,4 1,4 1,4 1,3 1,3	2,0 2,0 2,0 1,9 1,8	Starke Seifenlauge, mit Öl vermischt, oder Rüböl, seifen- und fetthaltige in Wasser emulgierbare Öle, ggf. mit Zusatz von kornfreiem Grafit.	
CuNi20Fe F30 (Monel)	110	295	1,9	1,3	1,8	Dicke Seifenlauge, mit Öl vermischt, oder Rüböl.	
Al 99,5 w Al 99,5 F10 Al 99 w	< 59 68 < 68	69 100 79	2,1 1,9 2,05	1,6 1,4 1,6	2,0 1,8 1,95	Petroleum mit Zusatz von kornfreiem Grafit oder Rübölersatz, mineralische Fette, sofern keine Markenschmierstoffe verwendet werden.	
Al-Legierungen Al 99,9 Mg 0,5 w AlMgSi1 w	30 —	70 145	2,05 2,05	1,6 1,4	1,95 1,9		

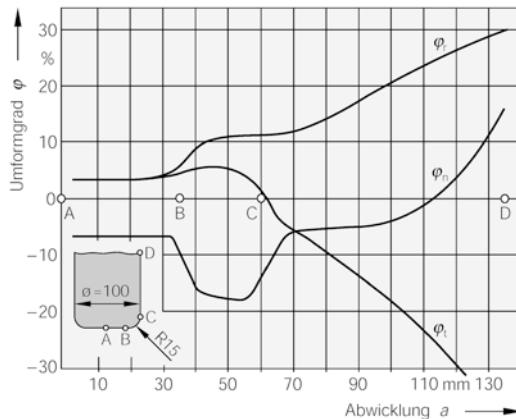


Abb. 3.95 Verlauf der örtlichen Umformung über der Abwicklung eines Tiefziehteils (s. Diss. A. H. Fritz, TU Berlin 1970)

ziehen unterworfen; hierbei erfolgt zusätzlich noch eine Biegung um die Rundung des Stempels r_s und den Ziehringradius r_M (Abb. 3.92).

Der Umformgrad φ_n in Blechdickenrichtung nimmt am Napfboden stets negative Werte an, wie aus dem Diagramm Abb. 3.95 hervorgeht; d. h., das Blech wird dort dünner, um dann im Bereich der Zarge stetig zuzunehmen. Am oberen Rand des Napfes ist die Wanddicke s_1 im Allgemeinen größer als die Ausgangsblechdicke s_0 . Der Verlauf der Wanddicke über Napfhöhe und Napfumfang hängt u. a. von folgenden Größen ab:

- Tiefziehverhältnis,
- Werkzeuggeometrie,
- Niederhalterdruck,
- Eigenschaften des Blechwerkstoffs (wie z. B. Anisotropie).

Der größte Umformgrad φ_{\max} tritt am oberen Rand des Napfes in tangentialer Richtung auf.

$$\varphi_{\max} = |\varphi_t|.$$

Die experimentelle Ermittlung der örtlichen Formänderungen erfolgt meist mit Liniennetzen, die entweder mechanisch oder photochemisch auf die Ausgangsronden aufgebracht werden. Durch Ausmessen der zu Ellipsen verzerrten ursprünglichen Kreise und der Blechdicke können

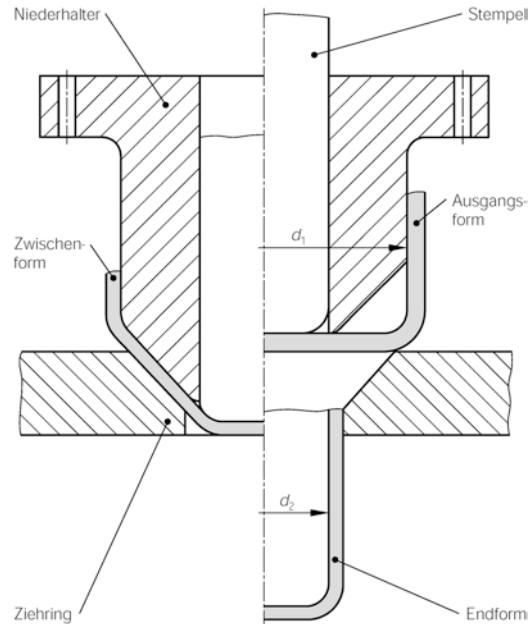


Abb. 3.96 Tiefziehen im Weiterzug zum Reduzieren des Hohlkörper-Durchmessers

zwei Formänderungen an dieser Stelle ermittelt werden. Die dritte Formänderung kann aber auch nach der Kontinuitätsbedingung (s. Blechprüfung, Abschn. 3.5.4) ermittelt werden.

Beim *Tiefziehen im Weiterzug* entsprechend Abb. 3.96 wird aus einem Napf ein anderer Behälter mit kleinerem Durchmesser und größerer Höhe hergestellt. Der Niederhalter muss der Ausgangsform angepasst sein und den Durchmesser d_1 haben. In seiner Mitte bewegt sich der Stempel mit dem Durchmesser d_2 , der mit dem Ziehring die Endform herstellt. Die Ziehkraft F_{Stmax} muss wiederum kleiner sein als die Bodenabreißkraft, die wie beim Erstzug berechnet werden kann. Bodenreißer lassen sich vermeiden, wenn die Ziehverhältnisse nach Tab. 3.3 ausgewählt werden. Bei Näpfen, die in mehreren Arbeitsgängen gezogen werden, ist das Gesamtziehverhältnis β_{ges} gleich dem Produkt der einzelnen Ziehverhältnisse.

Beim Ziehen ohne Zwischenglühen muss das Ziehverhältnis bei jeder folgenden Stufe verkleinert werden. Für die Werkzeuggestaltung ist zu berücksichtigen, dass der Ziehringradius r_M (Abb. 3.92) das fünf- bis zehnfache der Blech-

dicke s_0 betragen soll. Eine gute Kraftübertragung im Bodenteil des Tiefziehstempels lässt sich mit einem Stempelradius r_s von $0,15 d_0$ erreichen. Vorteilhaft ist eine Stempelrundung, die drei- bis fünfmal größer ist als die Ziehringrundung. Für den Ziehpalt u_z setzt man

$$u_z = u_0 + a \sqrt{10 s_0}. \quad (3.60)$$

Hierbei gilt $a_1 = 0,07$ für Stahlblech, $a_2 = 0,02$ für Aluminium und $a_3 = 0,04$ für sonstige Nichteisenmetalle. Bei zu großem Spalt wird der Napf nicht zylindrisch und bekommt u. U. Falten. Bei zu kleinem Ziehpalt wird das Werkstück abgestreckt, es kommt oft zu Bodenreißern.

Relativ dicke Blechteile mit $d_0/s_0 < 25$ haben genügend Eigensteifigkeit, sodass kein Niederhalter notwendig ist. Beim Ziehen von kegeligen und parabolischen Hohlteilen hat die Zarge beim Umformen keinen Kontakt zum Werkzeug; hieraus ergibt sich dann wieder eine größere Gefahr der Faltenbildung.

Bei niederhalterlosem Tiefziehen dickerer Teile ($d_0/s_0 = 25$ bis 40) wird meist ein *traktrix-förmiger*⁷ Ziehring verwendet. Wegen der fehlenden Niederhalterreibung und der geringeren Biegeverluste erhöht sich das Grenzziehverhältnis.

Die *Schmierstoffe* sollen die Reibkräfte beim Tiefziehen kleinhalten und ein Fressen zwischen Werkzeug und Werkstück verhindern. In der Fertigung wird darauf Wert gelegt, dass man den Schmierstoff nach der Bearbeitung mühelos beseitigen kann. Einige Hinweise auf Schmierstoffe finden sich in Tab. 3.3.

3.4.4.1 Zuschnittermittlung beim Tiefziehen

Eine möglichst genaue Ermittlung des Zuschnitts ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit (Werkstoffersparnis) und der Technologie (z. B. Vermeidung von Bodenreißern) wichtig. Da sich die Blechdicke beim Tiefziehen im Mittel nicht verändert, bleibt bei einfachen *rotationssym-*

metrischen Ziehteilen außer dem Volumen auch die Oberfläche von Platinen und Fertigteil gleich groß. Deshalb kann man aus den Teilflächen mit Hilfe der *Guldin-Regel* den Platinendurchmesser D_0 berechnen. Für ein zylindrisches Ziehteil der Höhe h und des Durchmessers d ohne Bodenrundung ergibt sich

$$D_0 = \sqrt{d^2 + 4 dh}. \quad (3.61)$$

Die so berechneten Platinendurchmesser D_0 für häufig vorkommende rotationssymmetrische Ziehteile sind in Abb. 3.97 zusammengestellt. Wenn sich ein Ziehteil aus sehr vielen Einzelteilen zusammensetzt, ist die Berechnung der einzelnen Teilflächen außerordentlich umständlich. Dann empfiehlt sich eine zeichnerische Ermittlung mit Hilfe des Seileckverfahrens.

Für die Ermittlung des Zuschnitts von *quadratischen* und *rechteckigen* Ziehteilen werden die geraden Wände des Hohlkörpers in die Bodenebene abgewickelt bzw. umgeklappt und durch Bögen verbunden. Da der Werkstoff in den Ecken beim Fließen durch die Seitenwände behindert wird, müssen die umgeklappten Seitenwände verkürzt und die Verbindungs-Viertelbögen erhöht werden. Andernfalls ergeben sich zu hohe Wände und zu niedrige Ecken am Ziehteil.

Die Zuschnittermittlung von unregelmäßig geformten *Karosserieteilen* ist bisher noch weitgehend Erfahrungssache. Man versucht in diesem Fall ebenfalls, nach dem Umklappprinzip die Zuschnittsform grob vorzubestimmen. Nach der Erprobung im Werkzeug wird die Platinen so lange korrigiert, bis der Zuschnitt optimal ist.

Das Ziehen von unregelmäßig geformten flachen Teilen in der Karosseriefertigung ist eine Kombination von Tiefziehen (Zug-Druck-Umformen) und Streckziehen (Zugumformen). Untersuchungen der Umformungen mit Linienrastern zeigen, dass nur wenig Werkstoff vom Flansch nachfließt. Der größte Teil des für die Hohlkörperbildung benötigten Werkstoffs wird durch Vermindern der Blechdicke bereitgestellt.

Die größte in der Fläche auftretende Dehnung soll 25 % nicht überschreiten. Damit die Teile ohne Nachbehandlung lackiert werden können, bleibt man meist unter 15 % Dehnung. Dadurch

⁷Eine Traktrixkurve ist z. B. die spiralähnliche Kurve, die bei einer vom Hund geschleppten Kette entsteht.

	$D_0 = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h}$		$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$		$\sqrt{d_1^2 + 4(h_1^2 + d_1 \cdot h_1)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)}$		$\sqrt{d_1^2 + 2s(d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h + 2f(d_1 + d_2)}$		$\sqrt{d_1^2 + 2s(d_1 + d_2) + d_1^2 - d_2^2}$
	$\sqrt{2 \cdot d^2} = 1,414 \cdot d$		$\sqrt{d_1^2 + 6,28r \cdot d_1 + 8r^2}$ oder $\sqrt{d_1^2 + 2,28r \cdot d_1 - 0,56r^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$		$\sqrt{d_1^2 + 6,28r \cdot d_1 + 8r^2 + 2f(d_2 + d_3)}$ oder $\sqrt{d_1^2 + 2,28r \cdot d_1 + 2f(d_2 + d_3) - 0,56r^2}$

Abb. 3.97 Berechnung des Zuschnitttdurchmessers D_0 nach Schuler GmbH (Hrsg.): Handbuch der Umformtechnik, Springer-Verlag 1996

kann man die sog. *Apfelsinenhaut* vermeiden. Mit Rücksicht auf die Aufrauung der Blechoberflächen kann also nur mit geringer Ziehtiefe und nur in einer Ziehstufe gearbeitet werden. Die erforderlichen Ziehkräfte und Grenzen des Verfahrens müssen experimentell ermittelt werden.

Wegen des meist ungleichförmigen Werkstoffflusses werden bei bestimmten Karosserieteilen in vielen Fällen *Bremswülste* im Werkzeug und *Entlastungslöcher* im Ziehteil verwendet. Bremswülste erschweren das Einziehen des Bleches an geraden, flachen Ziehkanten. Umgekehrt sollen größere Ziehradien an Ecken von z. B. Autotüren das Einziehen von Blech erleichtern. Entlastungslöcher werden dort vorgegeben, wo an vertieften Stellen im Ziehteil (z. B. an später ausgeschnittenen Fensteröffnungen) die Zugspannungen in der Nähe von Ecken bis an die Zugfestigkeit R_m heranreichen.

Durch den Einsatz einer Umformsimulation kann die gezielte Beeinflussung des Werkstoffflusses unterstützt werden, um die Versagensfälle Rissbildung, übermäßige Blehdickenabnahme und Faltenbildung zu vermeiden. In

Abb. 3.98 und 3.99 sind die Ergebnisse der Umformsimulation für ein Beispiel der AUDI AG unter Verwendung der Simulationssoftware Autoform dargestellt.

Die modernen Möglichkeiten der FE-Simulation haben in den letzten Jahren ermöglicht, dass die Außenhautteile eines neuen Fahrzeuges nach der Entwurfsphase virtuell überprüft werden können. Die Entwicklungen in Richtung „digitale Fabrik“ sind weit gediehen. Die Simulation der Fertigung von Karosserieteilen, angefangen beim Entwurf über die Werkzeuggestaltung, die Auslegung im Presswerk bis zur Montage und sogar zum Crash-Verhalten ermöglichen verkürzte Entwicklungs- und Herstellungszeiten bei gleichzeitiger Kostensenkung.

Zum Tiefziehen werden mechanische weggebundene oder hydraulische *Pressen* benutzt. Um eine zu hohe Auftreffgeschwindigkeit des Stößels zu vermeiden, arbeiten große Karosseriezehpressen höchstens mit 15 Hub/min. Die Hubzahl lässt sich durch veränderte Kinematik (z. B. Verbundkurbelantrieb mit schnellerem Vorlauf und Rückhub) bis auf etwa 20 Hub/min steigern.

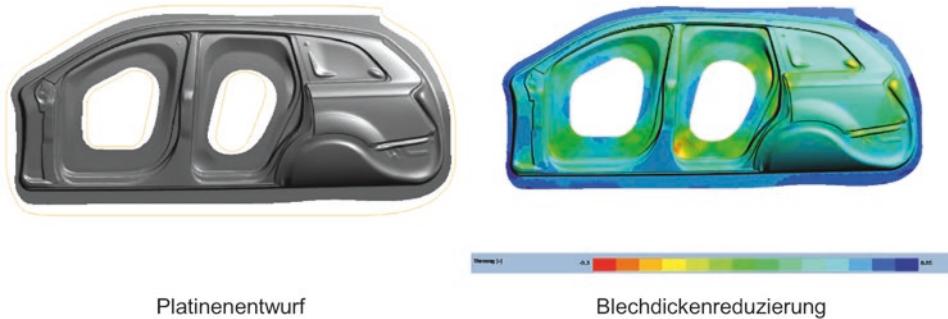


Abb. 3.98 Darstellung der Ergebnisse der Umformsimulation für ein Seitenteil. (Werkfoto: AUDI AG/AutoForm)



Abb. 3.99 Darstellung der Ergebnisse der Umformsimulation für ein Seitenteil hinsichtlich Spannungsverteilung. (Werkfoto: AUDI AG/AutoForm)

Hydraulische Tiefziehpressen erreichen nur kleinere Hubzahlen. Die Anschaffungs- und Betriebskosten sind höher als die von mechanischen Pressen. Der Vorteil liegt in der guten Regelbarkeit von Ziehgeschwindigkeit und Niederhalter. Werden versehentlich zwei Platten in das Werkzeug eingelegt, tritt bei hydraulischen Pressen keine Beschädigung durch Überlastung auf. Die größten serienmäßigen Hydraulikpressen haben eine Nennkraft von 20 MN und eine Ständerweite von 5 m. Meist werden mehrere solcher Pressen zu Pressenstraßen kombiniert. Das Einlegen, Herausnehmen und Transportieren der Werkstücke erfolgt teil- oder vollautomatisch durch Zangen- oder Greifervorrichtungen und ist zzt. Gegenstand von Rationalisierungsinvestitionen mit Robotersystemen.⁸

3.4.5 Drücken

Drücken wird zum Herstellen rotationssymmetrischer Hohlkörper aus Blech mit nahezu beliebiger Mantellinie angewendet. Die Blechdicke bleibt im Mittel unverändert. In der örtlich eng begrenzten Umformzone treten wie beim Tiefziehen tangentiale Druck- und radiale Zugspannungen auf. Beim Drücken sind die Ausgangsformen meist ebene Blechzuschneide. Sie werden mit einer Andruckscheibe zentrisch gegen die Stirnfläche des Drückfutters gespannt, das der Innenform der Fertigteils entspricht. Während Drückfutter und Werkstück rotieren, wird das Werkzeug als Drückwalze oder abgerundeter Drückstock längs der Mantellinie geführt, Abb. 3.100. Für Großserien setzt man Drückmaschinen mit hydraulisch betätigtem Schlitten und automatischer Programm-Nachformsteuerung ein. Für sehr große Blechteile im Raketen- und Behälterbau sind Sonder-

⁸Tiefziehen in der Kfz- und Metalltechnik. IFU Universität Stuttgart. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=wissensfloater).

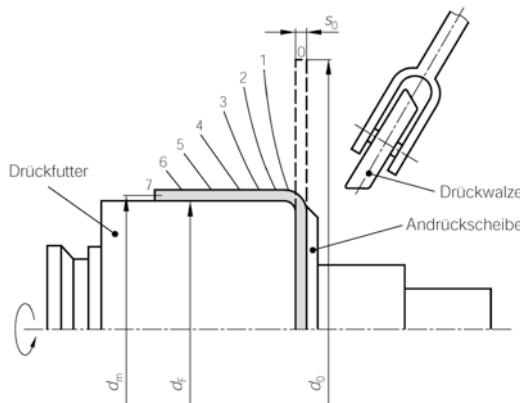


Abb. 3.100 Drücken eines Hohlkörpers mit den Zwischenstufen 0 bis 7. s_0 Rondendicke d_0 Rondendurchmesser d_F Durchmesser des Drückfutters d_m mittlerer Durchmesser des Hohlkörpers

maschinen mit vertikaler Drehachse entwickelt worden. Da diese Teile aus Ti-, Wo-, Mo- und Zr-Legierungen warm umgeformt werden müssen, ergeben sich hohe Kosten für das Futter aus hochlegiertem warmfestem Stahl. In diesen Fällen versucht man, die komplette Futterkontur durch eine bewegliche Formrolle auf der Gegenseite der Drückwalze zu ersetzen.

Das in einem Arbeitsgang erzielbare maximale Drückverhältnis $\beta_D = D_0/d_1 = 1,6$ (für den Stahl DC01 = St13) wird nur erreicht, wenn folgende Versagensformen *nicht* eintreten:

- Ausknicken des nur im Bereich der Drückwalze formschlüssig gestützten Flansches durch Wellen- oder Faltenbildung,
- Risse in tangentialer Richtung am Übergang zwischen Flansch und Zarge besonders bei zu kleiner Drückwalzenrundung,
- radiale Risse im äußeren Flanschbereich beim Wegdrücken von Falten durch Biegewechselbelastung.

Das Drücken ist bei kleinen Stückzahlen und großen Durchmessern wirtschaftlicher als das Tiefziehen, z. B. bei der Herstellung größerer Waschmaschinentrommeln und Kochkessel für Großküchen. Bei noch größeren Durchmessern, wie sie z. B. bei Parabolspiegeln, Radarreflektoren, Kümpelböden für Großkes-

sel oder bei sehr langen Teilen im Flugzeug- und Raketenbau vorliegen, ist das Drücken praktisch das einzige mögliche (und wirtschaftliche) Fertigungsverfahren.

Sobald die Drückwalzen die Wanddicke vermindern gehört das Verfahren nach DIN 8583-2 zu den Walzverfahren (Druckumformen). Hierunter fällt das *Projizierstreckdrücken*, das zum Herstellen rotationssymmetrischer Hohlkörper mit kegeligen, konkaven oder konvexen Wandformen angewendet wird, Abb. 3.101. Die Endform kann in den meisten Fällen in einem Arbeitsgang erreicht werden. Dabei wird die Wanddicke reduziert, indem Volumenelemente im Werkstoff parallel zur Rotationsachse verschoben werden. Die Endwanddicke s_1 über der Höhe h des Hohlkörpers lässt sich aus der Ausgangsdicke s_0 und dem halben Öffnungswinkel ($\alpha = 6$ bis 42°) berechnen:

$$s_1 = s_0 \sin \alpha. \quad (3.62)$$

Der Einsatzbereich der Drückverfahren ist sehr groß. So werden z. B. durch *Drücken* bzw. *Drückwalzen* hergestellt:

- Fässer und Trommeln,
- Pfannen und Kochtöpfe,
- Radkappen und Kfz-Schalldämpfer,
- Lampen- und Scheinwerfer-Reflektoren,

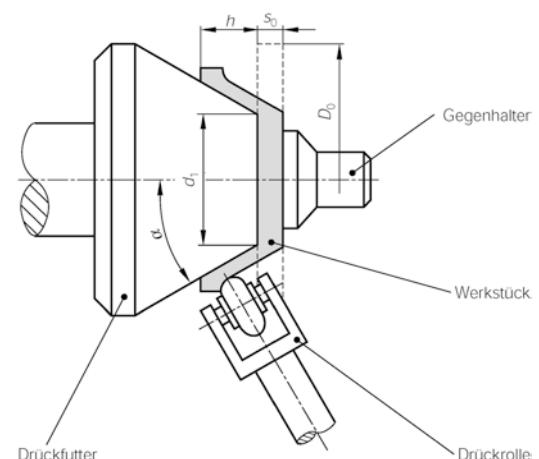


Abb. 3.101 Projizierstreckdrücken eines kegeligen Hohlkörpers. D_0 Rondendurchmesser d_1 Innendurchmesser (Boden) s_0 Ausgangsblechdicke h Höhe des kegeligen Mantels α halber Kegelwinkel

- Keilriemenscheiben und Kfz-Felgen,
- Präzisionsrohre und Hydraulikzylinder,
- Strahltriebwerk- und Raketenteile.

Im Vergleich zum Tiefziehen ist der Kraftbedarf bei den Drückverfahren wesentlich kleiner, da immer nur ein örtlich eng begrenzter Bereich umgeformt wird. Wegen der geringeren Werkzeugkosten können Drückverfahren auch in der Kleinserienfertigung eingesetzt werden. Schon bei Serien von ca. 800 zylindrischen Hohlkörpern kann das Verfahren wirtschaftlich sein. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die Kaltverfestigung (Festigkeitserhöhung!) im Wandbereich.

3.4.6 Kragenziehen (Bördeln von Öffnungen)

Dieses Verfahren hat den Zweck, an Hohlkörpern Kragen aufzurichten, um daran Gewinde schneiden, Bolzen einpressen oder Rohre einzulöten oder einschweißen zu können. Dabei taucht ein Stempel in ein vorgeschnittenes Loch und weitet es auf. Es erfolgt eine Durchmesserergrößerung bei gleichzeitiger Wanddickenabnahme. Abb. 3.102 zeigt diesen Vorgang. Druckspannungen wirken im Kragen in radialer und axialer Richtung, Zugspannungen in Umfangsrichtung. Bei weiten Borden ($d_i > 5s_0$), engem Spalt ($u_z \approx s_0$) und kleiner Ziehringrundung R_R ergibt sich die Kragenhöhe zu

$$h = \frac{1}{2}(d_R - d_0). \quad (3.63)$$

Bei großer Ziehringrundung oder weitem Spalt gilt

$$h = \frac{1}{2}(d_m - d_0) + 0,43 \cdot R_R + 0,72 \cdot s_0. \quad (3.64)$$

Durch Abstrecken ($u_z < s_0$) kann auf Kosten der Wanddicke ein höherer Kragen erzielt werden. Die Außenwand des Kragens wird genau zylindrisch, wenn $u_z < 0,6 s_0$ gewählt wird. Die Wanddicke darf allerdings nicht zu sehr geschwächt werden, weil sonst der ganze Kragen abreißt.

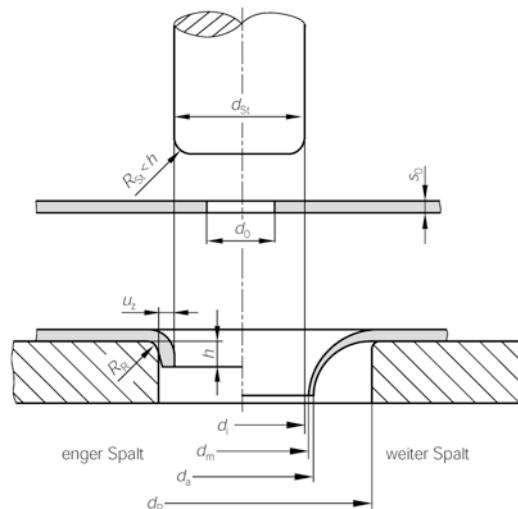


Abb. 3.102 Auswirkungen der Spaltweite beim Kragenziehen d_{st} Stempeldurchmesser R_{st} Stempelabrundung s_0 Blechdicke u_z Spaltweite d_0 Lochdurchmesser d_i Innendurchmesser des Kragens d_m mittlerer Durchmesser des Kragens d_a äußerer Kragendurchmesser d_R Ziehringdurchmesser R_R Ziehringrundung h Kragenhöhe für einen engen Spalt ($u_z \approx s_0$)

3.5 Zugumformen

Bei diesen Umformverfahren wird die gewünschte Fertigform überwiegend durch Zugbeanspruchung erreicht. Dabei tritt eine Oberflächenvergrößerung bei einer Wanddickenabnahme auf. Die wichtigsten Unterteilungen der Zugumformverfahren sind das *Längen*, *Weiten* und *Tiefen*.

3.5.1 Längen

Längen ist Zugumformen eines Werkstücks durch eine von außen aufgebrachte, in der Werkstücklängssachse wirkende Zugkraft. Dabei wird unterschieden zwischen *Strecken* zum Vergrößern der Werkstückabmessungen in Kraftrichtung wie beim Zugversuch an Rundproben, und *Streckrichten* zum Beseitigen von Biegungen an Stäben, Rohren und Wellen, oder von Ausbeulungen an Blechen.

Das zu richtende Werkstück wird in Zangen eingespannt und meistens hydraulisch gestreckt. Die Zugkraft wirkt zunächst auf teilverkürzte Stellen ein und bringt diese Bereiche zum Fließen. Dadurch steigt die Fließgrenze in diesem Bereich an, sodass nachfolgend der gesamte Querschnitt plastifiziert wird.

Für das Streckrichten z. B. von Rohren, Strangpressprofilen und Grobblechplatten reichen plastische Dehnungen von 1 bis 2 % aus. Die größten Streckbänke für Blechwerkstoffe haben eine Nennkraft von 140.000 kN und können Blechplatten von 20 m Länge und 150 mm Dicke bis zu 5 % strecken.

3.5.2 Weiten

Weiten ist Zugumformen durch eine im Werkstück radial nach außen wirkende Kraft. Die Verfahren zum Weiten werden bei der Herstellung von Gehäusen, Trommeln, Karosserie- teilen und großen Blechformteilen angewendet. Außer runden und ovalen können auch viereckige Hohlkörper umgeformt werden. Ist die Vorform mit Schweißnähten hergestellt, muss darauf geachtet werden, dass an diesen Stellen keine Werkzeugbeschädigung eintritt.

Das Weiten kann mit einem *Dorn* erfolgen. Hierbei werden entweder nur die Enden oder die gesamte Länge des Werkstücks aufgeweitet. Beim Weiten mit *Spreizwerkzeug* kann man dagegen auch die Mitte eines Werkstücks aufweiten. Die segmentförmigen Werkzeugteile werden mittels Keil oder Kegel nach außen gedrückt und formen dadurch das Werkstück entweder in einer Matrize oder frei. Letzteres geschieht z. B. bei der Durchmesserkalibrierung von geschweißten Großrohren. Dabei wird durch eine plastische Dehnung von 1,5 % eine genaue kreisrunde Rohrform erreicht. Da das Aufweiten über den ganzen Umfang gleichzeitig erfolgt, wird eine gleichmäßige Dickenabnahme und Formgenauigkeit von 0,2 bis 0,3 % des Durchmessers erreicht. Bei diesem Maß-Aufweiten kann die Durchmesserabweichung einschließlich der Formfehler bis auf einen Wert von 0,05 mm verringert werden.

Außer dem Weiten mit starren Werkzeugen gibt es auch Verfahren mit *elastischen Werkstoffen*, wie z. B. Kautschuk, Elastomerkunststoffen und Kork. Mit Gummistempeln können in den meisten Fällen nur kleinere Werkstücke bis zu 100 mm Durchmesser wirtschaftlich ausgebaut werden. Durch die Reibung zwischen Gummistempel und Werkstück ergeben sich verhältnismäßig große Kräfte und ein Verkürzen der Teile in Achsrichtung (z. B. bis zu 12 % bei CrNi-Stahlblechen). Dadurch kann die Umfangsdehnung deutlich erhöht werden (z. B. bis zu 60 % für CrNi-Stahl).

Als *Wirkmedien* zum Aufweiten können auch Öl oder Wasser verwendet werden. Der Druck wird durch Eintauchen des Stempels in das flüssige Medium aufgebaut, dabei unterliegt die Ringdichtung einem starken Verschleiß. Als Folge der gleichmäßigen Druckverteilung in der Flüssigkeit besteht die Gefahr des Ausbeulens und Reißen an Stellen mit geringerer Wanddicke.

Das hydraulische Ausbauchen wird zum Herstellen von Fittings mit zwei oder mehr Abzweigungen in beliebigen Richtungen angewendet. Meist wird der mittels einer Pumpe mit Druckverstärker aufgebrachte Innendruck durch eine mechanische Längskraft unterstützt, um größere Dehnungen zu erreichen. Solche Maschinen haben eine Werkzeugschließkraft bis zu 35.000 kN, um das Druckmedium mit 1500 bar wirken zu lassen (s. Abschn. 3.7).

3.5.3 Tiefen (Streckziehen)

Tiefen ist das Anbringen von Vertiefungen in einem ebenen oder gewölbten Blech. Die dabei eintretende Oberflächenvergrößerung wird durch Verringern der Blechdicke erreicht. Tiefen kann mit starrem oder nachgiebigem Werkzeug erfolgen. Beim Tiefen mit elastischem Wirkmedium lassen sich keine großen Formänderungen erreichen. Daher bleibt das Verfahren auf verhältnismäßig flache Teile beschränkt (*Hohlprägen* von Nummernschildern für Kraftfahrzeuge oder Kennzeichnung von Karosserien, Abb. 3.103).

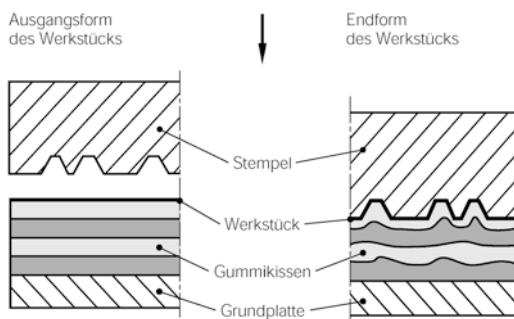


Abb. 3.103 Hohlprägen mit elastischem Wirkmedium (Verfahren des Tiefens nach DIN 8585-4)

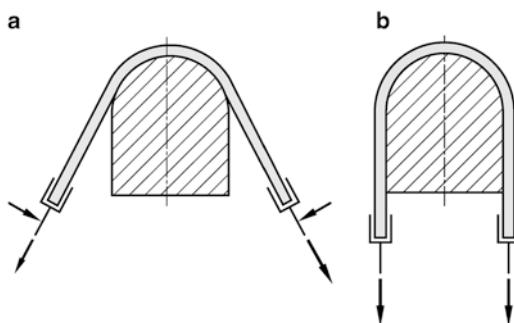


Abb. 3.104 Streckziehen von Blechteilen über einen Formklotz

Das wichtigste Tiefungsverfahren mit starrem Werkzeug ist das *Streckziehen*. Entsprechend Abb. 3.104 geschieht das Umformen unter verschiedenen Zugrichtungen. Dabei ist das Werkstück mit Spannzangen am Rand fest eingespannt und nimmt die Form des Stempels an. Dieses Verfahren wird besonders im Karosseriebau für Aufbauten von Omnibussen und Lastkraftwagen, für Türen, Dächer und Kotflügel sowie in der Luftfahrtindustrie für Blechformteile bis zu 50 m^2 angewendet. Die Teile sind meist über die ganze Ausdehnung hin gekrümmt, oft auch in querliegender Richtung. Der Blechzuschnitt ist rechteckig oder trapezförmig. Die notwendigen Zugspannungen werden über den beweglichen Stempel aufgebracht, der als Außenform für das Werkstück dient. Das Blech legt sich zuerst an der Kuppe des Stempels an und passt sich mit fortschreitendem Hub

der Stempelform an. Die Spannzangen sind um ihre Achsen drehbar. Wenn die Spannvorrichtungen den Werkstoff zunächst um etwa 2 % gleichmäßig dehnen und dann durch Schwenken an den Stempel anlegen, spricht man vom *Tangential-Streckziehen*. Es tritt keine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück auf, die Kraft wirkt stets tangential zur Werkzeugkontur.

Nach dem völligen Anliegen wird das Werkstück kurz nachgestreckt, um die *Rückfederung* klein zu halten. Im Vergleich zum Biegen, bei dem Restspannungen mit verschiedenem Vorzeichen auftreten, ist die Rückfederung aber wesentlich geringer. Beim anschließenden Beschränen oder Schweißen wirft sich das umgeformte Teil nicht. Dieser Effekt wird auch beim Streckrichten von Strangpressprofilen ausgenutzt.

Die Festigkeit von Werkstücken, die durch Streckziehen hergestellt wurden, ist höher als die von tiefgezogenen Teilen. Infolge der Verfestigung des Werkstoffs wird die Streckgrenze bei Karosserieteilen bis 10 %, die Härte bis 2 % erhöht. Da beim Streckziehen keine Druckspannungen entstehen, kann keine Faltenbildung auftreten. Durch das Strecken werden *Eigenspannungen* im Werkstoff abgebaut.⁹

Die Verfahrensgrenze beim Streckziehen ist erreicht, wenn der Werkstoff einschnürt oder reißt. Tritt dies ein, ehe die gewünschte Werkstoffform vollständig ausgebildet ist, so ist die Gleichmaßdehnung im Verhältnis zur erforderlichen Dehnung zu klein, oder die auftretenden Reibkräfte sind zu groß. Es werden drei verschiedene Arten von Reißen unterschieden:

- Risse infolge von Überbeanspruchung in der Nähe der Spannbacken (Kerbspannungen);
- Sprödbruch im Bereich des Scheitels am Streckziehstempel: Spröde Werkstoffe können sich schlecht der Werkzeugform anpassen;

⁹ Streckziehen von Bus- und Flugzeugteilen. IFU Uni Stuttgart. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=IwzJyfOOGjA).

- Einschnürung im Scheitelbereich: Beanspruchungsgrenze nach den Grenzformänderungsschaubildern.

3.5.4 Blechprüfung zur Kennwertermittlung

Bei kleinen Formänderungen können auch *Fließfiguren* auftreten, wenn der Werkstoff nur an örtlich begrenzten Stellen fließt und daneben unverformte Querschnitte vorhanden sind. Dies tritt besonders bei Werkstoffen mit ausgeprägter Streckgrenze auf. Zum Beispiel zeigen ausgehärtete Aluminium-Legierungen schon bei sehr kleinen Dehnungen im Bereich von 5 % Fließfiguren, die etwa unter einem Winkel von 120° zueinander verlaufen, die sog. *Lüders-Linien*. Zum Beurteilen von Werkstoffen für das Streckziehen werden die Ergebnisse des Zugversuchs herangezogen: Die Gleichmaßdehnung ε_{gl} , die Bruchdehnung A_{Br} , die Erichsenfestigung IE sowie der n -Faktor.

Je größer die *Gleichmaßdehnung* ist, um so geringer ist die Neigung eines Werkstoffs zum Einschnüren. Die beim *Erichsen-Versuch* ermittelte Tiefung ist ein Maß für die Dehnung unter zweiachsiger Zugbeanspruchung. Dieser Wert kann deshalb gut mit dem einfachen Streckziehen verglichen werden. Der *n-Faktor* ist ein Maß für die Verfestigung eines Werkstoffes und entspricht bei unlegierten und niedriglegierten Stählen der Steigung der Fließkurve in doppelt logarithmischer Auftragung:

$$n = \varphi_{gl} = \ln(1 + \varepsilon_{gl}). \quad (3.65)$$

Ist der n -Faktor groß, so ist auch die Verfestigung groß und die Bauteilfestigkeit höher. Aufgrund der Stützwirkung benachbarter Bereiche besteht eine geringere Neigung zum örtlichen Einschnüren. Dies bedeutet, dass bei einem großen n -Faktor eines Blechs eine gute Streckzieheignung vorliegt.

Für die fertigungs- und funktionsgerechte Werkstoffauswahl, zum Sichern eines ungestörten Fertigungsverlaufs und zur optimalen Ausnutzung des Werkstoffs muss das *Werkstoffverhalten* bekannt sein. Wichtig ist z. B. die

Anisotropie eines Werkstoffs. Sie gibt an, ob die Orientierungen der Kristalle von der statistisch regellosen Verteilung abweichen und dabei ausgeprägte Orientierungen, Texturen genannt, vorhanden sind. Texturen können bei vielkristallinen Werkstoffen durch Gieß-, Umform- und Glühbedingungen entstehen. Als Maß für die Anisotropie der plastischen Eigenschaften von Blechen wird der sog. *senkrechte Anisotropiewert R* im Zugversuch als Verhältnis der Umformgrade in Breiten- und Dickenrichtung ermittelt:

$$R = \frac{|\varphi_b|}{|\varphi_s|} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_1}}{\ln \frac{s_0}{s_1}}. \quad (3.66)$$

Danach kann das Grenzziehverhältnis wie in Abb. 3.105 abgeschätzt werden. Der Anisotropiewert R ändert sich aber mit dem Winkel zur Walzrichtung. Deshalb wird die sog. *ebene Anisotropie ΔR* als Änderung des R -Werts in der Blechebene aus den Einzelwerten berechnet. Dazu müssen die Flachproben der Blechtafel unter den Winkeln 0° , 90° und 45° zur Walzrichtung entnommen werden:

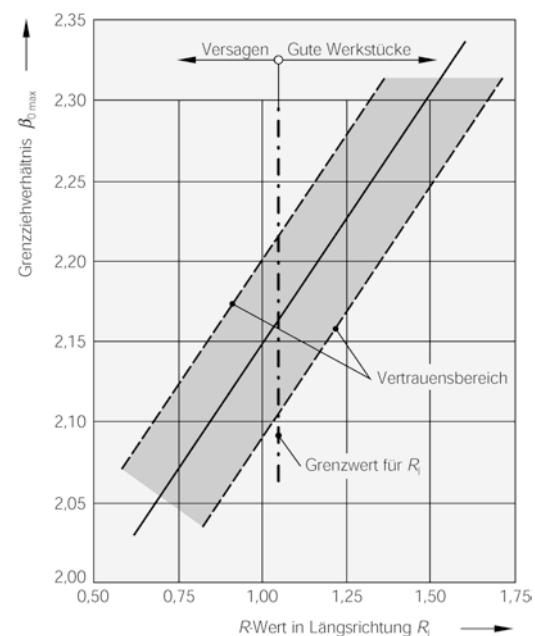


Abb. 3.105 Einfluss der senkrechten Anisotropie R auf das Grenzziehverhältnis R

$$\Delta R = \frac{1}{2}(R_{0^\circ} + R_{90^\circ} - 2R_{45^\circ}). \quad (3.67)$$

3.5.4.1 Tiefungsversuch nach Erichsen

Diese in DIN EN ISO 20482 genormte Blechprüfung wird zum Ermitteln der Tiefzieheigenschaften von Fein- und Feinstblech eingesetzt. Sie besteht im Ausbeulen einer fest eingespannten Blechprobe bis zum eintretenden Riss (Abb. 3.106). Als Kennwert wird der Tiefungswert *IE* (*IE = Erichsen cupping Index*) gemessen, bis zu dem der Stempel ohne Auftreten von Rissen das Blech ausbeulen kann. Für Feinbleche und Bänder aus unlegiertem Stahl sind die Mindest-Tiefungswerte in Abhängigkeit von der Blech- bzw. Banddicke genormt.

Die Tiefung wird durch eine zweiachsige Zugspannung erzeugt. Deshalb besteht eine deutliche Abhängigkeit des Tiefungswerts vom Verfestigungsexponenten *n*. Ein Zusammenhang zwischen dem Tiefungswert und dem Grenzziehverhältnis $\beta_{0\max}$ beim Tiefziehen besteht dagegen nicht. Das Ausbeulen der Blechkuppe erfolgt auf Kosten der Blechdicke; deshalb hat diese den größten Einfluss auf die erreichbare Tiefung. Blehdickenunterschiede – unter Umständen auch Änderungen in den Schmierverhältnissen – sind die häufigsten Fehlerquellen bei der *Erichsen*-Prüfung.

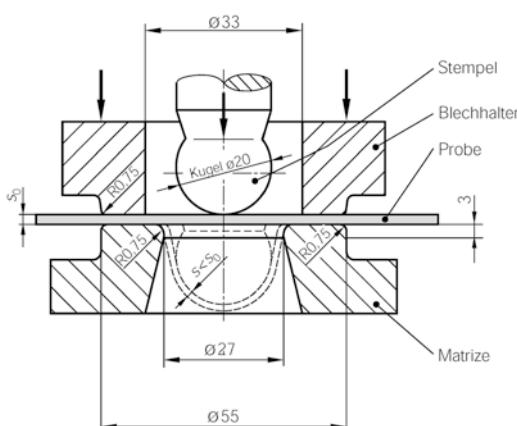


Abb. 3.106 Werkzeug zum Durchführen des Erichsen-Tiefungsversuchs nach DIN EN ISO 20482, für Bleche und Bänder mit einer Dicke von 0,2 bis 2 mm

3.5.4.2 Näpfchen-Tiefziehprüfung nach Swift

Dieses Prüfverfahren wird vorwiegend zum Beurteilen von Blechen für das Tiefziehen angewendet. Dabei wird mit gleichbleibendem Stempeldurchmesser d_0 aus Ronden mit stufenweise vergrößertem Durchmesser D_0 ein Näpfchen mit flachem Boden gezogen, bis die Grenze der Ziehfähigkeit durch einen Bodenreißer auftritt. Der größte, noch fehlerfrei gezogene Durchmesser $D_{0\max}$ bildet im Verhältnis zum Stempeldurchmesser d_0 das maximale Grenzziehverhältnis $\beta_{\max} = D_{0\max}/d_0$. Dieses Prüfverfahren ist verhältnismäßig aufwendig und wird daher vorwiegend als Modellversuch mit einem konstanten Stempeldurchmesser von $d_0 = 33\text{mm}$ angewendet. Infolge des großen Einflusses der Reibungsbedingungen auf das Grenzziehverhältnis β_{\max} lassen sich die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf das Tiefziehen von Blechen mit Großwerkzeugen übertragen. Im Näpfchenziehversuch werden größere Grenzziehverhältnisse als bei der betrieblichen Umformung erreicht, da das Grenzziehverhältnis mit größer werdendem Verhältnis von Stempeldurchmesser d_0 zu Blechdicke s_0 abnimmt (Abb. 3.107). Die großen Karosserieteile sind wegen der relativen Dünnwandigkeit d_0/s_0 wesentlich empfindlicher, dies ist besonders auf die Reibung am Niederhalter zurückzuführen.

3.5.4.3 Beurteilung von Blechen mittels Messrastertechnik

Bei umformtechnisch schwierigen Karosserieteilen, bei der Festlegung der Anzahl von Ziehstufen sowie der Erprobung neuer Werkstoffe und Werkzeuge wird eine *Formänderungsanalyse* durchgeführt. Hierzu werden Kreisrasternetze vor dem Umformen auf die Blechoberfläche aufgetragen und deren Verzerrungen nach dem Umformprozess gemessen. Das aufgebrachte Raster soll die Oberfläche nicht beeinflussen und nach dem Umformen noch gut erkennbar sein. Die beste geometrische Form zum Erkennen von Verzerrungen an der Blechoberfläche ist der Kreis (Abb. 3.108). Durch den Ziehvorgang werden die Kreise auf dem Werk-

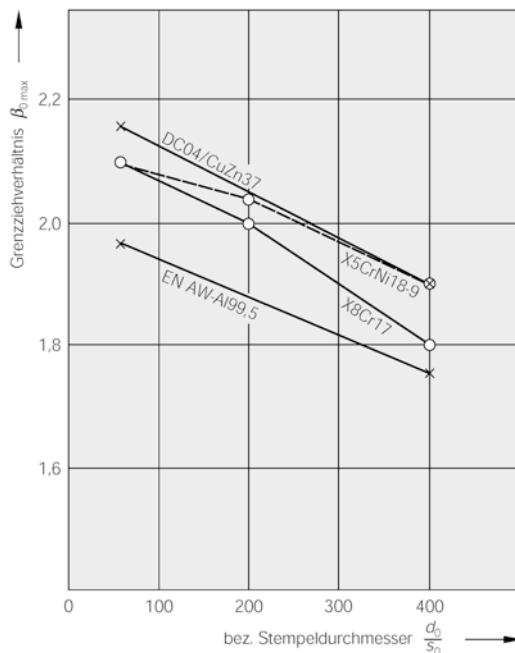


Abb. 3.107 Grenzziehverhältnis $\beta_{0\max}$ in Abhängigkeit vom bezogenen Stempeldurchmesser d_0/s_0 für verschiedene Werkstoffe (A. H. Fritz: Dr.-Ing. Diss, TU Berlin 1970)

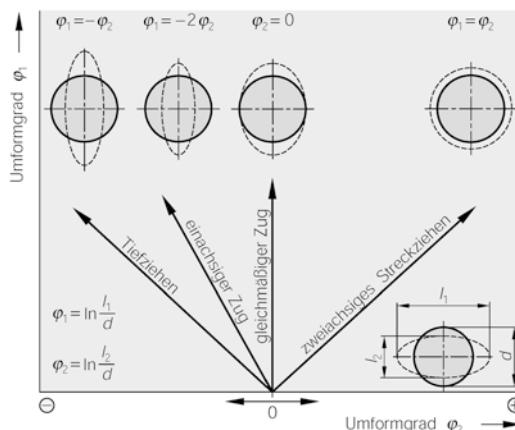


Abb. 3.108 Formänderungen von Kreisrastern je nach Beanspruchung. φ_1 Längenumformgrad φ_2 Breitenumformgrad φ_3 Dickenumformgrad: $\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2)$

stück ellipsenförmig verzerrt. Die Hauptachsen können dann messtechnisch erfasst werden. Bei großflächigen Ziehteilen werden Kreise mit 5 mm Durchmesser durch elektrochemisches Markieren mittels Schablonen aufgebracht. Auf

die vorher gesäuberte Blechplatine wird eine Kunststoff-Ätzvorlage mit dem entsprechenden Messraster aufgelegt. Über eine Filzmatte wird ein Elektrolyt aufgetragen, der je nach Stromstärke und Einwirkzeit das Rasterbild von der Folie auf die Blechoberfläche überträgt. Eine weitere Möglichkeit ist das photochemisch-elektrochemische Auftragen der Messgitter. Dabei wird die Rasterfolie durch einen Photolack ersetzt, wie er z. B. für die Leiterplattenfertigung oder als Offsetdruckplatte eingesetzt wird.

Die Auswertung der Messraster nach dem Umformen ist ein arbeitsintensiver Teil der Formänderungsanalyse. Mit Hilfe einer entsprechenden Software werden über der Werkstückkontur die Durchmesser der aufgebrachten Kreise ausgemessen (Abb. 3.108). Im vorliegenden Koordinatensystem mit φ_1 als Längenumformgrad und φ_2 als Breitenumformgrad sind das reine Tiefziehen mit $\varphi_1 = -\varphi_2$ sowie das reine Streckziehen mit $\varphi_1 = \varphi_2$ unter den möglichen Verformungsarten als Idealfälle zu bezeichnen. In der Praxis finden sich meist Verformungszustände, die zwischen diesen beiden Extremen einzuordnen sind.

Im Bereich zwischen der Kurve $\varphi_2 = 0$ und dem Streckziehen ($\varphi_1 = \varphi_2$) liegt die kritische Verformungsbeanspruchung. In diesem Dehnbereich ergibt sich ein Minimum in der Grenzformänderungskurve (Abb. 3.109). Diese Grenzformänderungskurven nach Keeler und Goodwin zeigen die Grenzen für die untersuchte Blechqualität für Bruch- bzw. Einschnürbeginn. Die Werte ergeben sich aus der Bestimmung des größten Umformgrades φ_1 (große Ellipsenachse) und des kleinsten Umformgrades φ_2 (kleine Ellipse). Die Grenzformänderungskurve (Forming Limit Curve) liegt entlang dieser Messwerte. Als kritische Stellen sind diejenigen Bereiche am Ziehteil zu betrachten, bei denen ein Reißen beim Umformen zu befürchten ist.

Ein Problem beim Beurteilen der Umformeignung von Blechen nach diesem Verfahren der Formänderungsanalyse ist der nur schwer erfassbare Einfluss der Reibungsbedingungen auf die Formänderungsverteilung. Das Verfahren erlaubt daher nur eine annähernde Beurteilung von Ble-

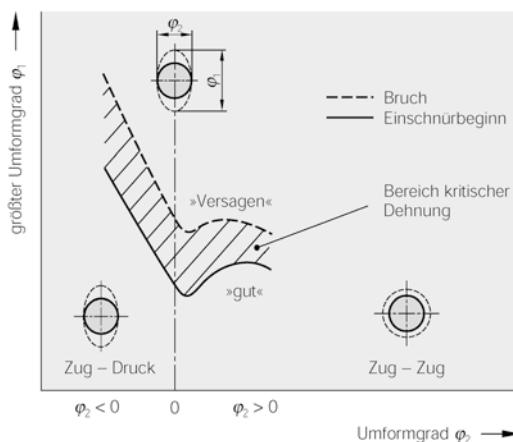


Abb. 3.109 Grenzformänderungsschaubild (Forming Limit Diagram) für Blechformteile. (Nach Keeler und Goodwin)

chen für große und flache, unregelmäßige Ziehteile beim Karosseriebau. In diesen und ähnlichen Fällen lohnt sich der Aufwand, weil bei dem Entwurf und der Konstruktion von Werkzeugen genauere Unterlagen über die Gleichmäßigkeit der Formänderung am Ziehteil ermittelt werden können.

3.6 Biegen

Biegeumformen ist nach DIN 8586 das Umformen eines festen Körpers, wobei man den plastischen Zustand (Fließen) im Wesentlichen durch eine Biegebeanspruchung herbeiführt. Für das Umformen durch Biegen eignen sich alle metallischen Werkstoffe. Das Biegen wird bei der Blechumformung häufig angewendet (Massenfertigung kleinster Werkstücke bis zur Einzelfertigung im Schiff- und Apparatebau). Außer Bleche werden auch Rohre, Drähte und Stäbe mit sehr unterschiedlichen Querschnittsformen mit einer Vielzahl von Verfahren durch Biegen – im Allgemeinen durch Kaltumformen – umgeformt. Nur bei sehr großen Blehdicken oder sehr kleinen Biegeradien wird warm gebogen, um die notwendigen Kräfte klein zu halten und eine Kaltversprödung des Werkstoffes zu vermeiden. Im Folgenden sei kurz das Biegen um gerade Achsen erläutert.

Beim Biegen um gekrümmte Achsen, wie es beim Kragenziehen auftritt, werden zusätzliche Zug- oder Druckspannungen überlagert.

3.6.1 Einteilung der Biegeverfahren

Entsprechend der Werkzeugbewegung kann man Biegeumformen mit *geradliniger* und *drehender* Werkzeugbewegung unterscheiden. Zur ersten Gruppe gehört das Biegen im V-förmigen *Biegegesenk*, wie es Abb. 3.110 zeigt. Das auf den Rändern des Gesenkes ruhende Werkstück wird durch die geradlinige Bewegung des Biegestempels in das V-Gesenk gedrückt. Der Stempel belastet das Blech mit einer Kraft F_b . Unter dem Biegemoment $M_b = 1/4w \cdot F_b$ beginnt der Werkstoff zu fließen, bis das Blech an der Gesenkwand anliegt. Dieses Verfahren wird auf der Abkantpresse durchgeführt. Der Krümmungsradius wird durch das Gesenk vorgegeben. Analog zu diesem Vorgang kann auch ein Biegen im U-förmigen Biegegesenk vorgenommen werden. Hierbei entsteht allerdings beim Biegen ohne Gegenhalter im Bodenteil eine elastische Durchbiegung, die erst im Gesenkgrund eben gedrückt wird.

Eine technische Anwendung dieses Verfahrens stellt die *Großrohrfertigung* dar. Aus einer Blechtafel wird zunächst ein U-förmiges Teil vorgebogen, das dann in einer Formpresse zu einer offenen O-Form umgeformt wird. Da

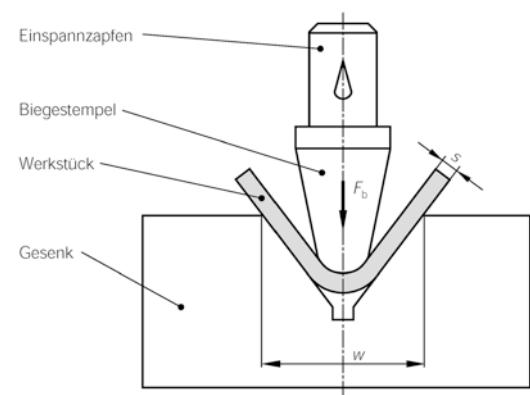


Abb. 3.110 Biegegesenk in V-Form. F_b Biegekraft w Gesenkweite b Breite des Biegeteils (im Bild nicht sichtbar) s Blechdicke

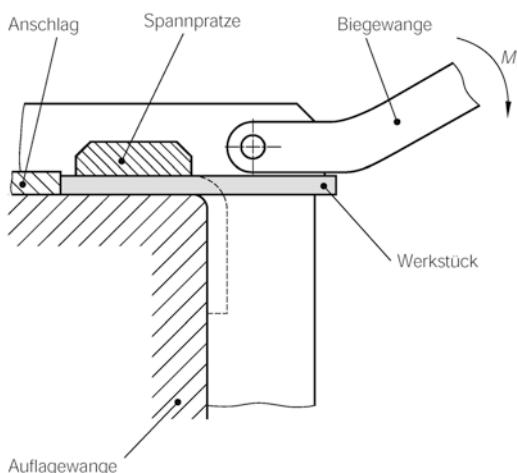


Abb. 3.111 Biegen mit drehender Werkzeugbewegung

die Kanten zuvor angebördelt werden, ergibt sich ein offenes Schlitzrohr, das mittels Unterpulver-Schweißverfahren verschweißt wird.

Beim Biegeumformen mit drehender Werkzeugbewegung wie in Abb. 3.111 wird eine schwenkbare Biegewange eingesetzt. Das mittels Spannpratze gehaltene Blech wird bis zur Anlage an die Auflagewange gebogen (*Schwenkbiegen*).

Ähnlich arbeitet das *Rundbiegen* entsprechend Abb. 3.112. Ein Klemmbolzen spannt das zu biegende Blech auf die Biegerolle. Das freie Ende kann unbehindert an einer Blechführung nachrutschen. Das zum Umformen erforderliche Moment M_t wird durch einen Hebel aufgebracht. Lange Biegeformteile können statt auf einer Abkantbank auch durch Biegen mittels Profilwalzen hergestellt werden. Das Prinzip verdeutlicht Abb. 3.113. Das Werkstück wird durch den Formsschlitz der Profilwalzen geführt und nimmt die gewünschten Biegewinkel an. Meist werden mehrere Walzenpaare hintereinander angeordnet, wenn die Geometrie oder die Größe des Biegebetrages nicht mit einem Walzenpaar erreicht werden kann.

Biegen wird auch vielfach angewendet, um ein Fügen durch Umformen zu erreichen. Dazu gehört das Hohlnieten als Biegen um gekrümmte Achsen, das Fügen durch umgebogene

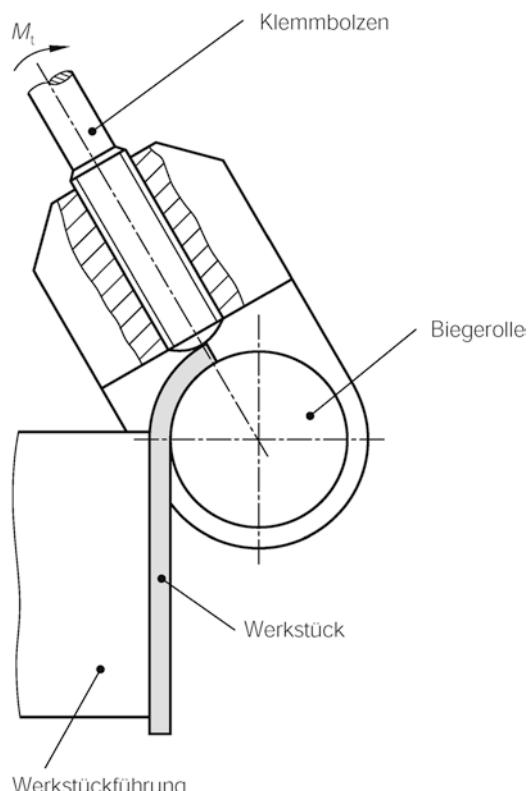


Abb. 3.112 Werkzeusanordnung für das Rundbiegen

Blechlappen sowie das Fügen durch geschränkte oder einseitig oder zweiseitig umgebogene Lappen. Das Verbinden von Glasscheiben mit Blech oder das Schließen eines Dosendeckels erfolgt durch Umbördeln; diesen Prozess kann man als partielles Biegen längs einer Kreisbahn ansehen.

Hohe Anforderungen werden an Falze gestellt. Ebene und zylindrische Bleche und Behälter werden durch Falze verbunden, die vor allem dicht sein sollen. Bei vielen Gebrauchsgegenständen müssen sie verhältnismäßig große Drücke aushalten, z. B. in Spraydosen. Beim Verbinden von ebenen Blechteilen zu einem Kasten dichtet schon der einfache Falz wie in Abb. 3.114a an drei Flächen, die unter den nach dem Umformen zurückbleibenden elastischen Kräften aufeinander gepresst bleiben. Beim stehenden oder liegenden *Doppelfalz* werden bereits vier bis fünf Dichtflächen erzeugt,

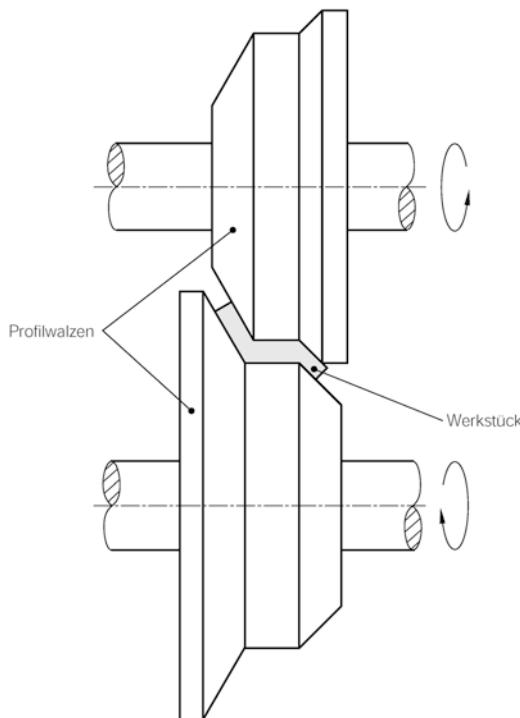


Abb. 3.113 Herstellen von langen abgewinkelten Werkstücken (Profilschienen) mittels Profilwalzen

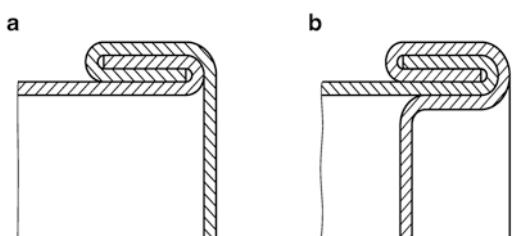


Abb. 3.114 Herstellen von Falzen an Blechbehältern durch mehrmaliges Umbiegen: **a** einfacher Falz **b** Doppelfalz

wie Abb. 3.114b zeigt. So können zylindrische Behälter mit ihren Böden verbunden werden, wobei der Zylinder bei Konservendosen von der Deckelseite her oder auf der Innenseite abgestützt wird. Ein ebener Boden ist schwieriger herzustellen, weil die Abstützung von innen unhandlicher ist als auf einem durchgedrückten Boden von außen.

3.6.2 Biegespannungen, Verformungen und Kräfte

Beim Umformen durch Biegen unterscheidet man nach Abb. 3.115 drei Zonen:

- *reine Zugzone*: Bereich zwischen der ursprünglich mittleren Faser und der äußeren Randfaser;
- *Druck-Zug-Zone*: Zone zwischen der ungelängten und der spannungsfreien Faser;
- *reine Druckzone*: Zone zwischen der Grenzdehnungsfaser und der inneren Randfaser.

Bei scharfkantigem Biegen ist die *Spannungsverteilung* nicht mehr symmetrisch zur Werkstückmitte. Die innen auftretende maximale Druckspannung ist nicht mehr so groß wie die auftretende maximale Zugspannung. Die größte Druckspannung am Rand ist beim Biegen größer als die Zugfestigkeit (R_m) des Werkstoffes. Die äußeren Zonen werden unter den Zugspannungen gelängt und damit dünner, die inneren Schichten werden gestaucht und daher dicker.

Da die Streckgrenze des Werkstoffs zu beiden Seiten der spannungsfreien Faser überschritten wird, suchen die elastischen Formänderungen im Inneren nach Wegfall der äußeren Biegekräfte das Werkstück in seine Ausgangslage zurückzubringen. Dabei federt das gebogene Werkstück zurück, bis ein (inneres) Gleichgewicht eintritt. Die Außenfaser befindet sich dann unter Druckspannung und die Innenfaser unter einer Zugspannung. Die dadurch bewirkte Rückfederung hängt von der Streckgrenze des Werkstoffes und von der Biegeart ab. Je kleiner der Biegeradius und je größer die Werkstückdicke sind, desto größer ist die plastische Umformzone.

Das Rückfederungsbestreben ist bei allen Biegeverfahren zu beachten. Um formgenaue Werkstücke zu erhalten, muss vor Auslegung der Biegewerkzeuge der *Rückfederungsfaktor* $k = \alpha_2/\alpha_1$ nach Abb. 3.116 ermittelt werden. Das ist das Verhältnis aus dem geforderten

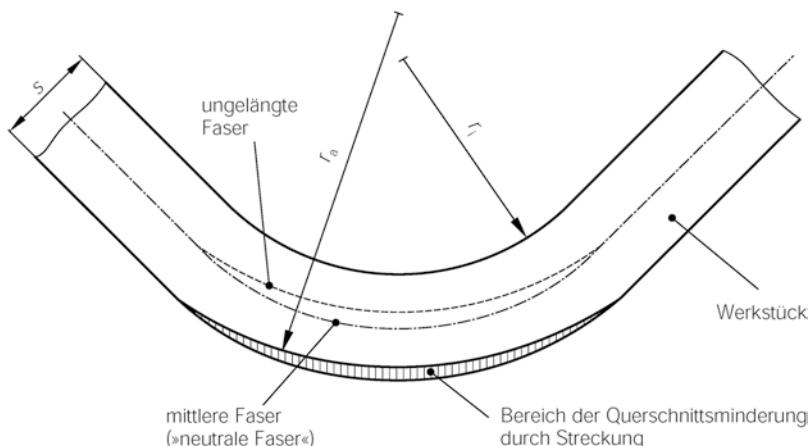


Abb. 3.115 Biegezone bei Werkstücken mit einem Biegewinkel von 90° (nach König u. Klocke: Fertigungsverfahren. Bd. 5. Blechumformung). s Blechdicke r_i Innenradius r_a Außenradius

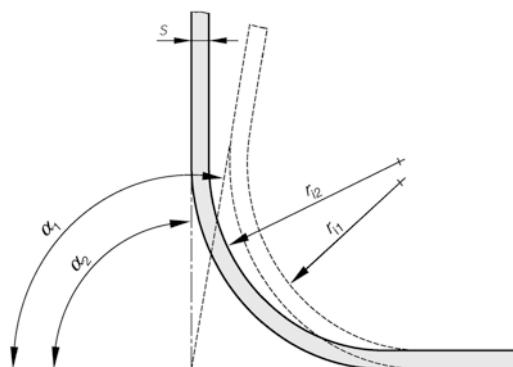


Abb. 3.116 Zur Geometrie der Rückfederung. α_1 Winkel am Werkzeug α_2 Winkel am Werkstück (aus dem Gesenk entnommen) s Blechdicke r_{i1} Innenradius am Werkzeug r_{i2} Innenradius am Werkstück Rückfederungsfaktor $k = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{r_{i1}+0,5s}{r_{i2}+0,5s} < 1$

Biegewinkel α_2 zum erforderlichen Biegewinkel α_1 , der die unerwünschte Rückfederung durch Überbiegen ausgleicht. Die k -Werte hängen von den Werkstoffeigenschaften und vom Verhältnis r/s (Biegeradius/Blechdicke) ab. Diese Zusammenhänge gehen für verschiedene Werkstoffe aus den *Rückfederungsdiagrammen* in Abb. 3.117 hervor.

Für die Praxis ist der *minimale Biegeradius* r_{\min} von Bedeutung, weil an den Blechrändern leicht Risse durch eine überproportionale Randverfestigung auftreten können. Er wird durch die

Höhe der Umformung in den Randfasern festgelegt und kann über die maximal zulässige Dehnung in der Außenfaser berechnet werden. Vereinfacht ergibt sich nach Oehler der Zusammenhang $r_{\min} = c \cdot s$. Dabei ist c der sog. *Mindestrundungsfaktor* für die Blechdicke s . In Tab. 3.4 sind für verschiedene Werkstoffe Mindestrundungsfaktoren zusammengestellt. Diese Werte gelten für Biegevorgänge quer zur Walzrichtung. Liegt die Biegeachse parallel zur Walzrichtung, so tritt bereits bei kleineren Randdehnungen Rissgefahr auf. Das gilt besonders für Bleche mit höherer Festigkeit und geringem Dehnvermögen. Nach DIN 6935 liegen die Werte für r_{\min} um $0,5 s$ höher als beim Biegen senkrecht zur Walzrichtung.

Vielfach kommt es zu Versagensfällen an Bauteilen aus Blech, wenn die *Gratlage* am Biegeteil nicht berücksichtigt wird. Mit abnehmender Dehnung, ansteigendem Streckgrenzenverhältnis R_e/R_m und zunehmendem bezogenen Radius r_i/s steigt die Gefahr der Rissbildung an den Biegekanten, wenn der Schnittgrat *außen* liegt. Deshalb ist in kritischen Fällen bereits auf der Konstruktionszeichnung zu vermerken „*Gratlage innen*“ oder „*Vor dem Biegen engraten*“.

Ein weiteres Problem bei Biegeteilen ist die *Randverformung*. Diese tritt vorwiegend beim Biegen dicker Bleche mit kleinem Biege-

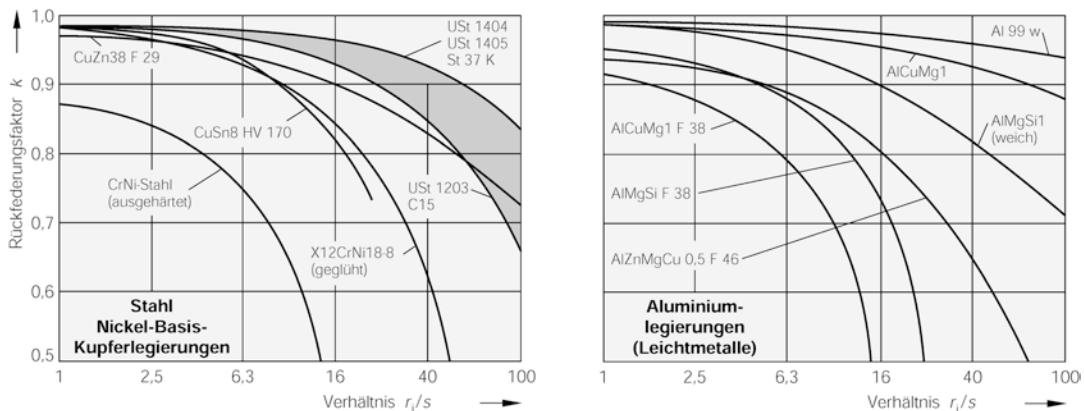


Abb. 3.117 Rückfederungsdiagramm für verschiedene Werkstoffe. (Nach J. Flimm, Hanser Verlag)

Tab. 3.4 Mindestrundungsfaktor für verschiedene Werkstoffe

Werkstoff	c-Faktor	Werkstoff	c-Faktor	Werkstoff	c-Faktor
Stahlblech	0,6	Aluminium, halbhart	0,9	AlMn, weich	1,0
Tiefziehblech	0,5	Aluminium, hart	2,0	AlMn, presshart	1,2
rostfreier Stahl		AlMg3, halbhart	1,3	AlMn, hart	1,2
martensitisch-ferritisch	0,8	AlMg7, weich	2,0	AlCu, weich	1,0
austenitisch	0,5	AlMg7, halbhart	3,0	AlCu, ausgehärtet	3,0
Kupfer	0,25	AlMg9, weich	2,2	AlCuMg, weich	1,2
Zinnbronze	0,6	AlMg9, halbhart	5,0	AlCuMg, presshart	1,5
Aluminiumbronze	0,5	AlMgSi, weich	1,2	AlCuMg, ausgehärtet	3,0
CuZn28	0,3	AlMgSi, ausgehärtet	2,5	AlCuNi, gegläht	1,4
CuZn40	0,35	AlSi, weich	0,8	AlCuNi, ungeglüht	3,5
Aluminium, weich	0,6	AlSi, hart	6,0	MgMn	5,0

radius auf. Der an der inneren Biegekante liegende Werkstoff wird gestaucht und versucht daher seitlich zum Rand hin auszuweichen, Abb. 3.118. Die Ausgangsbreite b nimmt dadurch um das Maß $2t$ auf $b_i = b + 2t$ zu. Die außen liegenden Werkstofffasern verhalten sich umgekehrt: Es entsteht eine Schrumpfung von der Größe $b_a = b - 2t$. Nach Versuchen von Oehler beträgt die Breitendifferenz im Biegegrund für weichen Baustahl $t = 0,4s/r_i$. Da der Werkstoff nach innen fließt, vermindert sich die Ausgangsdicke s um bis zu 10 % auf s_1 . Gleichzeitig tritt an den Enden der Biegekanten mit kleiner werdendem bezogenen Biegeradius r_i/s ein zunehmendes Aufwerfen der Außenkanten auf. Der Querschnitt im Biegebereich zeigt eine deutliche Aufwölbung. Um den seitlichen Überstand des Wulstes zu verhindern, wird bei Präzisionsteilen und bei Passungen eine teure

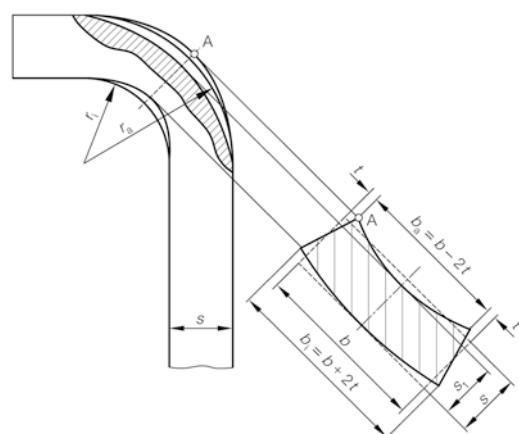


Abb. 3.118 Randverformung beim Biegen. (Nach W. König und F. Klocke)

Nacharbeit oder ein vorheriges Freischneiden im Biegebereich erforderlich.

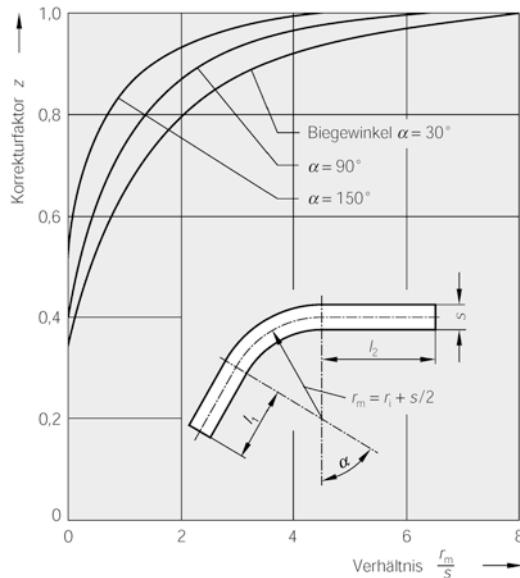


Abb. 3.119 Korrekturfaktor z zur Ermittlung der gestreckten Länge. (Nach K. Grüning, Vieweg Verlag)

Bei der *Zuschnittsermittlung* von Biegeteilen wird die gestreckte Länge L_Z der zu biegenden Teile aus der Summe der geraden Teilstrecken sowie der dazwischenliegenden Kreisbögen berechnet zu:

$$L_Z = l_1 + l_2 + \frac{\pi\alpha}{180^\circ} \left(r_i + z \frac{s}{2} \right). \quad (3.68)$$

Der Korrekturfaktor z zur Berücksichtigung der Verlagerung der neutralen Faser (mit zunehmendem Biegewinkel nach außen hin) kann Abb. 3.119 entnommen werden.

Ausgangspunkt für die Berechnung der *Biegekraft* bei Verwendung von *V-förmigen* Gesenken (s. Abb. 3.120) ist das Biegemoment M_b .

Wird ein Blech der Breite b und der Dicke s mit rechteckigem Querschnitt im Gesenk belastet, so ergibt sich zu Beginn der plastischen Umformung ein Biegemoment von

$$M_b = \frac{1}{4} w \cdot F_b = k_f \cdot W. \quad (3.69)$$

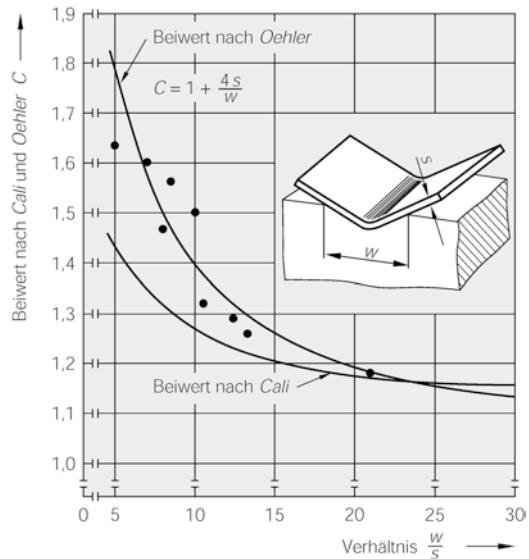


Abb. 3.120 Beiwert nach Cali und Oehler zur Biegekraftberechnung

Hierin ist F_b die mittig aufgebrachte Biegekraft, w die Gesenkweite der beiden Auflagepunkte, k_f die Fließspannung und W das Widerstandsmoment des Werkstücks mit $W = bs^2/6$. Dieses verschiebt sich mit zunehmender Krümmung (bei fortschreitender Biegung im plastischen Bereich bzw. kleinerem r/s -Verhältnis) zu $W = bs^2/4$. Damit lässt sich aus (Gl. 3.69) die in der Praxis gebräuchliche Beziehung für die maximale Biegekraft herleiten:

$$F_b = C \cdot b \cdot s^2 \cdot R_m/w. \quad (3.70)$$

Nach *Mäkelt* ist dabei die Fließspannung k_f durch den größeren Wert der Zugfestigkeit R_m ersetzt worden. Der Berichtigungsfaktor C nach *Cali* kommt insbesondere für kleine Gesenkweiten ($w/s < 10$) zum Tragen. Aus Kraftmessungen bei Biegeversuchen wurde von *Oehler* der praxisgerecht korrigierte C -Wert zu $C = 1 + 4s/w$ bestimmt, Abb. 3.120.

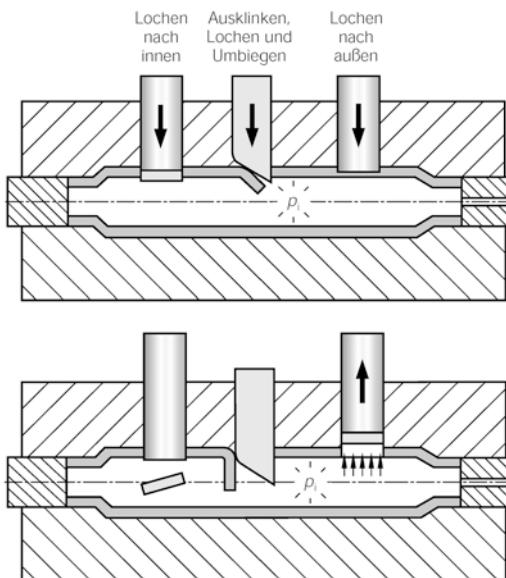


Abb. 3.121 Innenhochdruckumformen eines rohrförmigen Bauteils mit zusätzlichen Lochoperationen. (Quelle: Schuler-Handbuch)



Abb. 3.122 Werkstücke, hergestellt durch Rohraufweiten. (Quelle: Siempelkamp Pressen Systeme)

3.7 Innenhochdruckumformen (IHU)

3.7.1 Allgemeines

Die Blech verarbeitende Industrie ist gezwungen, neben einer Minimierung von Kosten und Gewicht, die Festigkeit und Steifigkeit der Produkte zu optimieren. Dabei hat in den letzten Jahren das Innenhochdruckumformen (IHU) durch Flüssigkeitsdruck als alternatives Fertigungsverfahren von Hohlkörpern mit komplexer Geometrie größere Bedeutung erlangt. Die folgenden Ausführungen stützen sich auf das „Handbuch der Umformtechnik“ (Hrsg. Schuler GmbH, Springer-Verlag 1996), die VDI-Richtlinie 3146 Blatt 1 und Blatt 2 sowie die Ausführungen von F.-U. Leitloff (Aug. 2017).

Das Innenhochdruckumformen gehört zu den Umformverfahren mit einem flüssigen Wirkmedium¹⁰. Das Rohteil wird dabei durch ein flu-

des Medium umgeformt, das in einem Hohlraum wirkt, Abb. 3.121. Ziel ist die Herstellung von Bauteilen, die durch andere Fertigungsverfahren nicht oder nur sehr aufwendig umformtechnisch hergestellt werden können. Konkrete Anwendungsbereiche sind die Automobil- und Armaturen-Industrie sowie der Anlagenbau, Abb. 3.122.

Bauteilspezifisch können sich folgende Vorteile gegenüber anderen Fertigungsverfahren ergeben:

- geringeres Gewicht,
- hohe Kaltverfestigung,
- höhere Steifigkeit,
- weniger Einzelteile,
- komplexere Geometrie,
- weniger Fertigungsstufen,
- höhere Genauigkeit.

Als Rohlinge für das Innenhochdruckumformen können Hohlprofile (Rohre, Strangpressprofile usw.) oder Bleche eingesetzt werden.

¹⁰A. H. Fritz, Berliner-Hochschule für Technik: Innen-Hochdruck-Umformen [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=IwzJyfjyDg).

Tab. 3.5 Anwendungen für das Innen-Hochdruck-Umformen. (Nach Schuler-Handbuch 1996)

Branche	Baugruppe	Bauteil (Beispiel)
Automobilindustrie Fahrzeuge – Straße – Wasser – Luft – Schiene	Fahrwerk Abgas-, Ansaugsysteme Anbauteile, Antrieb Sitz, Rahmen/Karosserie Lenkung	Quer-, Längsträger Krümmer Dachreling, Spoiler Getriebewellen Sitzrahmenteile, A-, B-, C-Säule Dachrahmenprofile Lenksäule mit Kompensator
Chemie-, Gas-, Ölindustrie, Kraftwerksbau	Leitungs- und Behälterteile Rohrformstücke	T-Stücke, Reduzierstücke Gehäuse, Verkleidungen
Haushaltstechnik	Armaturen Maschinen	Rohrbögen, T-Stücke, Reduzierstücke Kreuzstücke, Bögen
Zweiradindustrie	Rohrformstücke	Tretlager, Knoten, Rahmen
Profilverarbeitung	Gerüstbau, Rohrhalbzeuge Schienenfahrzeuge Nutzfahrzeuge	Knoten, Träger, kalibrierte Rohre und Profile, Dachspiegel, Rahmen Träger, Knoten
Pumpen und Armaturen	Gehäuse	Ansaugstutzen
Heizung, Lüftung, Klima	Formstücke	Rohrbögen, Reduzierstücke T-Stücke, Sammelrohre
Möbelindustrie	Rahmen Formelemente	Füße, Träger, Knoten Schalen, Regalböden
Beleuchtungsindustrie	Straßenbeleuchtung	Lichtmästen, Lampenschalen
Optik	Fernrohre, Taschenlampen	Gehäuse

Bei letzteren wird im Gegensatz zum Tiefziehen mit Wirkmedien nach ISO/DIS 8500 das gleichzeitige Umformen von zwei oder mehreren Blechen verstanden, zwischen denen nach Beendigung des Umformvorganges ein Hohlraum entstanden ist. Die Einteilung der Verfahrensvarianten des Innenhochdruckumformens von Hohlprofilen erfolgt nach den in der Umformzone wirkenden Spannungen:

- Zug-Druck-Spannungen beim Aufweitstauen im offenen oder geschlossenen Gesenk,
- Zugspannungen beim Innenhochdruck-Aufweiten oder -Kalibrieren,
- Biegespannungen bei Innenhochdruck-Biegevorgängen,
- Schubspannungen beim Innenhochdruck-Durchsetzen.

Automobilbau¹¹ wird das Innenhochdruckumformen bereits seit fünfzehn Jahren in größerem Umfang angewendet. Bauteile, die nach diesem Verfahren gefertigt werden, übernehmen hier im Wesentlichen zwei Funktionen: Zum einen kommen sie als Kraft und Moment übertragende Strukturbauenteile in Antriebsstrang, Karosserie und Fahrwerk zum Einsatz. Zum anderen dienen sie im Heizungs-, Lüftungs- und Klimagesystem als Medien führende Elemente.

Abgasbauteile

In der Automobilindustrie wurde das Innenhochdruckumformen als Fertigungsverfahren für die Großserie bei Abgassystemen entdeckt. Dabei konnten die Gusstechnik und die Blech-Halbschalenbauweise substituiert werden.

3.7.2 Anwendungsgebiete

Die möglichen IHU-Anwendungsgebiete umspannen viele technische Branchen, Tab. 3.5. Im

¹¹ Im Gegensatz zum Innenhochdruckumformen konnte sich das hydromechanische Tiefziehen aufgrund der höheren Zykluszeiten im Automobilbau nicht durchsetzen. In der Vergangenheit wurde dieses Verfahren z. B. zur Herstellung von Scheinwerferreflektoren eingesetzt.

Folgende Vorteile lassen sich für IHU-Abgas-systeme nennen:

- Weniger Einzelteile, dadurch weniger Schweißnähte,
- deutlich höhere Haltbarkeit,
- besserer Gasdurchfluss,
- geringeres Gewicht,
- niedrigere Herstellkosten.

Heute gehört das Innenhochdruckumformen zu den Standardverfahren bei der Entwicklung neuer Abgassysteme, Abb. 3.123.

Fahrwerksbauteile

Die Erfolge des Verfahrens wurden sehr bald auch im Fahrwerkbau genutzt. Ein bekanntes Beispiel ist hier die Aluminium-Hinterachse des 5er BMW von 1995, Abb. 3.124. Die erste vollautomatisierte IHU-Großserien-Fertigungsanlage der Welt für einen PKW-Motorträger wurde 1997 bei *Opel* in Bochum in Betrieb genommen, Abb. 3.125. Die hier erreichten technisch-wirtschaftlichen Ziele waren:

- Werkzeugkosten um 60 % reduziert,
- Gewicht um 30 % eingespart,
- Bauteilepreis um 20 % abgesenkt.

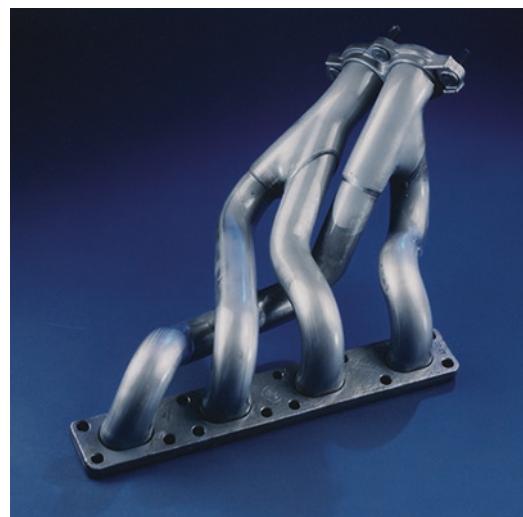


Abb. 3.123 Serienfertigung von Abgaskrümmern bei Fa. Arvin Exhaust, Finnentrop. (Quelle: Schuler Hydro-forming GmbH). Reduzierung der Einzelteile auf 53 %, der Herstellkosten auf 85 %, Erhöhen der Lebensdauer um 50 %

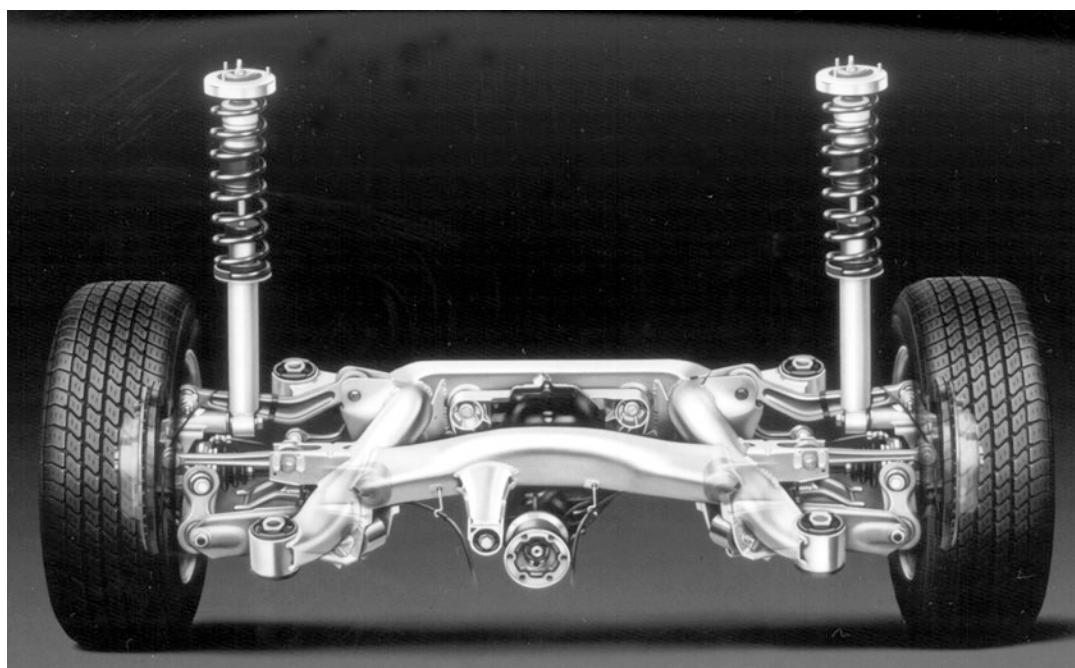


Abb. 3.124 BMW 5er Hinterachse, bestehend aus 4 IHU-Teilen: 2 Längsträger, 2 Querträger aus Aluminium-Rohr, geschweißt. (Quelle: Siempelkamp Pressen Systeme)



Abb. 3.125 Kompletter Motorträger für Opel-Astra/Zafira (Quelle: Schuler Hydroforming). Reduzierung der Werkzeugkosten um 60 %, der Produktionskosten um 20 %, des Gewichtes um 30 % (bezogen auf die bisherige Fertigung)



Abb. 3.126 Überrollbügel als IHU-Bauteil für Porsche Boxster. (Quelle: Schuler Hydroforming)

Diese und ähnliche Projekte führten zu weiteren Anwendungen der IHU-Technik im Achsenbau. Zum Beispiel machte der Motorträger von Opel Schule für viele weitere U-förmig ausgelegte IHU-Motorträger (Engine Cradle).

Karosserie- und Chassisbauteile

In den USA hatte man zeitlich parallel sehr viele Rohr-Hydroform-Anwendungen verwirklicht. Dabei lag der Schwerpunkt bei Strukturbau teilen im Chassis und in der Karosserie. Diese IHU-Bauteile wurden entsprechend der stark praxisorientierten amerikanischen Vorgehensweise gezielt fertigungsgerecht ausgelegt, wobei die umgebende Gesamtkonstruktion eine Anpassung an das IHU-Bauteil erfuhr (nicht umgekehrt!). Als Folge einer größeren Variantenvielfalt bei geringeren Stückzahlen gewinnten alternative Karosseriekonzepte zunehmend an Bedeutung, z. B. Rohrrahmen- oder Space Frame Bauweisen. Solche Bauweisen erleichtern dem Konstrukteur den sinnvollen Einsatz der Innenhochdruckumformverfahren. In Europa steht diese Technik im Bereich der Karosserie trotzdem noch in den Anfängen, Abb. 3.126.

3.7.3 Bauteil- und Prozessauslegung

Bei der Entwicklung von IHU-Bauteilen ist eine exakte Analyse der Randbedingungen erforderlich. Eine optimale Gestaltung der Bauteile

unter Berücksichtigung der verfahrensspezifischen Besonderheiten erhöht die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit im Serienbetrieb.

Die Machbarkeitsanalyse, die Bauteilauslegung sowie eine Festlegung des Fertigungsablaufs sind eng miteinander verknüpft. Wenn alle Punkte zu einem positiven Ergebnis führen, kann die Prototypentwicklung der Bauteile beginnen, Abb. 3.127.

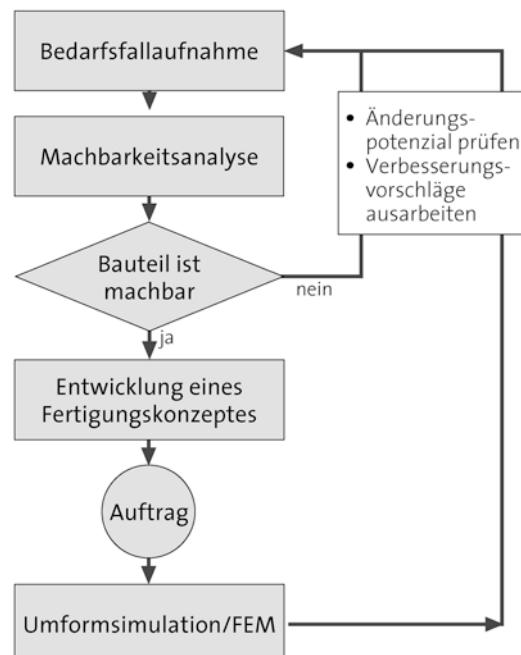


Abb. 3.127 Ablaufdiagramm für die Bauteilauslegung

Eine Checkliste zur Machbarkeitsanalyse besteht aus folgenden Punkten:

- Überprüfung der Geometriedaten,
- Bestimmung des erforderlichen Innendrucks,
- Festlegung der Werkzeuglage,
- Umformanalyse,
- Untersuchung der Lochgeometrien,
- Festlegung der Biegelinie.

Der erforderliche Innendruck p_i ergibt sich aus der Fließspannung k_f ($\approx 1,25 R_{eh}$) und der Rohrwanddicke s , bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser r_m . Sobald aber ein (im Verhältnis zur Wanddicke) kleinerer Eckradius r_{min} im Rohr ausgeformt werden soll, steigt der Innendruck hyperbolisch an. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 3.128 dargestellt.

Bauteilauslegung

Hierzu muss die verfahrensspezifische Technologie berücksichtigt werden. Dazu gehört neben der Verwendung von vorgebogenem Rohr z. B.

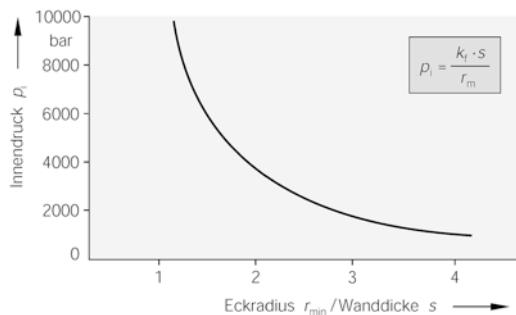


Abb. 3.128 Erforderlicher Innendruck als Funktion vom Verhältnis r_{min}/s

die Erzeugung von Querschnittsveränderungen, Durchsetzungen, Durchbrüchen, Einfach- und Mehrfachaushalsungen oder die Erzeugung von Schweißzentrierflächen. Für rohrförmige Rohpteile gelten nach dem derzeitigen Stand der Technik folgende Grenzwerte:

- maximale Länge $L = 12$ m,
- maximaler Durchmesser $D = 660$ mm,
- Wanddicke $s = 0,6$ bis 50 mm.

Die maximal erreichbare Aushalsungshöhe an einem geraden T-Stück ist deutlich höher als an einem Bogen, weil hier das Nachschieben von Werkstoff behindert wird, Abb. 3.129.

Eine erhöhte Aushalsung ist dann möglich, wenn sie in der Nähe eines Axialzyinders liegt. Bei der Auslegung eines Bauteiles sollten grundsätzlich scharfe Ecken und Kanten vermieden werden. Radien müssen an die jeweilige Wanddicke angepasst werden. Querschnittsübergänge sollen weich gerundet sein, falls dies möglich ist.

Machbarkeitsanalyse

Die Machbarkeitsanalyse besteht meist aus folgenden Einzelschritten:

- Modelleingabe,
- Vernetzung,
- automatische Wahl der Mittellinie,
- Anordnung der Schnitte über der gewählten Mittellinie,
- sofortige Darstellung der Umfänge,
- Angabe der Dehnungen für unterschiedliche Rohre,
- Festlegung des Vorrohr-Durchmessers.

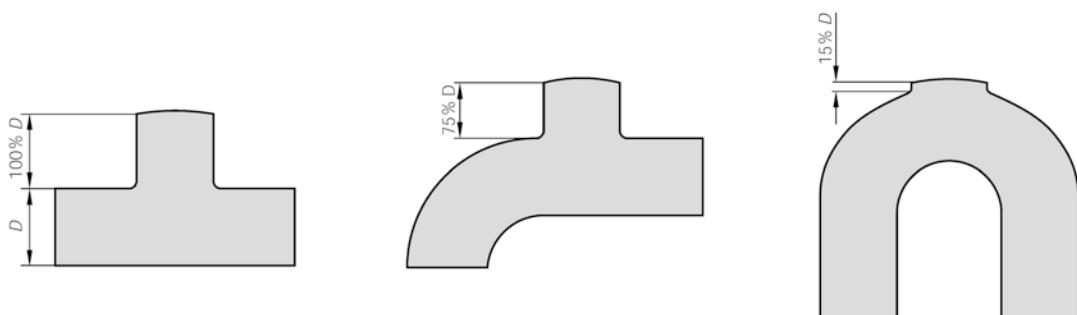


Abb. 3.129 Erreichbare Aushalsungshöhe in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie. (Nach Schuler-Handbuch)

Als Ergebnis der Machbarkeitsanalyse liegen danach auf der Werkzeugseite vor: Innendruck, erforderliche Lochzylinder, Schiebeweg und auf der Maschinenseite: Schließkraft der Presse, erforderliche Axialkraft und Biegelinie.

Simulation der Formgebung

In der Umformtechnik hat sich die Methode der finiten Elemente (FEM) fest etabliert. Ziel hierbei ist, teure und aufwendige experimentelle Untersuchungen durch eine schnelle und preiswerte Simulation zu ersetzen. Bei der Umsetzung aller Vorüberlegungen in die Praxis müssen die folgenden Besonderheiten der Innenhochdruckumformung beachtet werden:

- Berücksichtigung der partiellen Kaltverfestigung an vorverformten Rohren,
- Zusammenhang der Prozessparameter: Bewegungen und Kräfte der Axialzyylinder, zeitlicher Verlauf des Innendrucks, Bewegung zusätzlicher Werkzeugelemente, Schließbewegung des Werkzeugs,
- Funktionale Verknüpfung der Prozessparameter: Innendruck, verschiedene zusätzliche Werkzeugelemente wie Lochstempel und Gegenhalter sowie axiale Zylinder,
- elastische Rückfederung,
- Versagenskriterien: Knicken und Bersten,
- Werkstoffverhalten: Anisotropie und Fließkurve,
- Kontaktbeschreibung.

Folgende Ergebnisse lassen sich mit einem entsprechend ausgelegten FEM-Programm berechnen:

- Plastische Vergleichsdehnung,
- Vergleichsspannung,
- Dickenverteilung,
- Verteilung der Dehngeschwindigkeiten,
- Hauptdehnungen,
- Abstand der Werkstückaußenwand zur Werkzeugwand.

Mit diesen Ergebnissen lassen sich dann einzelne Fertigungsstufen festlegen, Abb. 3.130.



Abb. 3.130 Fertigungsstufen für den Opel-Motorträger aus modifiziertem niedrigkohlem Baustahl. Vorrohr: 2600 × 65 × 2 mm. (Quelle: Schuler Hydroforming)

Werkstoffeinsatz

Als Werkstoffe für das Innenhochdruckumformen kommen alle die infrage, die sich auch für andere Kaltumformverfahren eignen. Heute werden Bau- und Tiefziehstähle, höherfeste Stähle, hitzebeständige und nichtrostende Edelstähle, Aluminium und seine Legierungen sowie Kupfer und seine Legierungen eingesetzt. Allgemeine Anforderungen in Bezug auf die Umformfähigkeit sind:

- Große Gleichmaßdehnung,
- hoher Kaltverfestigungsexponent,
- hohe senkrechte Anisotropie,
- gute Umformbarkeit der Fügestellen.

Rohteil-Geometrie

Unter einem *IHU-Rohteil* wird das Werkstück verstanden, das dem Prozess zugeführt wird. Das Rohteil besitzt sowohl stoffliche als auch geometrisch bestimmte Eigenschaften. Es wird aus dem Halbzeug Rohr oder Blech hergestellt, z. B. durch Vorformen oder Vorbiegen.

Anforderungen an die *Rohteil-Geometrie* sind eine auf die Endteilgeometrie abgestimmte Form und Abmessung sowie geringe Form-, Maß- und Lagetoleranzen, insbesondere Länge, Schnittfläche und Wanddicke. Die quantitative Festlegung hierzu muss bauteilspezifisch erfol-

gen. Folgende geometrische Formen kommen zum Einsatz:

- Hohlprofile (gerade, vorgeformt, geschweißt, stranggepresst, Doppelwandrohr),
- Doppel- oder Mehrfachplatten (eben oder vorgeformt, Tailored Blanks).

Zusätzlich ist zu beachten, dass Späne, Verschmutzungen und Oberflächenbeschädigungen oder auch Schweißnahtüberhöhungen usw. vermieden werden.

Verfahrensgrenzen

Für die erfolgreiche Durchführung des Innenhochdruckumformens von z. B. Hohlprofilen müssen die Verfahrensparameter innerhalb eines sog. Prozessfensters liegen, um die typischen Versagensfälle zu vermeiden (Abb. 3.131). Die Prozessparameter müssen dabei folgende Anforderungen erfüllen:

- die aus Axialkraft und Innendruck resultierenden Spannungen müssen der Fließbedingung genügen,
- die Axialkraft muss so groß sein, dass eine sichere Abdichtung des Hohlprofils gewährleistet ist,
- der maximale Innendruck darf nicht zur Einschnürung der Profilwand führen,
- die maximal aufbringbare Axialkraft muss stets unterhalb der Knicklast liegen.

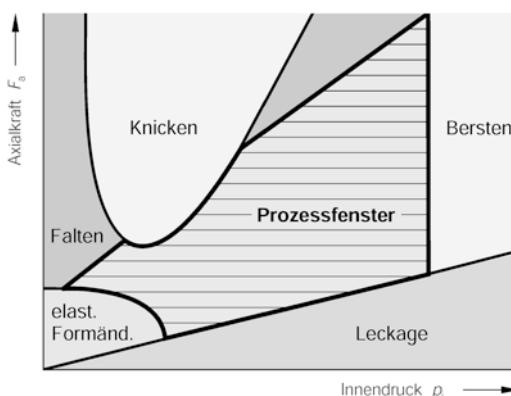


Abb. 3.131 Prozessfenster im IHU-Arbeitsdiagramm (VDI 3146, Blatt 1)

Versagensfälle

Als typische Versagensfälle beim Innenhochdruckumformen gelten:

- Falten in Profilumfangsrichtung (durch zu hohe Axialkraft bei niedrigem Innendruck),
- Knicken (bei Überschreiten der kritischen axialen Drucklast, die abhängig von der Rohrlänge und der Wanddicke ist),
- Bersten durch zu große Aufweitung (tritt bevorzugt in Zonen mit zweiachsigen Zugbeanspruchungen auf).

Tribologie

Die tribologischen Einflüsse auf das Prozessfenster beim Innenhochdruckumformen sind sehr komplex. Während manche Umformprozesse ohne zusätzliche Schmierstoffe auskommen, erfordern andere eine gezielte lokale oder globale Schmierung. Hierzu werden zurzeit hauptsächlich Gleitlacke auf MoS₂-Basis, Wachsemulsionen, grafithaltige Gleitlacke jeweils auf Wasserbasis eingesetzt (Tab. 3.6). Es ist aber auch möglich, die tribologischen Verhältnisse durch Beschichten oder spezielle Oberflächenbehandlung zu verbessern.

Prozessauslegung und Prototyping

Dieser Schritt umfasst die Festlegung des Fertigungsablaufs und die Auslegung der benötigten Fertigungsanlagen. Von besonderer Bedeutung ist die konsequente Umsetzung der Ergebnisse des Prototypings. Nur ein Zusammenspiel von theoretischer Analyse und praxisgerechter Versuchsdurchführung liefert ein optimales Produkt. Die Festlegung qualitätsrelevanter Daten gehört ebenfalls dazu.

Tab. 3.6 Reibungszahlen des verwendeten Schmierstofftyps beim Innenhochdruck-Umformen. (Quelle: Schuler Hydroforming)

Schmierstofftyp	Reibungszahlen
Ohne Schmierstoff	0,1
Öle	0,025 bis 0,06
Lacke	0,015 bis 0,02
Wachse	0,01 bis 0,015

3.7.4 Anlagen- und Werkzeugtechnik

Zur praktischen Durchführung von Innenhochdruck-Verfahren bedarf es einer speziellen Anlage (IHU-Zelle). Diese besteht aus einer hydraulischen Presse, der Wasserhydraulik und dem eigentlichen Werkzeug. Zusätzlich werden Steuer- und Regeleinrichtungen sowie Werkzeugwechselsysteme benötigt. Vorgelagerte Prozesse sind das Ablängen und Vorformen (Biegen und Querschnitt ändern), nachgelagert ist die Endenbearbeitung.

Grundlegende Funktionen beim Innenhochdruckumformen sind:

- Schließen – Zuhalten – Öffnen,
- Füllen und Dichten,
- Druck erzeugen und regeln, Abb. 3.132,
- Form geben,
- Prozess führen.

Mitunter ergibt sich bereits zum Vorformen des Rohteils die Notwendigkeit einer gesteuerten oder geregelten Schließbewegung. Diese Funktionen werden durch eine Schließ- und Zuhalteinrichtung erfüllt. Aufgrund des Prozessablaufs und der erforderlichen Kräfte kommen kraftgebundene Pressen, mechanisch verriegelte Maschinen oder deren Kombination zum Einsatz. Die unter Wirkung des Innendrucks auftretenden Werkzeugauffederungen müssen durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden.

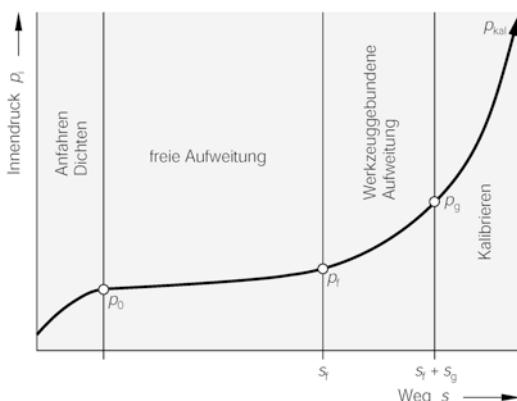


Abb. 3.132 Typischer Druck-Wegverlauf eines IHU-Aufweitevorgangs

Die eigentliche Formgebung erfolgt beim Innenhochdruckumformen in einem Hohlformwerkzeug mit integrierten aktiven Formelementen. Diese können mittels regelbarer Achsen die Hohlräume im Werkzeug verkleinern oder vergrößern.

Ein IHU-Werkzeug besteht grundsätzlich aus Werkzeugober- und -unterteil, Abb. 3.133. Die Aufnahmeplatten für die Werkzeuge ermöglichen die Anpassung an die Einbauhöhe, die durch Pressenhub bzw. Höhe der Zylinderkonsolen vorgegeben ist. Die (z. B. wegabhängig geregelten) horizontal bewegten Dichtstempel dichten die Rohrenden ab und schieben sie beim Stauchprozess nach. Die Zylinderkonsolen nehmen die Axialkräfte auf und ordnen die Axialzylinder konzentrisch zu den Einläufen an. Sie können auf der Tischplatte bzw. Stöbelplatte verschoben werden.

Durch einen modularen Grundaufbau der Werkzeuge kann eine gewünschte Bauteilgeometrie flexibel realisiert werden. Diese Maßnahme hat das Ziel, die Fertigungskosten und die Wechselzeiten für Werkzeuge und Verschleißteile zu minimieren. Während der Entwicklungsphase kann man ohne Werkzeugwechsel verschiedene Rohrwerkstoffe und Wanddicken erproben.

Bei der Auslegung eines Prototypwerkzeugs spielt die Lebensdauer eine untergeordnete Rolle. Abgesehen von den Schiebeeinsätzen kann auf das zeitintensive Beschichten bzw. Behandeln der Oberflächen verzichtet werden. Die schrittweise Annäherung an ein serientaugliches Werkzeug, das sog. Prototyping, findet in folgenden Stufen statt:

- Entwicklung der Grundgeometrie eines Bau-teils,
- Integration von Zusatzoperationen wie Löchern,
- Fertigung modifizierter Einsätze.

Dabei beeinflussen folgende Parameter die Auswahl der Werkzeugwerkstoffe sowie deren notwendige Beschichtung bzw. Behandlung der Oberfläche:

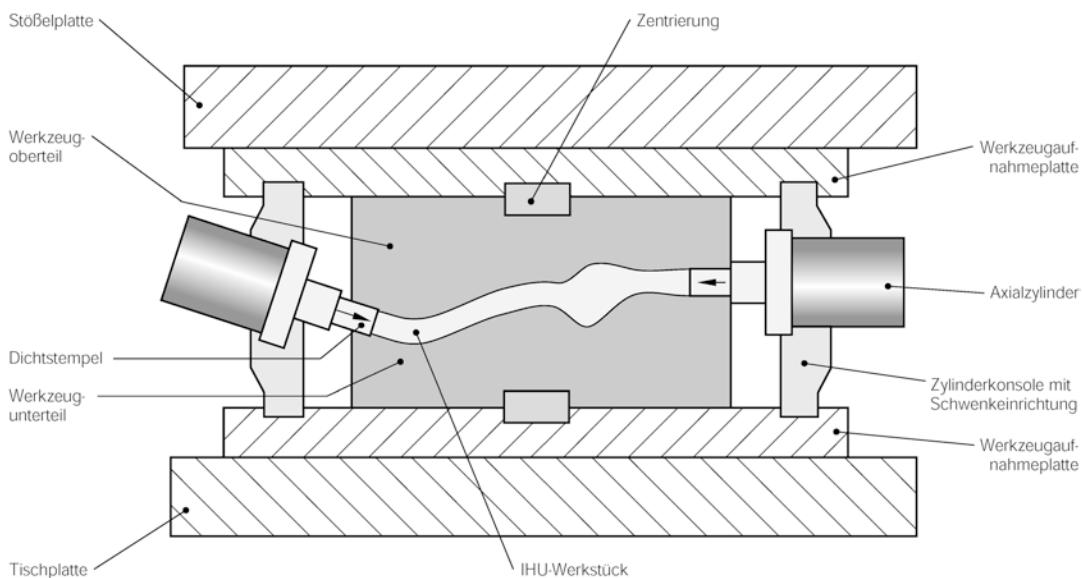


Abb. 3.133 Prinzipieller Werkzeugaufbau für das Innenhochdruckumformen. (Nach Schuler-Handbuch)

- Geometrie des Bauteils,
- Werkstoff des Bauteils,
- maximaler Innendruck,
- Dichtsystem,
- Verwendungszweck (Prototyping oder Serienbetrieb).

3.7.5 Fertigteilqualität

Ob eine Prozessauslegung und das anschließende Prototyping ein gutes IHU-Bauteil ergeben, hängt von der Beurteilung dieser Bauteile durch den Kunden ab. Eine rein optische Prüfung auf Falten oder Markierungen durch den Fertigungstechniker nach der Entnahme des Bauteils aus dem Werkzeug genügt nicht. Schon beim Prototyping müssen Wanddicken und zum Teil auch Außenkonturen gemessen werden, deren Ergebnisse wiederum zur Anpassung des IHU-Prozesses verwendet werden. Der dafür aufzubringende Zeit- und Kapazitätsbedarf ist bei der Planung der Pressenbelegung zu berücksichtigen.

Die Übertragbarkeit von Qualitätsdefinitionen und Kontur-Messmethoden von ebenen Formpresssteilen auf IHU-Bauteile mit geschlossenem Profil und ausgeprägter Längs-

achse ist meist nicht sinnvoll. Daher wurde von *F.-U. Leitloff* eine begleitende Qualitäts sicherung mit spezieller Messung der Außen kontur von IHU-Bauteilen vorgeschlagen.

Vorausplanung mit dem Kunden

Zu Beginn eines Entwicklungsprojektes werden eine Machbarkeitsanalyse und eine fertigungs- und funktionsgerechte Bauteilauslegung durchgeführt. Bereits in dieser frühen Projekt phase muss die „Projektbegleitende Qualitäts sicherung“ mit Kunde und IHU-Entwicklungs ingenieur ein Team bilden. Zunächst muss die Analyse der Kundenwünsche erfolgen in Bezug auf:

- Weitere Verwendung des Bauteils,
- Toleranzen des IHU-Bauteils,
- Maße der Außenkontur und der Wanddicke,
- Form und Lage von Anbauteilen und Lö chern,
- Anzahl der zu vermessenden Bauteile bei Qualitätsprüfungen,
- Art der Auswertung dieser Messungen.

Ergebnis dieses Vorgehens sollte es sein, die für den Kunden *primär* wichtigen Bauteil

bereiche und die zugehörigen Maße und Toleranzen herauszuarbeiten (z. B. Stellen für Anbauteile). Die weniger wichtigen Bereiche werden dann nicht mit überflüssigen Messpunkten überfrachtet, um so für die Serienfertigung zu einem bauteilspezifisch optimierten Prüfumfang zu kommen. Diese Überlegungen beeinflussen die Konstruktion und Fertigung der Serienwerkzeuge, Abb. 3.134.

Der Entwicklungsingenieur muss die *voraussichtlich* zu erwartenden Toleranzen und Abmessungen des fertigen IHU-Bauteils zunächst abschätzen. Diese Schätzungen sind für weitere Planungen des Kunden sehr wichtig. Die Erfahrung zeigt, dass erst nach Abschluss des Prototypings mit den vorgesehenen Messungen die tatsächlich erreichbaren Maße und Toleranzen bekannt sind. In einem abschließenden Schritt werden die Ergebnisse gemeinsam mit dem Kunden in eine Zeichnung des Bauteils eingetragen, die als **Prüfplan** gilt.

Spezifikation des Rohteils

Bereits während der Bauteilauslegung wurde das zu beschaffende „Vorrohr“ hinsichtlich Durchmesser, Wanddicke, Werkstoff und Biegekontur durch den IHU-Entwickler festgelegt. Nun lassen sich weitere Anforderungen an das Vorrohr gemeinsam mit dem Qualitätsicherungs-Ingenieur spezifizieren und an den

Rohrlieferanten und den Bieger weiterleiten. Bei Lieferung der Vorrohre ist eine **Wareneingangsprüfung** anhand der Spezifikation durchzuführen. Bei Abweichungen entscheidet der Qualitätsicherungs-Ingenieur unter Hinzuziehung des IHU-Fertigungstechnikers die weitere Vorgehensweise.

Prüfung von IHU-Prototypen

Prototypbauteile sollten bereits während des Prototypings stichprobenartig geprüft werden. Danach kann der Umformprozess entsprechend angepasst werden, um die gewünschten Bauteileigenschaften zu erreichen. Nach Abschluss des Prototypings wird dann die vereinbarte Anzahl IHU-Bauteile nach dem festgelegten Prüfplan bewertet. Die Ergebnisse werden interpretiert und mit dem Kunden besprochen. Sie dienen jetzt der Festlegung tatsächlich erreichbarer Toleranzen für die geplante Serienfertigung.

Projektbegleitende Messungen an IHU-Prototypen durch das entwickelnde Unternehmen beschränken sich auf folgende Punkte:

- Messung der Außenkontur (Oberfläche und Löcher),
- Messung der Wanddicke,
- optische Beurteilung der Oberfläche (sichtbare Trennkanten, Abdrücke von Biegebacken, Mikrofalten).

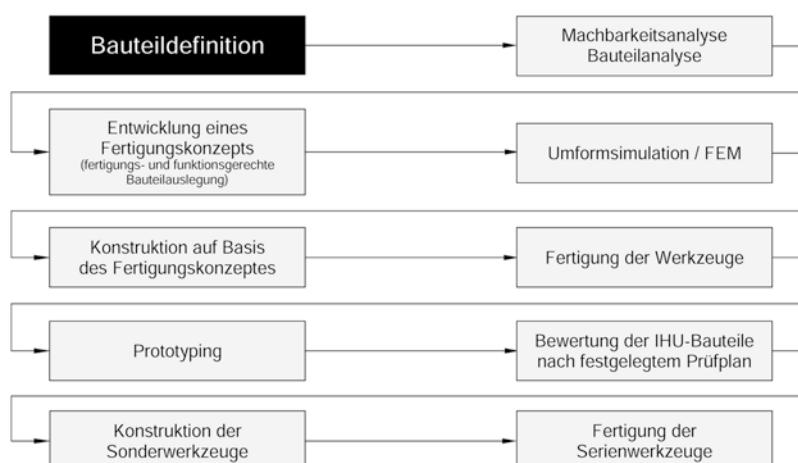


Abb. 3.134 Einzelschritte für die Serien-Werkzeugfertigung. (Nach Leitloff)

Der Kunde bewertet weitere Punkte durch eigene Untersuchungen, z. B. Gewicht und Crashverhalten.

Definitionen

Zum Vermeiden von Missverständnissen und zum Schaffen einer gemeinsamen Nomenklatur für Gespräche zwischen Kunde, Qualitätsicherungs-Ingenieur und IHU-Entwicklungsingenieur wird die Verwendung folgender Definitionen vorgeschlagen:

Abformgenauigkeit

Sie ergibt sich aus dem Vergleich der Messdaten eines IHU-Bauteils mit den ursprünglichen CAD-Daten. Die Abformgenauigkeit kann durch Mittel der statistischen Prozessregelung (SPC) bewertet werden, z. B. als Maschinenfähigkeit mittels c_m - oder c_{mk} -Wert.

Unter **Maschinenfähigkeit** versteht man die Fähigkeit einer Maschine, die Werte eines Merkmals mit genügender Wahrscheinlichkeit innerhalb der vorgegebenen Merkmalsgrenze zu fertigen. Hierzu wird eine fortlaufende Stichprobe vom Umfang $n > 50$ entnommen. Alle Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess müssen dabei konstant bleiben, wie z. B. Prüfmittel, Rohmaterial, Maschineneinstellung und Bedienungspersonal. Der geschätzte Mittelwert und die geschätzte Standardabweichung s dieser Stichprobe charakterisieren die Fertigungsgenauigkeit der Maschine, Abb. 3.135.

Aus diesen Kennwerten der Stichprobe werden die beiden Kennzahlen c_m und c_{mk} nach folgenden Formeln berechnet:

$$c_m = \frac{T}{6 \cdot \sigma} \quad \text{bzw.} \quad c_{mk} = \frac{|\Delta_{krit}|}{3 \cdot \sigma}. \quad (3.71)$$

Die Maschine gilt als „fähig“, wenn die Toleranz T mindestens den 8-fachen Wert von s beträgt. Die Maschinenfähigkeitskennzahl c_m erreicht dann den Wert 1,33 oder größer.

Im Automobilbau ist man dazu übergegangen, einen Wert für $s < 0,1 T$ zu fordern. Demzufolge ist eine Maschine erst fähig, wenn ein c_m -Wert von 1,67 oder größer vorliegt.

Der c_m -Wert sagt nun nichts über die Lage der Verteilung innerhalb des Toleranzbereiches

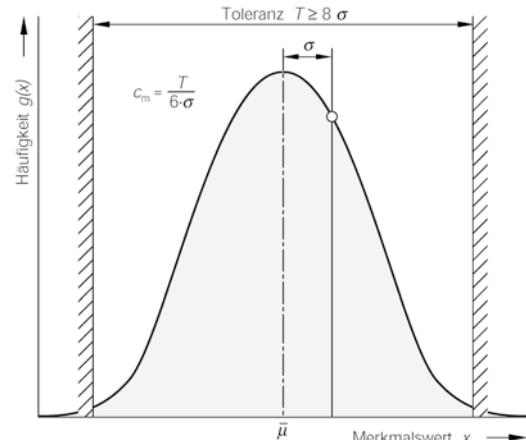


Abb. 3.135 Normalverteilung einer Maschinenfähigkeitsuntersuchung

T aus, Abb. 3.136. Daher wird mit dem kleinsten Abstand vom Mittelwert zur Toleranzgrenze Δ_{krit} nach obiger Beziehung der c_{mk} -Wert ermittelt. Ergibt sich dabei ebenfalls ein Wert von 1,33 oder größer, ist die Maschine auch jetzt zur Fertigung in der geforderten Qualität fähig.

Wiederholgenauigkeit

Sie ergibt sich aus dem Vergleich der Messwerte eines IHU-Bauteils mit denen eines wei-

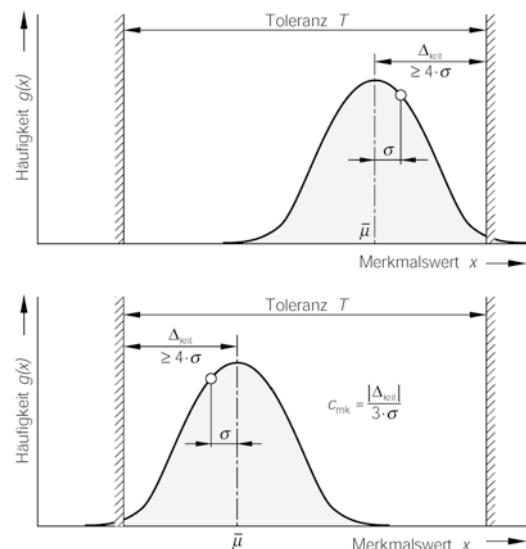


Abb. 3.136 Normalverteilung mit außermittiger Lage im Toleranzfeld

teren IHU-Bauteils. Sie gibt Auskunft über die Stabilität bzw. Wiederholbarkeit einer Serienfertigung. Die Wiederholgenauigkeit wird durch Mittel der statistischen Prozessregelung (SPC) bewertet, z. B. als Prozessfähigkeit mittels c_p - oder c_{pk} -Wert.

Bei der Ermittlung der **Prozessfähigkeit** wird der gesamte Fertigungsprozess mit sämtlichen Einflussgrößen (Personal, Maschine, Rohmaterial, Umwelteinflüsse, Prüfmethode usw.) untersucht. Die Bestimmung der Verteilungsparameter basiert auf der Grundlage von mindesten 25 Stichproben in einem Umfang von mindestens $n = 7$. Diese werden in regelmäßigen Abständen dem Fertigungsprozess entnommen. Auch hier werden aus den geschätzten Parametern Standardabweichung s und Mittelwert analog zu den oben angegebenen Beziehungen die Prozessfähigkeitskennzahlen c_p und c_{pk} gebildet und bewertet.

Die Abb. 3.137 zeigt ein Beispiel für eine Qualitätsregelkarte mit der Erfassung des Durchmessers an 84.000 IHU-Teilen und der Angabe der Prozessfähigkeitskennzahlen c_p und c_{pk} .

Mit **Qualitätsregelkarten** werden die Kennwerte für die Verteilung der Merkmalswerte laufend überwacht. Dazu werden dem Prozess in regelmäßigen Abständen Stichproben entnommen, ausgewertet und die Kennwerte dokumentiert. Mit diesen Karten lassen sich im Wareneingang auch die Lieferqualitäten überwachen.

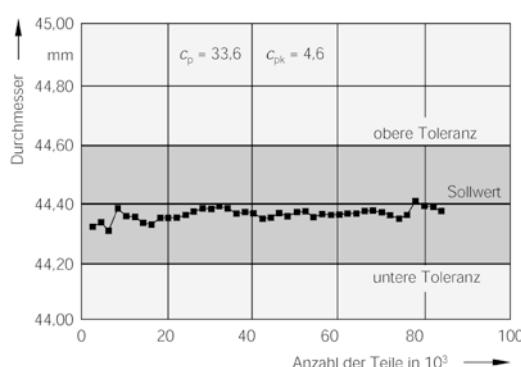


Abb. 3.137 Beispiel für eine Qualitätsregelkarte.
(Quelle: Schuler Hydroforming GmbH)

Um frühzeitig auf Änderungen im Prozessablauf reagieren zu können, setzt man obere und untere Toleranzgrenzen. Wenn die noch davor liegenden Warngrenzen erreicht werden, haben die Überschreitungssanteile zwar noch ein erträgliches Maß. Es besteht aber die Gefahr, dass der Prozess noch weiter abdriftet. Daher werden obere und untere Eingriffsgrenzen festgelegt, bei denen der Prozess angehalten werden muss, um Werkzeuge auszuwechseln oder die Maschinenstellungen zu korrigieren. Welche Maßnahmen speziell zu treffen sind, ist dem Prüfplan zu entnehmen.

Eine hohe Abformgenauigkeit ist für den Kunden wichtig, da er die Anbauteile (Abmessungen und Toleranzen) auslegen muss. Andererseits muss die Serienfertigung stabil und die Wiederholgenauigkeit groß sein. Denn es ist preiswerter, Anbauteile und entsprechende (Schweiß-) Vorrichtungen einmalig an einen stabilen Prozess anzupassen, als während einer instabilen Serienfertigung ständig korrigierend eingreifen zu müssen. Ein fachgerecht ausgelegter IHU-Prozess weist i. Allg. eine überdurchschnittlich hohe Wiederholgenauigkeit auf.

Querschnittstoleranz

Möchte der Kunde z. B. ein Stanz-Biegeteil an einem IHU-Bauteilquerschnitt anbringen, so interessiert ihn die so genannte Querschnittstoleranz. In diesem Fall wird ein Querschnitt hinsichtlich Höhe, Breite und Eckradien vermessen.

Formlinientoleranz

Muss andererseits ein IHU-Bauteil zwischen zwei anderen Bauteilen einer Baugruppe eingefügt werden, so ist die Lage der Endquerschnitte (z. B. hinsichtlich des Schweißspaltes) wichtig. Diesbezüglich spricht man von der Formlinientoleranz. Sie gibt Auskunft darüber, ob das IHU-Bauteil in seiner Längsachse dem gewünschten Verlauf entspricht oder z. B. durch Rückfederung davon abweicht.

Diese vier Definitionen erleichtern dem Kunden und dem entwickelnden Unternehmen die Kommunikation hinsichtlich der Fragen nach Genauigkeit und Toleranzen des herzustellenden Bauteils.

Werkzeugeinfluss

Das IHU-Werkzeug ist das formgebende Element des Prozesses. Es enthält starre formgebende Hohlräume (Werkzeuggravuren) sowie bewegliche Elemente, die Teile dieser Hohlräume entweder schließen oder freigeben (z. B. Stanzstempel, Schieber). Die Genauigkeit des Werkzeugs entscheidet über die des Bauteils und hängt von folgenden Hauptfaktoren ab:

- Güte der CAD-Bauteil- und CNC-Bearbeitungsdaten (Fräspogramme),
- Präzision der Bearbeitungsmaschinen und deren Werkzeuge,
- Genauigkeit der Montage und der Einpassarbeiten.

Unter dem Einfluss von Schließkraft und Innendruck verformen sich das Werkzeug und die darin enthaltenen Hohlräume. Das kann Einfluss auf die Außenkontur des Bauteils haben. Daher sind IHU-Werkzeuge nicht nur auf Dauerfestigkeit, sondern auch auf Steifigkeit auszulegen. Die Steifigkeit einer Konstruktion (und damit ihr elastisches Verhalten) hängen von den zwei Faktoren *E-Modul* des verwendeten Konstruktionswerkstoffes und *Geometriemaße* der tragenden Querschnitte ab.

Beispiele für Messungen und Toleranzen

Aus verschiedenen Projekten gibt es Erfahrungen über die auftretenden Toleranzen an Querschnitten und an Längsachsenverläufen von IHU-Bauteilen. So müssen z. B. Strangpressprofile aus Aluminium kalibriert werden, um die für diesen Werkstoff typischen rückfederungsbedingten Toleranzen zu minimieren. Bei nicht genügender Kaltverfestigung kann es zum Einfallen gerader, flacher Querschnittswände auf der Außenseite von Biegungen kommen. Hier muss der IHU-Prozess angepasst werden.

Zusammenfassend lässt sich Folgendes festhalten: Vergleicht man Messdaten von IHU-Bauteilen mit den CAD-Solldaten, so erhält man typische *Abformgenauigkeiten* für:

- Querschnitte von ca. 0,15 bis 0,50 mm,
- Formlinien von ca. 0,40 bis 1,40 mm (rückfederungsbedingt).

Beim Vergleich einer größeren Menge vermessener Bauteile untereinander ergeben sich für die *Wiederholgenauigkeit* in der Serienfertigung folgende typische Werte:

- Querschnitte ca. 0,10 bis 0,20 mm,
- Formlinien ca. 0,15 bis 0,35 mm.

IHU-Bauteile zeigen relativ geringe Abweichungen von den CAD-Solldaten, die sich i. Allg. im Bereich von wenigen Zehntel Millimetern bewegen. Treten Abweichungen von >1mm beim Vergleich von Formlinienmessungen mit den CAD-Solldaten auf, so ist das durch die Rückfederung bedingt. Querschnitte haben etwas engere Toleranzen als Formlinien. Dies gilt besonders für lange, gebogene IHU-Bauteile. Die Wiederholgenauigkeit ist prinzipiell etwas besser als die Abformgenauigkeit, was vorteilhaft für eine stabile Serienfertigung ist. Damit hat das Innenhochdruckumformen seine Tauglichkeit für die Fertigung von Großserien bewiesen.

3.7.6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Eine Gegenüberstellung des Innenhochdruckumformens mit anderen Verfahren (z. B. Formpressen und Verbinden von Blechschalen(teilen, Gießen oder Verbinden gebogener Rohre, Schweißen) muss sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte einbeziehen. Dabei sind auch vorangehende und nachfolgende Arbeitsschritte sowie die technischen Eigenschaften des fertigen Bauteils zu beachten, Tab. 3.7. So kann durchaus eine Fertigung durch Innenhochdruckumformen für geringe Stückzahlen bei alleiniger Betrachtung der Bauteilkosten unwirtschaftlich sein, da die Zykluszeiten relativ lang sind.

Bei mittleren und hohen Stückzahlen eines IHU-gerecht ausgelegten Bauteils können die technisch-wirtschaftlichen Vorteile der Innenhochdruckumformung so gravierend sein, dass andere Herstellverfahren ausscheiden.

Für die *Weiterverarbeitung* der Teile lassen sich alle Fertigungsschritte anführen, die nach dem Innenhochdruck-Umformprozess direkt am

Tab. 3.7 Vergleich der konventionellen mit der IHU-Bauweise eines 6-Zyl.-Abgaskrümmers. (Nach Schuler-Handbuch)

Einzelheit	Konventionelle Fertigung	IHU-Fertigung
Anzahl Einzelteile	17	9
Lebensdauer	700 bis 1000 h	> 1500 h
Herstellkosten	100 %	85 %
Entwicklungszeit	100 %	33 %
Flansch-Art	unterschiedlich	gleich
Gewicht	100 %	100 %
Ausschuss	1 %	< 0,5 %

Bauteil durchgeführt werden. Können die Teile aufgrund ihrer Geometrie oder besonderer Vorgaben nicht auf Endmaß gepresst werden, so ist eine *Endbearbeitung* notwendig. Dabei kann das Teil gelocht, angeschnitten oder gebogen werden, sofern dies nicht bereits beim IHU-Prozess erfolgte.

Durch Kalibrieren bzw. Anformen lassen sich spezielle Konturen an den Rohrenden herstellen. Das Anbringen von Anbauteilen bzw. der Zusammenbau mit verfahrensfremden Komponenten, muss in einem separaten Prozess (meist durch Schweißen) durchgeführt werden.

Folgende technisch-wirtschaftliche Aspekte der Innenhochdruckumformung können aufgeführt werden:

- Bauteile mit sehr komplexer Geometrie sind in einem Stück herstellbar.
- Durch die einteilige Bauweise entfallen Verbindungsschweißnähte.
- Der Kalibriervorgang sorgt für eine sehr hohe Form- und Maßgenauigkeit der Bauteile.
- Die Kaltverfestigung macht die Bauteile im Allgemeinen verwindungssteif (sie federn deutlich weniger zurück als solche aus verschweißten Blechschalen).
- Oft ist die Wanddicke des IHU-Bauteils im Vergleich zum Schalen- oder Gussteil geringer (Effekt der Gewichtseinsparung).
- Im selben Werkzeug können u. U. Rohre mit unterschiedlichen Wanddicken und Ausgangsdurchmessern eingesetzt und erprobt werden (Optimierung von Gewicht und Festigkeit).

- Bei Abgasanlagen ergibt sich oft ein geringerer Strömungswiderstand und eine höhere Dauerfestigkeit.

Durch eine gezielte Gestaltung von IHU-Bauteil und Umformprozess lassen sich Energie als auch Material einsparen. Die Entwicklungs- und Produktionszeiten können wesentlich verkürzt werden, was insgesamt zu einer Kostensenkung führt.

3.7.7 Fertigungsbeispiele

Mit über 5000 Beschäftigten und einem Umsatz von mehr als 2 Mrd. € stellt die Automobilindustrie im Raum Berlin-Brandenburg eine Schlüsselbranche dar. Aus einem mittelständischen Fertigungsbetrieb, der eine beachtenswerte Erfolgsgeschichte schrieb, sollen hier einige aktuelle Beispiele für das Innen-Hochdruck-Umformen aufgeführt werden.

Die Finow Automotive GmbH in Eberswalde hat sich auf die Entwicklung von rohrförmigen Bauteilen für die Automobil-Industrie spezialisiert. Dazu gehören Baugruppen für die Abgas-, Fahrwerk-, Chassis- und Karosserie-Struktur. Als System-Zulieferer arbeitet das Unternehmen mit ganzheitlichem Projektmanagement.

Im Jahre 2000 begann man mit der Serienfertigung von Hinterachsschenkeln für den Jaguar X 400 und ein Jahr später für den Ford Fiesta. 2002 folgte das IHU-Bauteil Diagonalestrebe für den BMW E 65, ein Jahr später wurden für Opel die Ladelufttrophe für Dieselmotoren produziert. Im Oktober 2004 wurde eine neue Fertigungsanlage für die Land Rover Plattform T5 mit Investitionen von rd. 28 Mio. € eingeweiht und mehr als 20 neue Arbeitsplätze geschaffen, Abb. 3.138.

Bisher war es nur in Nordamerika üblich, die rel. schweren Geländewagen (SUV) und sog. Light Trucks auf „Hydroform-Frames“ zu setzen. Diese Leiterrahmen bestehen aus ungewöhnlich langen IHU-Bauteilen. In den USA laufen solche IHU-Rahmen in großen Stückzahlen (mehrere 100.000 p. a.) vom Band. In



Abb. 3.138 Vollautomatisierte Fertigungslinie für Leiterrahmen aus ungewöhnlich langen IHU-Bauteilen, sog. Hydro-Frames. (Werkbild: Finow Automotive GmbH, Eberswalde)

Europa dagegen ist dieses Konzept „Integrated Body Frame“ erstmalig von Finow Automotive in Eberswalde GmbH als T5-Plattform für Land Rover (Typ Discovery und Range Rover) verwirklicht worden. Da diese Fahrzeuge bei großzügiger Dimensionierung möglichst stabil gestaltet werden sollen, ergab sich als Lösung eine selbst tragende Karosserie, die mit einem stabilisierenden Rahmen verschraubt wird. Ein sog. Frame-Set besteht dabei immer aus einem Paar Front-Rails und einem Paar Rear-Rails. Letzteres wiegt 21 kg und ist als geteiltes Fertigteile 1955 mm lang bei einem Rohrquerschnitt von 100×140 mm. Mit einer Länge von ca. 4 m durchläuft der doppelte Längsträger die Produktionslinie.

Als Vormaterial wird ein Präzisionsstahlrohr nach ASTM 513 (Werkstoff AISI 1008) mit den Maßen $135 \times 3,2 \times 4500$ mm verwendet. Bei der Weiterverarbeitung muss besondere Sorgfalt beim Schmiermittelauftrag aufgewendet werden. Die Rohroberfläche muss völlig sauber und trocken und das Material vorgewärmt sein. Erst nach dem Waschen, Spülen und Erwärmen kommt das Rohteil in die Sprühkabine. In der Vorformpresse erhält das bereits vorgebogene

Werkstück seine genaue geometrische Form für die Aufnahme im IHU-Werkzeug, Abb. 3.139.

3.8 Gebaute Nockenwellen, hergestellt mit Umformverfahren

Die konventionelle Fertigung von einteiligen Nockenwellen erfolgt vorwiegend durch Gießen im Hartschalen-, Sphäro-, Temper- oder Lost-Foam-Guss. Ein kleinerer Anteil wurde geschmiedet, oft mit anschließendem Hohlbohren der Welle. Spanen aus dem Vollen kam nur für Prototypen und Sonderanwendungen infrage. Die Anforderungen an den Kfz-Verbrennungsmotor in Hinsicht auf hohe Leistung bei geringem Kraftstoffverbrauch und niedrigen Emissionen führt zu einem verminderten Motorgewicht. Das bedeutet ein Verringern des Hubvolumens und der Motorbaugröße. Zum Erreichen der geforderten Leistung musste aber die Drehzahl erhöht werden, wodurch die Belastung des Ventiltriebs stark zunahm. Seit etwa 25 Jahren wurde daher der Nockenwelle erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt, um die hohen auftretenden Kräfte durch

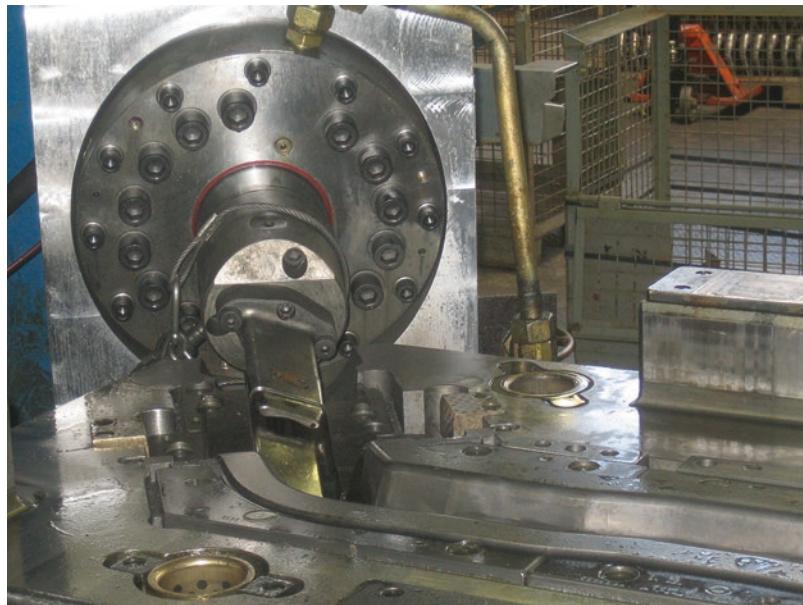


Abb. 3.139 IHU-Werkzeug mit Abdichtstempel zur Herstellung von Fahrwerkträgern (Werkbild: Finow Automotive GmbH, Eberswalde)

große Bauteilsteifigkeit, geringe bewegte Massen und kleine Reibungsverluste beherrschen zu können. Hier bieten die gebauten Nockenwellen erhebliche Vorteile gegenüber den einteiligen gegossenen. Nach *Tristan Engelmann* können folgende unterschiedlichen Herstellverfahren für gebaute Kurbelwellen unterschieden werden:

- Fügen durch Einwalzen,
- Innenhochdruck-Fügen (IHF),
- Aufweiten durch Innen-Hochdruck-Umformen (IHU), siehe Tab. 3.8,

Tab. 3.8 Merkmale beim Innen-Hochdruck-Umformen von Nockenwellen. (Quelle: Tristan Engelmann)

Verfahren	IHU
Anwender	Linamar Corporation, Salzgitter Antriebstechnik, vormals Bleistahl
Material Welle (Standard)	Präzisionsstahlrohr DIN 2393, St 37.2
Material Welle (alternativ)	Nicht vorgesehen
Material Nocke (Standard)	100Cr6
Material Nocke (alternativ)	Nicht vorgesehen
Lager radial	Geschliffene Basiswelle
Fügeverband	Elastisch-plastisch
Potential zur Massenreduktion	60%

- ThyssenKrupp Presta-Verfahren (Aufpressen auf rolliertes Rohr),

Wegen des Bezugs zu den vorstehend besprochenen Umformverfahren soll im Folgenden nur auf das IHU- und das Presta-Verfahren eingegangen werden.

3.8.1 Aufweiten durch Innen-Hochdruck-Umformen (IHU)

Hierbei wird das ganze Rohr durch ein fluides Wirkmedium unter hohem Druck aufgeweitet. Dadurch wird auch die Geometrie des Basisrohres deutlich verändert, was sich auf die Werkstoffeigenschaften auswirkt. Die Rohr-Ausweitungen erfolgen gegen eine Negativkontur, die aus dem Umformwerkzeug mit den aufzubringenden Nockenringen (z. B. aus 100Cr6) besteht. Diese müssen in eine Vorrichtung eingelegt werden, welche die Nocken in der gewünschten axialen und radialen Winkel-Position fixiert. Das Präzisionsstahl-

rohr nach DIN 2393 (St 37.2, Wanddicke 2,5 bis 3 mm) wird durch die fixierten Nocken geschoben und danach mit der Vorrichtung in die IHU-Presse eingelegt. Nach dem Verschließen der Rohrenden durch die Axialstempel erfolgt die Rohr-Aufweitung bei rd. 3000 bar. Einzelheiten zum Innen-Hochdruck-Umformen sind in Abschn. 3.7 beschrieben.

Ein Hauptnachteil dieses Verfahrens für die Herstellung von Nockenwellen ist die fehlende Flexibilität, weil für jeden Nockenwellentyp eine gesonderte Negativform hergestellt werden muss. Außerdem müssen die Mindestabstände zwischen den einzelnen Funktionsbereichen (Nocken, Lagersitze usw.) genau eingehalten werden. Ein Vorteil ist, dass alle Bauteile in einem Arbeitsschritt gefügt werden. Das ergibt insbesondere bei langen Nockenwellen (z. B. für den Reihensechszylinder BMW NG6) einen nicht unwesentlichen Zeitvorteil.

Die Werkstoffe für die Basisrohre müssen (wie höherfeste Tiefziehstähle) folgende Eigenschaften aufweisen:

- hohe Gleichmaßdehnung,
- hoher Kaltverfestigungsexponent,
- hohe senkrechte Anisotropie,
- gute Umformbarkeit an den Fügestellen.

3.8.2 Thyssen-Krupp-Presta-Verfahren (Aufpressen auf rolliertes Rohr)

Die unter Einsatz von Umformverfahren sog. „Gebauten Nockenwellen“ haben in Zukunft eine zunehmende Bedeutung im Vergleich zu den gegossenen Nockenwellen. Abb. 3.140 zeigt die jährlichen Steigerungsraten, wobei die des Haupterzeugers (ThyssenKrupp Presta Cams-Haftschafts) mit 8,34 % das der gegossenen um das 2,4-fache übersteigen.

Nach einem patentierten Fügeverfahren wird das Rohr an der Fügestelle durch den Umformvorgang Rollieren im Außendurchmesser so weit vergrößert, dass durch die Kombination aus Kraft- und Formschluss die Übertragung hoher Drehmomente möglich wird. Die Nocke wurde zuvor zu einer Art Innenkamm geräumt. Danach werden die Nocken in dem erforderlichen Winkel auf die rollierte Stelle des Rohres aufgepresst. Durch dieses Montagekonzept ist z. B. bei Nutzfahrzeugen ein Drehmoment von mehr als 1000 Nm übertragbar. Merkmale des Presta-Verfahrens zeigt Tab. 3.9.

Die Montagekräfte werden für jedes einzelne Teil im Fertigungsprozess gemessen, mit den Sollwerten verglichen und dokumentiert. Dieses

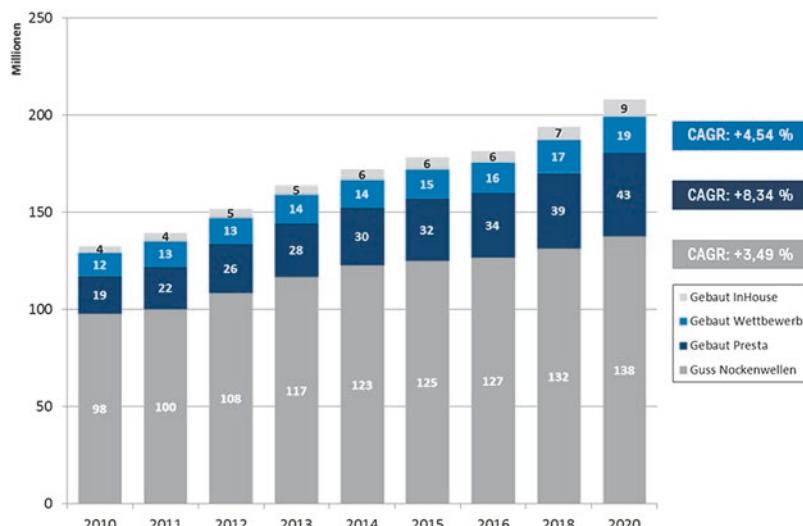


Abb. 3.140 Nockenwellenproduktion (weltweit) für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t (Quelle: IHS) Dabei wird die Nockenwelle je nach Typ z. B. aus den Komponenten Endstück, Stahlrohr und Nocken aufgebaut, wie Abb. 3.141 zeigt

Tab. 3.9 Merkmale des Presta-Verfahrens. (Quelle: T. Engelmann)

Verfahren	Presta
Anwender	ThyssenKrupp Presta
Material Welle (Standard)	Präzisionsstahlrohr DIN 2393, St52.3
Material Welle (alternativ)	Leichtmetalle möglich, jedoch nicht vorgesehen
Material Nocke (Standard)	100Cr6
Material Nocke (alternativ)	Sinternocken
Lager radial	Standard: geschliffene Basiswelle, gefügte Lagerringe möglich
Belastbarkeit	200-300 Nm
Fügeverband	Elastisch-plastisch
Potential zur Massenreduktion	40%

kostengünstige und prozessfähige Verfahren ist in der Großserie erprobt. Die Einzelteile können wirtschaftlich vorgefertigt werden. Als weitere Vorteile des Verfahrens sind zu nennen: die große Vielfalt der möglichen Werkstoffe sowie die Flexibilität bei den Axial- und Winkelpositionen der zu fügenden Teile. Zudem führt der altbewährte Rollier-Prozess zu keinen ungünstigen Eigenspannungszuständen an den Fügeteilen.

Mit der Nockenwelle für den V6-Duratec-Motor von Ford begann bereits 1993 die Serienfertigung nach dem Presta-Verfahren. Bei dem mit 4 gebauten Nockenwellen bestückten Motor reduzierte sich das Gewicht des Motors um 3,2 kg im Vergleich zu den geschmiedeten Nockenwellen.

Bei dem sog. *Presta²-Verfahren* handelt es sich um die Kombination eines thermischen Fügeprozesses mit dem bewährten Presta-Fügeverfahren. Hierbei werden bereits rollierte Wellen tiefgekühlt und die zu fügenden Einzelteile (Nocken, Axiallagerringe usw.) erwärmt. Erst

diese Temperierung und die damit verbundene Volumenänderung ermöglichen das kraftlose Vorfügen der Bauteile. In einem weiteren Schritt werden die Bauteile nach Temperaturausgleich mittels Kraft-Weg-Überwachung axial- und winkel-orientiert auf die Endposition gesetzt. Das „Presta²“-Verfahren wurde entwickelt, um die Nockenwellen in geschlossene Körper wie Rahmen oder Hauben montieren zu können. Die Einzelschritte beim *Presta²-Verfahren* gehen aus Abb. 3.142 hervor.

Zur Sicherung einer gleichbleibenden Qualität wird die Aufpresskraft jeder einzelnen Komponente gemessen und elektronisch gespeichert. Jeder Vorgang, der außerhalb der vorher definierten Grenzwerte liegt, wird automatisch zurückgewiesen. Ein Messprotokoll der Aufpresskraft über dem Aufpressweg zwischen 2 und 12,5 mm zeigt Abb. 3.143.

Einige Beispiele von gebauten Nockenwellen sind in Abb. 3.144 gezeigt. Nocken- und Exzenterwellen werden im Pkw-Bereich zwischen 300 bis 700 mm Länge und mit Gewichten zwischen 0,9 bis 5 kg gebaut, im Lkw-Bereich bis zu 2200 mm Länge und 20 kg Gewicht.

Ein weiterer Gesichtspunkt moderner Montagekonzepte im Kraftfahrzeugbau ist die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und damit des CO₂-Ausstoßes. Wenn z. B. im Zylinderkopf die geteilten Lagerschalen durch ein vereinfachtes Zylinderkopfdesign mit einteiligen Wälzlagersitzen ersetzt werden, entfallen mögliche Lagefehler. Damit ergibt sich durch die Verbesserung der Hydrodynamik ein reduzierter Kraftstoffverbrauch wegen

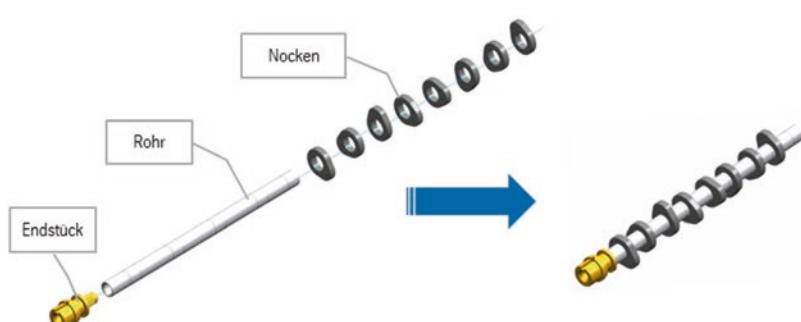


Abb. 3.141 Aufbau einer Nockenwelle aus Komponenten. (Quelle: ThyssenKrupp Presta Ilsenburg GmbH)



Abb. 3.142 Einzelschritte des patentierten Presta-Fügeverfahrens. (Quelle: ThyssenKrupp Presta Camshafts)

geringerer Reibungsverluste. Gleichzeitig kann das Gewicht des Zylinderkopfes reduziert werden und die Montagezeiten verkürzen sich, Abb. 3.145.

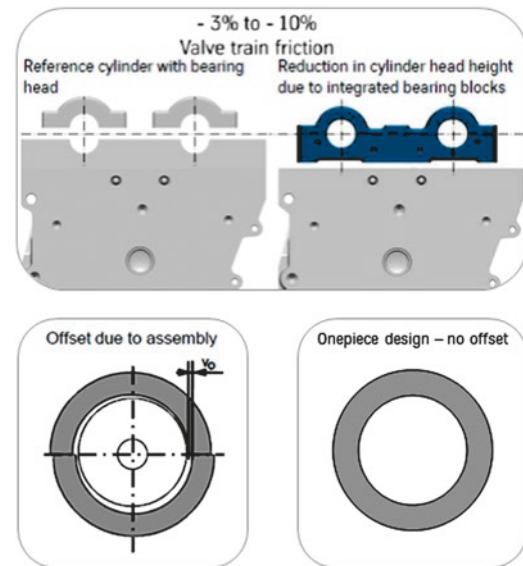


Abb. 3.145 Vereinfachtes Zylinderkopfdesign zwecks Reduzierung von Gewicht, Montagezeit und Reibung. (Quelle: Thyssen Krupp Presta Ilsenburg GmbH)

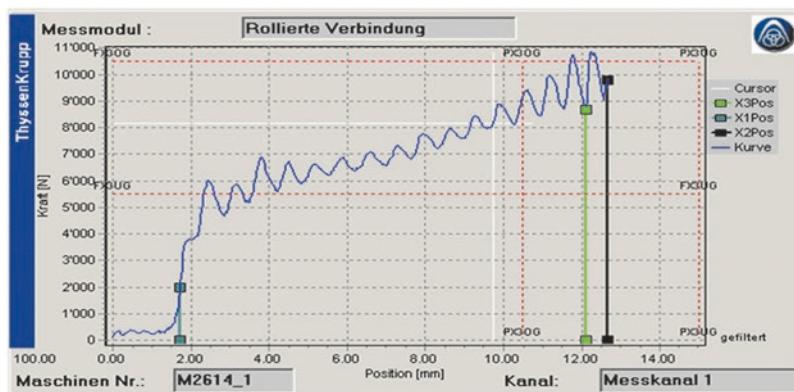


Abb. 3.143 Messprotokoll der Aufpresskraft über dem Aufpressweg. (Quelle: ThyssenKrupp Presta Camshafts)

	Pkw	Motorrad	Lkw
Produkte	Nockenwellen	Exzenterwellen	Nockenwellen
Daten	Größe: 300 – 700mm Gewicht: 0,9 – 5kg	Größe: 120 – 500mm Gewicht: 0,4 – 1,5kg	Größe: < 2.200mm Gewicht: 7 – 20kg

Abb. 3.144 Beispiele von gebauten Nockenwellen für Pkw, Motorrad und Lkw. (Quelle: Thyssen Krupp Presta)

3.9 Gestaltung von Umformteilen

3.9.1 Allgemeines

Umgeformte Werkstücke sollten in enger Zusammenarbeit zwischen Besteller und Hersteller gestaltet werden. Der Hersteller kann dann aufgrund seiner Erfahrung die funktionsbedingten Anforderungen des Bestellers umformtechnisch optimal erfüllen.

Im Folgenden wird zunächst auf die Herstellung von Schmiedestücken eingegangen. Es liegt im Interesse des Kunden und des Herstellers, dass die Schmiedestückzeichnung unter Beachtung der nachstehenden DIN-Normen angefertigt wird:

- DIN EN 10031: Halbzeug zum Schmieden – Grenzabmaße, Formtoleranzen und Grenzabweichungen der Masse, 2003-06.
- DIN EN 10243: Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen – Teil 1: Warm hergestellt in Hämmern und Senkrecht-Pressen, 2000-06.
- DIN EN 10243, Berichtigung 2: Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen.
- DIN 7527-1: Schmiedestücke aus Stahl; Bearbeitungszugaben und zulässige Abweichungen für freiformgeschmiedete Scheiben, 1971-10.

Für die Herstellung von Freiformschmiedeteilen sind u. a. folgende DIN-Normen zu beachten:

- DIN EN 586: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Schmiedestücke. Teil 2: Mechanische Eigenschaften und zusätzliche Eigenschaftsanforderungen, 1994-11.
- DIN EN 586: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Schmiedestücke, 2002-02. Teil 3: Grenzabmaße und Formtoleranzen.

- DIN 7523-2: Schmiedestücke aus Stahl; Gestaltung von Gesenkschmiedestücken; Bearbeitungszugaben, Seitenschrägen, Kantenrundungen, Hohlkehlen, Bodendicken, Wanddicken, Rippenbreiten und Rippenkopfradien, 1986-09.

In den folgenden Beispielen ist immer links die ungünstige, rechts die zweckmäßige Gestaltung dargestellt.

3.9.2 Gestaltung von Gesenkschmiedestücken

(Siehe Abb. 3.146, 3.147, 3.148, 3.149, 3.150, 3.151, 3.152, 3.153, 3.154, 3.155, 3.156, 3.157, 3.158, 3.159, 3.160, 3.161, 3.162, 3.163, 3.164, 3.165, 3.166 und 3.167)

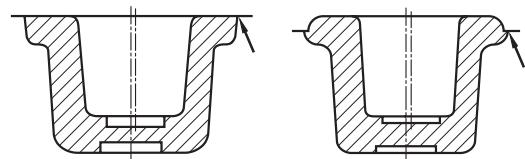


Abb. 3.146 Die Teilung des Gesenks unmittelbar an einer Stirnfläche ist möglichst zu vermeiden, da die Gratnaht dort das leichte Erkennen von Versatz verhindert und das Abgraten erschwert

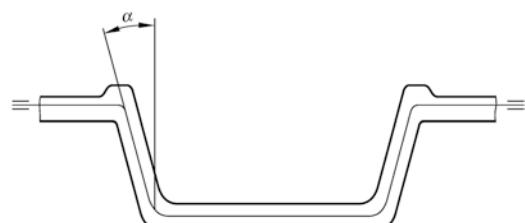


Abb. 3.147 Die Neigung der Kröpfungen sollte nicht zu steil sein. Bei zu kleinem Winkel α zwischen Gratnaht und Umformrichtung besteht die Gefahr, dass der Grat nicht glatt geschnitten, sondern abgequetscht wird

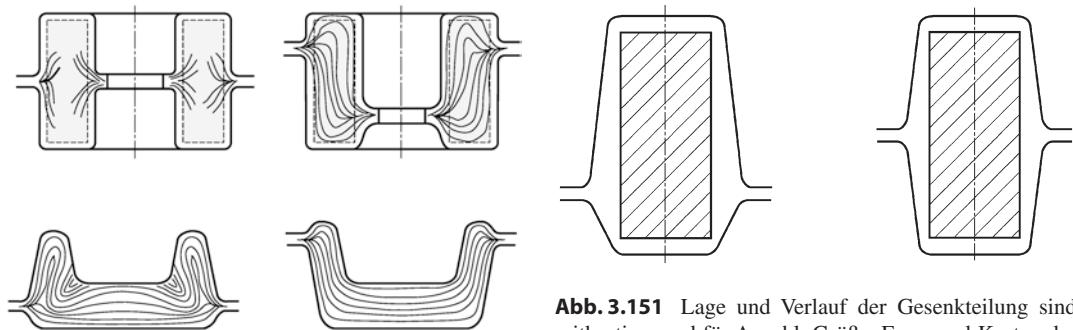


Abb. 3.148 Zur Verbesserung des Werkstoffflusses kann eine andere Lage der Gesenketeilung besser sein. Dies ist z. B. der Fall, wenn hohe enge Gravurräume ausgefüllt werden müssen, wie z. B. bei ringförmigen Schmiedestücken größerer Höhe und bei U-förmigen Querschnitten

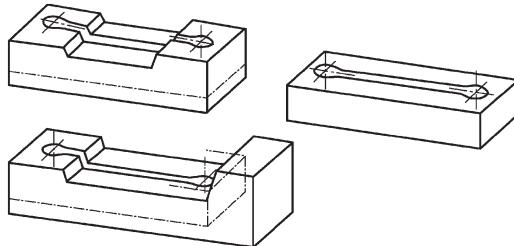


Abb. 3.149 Gesenke mit unsymmetrisch gekröpfter Teilung erfordern einen noch höheren Herstellungsaufwand. Um den zulässigen Versatz einhalten zu können, müssen sie ein Widerlager erhalten, das die auftretenden Schubkräfte aufnimmt

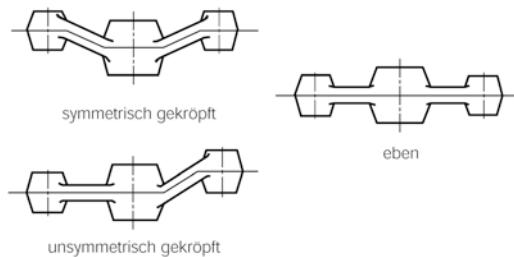


Abb. 3.150 Es werden drei Grundformen der Gesenke teilung unterschieden: – eben, – symmetrisch gekröpft, – unsymmetrisch gekröpft. Bei der ebenen Gesenke teilung ist der Herstellungsaufwand des Werkzeugs am geringsten

Abb. 3.151 Lage und Verlauf der Gesenke teilung sind mitbestimmend für Anzahl, Größe, Form und Kosten der Umformwerkzeuge. Vorteilhaft ist i. Allg. eine Teilfuge in halber Höhe des Gesenk schmiedestücks, besonders dann, wenn es in Bezug auf die Gesenke teilung symmetrisch ist

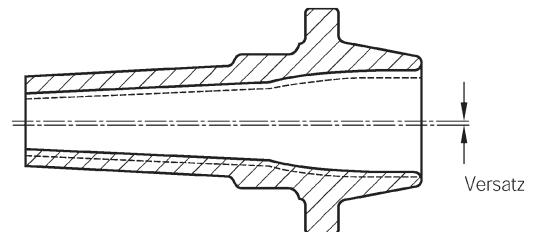


Abb. 3.152 Beim Hohlfließpressen entsteht ein Versatz durch das Verlaufen des Pressstempels. Er ist umso größer, je kleiner das Verhältnis Durchmesser zu Länge der Innenform ist

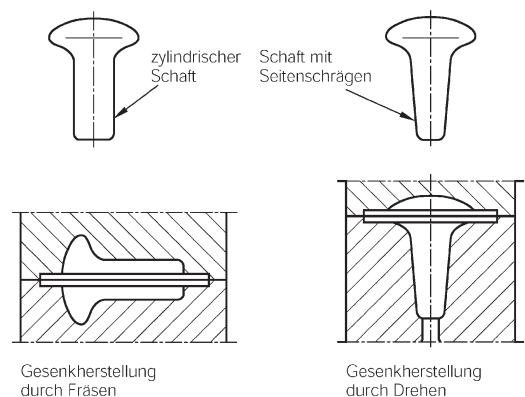


Abb. 3.153 Durch die Veränderung der Gesenke teilung kann sich der Werkzeug- und Fertigungsaufwand sowohl verringern als auch erhöhen. Bei diesem Beispiel erzielt man eine Verringerung der Werkzeugkosten durch eine andere Gesenke teilung

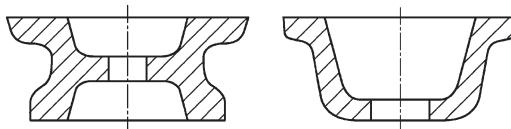


Abb. 3.154 Unterschneidungen nach Möglichkeit vermeiden, da das Werkstück aus einem einteiligen Werkzeug nicht ausgehoben werden kann. In unvermeidbaren Fällen sind geteilte Werkzeuge einzusetzen

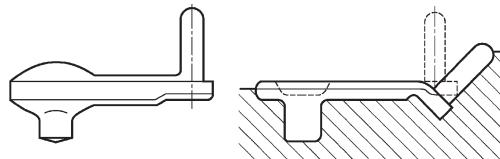
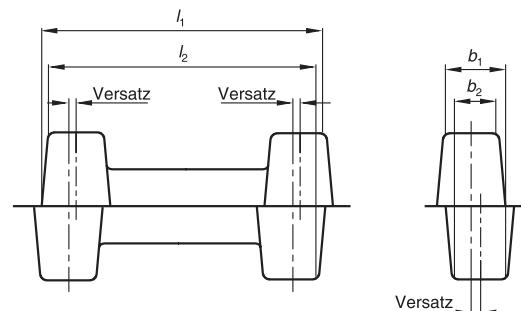


Abb. 3.157 Beim Festlegen der Teilung muss auch der Versatz am Schmiedestück berücksichtigt werden. Nach DIN EN 10243-1 ist der zulässige Versatz nicht in die zulässigen Maßabweichungen einbezogen

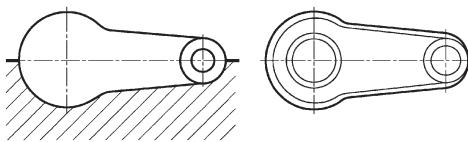


Abb. 3.155 Durch die zweckmäßige Wahl der Gesenkteilung bzw. der Lage der Hauptachsen des Schmiedestücks zur Gesenkteilung kann der Konstrukteur bestimmen, an welchen Flächen Seitenschrägen vorgesehen werden müssen

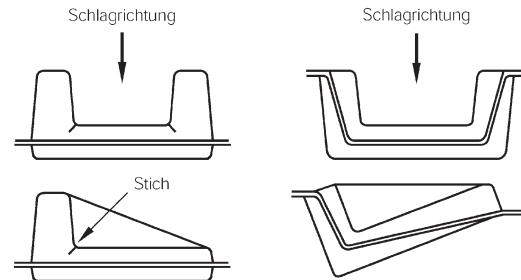


Abb. 3.158 Durch eine sinnvolle Führung der Grattnaht – aufgezeigt an zwei Beispielen – können Stichbildungen vermieden werden. Stiche sind Stellen, an denen Werkstoff aus zwei Richtungen gegeneinander fließt, ohne dass es zu einer Verbindung kommt

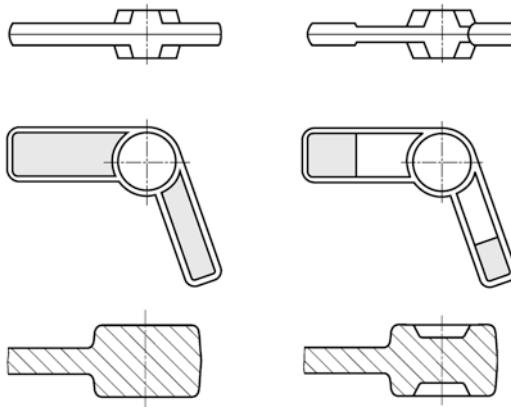


Abb. 3.156 Durch Prägen erzielt man bei einzelnen Maßen kleinere Toleranzen und eine hohe Oberflächenqualität, sodass in vielen Fällen auf eine spanende Bearbeitung verzichtet werden kann

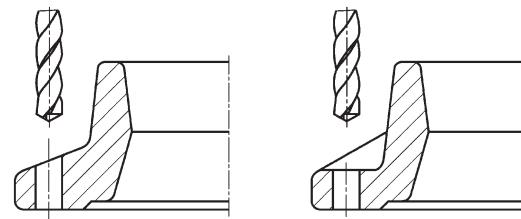


Abb. 3.159 Die Schwierigkeit, schräge Flächen anzubohren, lässt sich dadurch umgehen, dass man eine rechtwinklig zur Bohrerachse stehende Tasche oder einen entsprechenden Ansatz vorsieht

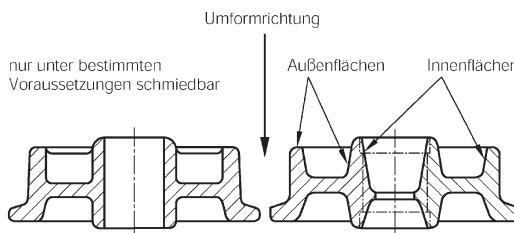


Abb. 3.160 Um Stahlschmiedestücke aus dem Gesenk heben zu können, müssen ihre in Umformrichtung liegenden Flächen eine ausreichende Neigung aufweisen. Richtwerte für Stahl sind in DIN 7523-2 angegeben

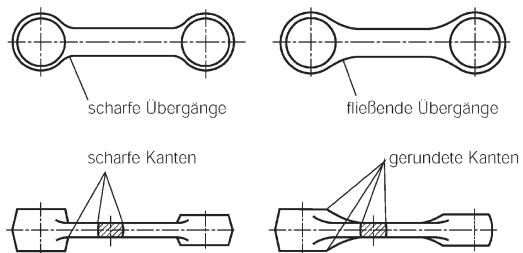


Abb. 3.164 Der Werkstoff setzt dem Umformen in den Gesenk Widerstand entgegen, der besonders dann zunimmt, wenn der Werkstoff scharfe Kanten umfließen muss. (Ausreichende Kantenrundungen und Hohlkehlen vorsehen)

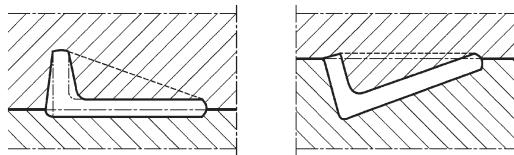


Abb. 3.161 Eine Verringerung des Aufwandes beim Fertigbearbeiten ergibt sich in diesem Beispiel durch die Wahl einer vorteilhaften Gesenkteilung (Vermeiden von Schrägen)



Abb. 3.162 Bei zu kleinen Rundungen von Hohlkehlen entstehen Schmiedefehler

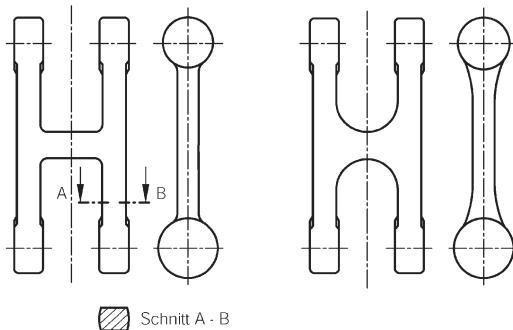


Abb. 3.165 Bei der Gestaltung von Querschnittsübergängen sollen Rundungshalbmesser stets so groß gewählt werden, wie es ohne Nachteile für die Funktionseigenschaften des Werkstücks möglich ist

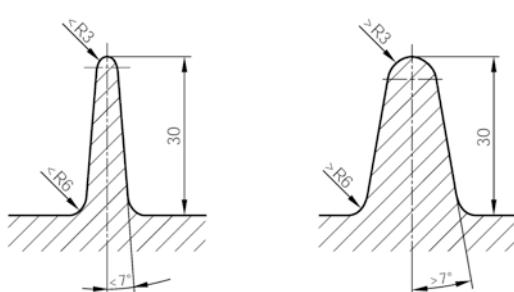


Abb. 3.163 Enge Hohlräume und schmale, hohe Rippen und Stege erschweren das Eindringen des Werkstoffs infolge schnellerer Abkühlung und des dadurch bedingten Anstiegs seiner Festigkeit. Daher sollen Rippen und Stege eine gedrungene Querschnittsform erhalten

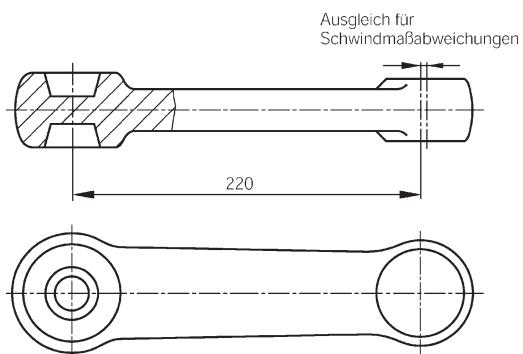


Abb. 3.166 Bearbeitungszugaben für die Stirnflächen langer Schmiedestücke müssen wegen des unterschiedlichen Schwindens ausreichend bemessen werden. (Augen, Zapfen oder Nocken, die bearbeitet werden sollen, oval ausbilden)

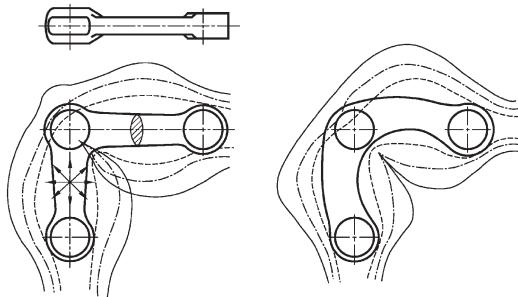


Abb. 3.167 Werkstoffanhäufungen sind besonders gefährlich, wenn von ihnen Partien mit geringerem Querschnitt im Winkel zueinander ausgehen. Bei diesem Winkelhebel ist die Gratform beim 1., 2. und 3. Schlag durch strichpunktierte und ausgezogene Linien angedeutet. (beim dritten Schlag ein Stich bis in das Werkstück)

3.9.3 Gestaltung von Tiefziehteilen

(Siehe Abb. 3.168, 3.169, 3.170, 3.171, 3.172, 3.173 und 3.174)

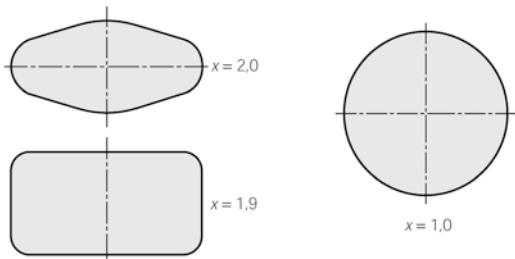


Abb. 3.168 Komplizierte Teile und asymmetrische Grundformen sind nach Möglichkeit zu vermeiden. (x = Herstellkosten für verschiedene Werkzeugformen) x ($x = 2$ $x = 1$)

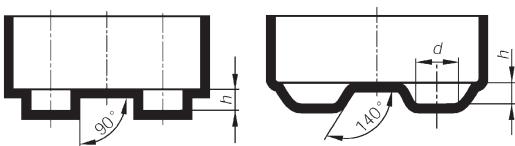


Abb. 3.169 Die Höhen ausgezogener Vertiefungen, Augen oder Stutzen sind niedrig zu halten ($h \geq 0,3 d$). Möglichst große Schrägen und große

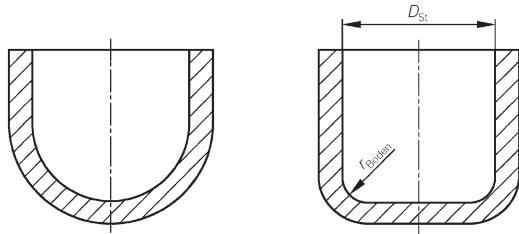


Abb. 3.170 Runde Böden sind schwieriger durch Tiefziehen herzustellen als ebene mit genügend großer Bodenrundung. Die günstigste Bodenrundung (r_{Boden}) entspricht dem 0,15-fachen Stempeldurchmesser D_{St}

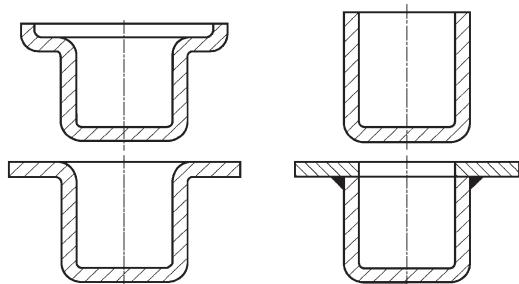


Abb. 3.171 Tiefe Teile mit breitem Flansch erfordern einen großen Rondendurchmesser sowie große und teure Werkzeuge. Es kann sehr wirtschaftlicher sein, den Flansch nachträglich anzubringen

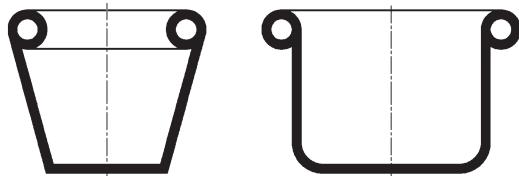


Abb. 3.172 Senkrechte Zargen sind billiger als Kegelflächen. Eine Außenrolle ist leichter als eine Innenrolle zu fertigen

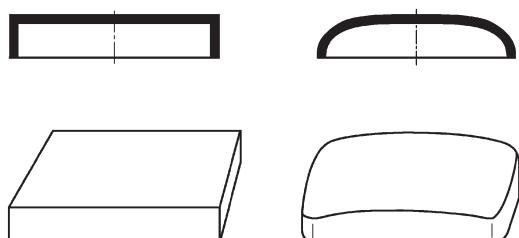


Abb. 3.173 Ebene Verschalungsbleche mit Randbördel neigen eher zu Verwerfungen als leicht gewölbte Blechformen

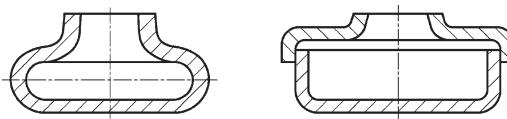


Abb. 3.174 Teile mit Hinterschneidungen sind nicht ziehbar. In diesen Fällen ist das Werkstück so zu teilen, dass einfache Grundformen entstehen

Ergänzendes und weiterführendes Schrifttum

- *Bargel, H.-J.*: Werkstoffkunde, 13. Aufl. Berlin, Heidelberg, Wiesbaden: Springer Vieweg 2022.
- *Bauer, H. u. W. Schadt*: Walzen von Flachprodukten. Springer 2017. ISBN 978-3-662-48091-5.
- *Billigmann, J. u. H.-D. Feldmann*: Stauchen und Pressen. München: Carl Hanser Verlag 1973.
- *Birkert, A. R. u. R. Sünkel*: Hydroforming: Umformen mit Wirkmedien im Automobilbau. Verlag Moderne Industrie, Landsberg 2002.
- *Böhm, A.*: Hydroforming – Zukünftige Verfahren zur Herstellung von IHU-Ausgangsteilen. Proceedings Inno-Meeting EuroBlech. Hannover 2000.
- *Cherek, H., F.-U. Leitloff u. M. Prier*: Innenhochdruck-Umformen – Eine Technologie für die Zukunft. UKD-Kolloquium, TU Darmstadt 2003.
- DIN 1547-1: Hartmetall-Ziehsteine und -Ziehringe; Begriffe, Bezeichnung, Kennzeichnung, 1969-07.
- DIN 65033: Luft- und Raumfahrt; Schmiedestücke aus Aluminium- und Magnesium-Legierungen; Technische Lieferbedingungen; Nicht für Neukonstruktionen von Schmiedestücken aus Aluminium-Legierungen, 1990-08.
- DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung, 2003-09.
- DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen – Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht, 2003-09.
- DIN 8583: Fertigungsverfahren Druckumformen. Teil 1: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09. Teil 2: Walzen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09.
- DIN 8584: Fertigungsverfahren Zugdruckumformen. Teil 1: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09.
- DIN 8586: Fertigungsverfahren Biegeumformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09.
- DIN 8587: Fertigungsverfahren Schubumformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09.
- DIN EN 10111: Kontinuierlich warmgewalztes Band und Blech aus weichen Stählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen, 2008-06.
- DIN EN 10243, Berichtigung 1: Gesenk-schmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen. Teil 1: Warm hergestellt in Hämmern und Senkrecht-Pressen; 2007-12. Teil 2, Berichtigung 1: Warm hergestellt in Waagerecht-Stauchmaschinen, 2005-07.
- DIN EN 12420: Kupfer- und Kupferlegierungen – Schmiedestücke, 2012-06.
- DIN EN 586: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Schmiedestücke. Teil 2: Mechanische Eigenschaften und zusätzliche Eigenschaftsanforderungen, 1994-11.
- DIN EN ISO 20482: Metallische Werkstoffe – Bleche und Bänder – Tiefungsversuch nach Erichsen, 2014-03.
- DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch. Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, 2014-06.
- DIN-Fachbericht 137: Einbindung der Innen-Hochdruck-Verfahren in die Normenreihe DIN 850 ff. 2004-04.
- *Dahl, W., R. Kopp, O. Pawelski*: Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde. Düsseldorf: Verlag Stahleisen und Springer-Verlag, Berlin 1993.
- *Dietrich, J.*: Praxiswissen Umformtechnik – Umform und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen –. Springer Vieweg 2018

- *Flimm, J.:* Spanlose Formgebung, 7. Aufl. München Wien: Hanser 1996.
- *Fritz, A. H. u. Chr. Wagner:* Herstellung von biokompatiblen Implantaten durch Massivumformung. Tagungsband XIX Verform. Kolloquium, Montanuniversität Leoben, 2000.
- *Fritz, A. H., H. Gattinger, K. Peters u. a.:* Herstellung von Grobblech, Warmbreitband und Feinblech. Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1976.
- *Grote, K-H., J. Feldhusen (Hrsg.):* Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. 24. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 2014.
- *Grüning, K.:* Umformtechnik. Verlag Springer Vieweg 2013.
- *König, W. u. F. Klocke:* Fertigungsverfahren. Bd. 5. Blechumformung, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1997.
- *Lange, K.:* Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Bd. 1: Grundlagen. Bd. 2: Massivumformung. Bd. 3: Blechumformung. Bd. 4: Sonderverfahren, Prozesssimulation. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1993.
- *Leitloff, F.-U.:* Die Fertigungslinie für die Längsträger der LandRover T5-Plattform. EFB-Kolloquium, Prag, Februar 2005.
- *Oehler, G., W. Panknin u. H. Hoffmann:* Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 2001.
- *Panknin, W. u. A. H. Fritz:* Der Einfluß einer Umkehr der Verformungsrichtung auf die Formänderungsfestigkeit von metallischen Werkstoffen. Draht 18 (1967) Nr. 1, S. 1/6.
- *Pawelski, O., W. Rasp, u. W. Wengenroth:* Advanced Technology of Plasticity. Vol. III, Proc. of 6th ICPT, Sept. 1999, S. 1753/1762.
- *Rasp, W., A. Yusupov:* A Newly Developed Upper-Bound Approach for Calculating the Width Flow in Hot Rolling. Steel Research International 76 (2005), H. 2/3, S. 99/105.
- *Roloff/Matek:* Maschinenelemente – Normung, Berechnung, Gestaltung. 21. Aufl. Berlin, Heidelberg, Wiesbaden: Springer Vieweg 2013.
- *Schal, W. (Hrsg.):* Fertigungstechnik 2: Massivumformen und Stanzen. 7. Aufl. Hamburg: Verlag Handwerk u. Technik 1995.
- *Schmied, D. u. a.:* Produktionsorganisation mit Qualitätsmanagement und Produktpolitik, 2. Aufl. Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2002.
- *Schuler GmbH (Hrsg.):* Handbuch der Umformtechnik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 2003.
- *Siegert, K. (Hrsg.):* Hydroumformung. Internat. Konf., Stuttgart-Fellbach. MAT INFO Werkstoff-Informationsges. mbH, Frankfurt/Main 1999.
- *Siegert, K. (Hrsg.):* Neuere Entwicklungen in der Blechumformung. MAT INFO Werkstoff-Informationsges. mbH, Frankfurt/Main 2002.
- *Spur, G. u. T. Stöferle:* Handbuch der Fertigungstechnik – Umformen und Zerteilen –. München, Wien: Carl Hanser Verl. 1980.
- VG 81237: Stäbe, Profile, Formschmiedestücke, nahtlos gewalzte Ringe aus nichtmagnetisierbaren Stählen – Technische Spezifikation, 2005-12.
- *Wagner, C., u. A. H. Fritz:* Walzenwechselvorrichtungen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht. Stahl u. Eisen 95 (1975) Nr. 5, S. 188/94.
- youtube wissensfloater
 - Innen-Hochdruck-Umformen
 - (BEUTH Hochschule Berlin)
 - Kaltwalzplattieren (Wickeder GmbH)
 - Streckziehen (IFU Uni Stuttgart)
 - Thixoforming (IFUM Uni Hannover)
 - Tiefziehen (IFU Uni Stuttgart)
 - Walzen von Schienen (Voestalpine AG)

Trennen

4

Klaus-Dieter Kühn, Alfred Herbert Fritz
und Ralf Förster

Zusammenfassung

Trennen ist das Fertigen durch Ändern der Form eines festen Körpers. Dabei wird der Zusammenhalt örtlich aufgehoben, im Ganzen also vermindert. Dazu gehören in der Hauptgruppe nach DIN 8580 die wichtigen Fertigungsverfahren Zerteilen (Scherschneiden von Blechen), Spanen (mit geometrisch bestimmten und unbestimmten Schneiden), Abtragen, thermisches Schneiden und das Wasserstrahlschneiden. Nach dem industriellen Einsatz dürfte die Gruppe Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden die wichtigste sein. Dazu gehören die spangebenden Verfahren Drehen, Bohren, Fräsen, Hobeln und Räumen. In der Gruppe Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden übernimmt das Schleifen außer dem Fertigungsziel der guten Endqualität zunehmend die Aufgabe des eigentlichen Werkstoffabtrags, so dass früher vorgeschaltete Verfahren (z. B. Fräsen) entfallen können. Für

das Zuschneiden von Rohteilen für Schweißkonstruktionen ist das Thermische Schneiden am weitesten verbreitet. Seit einigen Jahren hat auch das Wasserstrahlschneiden verstärkt Einsatz in der Praxis gefunden.

Aktualisiert wurde der Abschnitt über das Thermische Abtragen. Der Abschnitt Scherschneiden wurde durch das Feinschneiden ergänzt.

4.1 Verfahrensübersicht Trennen

Im Ordnungssystem der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 ist das charakteristische Merkmal der Gruppe 3 *Trennen* das örtliche Aufheben des Stoffzusammenhalts. Abb. 4.1 gibt einen Überblick über die Aufteilung der Hauptgruppe [3] mit den entsprechenden DIN-Normen. In der Gruppe [3] 1 Zerteilen kann das Scherschneiden hinsichtlich der industriellen Anwendung hervorgehoben werden. Die Bedeutung der übrigen Verfahren, insbesondere Reißen und Brechen, ist demgegenüber gering. Dies liegt im Wesentlichen an der schlechten Qualität der durch diese Verfahren erzeugten Trennflächen. Aus diesem Grunde beschränkt sich die Behandlung der Gruppe [3] 1 auf das Scherschneiden.

Nach dem industriellen Einsatz dürfte die Gruppe [3] 2 *Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden* (Drehen, Bohren, Fräsen usw.)

K.-D. Kühn (✉)
Braunschweig, Deutschland
E-Mail: k.kuehn@tu-bs.de

A. H. Fritz · R. Förster
Berlin, Deutschland
E-Mail: fritz.herbert@t-online.de

R. Förster
E-Mail: rfoerster@bht-berlin.de

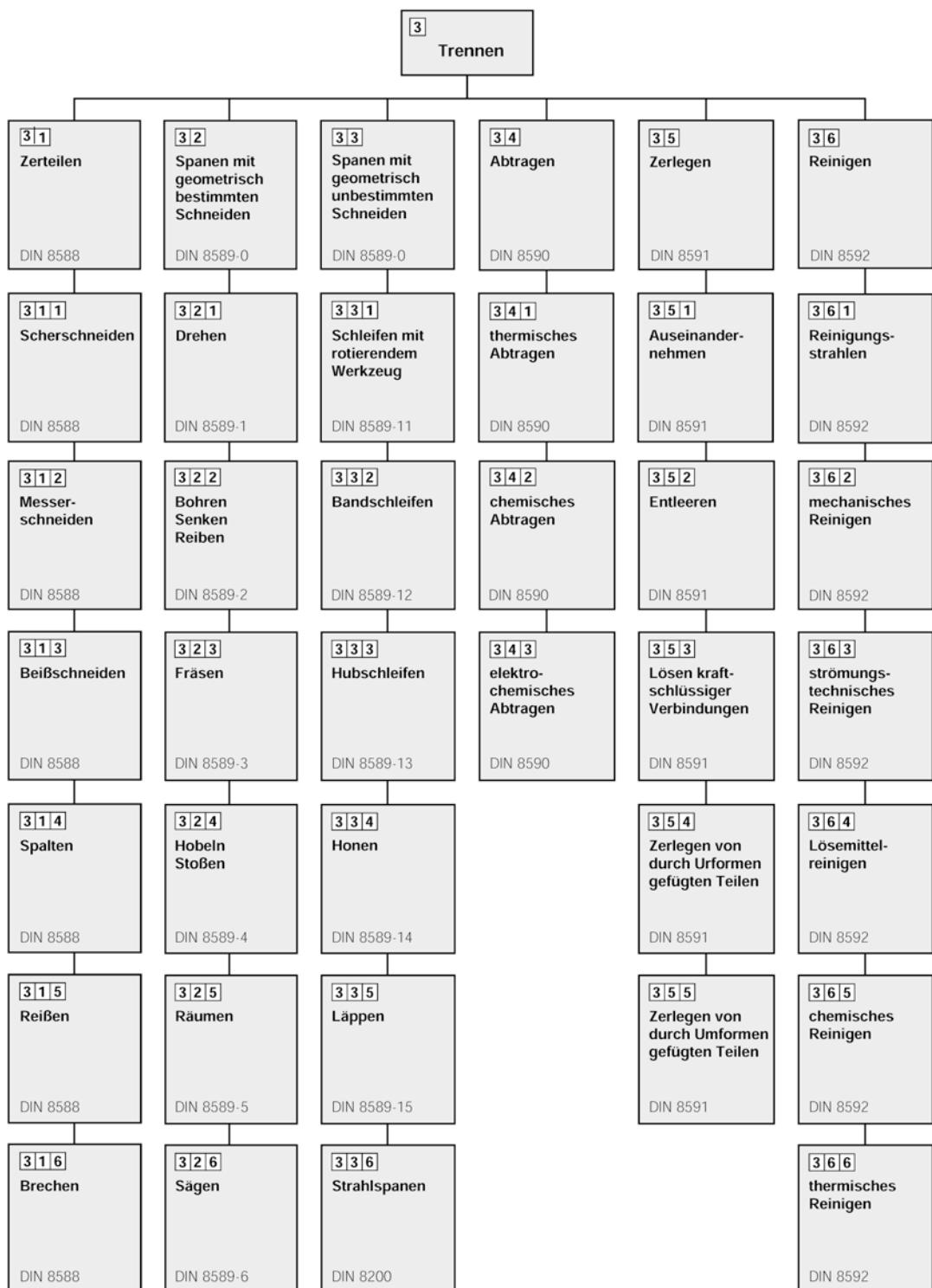


Abb. 4.1 Trennen und Einteilung der Verfahren (auszugsweise) nach DIN 8580

die wichtigste sein. In der Gruppe **[3|3] Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden** übernimmt das Schleifen außer dem Fertigungsziel der guten Endqualität in zunehmendem Maße auch die Aufgabe des Werkstoffabtrags, so dass früher vorgeschaltete Verfahren, wie z. B. das Fräsen entfallen können.

In der Gruppe **[3|4] Abtragen** ist das thermische Trennen, z. B. beim Zuschneiden von Rohteilen für Schweißkonstruktionen, am weitesten verbreitet, deshalb wird ausführlich auf dieses Verfahren eingegangen. Das Wasserstrahlschneiden hat seit einigen Jahren aufgrund seiner vielen Vorteile verstärkt Eingang in die Praxis gefunden. Daher wird auch dieses Trennverfahren in einem eigenen Abschnitt behandelt.

4.2 Scherschneiden

Das Scherschneiden ist das am häufigsten angewandte Verfahren in der Blechbearbeitung. Für jedes herzustellende Teil wird entweder das Rohteil aus Blech durch Schneiden hergestellt, oder das Fertigteil wird nach dem Umformen beschnitten. Schneiden ist ein Verfahren des Trennens, es gehört also nicht zu den Umformverfahren. Der Schneidevorgang ist jedoch immer mit einer plastischen Umformung verbunden, ehe der Werkstoff nach Erreichen seiner Trennfestigkeit τ_B in der Scherfläche einreißt. Ist weder das Schneiden noch das Umformen am Blechteil dominierend, wird diese Verfahrenskombination als Stanzen bezeichnet.

Das Scherschneiden kann mit parallelen oder schrägen Schneiden erfolgen. Abb. 4.2 zeigt hierzu Einzelheiten. Der Schräglungswinkel ist wegen der Ebenheit der Blechabschnitte rel. klein ($\delta = 0,5$ bis 3°). Abhängig von der Lage der Schnittfläche zur Werkstückbegrenzung werden die Verfahren Ausschneiden, Lochen, Abschneiden, Ausklinken, Einschneiden und Bebeschneiden beim Stanzen unterschieden.

Ausschneiden und Lochen sind Schneidverfahren mit in sich geschlossener Schnittlinie, wie Abb. 4.3 zeigt. Beim Ausschneiden ist der vom Stempel durch die Schneidplatte

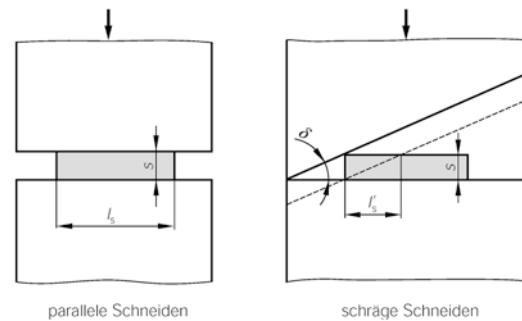


Abb. 4.2 Prinzip des Schneidevorgangs

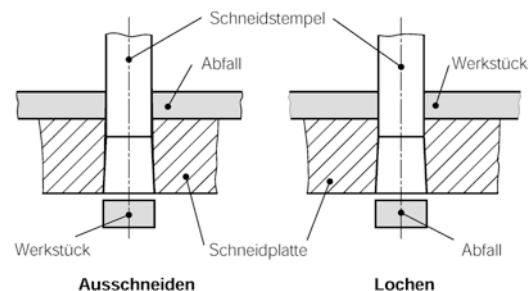


Abb. 4.3 Gegenüberstellung der Schneidverfahren Ausschneiden und Lochen

gedrückte Werkstoffteil das Werkstück. Die gesamte Außenform dieses Werkstücks wird in einem Arbeitsgang erzeugt. Der Rest des Rohlings bzw. Bleches bleibt als Rand oder Gitterstreifen als Abfall zurück.

Beim *Lochen* wird eine Innenform am Werkstück erzeugt. Der ausgeschnittene Werkstoff ist meist der Abfall.

Abtrennen ist das Trennen eines Teils vom Rohteil oder vom Halbfertigteil. Die Schnittlinie ist meist offen, sie kreuzt die Werkstückränder. An diesen Stellen wird das Scherwerkzeug schneller abstumpfen.

Ausklinken ist ein Herausschneiden von Werkstoffteilen an einer inneren oder äußeren Umgrenzung. Auch hier ist die Schnittlinie offen. Ausklinken wird verwendet, um Teile der Schnittlinien eines Werkstücks zu erstellen, das auf andere Weise nur schwer herstellbar ist. Beispielsweise werden die quadratischen Ecken einer Blechtafel ausgeklinkt, bevor die dadurch

entstehenden Seitenteile hochgeklappt und an diesen Kanten zu einem Kasten verschweißt werden.

Einschneiden ist ein teilweises Trennen des Werkstücks ohne Entfernen von Werkstoff. Es dient meist als Vorbereitung für einen Umformvorgang, z. B. Biegen oder Schränken der durch Einschneiden entstandenen Blechzunge. Die Schnittlinie ist offen.

Beschneiden dient zum Abtrennen von Werkstoff am Werkstück. Bei Gesenkschmiedestücken wird das Beschneiden auch Abgraten genannt. Die Schnittlinie kann sowohl offen als auch geschlossen sein. Abb. 4.4 zeigt das Beschneiden des Flansches eines Tiefziehteiles mit feststehendem Schneidstempel als Stanzschnitt. Das Beschneiden eines Hohlkörpers mittels Schneidrolle auf einem sich drehenden Aufnahmedorn geht aus Abb. 4.5 hervor.

4.2.1 Beschreibung des Schneidvorgangs

Die *Schneidkräfte* können nicht unmittelbar an den Schneidkanten angreifen. Sie werden in einem schmalen Bereich entlang der Schneidkanten in das Werkstück eingeleitet. Infolge des Abstandes der resultierenden Kraft von der äußeren Schneidkante entsteht ein Moment, das das Werkstück kippen oder durchbiegen will. Diesem Moment muss ein gleichgroßes Gegenmoment entgegenwirken, das sich aus den Biege-

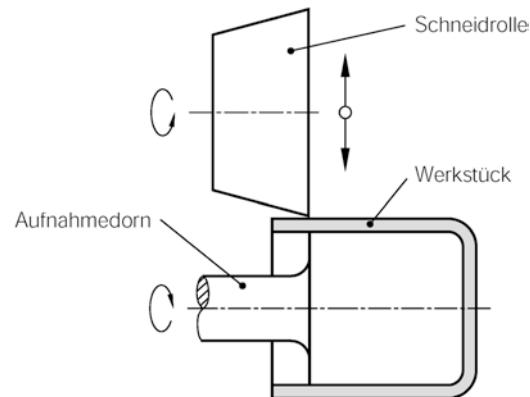


Abb. 4.5 Beschneiden von rotationssymmetrischen Hohlkörpern

spannungen im Werkstück und den durch die Biegung einwirkenden Normalspannungen ergibt. Infolge der Reibung treten sowohl auf den Seitenflächen der Werkzeugelemente als auch an den Werkzeugstirnflächen Reibkräfte auf.

Der Ablauf des Schneidvorgangs und die Ausbildung der Schnittflächen werden von der Werkzeuggeometrie und den Eigenschaften des Werkstoffes beeinflusst. Die mechanischen Gütekriterien des Werkstoffes können durch die Blechdicke s_0 , die Festigkeitswerte R_m und τ_B und die Dehnungswerte A_5 und A_{gl} aus dem Zugversuch beschrieben werden. Je nachdem, ob es sich um einen harten oder um einen zähen Werkstoff handelt, wird das Kraft-Weg-Schaubild unterschiedlich ausfallen. Abb. 4.6 zeigt diese Unterschiede. Bei harten Werkstoffen, die wenig Dehnung aufweisen, steigt die Schnitt-

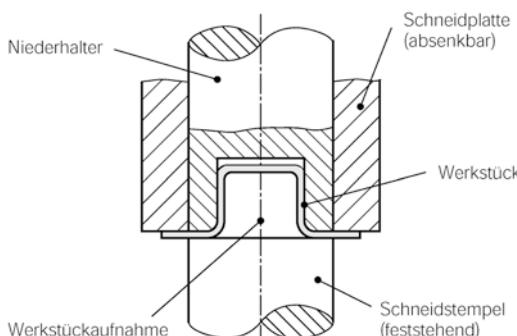


Abb. 4.4 Beschneidewerkzeug für den Flansch von Tiefziehteilen, schematisch

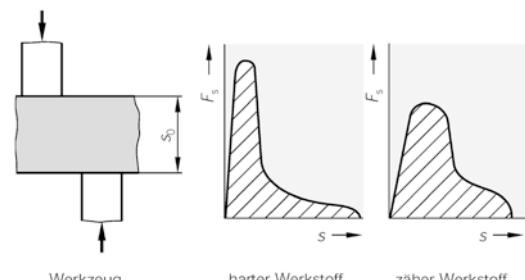


Abb. 4.6 Kraft-Weg-Schaubild beim Blechschnitzen. s_0 Blechdicke, F_s Schnittkraft, s Weg des Schneidstempels

kraft F_s steil an und fällt nach dem Erreichen des Maximums steil ab. Ein zäher Werkstoff zeigt kein so hohes Kraftmaximum. Er wandelt die gespeicherte elastische Energie der Stanzpresse während des Einreißens oder völligen Durchreißens des Blechquerschnittes in Wärme um.

Die Werkzeuggeometrie wird in erster Linie durch den Schneidspalt u und die Schneidkantenabstumpfung beschrieben. Die Auswirkungen eines verschieden großen Schneidspaltes zeigt Abb. 4.7. Bei extrem kleinem Spalt können bereits beim Anschneiden Risse als Folge der verhältnismäßig großen Querspannungen auftreten (Abb. 4.7a). Die Schnittkraft sowie der Arbeitsbedarf sind hoch. Am Werkstück zeigen die Schnittflächen dann keine geraden Kanten, sondern Anrisse in der Schnittfläche.

In Abb. 4.7b sind die richtig gewählten Verhältnisse des Schneidspaltes dargestellt. Zu Beginn des Vorgangs biegt sich das Blech zunächst elastisch, dann plastisch durch. Diese Biegung zeigt sich in einer bleibenden Durchwölbung der Ausschnitte. Bei weiterem Eindringen des Schneidstempels in das Blech und dem Ausschieben des Schnittteils in die Schneidplatte bildet sich ein Kantenabzug an dem Außenstück und dem Ausschnitt aus. Nach dem Erreichen des

Kraftmaximums beginnt die Scherung des Werkstoffs an den Schneidkanten der Werkzeuge. Es entsteht ein glatter Teil als Schnittfläche.

Wird der Schneidspalt extrem groß gewählt, etwa wie in Abb. 4.7c, entstehen Risse unmittelbar nach dem Kraftmaximum. Gleichzeitig fällt die Schneidkraft steil ab. Das Werkstück zeigt rissige Schnittflächen. Als möglicher Schneidspaltbereich wird $u = 0,02 s_0$ bis $u = 0,10 s_0$ angegeben. Mit größer werdendem Schneidspalt wird die Schneidkraft kleiner. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass gleichzeitig die Maßungenauigkeiten, über die Schnittflächen gemessen, zunehmen.

Der Schneidvorgang bewirkt durch die zwischen Werkzeug und Werkstück auftretenden Relativbewegungen einen unvermeidlichen Verschleiß der schneidendenden Werkzeugelemente. Dieser tritt an den Druckflächen und an den Freiflächen auf und wird dementsprechend *Druckflächenverschleiß* und *Freiflächenverschleiß* genannt. Mit dem Verschleiß ist stets eine Abrundung der Schneidkanten verbunden. Mit zunehmendem Verschleiß wird nun der Stempelweg bis zum Auftreten der Anrisse größer. Infolgedessen nimmt der glatte Anteil in der Schnittfläche zu. Die entstehenden Risse laufen aufeinander zu; im

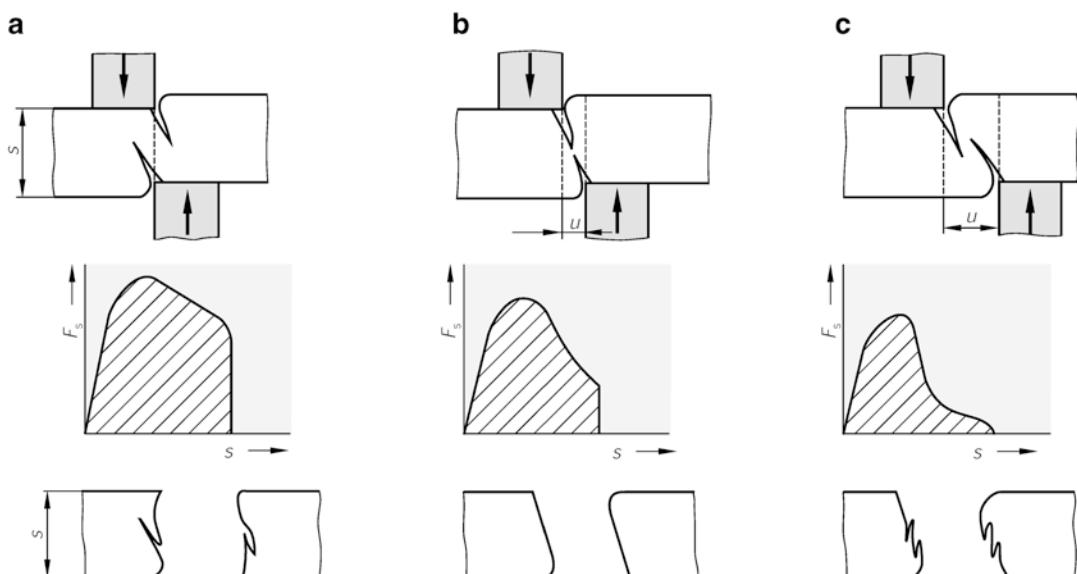


Abb. 4.7 Auswirkungen des Schneidspaltes u auf die Schnittkraft F_s und Schnittflächenqualität: **a** Schneidspalt zu klein **b** richtig bemessen ($u \approx 0,08 \cdot s_0$) **c** zu groß

Gegensatz zu scharfen Schneidkanten tritt keine Zipfelbildung mehr ein.

Sind die Werkzeugkanten zu stark verschlissen, gehen die Risse nicht mehr von den Schneidkanten aus, sondern von den Freiflächen. Diese Verschiebung des Rissverlaufs führt zu einer Gratbildung, die mit zunehmender Anzahl der mit einem Werkzeug geschnittenen Teile ansteigt. Die Größe des Grats ist vom Verschleiß und vom Werkstoff abhängig. Grundsätzlich bewirkt ein Verschleiß der Schneidkanten eine Erhöhung von Schneidkraft und Schneidarbeit. Die Fehler an den geschnittenen Teilen werden vom Werkstoff, Werkzeug, Arbeitsablauf und Maschinentyp beeinflusst. Die an der Schnittfläche auftretenden *Formfehler* sind wie in Abb. 4.8 der Kantenabzug s_A , die Einrisstiefe t_E und die Grathöhe h_G . Hinzu kommen u. U. Formfehler als Abweichung von der Ebenheit. Diese sind besonders die beim Ausschneiden von kleinen Teilen auftretenden *Verwölbungen* und die nach dem Ausschneiden von biegegerichtetem Band durch Freiwerden der Restspannungen bedingten *Durchbiegungen*.

Der Kantenabzug s_A wird vom Werkstoff, dem Schneidspalt und von der Form der Schneidlinie bestimmt. Nur an kreisrunden Zuschneiden ist der Kantenabzug konstant. An den Schnittflächen von kleinen Löchern und an Einsprüngen der Außenform mit kleinen Radien ist u. U. gar kein Kantenabzug vorhanden. An Vorsprüngen mit kleinen Radien dagegen kann er bis zu 30 % der Blechdicke ausmachen.

Die Einrisstiefe t_E wird durch den Werkstoff und den Schneidspalt bestimmt, solange Zipfel in der Schnittfläche auftreten. Sobald der Schneidspalt optimiert ist und keine Zipfel-

bildung mehr auftritt, ist die Einrisstiefe etwa genauso groß wie der Schneidspalt.

4.2.2 Schneidkraft

Für die Auswahl von Pressen ist die maximale Schneidkraft die wichtigste Kenngröße. Bezogen auf die Fläche A_s , die sich aus der Blechdicke s_0 und der Länge der Schnittlinie l_s ergibt, kann der Schneid- oder Scherwiderstand k_s formuliert werden:

$$k_s = \frac{F_{s \max}}{A_s}. \quad (4.1)$$

Das Rechnen mit dem Schneidwiderstand k_s hat den Vorteil, dass sich damit relativ einfach die Einflüsse von Schneidspalt, Werkzeugverschleiß, Werkstoffeigenschaften, Blechdicke und Schnittlinienform beschreiben lassen. Der *Schneidwiderstand* k_s nimmt mit zunehmendem Schneidspalt ab. Die Abnahme beträgt in dem angegebenen Schneidspaltbereich $u = 0,01 s_0$ bis $u = 0,1 s_0$ bis zu 14 %, bezogen auf den Maximalwert. Die maximale Schneidkraft wird für die Praxis genügend genau aus der Beziehung

$$F_{s \max} = l_s s_0 k_s \quad (4.2)$$

ermittelt. Näherungsweise kann k_s aus der Zugfestigkeit hergeleitet werden:

$$k_s \approx 0,8R_m. \quad (4.3)$$

Eine mögliche Erhöhung der Schneidkraft infolge des Werkzeugverschleißes lässt sich durch den empirisch gefundenen Faktor 1,6 in (Gl. 4.2) ausgleichen.

Die Schneidkraft kann verringert werden, wenn man die Länge der wirkenden Schneidlinie l_s verkleinert.

Für das Ausschneiden oder Lochen kann außerdem durch Abschrägen der Schneidplatte oder des Stempels die Schneidkraft verringert werden, verdeutlicht in Abb. 4.9. Werden in einem Arbeitshub der Presse verschiedene Teile des Umrißes hergestellt, kann durch einen zeitlich verschobenen Eingriff der Schneidkanten die Gesamtkraft F_s verkleinert werden. Diese

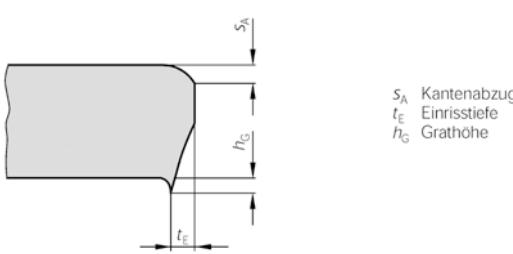


Abb. 4.8 Formfehler am Schnittteil. (nach G. Spur)

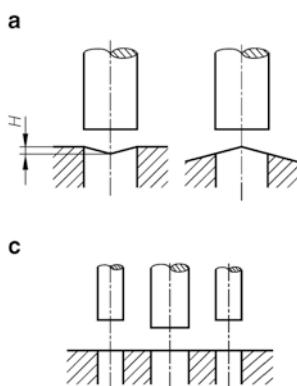


Abb. 4.9 Möglichkeiten zum Verringern der Schneidkraft: **a** Schrägschliff der Schneidplatte **b** Schrägschliff des Stempels **c** unterschiedliche Stempel-Längen **d** Versatz von Ausschneid- und Lochstempel

Maßnahmen führen auch zur Lärminderung beim Stanzen.

Die Höhe H der Abschrägung kann das 1- bis 1,5-fache der Blechdicke betragen. Die größte Schneidkraft berechnet sich dann zu

$$F_{s \max} = 0,67 l_s s_0 k_s. \quad (4.4)$$

Dieser Ausdruck gilt für scharfe Schneidkanten. Bei Abstumpfung der Kanten müssen die genannten Krafterhöhungen in Kauf genommen werden.

Wegen der Verformungen des Werkstücks sind zwischen Schneidstempel und Außenstück Radialspannungen wirksam, durch die Rückzugskräfte entstehen. Diese können Werte von 1 % bis zu 30 % der Schneidkraft annehmen.

4.2.3 Gestaltung von Schneidwerkzeugen

Schneidwerkzeuge werden nach Art ihrer Führung als Frei-, Plattenführungs- und Säulenführungs-Schneidwerkzeuge bezeichnet. Ein Beispiel für ein *Freischneidwerkzeug* zeigt Abb. 4.10. Die schneidenden Werkzeugelemente sind im Werkzeug nicht gegeneinander geführt. Die Führung wird nur durch die Führungen des Pressenstößels übernommen.

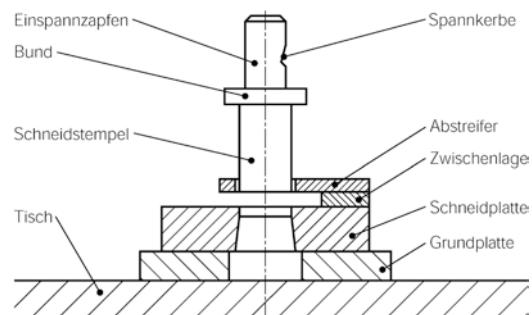


Abb. 4.10 Freischneidwerkzeug zum Stanzen von Blechen, schematisch

Bei entsprechender Qualität der Stößelführung und der Bauart der Schneidpresse braucht das kein Nachteil hinsichtlich der Genauigkeit des Werkstücks zu sein. Freischneidwerkzeuge sind wegen ihrer einfachen Bauart bei vielen Anwendungen preiswerter. Sie werden besonders bei kleinen Stückzahlen eingesetzt. Sie haben allerdings den Nachteil, dass es beim Einrichten in der Presse schwierig ist, den Spalt zwischen Schneidplatte und Schneidstempel konstant zu halten. Dadurch kann u. U. ein verhältnismäßig großer Verschleiß entstehen, z. B. beim Schneiden von Blechen mit $s_0 \leq 1 \text{ mm}$ bei einem Schneidspalt von $u = 0,01 \text{ mm}$.

Plattenführungsschneidwerkzeuge nach Abb. 4.11 haben eine Führungsplatte, die meist eine Führungsbuchse enthält. Die beim Einrichten des Werkzeuges möglichen Lagefehler der Werkzeugelemente werden dadurch vermieden. Verschiebelagefehler der schneidendenden

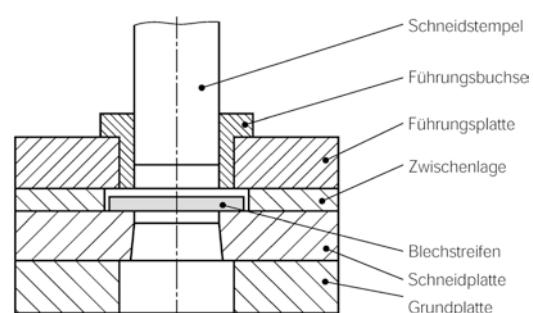


Abb. 4.11 Plattenführungsschneidwerkzeug, verstiftet u. verschraubt

Werkzeugelemente infolge der Führungsun genauigkeit der Stößelführung sowie eine mögliche Winkelauffederung, die besonders bei C-Gestell-Pressen auftreten kann, werden durch die Stempelführung vermindert. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Führungsplatte die Gefahr des Ausknickens bei dünnen Stempeln verringert. Gleichzeitig übernimmt sie die Funktion des Abstreifers. Da ein Werkzeugelement direkt zum Führen verwendet wird, kann durch am Stempel anhaftende Werkstoffteilchen ein starker Verschleiß auftreten.

In *Säulenführungsschneidwerkzeugen* entsprechend Abb. 4.12 sind die Funktionen „Führen“ und „Schneiden“ voneinander getrennt. Ein Säulenführungsschneidwerkzeug ist wegen der hohen Genauigkeit bei entsprechendem Einbau jedem anderen Werkzeug vorzuziehen. Man kann mit geringstem Verschleiß der Schneidelemente rechnen. Wegen der Führung der Schneidelemente gegeneinander durch die Säulenführung braucht man während des Einrichtens nicht auf Lagefehler zu achten. Das Einrichten der Werkzeuge in den Pressen ist daher kostengünstig.

Es ist zu beachten, dass *Säulenführungen* nur als Einrichthilfen und als Herstellungshilfen für genaue Werkstücke anzusehen sind. Verschiebungskräfte bei nichtmittiger Einspannung der Werkzeuge oder Auffederungsfolgen bei C-Gestell-Pressen lassen sich nicht aufnehmen, weil die Führungssäulen meist nicht steif

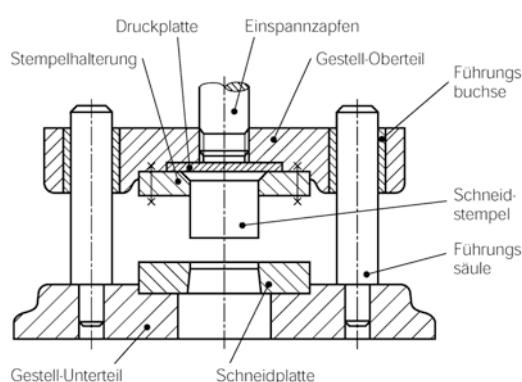


Abb. 4.12 Säulenführungsschneidwerkzeug, schematisch

genug sind. Säulenführungsgestelle sind in verschiedenen Ausführungen genormt (DIN 9812, 9814, 9816, 9819, 9822). Als Führungsarten für die Säulen werden Büchsen oder Kugelkäfige verwendet. Führungen mit Büchsen sind unter Lasteinwirkung steifer; Kugelführungen haben eine geringere Reibung und werden deshalb bei schnelllaufenden Pressen eingesetzt.

An Werkstücken mit Außen- und Innenform können alle Schnittflächen entweder in einem Arbeitsgang oder in mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitsgängen erzeugt werden. Im ersten Fall wird das Werkzeug als Gesamtschneidwerkzeug bezeichnet. Werden die Arbeitsgänge in einem Werkzeug in Stufen durchgeführt, nennt man das Werkzeug Folgeschneidwerkzeug. Bei Gesamtschneidwerkzeugen sind die Lagefehler der Außenformen zu den Durchbrüchen der Werkstücke nur durch die Herstellgenauigkeit der Werkzeuge gegeben. Bei der Fertigung mit Folgewerkzeugen kommt zur Ungenauigkeit der Werkzeuge diejenige des Streifen- oder Bandvorschubs hinzu. Im Vergleich zum Gesamtschneidwerkzeug wird also bei gleicher Genauigkeit der Werkzeuge die Ungenauigkeit der mit einem Folgeschneidwerkzeug gefertigten Teile größer sein. Im Gesamtschneidwerkzeug müssen die geschnittenen Teile sowie der Lochabfall aus den Schneidplatten ausgeworfen und aus dem geöffneten Werkzeug abgeführt werden. Im Folgeschneidwerkzeug kann man die Teile und den Abfall durch die Schneidplatten herausschieben. Auch aus diesem Grund sind Gesamtschneidwerkzeuge teurer und komplizierter in ihrem Aufbau.

4.2.4 Vorschubbegrenzungen

Vorschubbegrenzungen unterbrechen den Vorschub des Blechstreifens und bestimmen dessen Lage im Werkzeug. Bei Gesamtschneidwerkzeugen haben die Vorschubbegrenzungen den Zweck, den Abfall gleichmäßig und klein zu halten. In Folgewerkzeugen sollten sie außerdem die richtige Lage des Werkstücks in den einzelnen Arbeitsstufen sichern. Ein Beispiel für

die Werkstückteilung zeigt Abb. 4.13. Die Anordnung der Werkzeuge beim Folgeschnitt geht aus Abb. 4.14 hervor. Der Streifen wird durch die Vorschubeinrichtung bis zum Anschlag transportiert. Danach fährt der Stempel nach unten und schneidet das Werkstück ab, das von einem federnden Gegenstempel ausgeworfen wird.

Bei den Abschnitten ist die unterschiedliche Gratlage wie in Abb. 4.14b zu beachten, die mitunter zu Problemen bei der Weiterverarbeitung führt. Als Vorschubbegrenzungen (Abb. 4.15) können im Werkzeug *Einhängestifte* oder *Seitenschneider* verwendet werden. Einhänge- oder Anschlagstifte (Abb. 4.15a) sind die einfachste Vorschubbegrenzung, beim automatischen Vorschub aber meist nicht zu

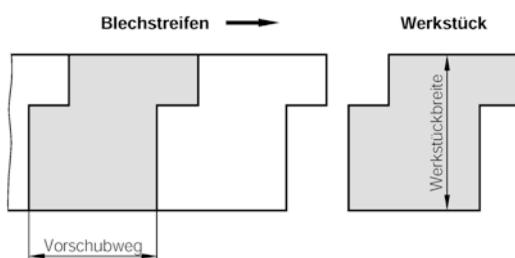


Abb. 4.13 Beispiel einer Werkstückteilung (Stanzen vom Blechstreifen)

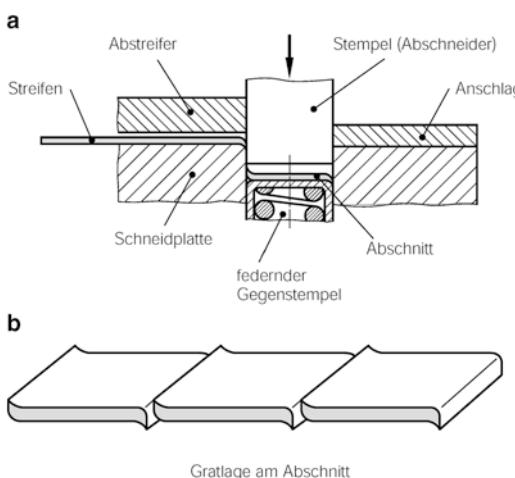


Abb. 4.14 Werkzeugaufbau beim Folgeschnitt (a) und Gratlage am Blechabschnitt (b)

verwenden. Seitenschneider werden zur Begrenzung des Vorschubs bei mechanischen Vorschubeinrichtungen eingesetzt. Sie geben eine genauere Begrenzung des Vorschubs als die Einhängestifte. Die Ausführung von Seitenschneidern und die Anordnung der dazu notwendigen Anschläge für den Streifen sind in VDI-Arbeitsblättern festgelegt. Außerdem können auch *Formseitenschneider* verwendet werden, die außer der Vorschubbegrenzung auch einen Teil der Schnittlinie herstellen.

Die Länge des Seitenschneiders entspricht immer dem Vorschub. Die Blechdicke ist bei Verwendung von Seitenschneidern auf mindestens 0,1 mm begrenzt. Bei dünneren Blechen reicht die Steifigkeit des Blechstreifens nicht aus. Die obere Blechdickengrenze liegt bei etwa 3 mm.

Bei Seitenschneidern wird eine offene Schnittlinie erzeugt. Dadurch wirken Seitenkräfte auf Streifen und Seitenschneider. Um diese Kräfte aufzunehmen, müssen Seitenschneider häufig auf ihrer Rückseite in der Schneidplatte geführt werden.

Zusätzlich zu diesen zwei Möglichkeiten werden bei der Vorschubbegrenzung oft *Fang-* oder *Pilotstifte* verwendet. Diese greifen mit ihrer konisch oder parabolisch geformten Spitze in die Löcher im auszuschneidenden Werkstück oder im Abfallgitter ein. Der zylindrische Führungsteil der *Fang-, Pilot-* oder *Suchstifte* zentriert die Lage beim Schneiden genauer, Abb. 4.15b. So wird ein geringer Vorschubfehler ausgeglichen und der Blechstreifen zwangsläufig in die richtige Lage gebracht. Da der zylindrische Teil des Stifts die Vorlochränder erreicht haben muss, bevor einer der Schneidstempel auf dem Blech aufsetzt, ist der Fangstift erheblich länger. Falls im Schnittteil bereits Löcher vorhanden sind, können diese als Suchlöcher herangezogen werden. Andernfalls muss man im Abfallgitter besondere Lochungen einbringen.

Wenn ein Seitenschneider lange im Einsatz bleibt, führt die zunehmende Kantenverrundung zu einem Grat am Blechstreifen, der eher am Anschlag ankommt, als die senkrecht

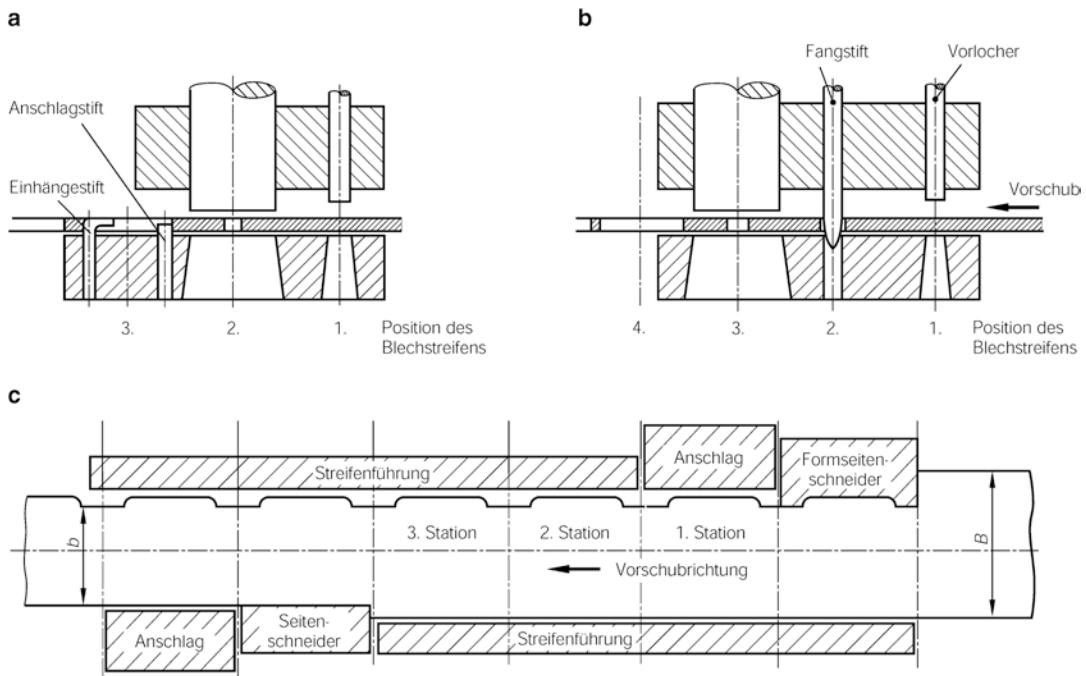


Abb. 4.15 Verschiedene Arten der Vorschubbegrenzung. **a** Einhänge- und Anschlagstift **b** Fang- oder Pilotstift (siehe VDI 3358) **c** Seitenschneider bzw. Formseitenschneider (im oberen Bildteil **c**), B Blechstreifenbreite; b nutzbare Breite (VDI 3367)

zur Vorschubrichtung stehende Blechkante. Dann wird der Vorschub ungenau, und es besteht die Gefahr, dass sich der Blechstreifen mit dem stehengebliebenen Grat in der Streifenführung verklemmt (Stillstandzeiten!). Dieser Nachteil kann durch einen Formseitenschneider vermieden werden, der im oberen Teil von Abb. 4.15c) dargestellt ist.

Moderne *Schnellschneidpressen* mit hohen Hubzahlen (bis zu 1000 Hübe/min) arbeiten mit Geschwindigkeiten bis zu 40 m/min. Bei diesen großen Werten ist es wegen der auftretenden Massenkräfte nicht mehr möglich, eine Vorschubbegrenzung durch Seitenschneider zu realisieren. Es werden deshalb Walzenvorschubeinrichtungen mit speziellen Antrieben eingesetzt, die eine Vorschubgenauigkeit bis zu $\pm 0,01$ mm bei modernen *Stanzwerkzeugen* gewährleisten.

Auf die Gestaltung von Schnittteilen – auch unter Bezug auf Vorschubprobleme – wird in Abschn. 4.11 eingegangen.

4.2.5 Feinschneiden

Feinschneiden ist einhubiges Schneiden mit Ringzackenblechhalter und Gegenhalter zur Erzeugung von glatten anriss-freien Schnittflächen. Diese werden häufig als Funktionsflächen eingesetzt. Das Prinzip ist in Abb. 4.16 ersichtlich. Das Feinschneiden ist in der Praxis auch

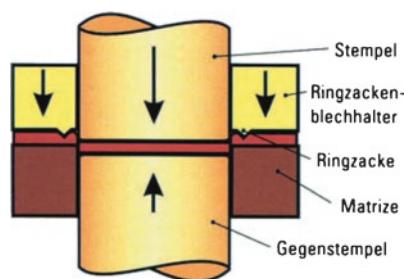


Abb. 4.16 Werkzeugaufbau beim Feinschneiden. (Quelle: Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik, Springer 2003)

als *Genauschneiden* oder *Feinstanzen* bekannt. Es ist ein Scherschneiden zum Herstellen von Blechteilen mit glatter Schnittfläche. Im Gegensatz zum Normalschneiden wird der Werkstoff, bedingt durch das allseitige Einspannen des Bleches, allein durch Fließen ohne eine Bruchfläche getrennt. Neben der größeren Wirtschaftlichkeit ergeben sich folgende Vorteile:

- Glatte abriss-freie Schnittflächen, ohne Nacharbeit als Funktionsflächen einsetzbar,
- geringere Maßtoleranzen, in der gesamten Serie gleichbleibend,
- durch Wegfall des Schnittschlages weniger Lärm und Erschütterungen,
- weniger Arbeitsschritte bei Schnitt- und kombinierten Schnitt-/Umformteilen.

In Abb. 4.17 ist die konventionelle Fertigung eines Motorrad-Kettenrades dem Feinschneiden gegenübergestellt. Die neun Arbeitsschritte (Schneiden auf Einzelpressen, Spannen, Entgraten und Schleifen) werden beim Feinschneiden im Komplettwerkzeug auf drei Operationen verkürzt. Auch bei der Fertigung im Folgeverbundwerkzeug (Abb. 4.18) werden durch den Wegfall des zeitintensiven

Maschinenwechsels 80 % der Fertigungskosten eingespart.

Die *Ringzacke* ist das besondere Kennzeichen im Feinschneidwerkzeug. In einem definierten Abstand umläuft sie als erhabene Zacke die Schnittlinie. Sie wird in das Stanzgitter eingepresst, um beim Schneidvorgang das Ausweichen des Werkstoffs zu verhindern. Gleichzeitig begünstigen die eingebrachten Druckspannungen den Fließvorgang. Bei großen Innenformen hat auch der Auswerfer eine Ringzacke, die in den Innenformabfall eingedrückt wird. Beim Feinschneiden wirken drei Kräfte im Werkzeug auf das Stanzmaterial ein, Abb. 4.19 links. Vor dem Schneidbeginn wird die Ringzacke mit der Kraft F_R außerhalb der Schnittlinie in das Blech eingepresst. Innerhalb der Schnittlinie wird der Werkstoff mit der Gegenkraft F_G auf den Schneidstempel gepresst. Der Schneidvorgang erfolgt in diesem vorgespannten Zustand durch die Schneidkraft F_S . Nach Abschluss des Schneidvorgangs werden Ringzacken und Gegenkraft abgeschaltet. Das Werkzeug öffnet sich und das Stanzgitter wird durch die Abstreiferkraft F_{Ra} vom Stempel geschoben. Nach dem Ausstoßen des Innenformabfalls wird das Feinschnittteil mit der Auswerferkraft F_{Ga} aus der Schneidplatte ausgeworfen.

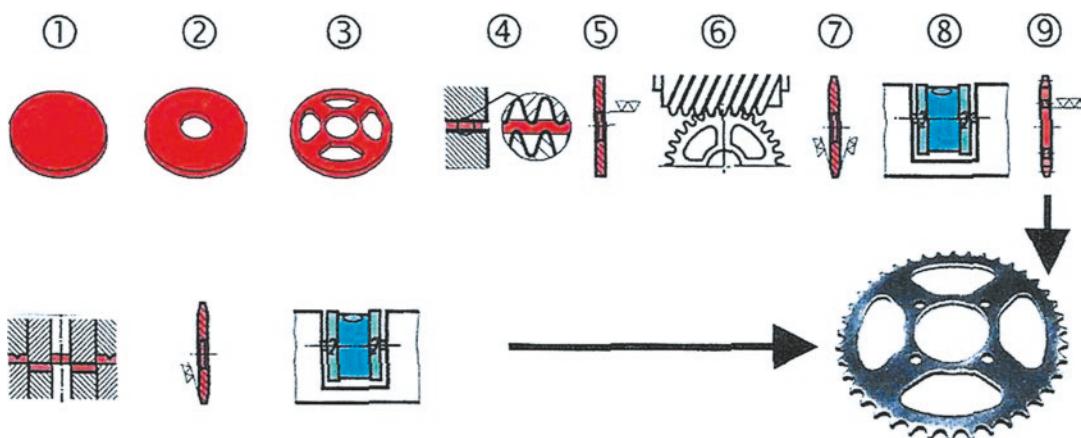


Abb. 4.17 Fertigungsfolge für ein Motorrad-Kettenrad, konventionell (oben) und durch Feinschneiden. (Quelle: Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik, Springer 2003)

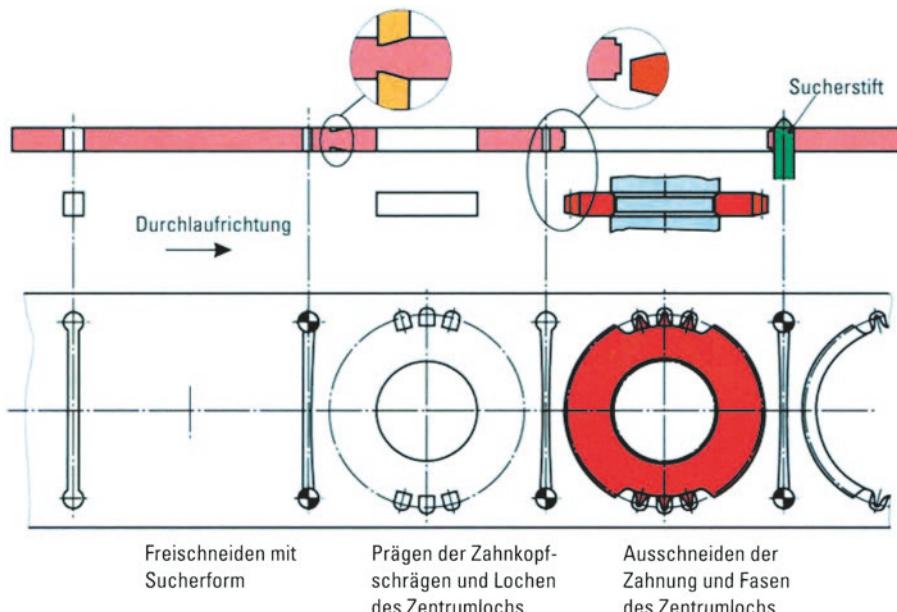


Abb. 4.18 Streifenbild vom 3-stufigen Folgeverbundwerkzeug für die Kettenradfertigung. (Quelle: Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik, Springer 2003)

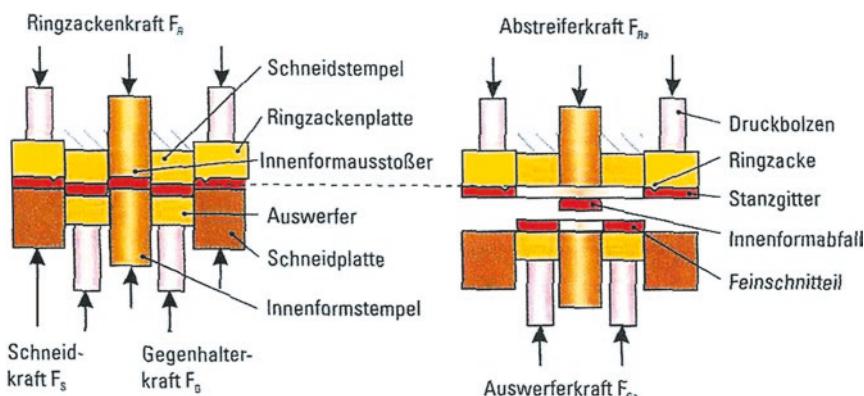


Abb. 4.19 Kraftwirkung im Werkzeug beim Feinschneiden (*links*) und beim Auswerfen (*rechts*). (Quelle: Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik, Springer 2003)

Der Kraft-Weg-Verlauf beim Feinschneiden unterscheidet sich stark von dem beim Normalschneiden, Abb. 4.20. Beim Auftreffen des Normal-Snidestempels wird das Blech zuerst elastisch verformt (Bereich I) und danach geschnitten (Bereich II). In der Abreißphase III fällt die Kraft plötzlich ab, was zu Schwingun-

gen in Maschine und Werkzeug führt. In dieser Phase IV tritt der höchste Werkzeugverschleiß auf. Beim Feinschneiden fehlen die Abriss- und Schwingphase völlig, so dass ein plötzliches Durchreißen des Teiles verhindert wird. Das Feinschnittteil weist über die gesamte Blechdicke eine glatte Schnittfläche auf.

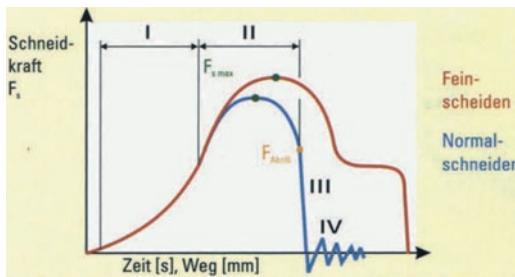


Abb. 4.20 Kraft-Weg-Verlauf beim Normalschneiden und Feinschneiden. (Quelle: Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik, Springer 2003)

Der *Schneidspalt u* ist die auf eine Seite bezogene Maßdifferenz zwischen Schneidstempel und Schneidplatte. Er beeinflusst den Glattschnittanteil an der Schnittfläche, denn bei größerem Schneidspalt wird der Glattschnittanteil geringer. Während der Schneidspalt beim Normalschneiden bei etwa 5–10 % der Blechdicke liegt, sollte er beim Feinschneiden 0,5 % nicht überschreiten, Abb. 4.21. Mitunter wird auch ein unterschiedlicher Schneidspalt in einem Werkzeug gewählt. Bei Teilen mit Verzahnungen kann er im Zahngrund größer sein als im Bereich des Zahnkopfes. Die erreichbaren Maß- und Formtoleranzen hängen vom Werkstoff, der Blechdicke und der geometrischen Teileform ab. Außerdem sind

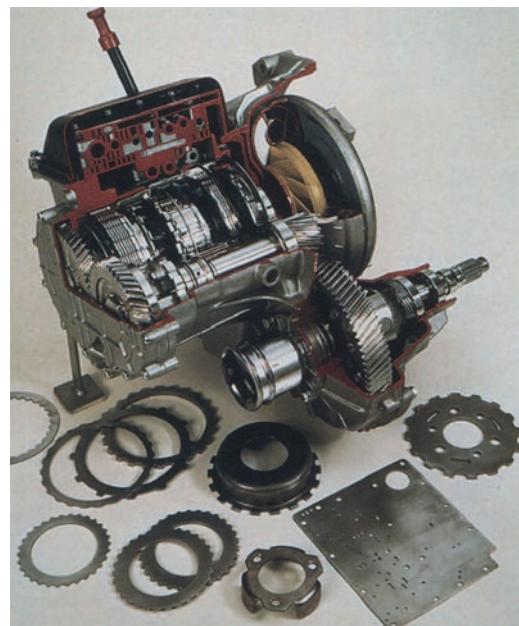


Abb. 4.22 Feinschnitteile in einem Pkw-Automatikgetriebe. (Quelle: Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik, Springer 2003)

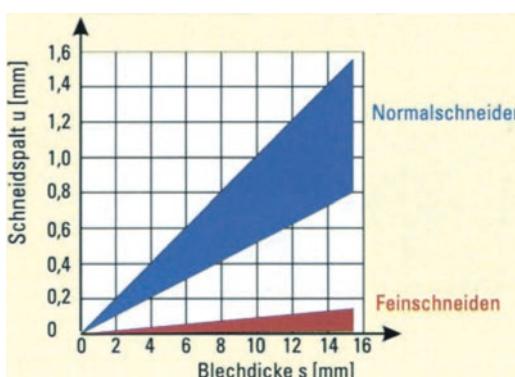


Abb. 4.21 Schneidspalt u beim Normal- und Feinschneiden in Abhängigkeit von der Blechdicke s . (Quelle: Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik, Springer 2003)

die Feinschneidpresse, das Werkzeug und der Schmierstoff von großem Einfluss. Ein völlig grätfreies Feinschneiden ist nicht möglich. Der Schnittgrat liegt dem Kanteneinzug gegenüber (s. Abb. 4.8). Durch Verschleiß an den Werkzeugkanten nehmen Grathöhe und -breite mit zunehmender Schnittzahl zu. Der Schnittgrat muss dann durch Band- oder Gleitschleifen entfernt werden.

Anwendungsbeispiele für Feinschnitteile in einem Pkw-Automatikgetriebe zeigt Abb. 4.22. Die Lamellen, Antriebstöpfe und Zwischenbleche müssen hinsichtlich der Schnittflächenqualität, Maßtoleranzen und Planheit hohen Anforderungen genügen. Die extrem kleinen Löcher im Zwischenblech können auch bei dem s/d-Verhältnis von 2 im Feinschnitt hergestellt werden. Im Normalschnitt sind diese Kleinlochungen nicht herstellbar. Außerdem ist eine rissfreie Schnittfläche zur Vermeidung von Kerbwirkungen die Voraussetzung für das anschließende Vergüten der Scheiben. Das gilt auch für die Bremsscheiben und Ritzel im Antriebssystem von Kraftfahrzeugen.

4.3 Spanen

Unter Spanen versteht man nach DIN 8589 einen Trennvorgang, bei dem von einem Werkstück mit Hilfe der Schneiden eines Werkzeugs Werkstoffschichten in Form von Spänen zur Änderung der Werkstückform und (oder) Werkstückoberfläche mechanisch abgetrennt werden.

4.3.1 Einteilung nach DIN 8589

Das Spanen umfasst im *Ordnungssystem* der Fertigungsverfahren die Verfahren mit geometrisch bestimmten und die Verfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden. Abb. 4.23

und 4.24 geben einen Überblick über die einzelnen Verfahrensuntergruppen nach den entsprechenden DIN-Normen. Zum *Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden* wird ein Werkzeug verwendet, dessen Schneidenanzahl, Geometrie der Schneidteile und Lage der Schneiden zum Werkstück bestimmt sind. *Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden* dagegen ist ein Trennen, bei dem ein Werkzeug verwendet wird, dessen Schneidenanzahl, Geometrie der Schneidteile und Lage der Schneiden zum Werkstück unbestimmt sind.

Im Ordnungssystem nach DIN 8589 werden die spanenden Fertigungsverfahren durch Ordnungs- bzw. *Verfahrensnummern* gekennzeichnet. Die jeweiligen Verfahrensuntergruppen

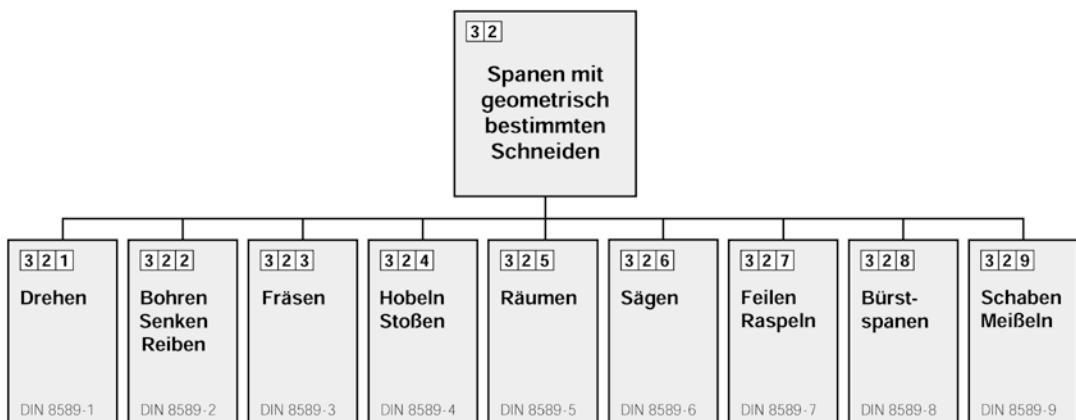


Abb. 4.23 Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden; Einteilung nach DIN 8589



Abb. 4.24 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden; Einteilung nach DIN 8589

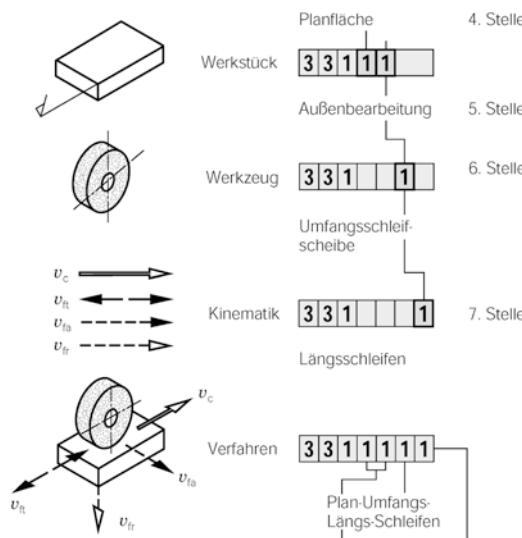


Abb. 4.25 Aufbau einer Verfahrensbenennung (Beispiel Schleifen).

- v_c Schnittgeschwindigkeit
- v_{ft} Vorschubgeschwindigkeit (tangential)
- v_{fa} Vorschubgeschwindigkeit (axial)
- v_{fr} Vorschubgeschwindigkeit (radial).

sind durch die ersten drei Stellen der Ordnungsnummer bestimmt (z. B. 3 | 3 | 1 Schleifen, Abb. 4.25). Weitere Verfahrensbenennungen ergeben sich aus werkstückbezogenen Verfahrensmerkmalen (4. bis 7. Stelle ON).

Einheitlich für alle spanenden Fertigungsverfahren unterscheidet man in der vierten Stelle der Ordnungsnummer zwischen *Plan-, Rund-, Schraub-, Profil- und Formspanen*.

Weitere mögliche *Ordnungsgesichtspunkte* sind Werkzeugtyp, Kinematik, Art der Werkstückaufnahme und Werkzeugstoff. Als Beispiel zeigt Abb. 4.25 den systematischen Aufbau einer *Verfahrensbenennung* beim Schleifen, die die primären Verfahrensmerkmale Werkstück, Werkzeug und Kinematik in Form einer Zahlenkombination miteinander verbindet.

4.3.2 Technische und wirtschaftliche Bedeutung

Fertigungsverfahren stehen miteinander im Wettbewerb. Trotz zunehmender Konkurrenz, besonders durch umformende Fertigungsverfahren,

konnten die spanenden Fertigungsverfahren wegen der erreichbaren hohen Fertigungsgenauigkeit und geometrisch nahezu unbegrenzten Bearbeitungsmöglichkeiten ihre bedeutende Stellung behaupten.

Der wertmäßige Anteil spanender Werkzeugmaschinen beträgt nach einer Statistik (VDMA 2021) 73 % gegenüber einem Anteil von 27 % bei umformenden Werkzeugmaschinen, gemessen an der Gesamtproduktion der Werkzeugmaschinen in der Bundesrepublik Deutschland. Der Rest entfällt auf Zubehörteile, Reparation und Instandhaltung.

4.4 Grundbegriffe der Zerspantechnik

Die grundlegenden Begriffe der Zerspantechnik sind nach DIN 6580/81, DIN 6583/84 und international nach ISO 3002 einheitlich für alle spanenden Fertigungsverfahren festgelegt. Eine visuelle Kurzeinführung findet man zum Drehen unter: youtube *wissensfloater* (erstellt vom BZI Remscheid).

4.4.1 Bewegungen und Geometrie von Zerspanvorgängen

Beim Spanen wird die zu erzeugende Werkstückform einmal durch die Geometrie des Werkzeugs und zum anderen durch die Relativbewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug (Wirkpaar) bestimmt. Die während der Spanabnahme ausgeführten Relativbewegungen setzen sich wie in Abb. 4.26 aus einer Schnitt- sowie einer oder mehreren Vorschubbewegungen zusammen.

Die *Schnittbewegung* wird gekennzeichnet durch den Vektor der Schnittgeschwindigkeit v_c für einen bestimmten Schneidenpunkt (Kontaktpunkt) zwischen Werkstück und Werkzeug.

Die *Vorschubbewegung* ermöglicht zusammen mit der Schnittbewegung eine Spanabnahme. Sie kann schrittweise oder stetig erfolgen, und sie kann sich auch aus mehreren Komponenten zusammensetzen. Sie wird ge-

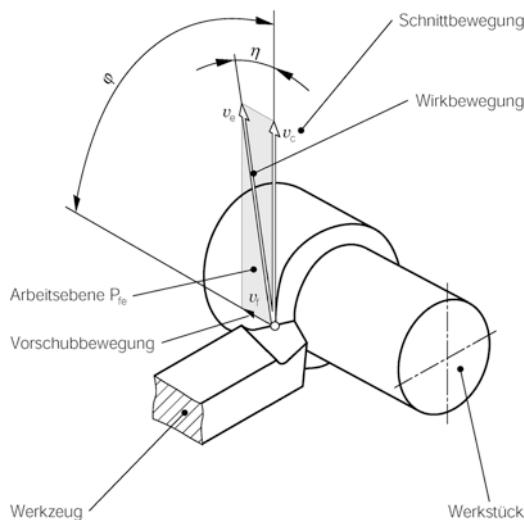


Abb. 4.26 Bewegungen, Arbeitsebene P_{fe} , Vorschubrichtungswinkel φ und Wirkrichtungswinkel η beim Drehen. (nach DIN 6580)

kennzeichnet durch den Vektor der *Vorschubgeschwindigkeit* v_f .

Die *Wirkbewegung* ist die resultierende Bewegung aus Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit. Sie wird gekennzeichnet durch den Vektor der *Wirkgeschwindigkeit* v_e .

Für das Wirkpaar Werkstück/Werkzeug und für den Ablauf des Zerspanvorgangs ist es meist belanglos, ob die Bewegungen vom Werkstück oder vom Werkzeug ausgeführt werden. Hingegen ist es von entscheidender Bedeutung für den Aufbau der Werkzeugmaschine, wie die Bewegungen auf Werkstück und Werkzeug aufgeteilt sind.

Weitere Bewegungen sind *Anstell-, Zustell-* und *Nachstellbewegungen*. Diese Bewegungen sind nicht unmittelbar an der Spanentstehung beteiligt.

Die einheitliche Betrachtung der spanenden Fertigungsverfahren erfordert die Einführung der Hilfsgrößen Vorschubrichtungswinkel φ und Wirkrichtungswinkel η (Abb. 4.26). Mit ihnen lassen sich kinematische Unterschiede zwischen den verschiedenen spanenden Fertigungsverfahren kennzeichnen.

Der *Vorschubrichtungswinkel* φ ist der Winkel zwischen Vorschubrichtung und Schnitt-

richtung. Der *Wirkrichtungswinkel* η ist der Winkel zwischen Wirkrichtung und Schnittrichtung. Allgemein gilt:

$$\tan \eta = \frac{\sin \varphi}{v_c/v_f + \cos \varphi}. \quad (4.5)$$

Der Vorschubrichtungswinkel φ ist verfahrensabhängig und beträgt beispielsweise beim Drehen $\varphi = 90^\circ$, während sich beim Fräsen und Schleifen der Wert des Vorschubrichtungswinkels ändert.

Der Wirkrichtungswinkel η ist abhängig vom jeweiligen Geschwindigkeitsquotienten v_c/v_f und nimmt für viele Zerspanvorgänge, z. B. beim Schleifen, vernachlässigbar kleine Werte an. Beim Schraubdrehen dagegen entspricht der Wirkrichtungswinkel η dem Steigungswinkel der erzeugten Schraubfläche.

Eine wichtige Bezugsebene ist die *Arbeitsebene*. Sie ist eine gedachte Ebene, die durch die Vektoren der Schnittgeschwindigkeit und der Vorschubgeschwindigkeit(en) durch den jeweils betrachteten Schneidenpunkt gelegt wird. In ihr vollziehen sich die an der Spanentstehung beteiligten Bewegungen.

4.4.2 Eingriffe von Werkzeugen

Zum Kennzeichnen des Eingriffs eines spanenden Werkzeugs benötigt man die Begriffe *Vorschub* f , *Schnitttiefe* bzw. *Schnittbreite* a_p und den *Arbeitseingriff* a_e sowie den *Vorschubeingriff* a_f entsprechend Abb. 4.27 und 4.28.

Der *Vorschub* f ist die Ortsveränderung der Schneide bzw. des Werkzeugs in Richtung der Vorschubbewegung je Umdrehung oder je Hub des Werkzeugs oder Werkstücks, gemessen in der Arbeitsebene. Die *Schnitttiefe* bzw. *Schnittbreite* f ist die Tiefe bzw. Breite des momentanen Eingriffs eines Werkzeugs, senkrecht zur Arbeitsebene gemessen.

Bei rotierenden Werkzeugen (z. B. Fräser, Schleifscheibe) wird zur Bestimmung des Werkzeugeingriffs zusätzlich der *Arbeitseingriff* a_e benötigt. Diese Eingriffsgröße beschreibt den momentanen Eingriff des Werkzeugs mit dem

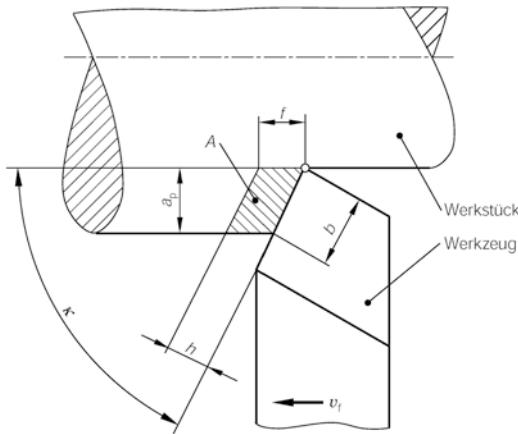


Abb. 4.27 Eingriffs- und Spanungsgrößen beim Längsdrehen.

a_p Schnitttiefe, f Vorschub, h Spanungsdicke, b Spanungsbreite, A Spanungsquerschnitt, κ Einstellwinkel

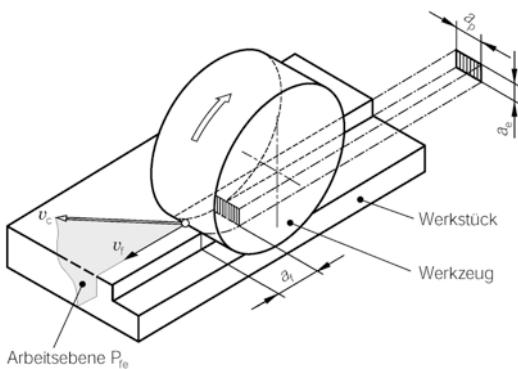


Abb. 4.28 Eingriffsgrößen beim Umfangsfräsen und Umfangsschleifen.

a_p Schnittbreite a_c Arbeitseingriff a_f Vorschubbeintrag

Werkstück, gemessen in der Arbeitsebene und senkrecht zur Vorschubrichtung.

Der *Vorschubbeintrag* a_f bezeichnet die Größe des Eingriffs des Werkzeugs in Vorschubrichtung.

4.4.3 Spanungsgrößen

Während Vorschub und Eingriffsgrößen Maschineneinstellgrößen sind, werden für die Berechnung von Zerspanvorgängen vor allem die aus diesen Größen abgeleiteten Spanungsgrößen benötigt. Diese beschreiben die Abmessungen

der vom Werkstück abzuspanenden Schichten und sind nicht identisch mit den Abmessungen der durch den Zerspanvorgang entstehenden Späne (Abschn. 4.5.2).

Der *Spanungsquerschnitt* A (Abb. 4.27) ist die senkrecht zur Schnittrichtung projizierte Querschnittsfläche eines abzunehmenden Spans. Für Drehmeißel mit geraden Schneiden und scharfkantigen Schneidenecken gilt

$$A = a_p f = b h. \quad (4.6)$$

Die *Spanungsbreite* b gibt die Breite, die *Spanungsdicke* h die Dicke des Spanungsquerschnitts an.

Die geometrischen Zusammenhänge zwischen Vorschub, Eingriffs- und Spanungsgrößen gehen aus Abb. 4.27 hervor. Bei vereinfachter Betrachtung gelten die Beziehungen

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa}, \quad (4.7)$$

$$h = f \cdot \sin \kappa. \quad (4.8)$$

Eine wichtige Spanungsgröße, besonders beim Vergleich von spanenden Fertigungsverfahren, ist das *Zeitspannungsvolumen* Q_w . Dieses ist das auf eine Zeiteinheit bezogene vom Werkstück abzuspannde Werkstoffvolumen (Spanungsvolumen).

Für das Zeitspannungsvolumen beim Drehen gilt

$$Q_w = A v_c = d_m a_p v_f. \quad (4.9)$$

Hierbei ist d_m der mittlere Durchmesser der vom Werkzeug nach einer Zustellung in einem Durchgang vom Werkstück abzuspanenden Werkstoffsschicht (Spanungsschicht).

4.4.4 Geometrie am Schneidteil

Wie aus Abb. 4.29 hervorgeht, wird der *Schneidteil* eines spanenden Werkzeugs aus Span-, Haupt- und Nebenfreiflächen gebildet. Die *Spanfläche* ist die Fläche, auf der der Span abläuft. Die *Freiflächen* sind den am Werkstück entstehenden Schnittflächen zugekehrt.

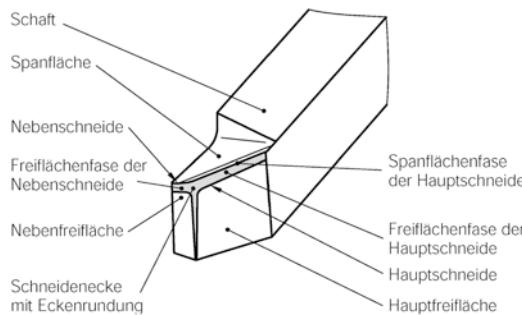


Abb. 4.29 Flächen, Fasen, Schneiden und Schneiden-ecken am Dreh- oder Hobelmeißel. (nach DIN 6581)

Die Schnittlinien der Span- und Freiflächen bilden die Schneiden des Werkzeugs. Man unterscheidet zwischen *Haupt-* und *Nebenschneiden*. Hauptschneiden weisen bei Betrachtung in der Arbeitsebene in Vorschubrichtung, Nebenschneiden nicht. Die *Schneidenecke* ist diejenige Ecke des Werkzeugs, an der Haupt- und Nebenschneiden mit der Spanfläche zusammentreffen. Sie ist vielfach mit einer Eckenrundung oder Eckenfase versehen.

Die *Werkzeugwinkel* werden durch die Stellung der Flächen am Schneidteil zueinander bestimmt. Zwecks Definition der Winkel am Schneidteil hat man entsprechende Bezugs-

systeme eingeführt. Man unterscheidet zwischen dem Werkzeug- und dem Wirkbezugssystem. Die im *Werkzeugbezugssystem* gemessenen Werkzeugwinkel kennzeichnen wie in Abb. 4.30 die Geometrie des Schneidteils und sind für die Herstellung und Instandhaltung der Werkzeuge von Bedeutung. Die im *Wirkbezugssystem* gemessenen Wirkwinkel sind für die Darstellung des Zerspanungsvorgangs von Bedeutung.

Die *Bezugssysteme* zum Bestimmen der Winkel am Schneidteil enthalten außer der jeweiligen *Bezugsebene* die *Schneidenebene* und die *Keilmessebene*. Die Ebenen stehen jeweils aufeinander senkrecht. Als zusätzliche Ebene wird die *Arbeitsebene* benötigt.

Bezugsebene für das Werkzeugbezugssystem ist die *Werkzeugbezugsebene*. Sie wird durch den betrachteten Schneidenpunkt möglichst senkrecht zur angenommenen Schnittrichtung gelegt, aber nach einer Ebene, Achse oder Kante des Werkzeugs ausgerichtet. Bei Dreh- und Hobelmeißeln liegt die Werkzeugbezugsebene meist parallel zur Werkzeugauflagefläche.

Bezugsebene für das Wirkbezugssystem ist die senkrecht zur Wirkrichtung stehende *Wirkbezugsebene*. Die *Schneidenebene* enthält die Schneide und steht senkrecht zur Wirk- bzw.

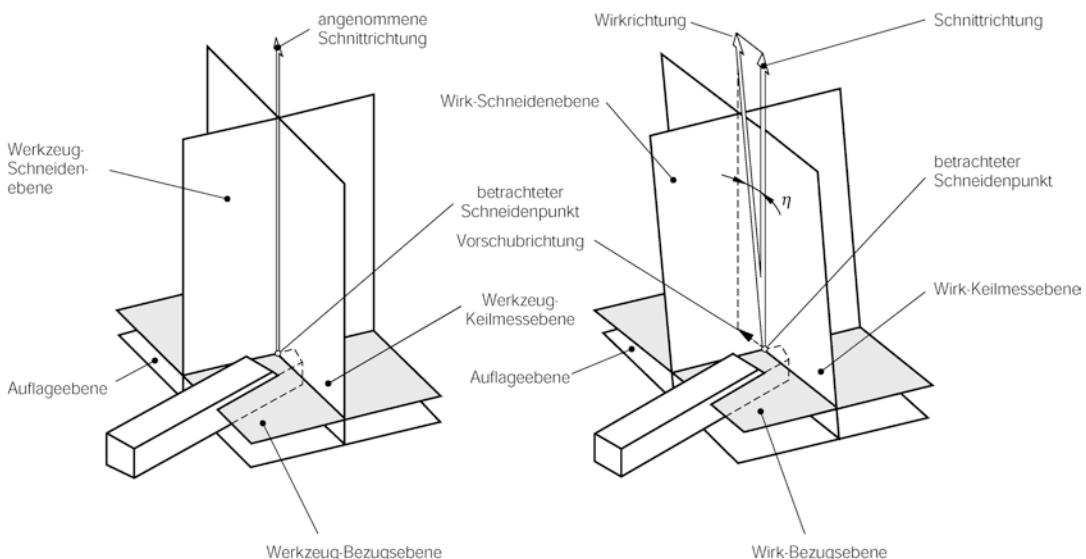


Abb. 4.30 Werkzeug- und Wirkbezugssystem am Drehmeißel. (nach DIN 6581)

Werkzeugbezugsebene. Die Keilmessebene ist eine Ebene, die senkrecht zur Wirk- bzw. Werkzeugbezugsebene und senkrecht zur Wirk- bzw. Werkzeugschneidenebene steht.

Die für die Zerspanung wichtigsten Winkel zeigt Abb. 4.31. Spanwinkel γ , Keilwinkel β und Freiwinkel α werden in der Keilmessebene gemessen ($\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$). Der Spanwinkel γ ist der Winkel zwischen Spanfläche und Werkzeugbezugsebene, der Keilwinkel β ist der Winkel zwischen Span- und Freifläche, und der Freiwinkel α ist der Winkel zwischen Freifläche und Werkzeugschneidenebene.

In der Werkzeugbezugsebene werden der Werkzeugeinstellwinkel κ und der Eckenwinkel ε angegeben. Der Werkzeugeinstellwinkel wird zwischen Werkzeugschneidenebene und Arbeitsebene, der Eckenwinkel zwischen den Schneidenebenen von zusammengehörigen Haupt- und Nebenschneiden gemessen. In der Werkzeugschneidenebene wird der Neigungswinkel λ als Winkel zwischen Schneide und Werkzeugbezugsebene definiert.

Das Symbol für den Werkzeugwinkel hat grundsätzlich keinen Index, dagegen erhalten die Symbole für die Wirkwinkel zur Unterscheidung den Index „e“ (von effektiv).

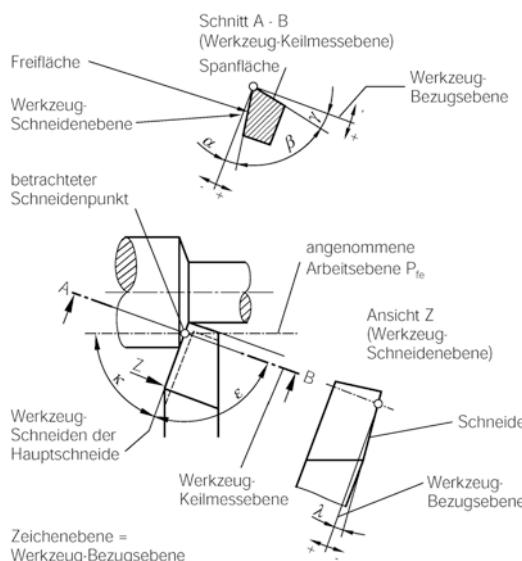


Abb. 4.31 Werkzeugwinkel für einen Punkt der Hauptschneide am Drehmeißel. (nach DIN 6581)

4.4.5 Kräfte und Leistungen

Die bei einem Zerspanvorgang auf das Werkstück wirkende *Zerspankraft* F kann in verschiedene Komponenten zerlegt werden, wie Abb. 4.32 zeigt. Bezogen auf die Arbeitsebene wird die Zerspankraft in die *Aktivkraft* F_a und die *Passivkraft* F_p zerlegt. Die Aktivkraft ist die Komponente der Zerspankraft in der Arbeitsebene und, da in der Arbeitsebene die Bewegungen zur Spanentstehung ausgeführt werden, leistungsbestimmend. Die Passivkraft ist die Komponente der Zerspankraft senkrecht zur Arbeitsebene und an den Leistungen beim Zerspanen nicht beteiligt.

Bezogen auf die Schnittrichtung wird die Aktivkraft in die *Schnittkraft* F_c , bezogen auf die Vorschubrichtung in die *Vorschubkraft* F_f und, bezogen auf die Wirkrichtung, in die *Wirkkraft* F_e zerlegt. Es gilt

$$F = \sqrt{F_a^2 + F_p^2} = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_e^2}. \quad (4.10)$$

Die Leistungen beim Zerspanen ergeben sich aus dem Produkt der jeweiligen Geschwindigkeitskomponenten und der in ihren Richtungen wirkenden Komponenten der Zerspankraft. Als *Schnittleistung* erhält man

$$P_c = v_c F_c, \quad (4.11)$$

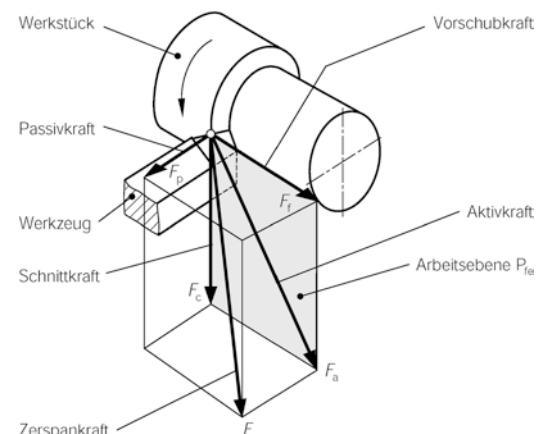


Abb. 4.32 Komponenten der Zerspankraft beim Drehen, F_c ist meist doppelt so groß wie F_f . (nach DIN 6584)

als Vorschubleistung

$$P_f = v_f F_f \quad (4.12)$$

und als Wirkleistung

$$P_e = v_e F_e. \quad (4.13)$$

Die Wirkleistung ist auch die Summe aus Schnittleistung P_c und Vorschubleistung P_f

$$P_e = P_c + P_f. \quad (4.14)$$

4.4.6 Standzeit- und Verschleißbegriffe

Das *Standvermögen* kennzeichnet die Fähigkeit eines Wirkpaars (Werkstück und Werkzeug), bestimmte Zerspanvorgänge durchzustehen. Es ist abhängig von den *Standbedingungen*, die durch alle am Zerspanvorgang beteiligten Elemente beeinflusst werden, nämlich durch

- das Werkstück (Werkstückform, Werkstückstoff),
- das Werkzeug (z. B. Geometrie am Schneidteil, Werkzeugstoff),
- die Werkzeugmaschine sowie durch weitere
- Randbedingungen (z. B. Kühlshmierung).

Zur Beurteilung des Standvermögens werden Standkriterien als Grenzwerte für unerwünschte Veränderungen am Werkzeug, am Werkstück oder am Bearbeitungsverlauf herangezogen. Als Grenzwerte können alle am Werkzeug messbaren Verschleißgrößen, aber auch die am Werkstück messbaren Eigenschaften, wie beispielsweise Rauheitsveränderungen oder während des Zerspanvorgangs messbare Änderungen von Zerspankraftkomponenten, sowie die Temperaturen beim Zerspanen dienen.

Standgrößen sind Zeiten, Wege oder Mengen, die bis zum Erreichen eines festgelegten Standkriteriums unter den gewählten Standbedingungen erzielt werden können (z. B. *Standzeiten*, *Standwege*, *Standmengen*). Zur eindeutigen Beschreibung des Standvermögens sind die Standgrößen stets in Verbindung mit

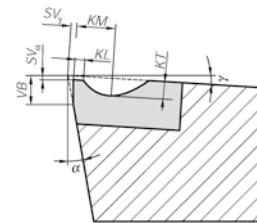


Abb. 4.33 Verschleißgrößen am Schneidteil eines Drehmeißels.

γ Spanwinkel α Freiwinkel SV_x Schneidenversatz, in Richtung der Freifläche gemessen SV_y Schneidenversatz, in Richtung der Spanfläche gemessen VB Verschleißmarkenbreite an der Freifläche KM Kolkmittendistanz KT Kolktiefe KL Kolklippenbreite

dem Standkriterium und den zugehörigen Standbedingungen anzugeben.

Beispiel: $T_{VB\ 0,2\ 200} = 60$ Minuten

Hierin ist das Standvermögen durch die Angabe der Standzeit T bis zum Erreichen der Verschleißmarkenbreite $VB = 0,2$ mm bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 200$ m/min bestimmt. In der Praxis werden häufig *Verschleißgrößen* als Standkriterium herangezogen. Hinsichtlich des Verschleißorts am Schneidteil eines Drehwerkzeugs unterscheidet man die in Abb. 4.33 dargestellten Verschleißgrößen. Als Standkriterium sind besonders der *Freiflächenverschleiß* und der *Kolkverschleiß* von Bedeutung.

4.5 Grundlagen zum Spanen

Die *Zerspanbarkeit* eines Werkstücks kann nicht durch eine allgemeingültige physikalische Gesetzmäßigkeit beschrieben werden. Wichtige Beurteilungskriterien sind z. B. die Spanbildung, die Schnittkräfte, das Standvermögen und die Oberflächengüte. Diese sind je nach Bearbeitungsaufgabe und Fertigungsverfahren von unterschiedlicher Bedeutung. Zur Klärung der verschiedenen Einflussgrößen und Wirkungen von Zerspanvorgängen werden Modellvorstellungen verwendet, um die einzelnen Abläufe rechnerisch erfassen zu können.

4.5.1 Spanbildung

Die Vorgänge bei der Spanbildung sind am einfachsten zu überblicken, wenn sie auf den sog. Orthogonalprozess bezogen werden. Die Spanbildung wird dabei als zweidimensionaler Vorgang in einer Ebene senkrecht zur Schneide dargestellt. Der Orthogonalprozess ist beispielsweise beim Plan-Längsdrehen eines Rohres mit einem Einstellwinkel $\kappa = 90^\circ$ wie in Abb. 4.34 weitgehend verwirklicht.

Ausgehend vom Orthogonalprozess entwickelten *Piispanen* und *Merchant* eine sehr vereinfachte *Modellvorstellung der Spanbildung*, Abb. 4.35 erläutert dies im Einzelnen. Bei diesem Modell stellt man die Ausbildung von Gleitlinien (Linien maximaler Verformung) in den Vordergrund der Betrachtung. Die Spanentstehung wird auf die *Scherebene* bezogen, die mit der Schnittrichtung den *Scherwinkel* Φ einschließt.

Der Werkstückstoff gleitet lamellenförmig entlang der Scherebene ab. Die Kristallverformung im Bereich der Scherebene äußert sich in Strukturlinien, die sich an Hand von Spanwurzelaufnahmen nachweisen lassen. Sie bilden mit der Scherebene den *Strukturwinkel* η .

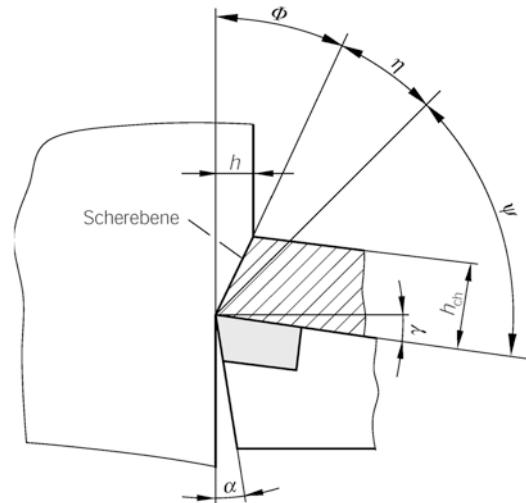


Abb. 4.35 Spanbildungsmodell . (nach Merchant)
 ϕ Scherwinkel η Strukturwinkel Ψ Fließwinkel h Spannungsdicke h_{ch} Spandicke γ Spanwinkel α Freiwinkel

Der Winkel zwischen den Strukturlinien und der Spanfläche wird *Fließwinkel* Ψ genannt.

Das Scherebenenmodell ist eine sehr idealisierte Vorstellung von den Vorgängen bei der Spanbildung. Neuere Untersuchungen von Warnecke kommen den tatsächlichen Gegebenheiten wesentlich näher. Ausgehend vom Orthogonalschnitt werden die an der Spanentstehung beteiligten Werkstückstoffbereiche in einzelne Zonen aufgeteilt, wie Abb. 4.36 zeigt. Die *primäre Scherzone* (Zone 1) wird als unmittelbare *Spanentstehungszone* angenommen. In der *Formungsvorlaufzone* (Zone 2) entstehen durch den Spanbildungsvorgang Spannungen, die elastische und plastische Verformungen im Werkstück hervorrufen. Durch Reibung zwischen der Werkzeugfreifläche und der gefertigten Fläche bzw. Werkzeugspanfläche und Spanunterseite entstehen Schubspannungen, die zu plastischen Verformungen in den Zonen 3 und 4 führen. Im Bereich der Schneidkante (Zone 5) erfolgt die eigentliche Trennung des Werkstückstoffs. Hohe mechanische und thermische Belastungen in diesen *sekundären Scherzonen* verursachen den Werkzeugverschleiß.

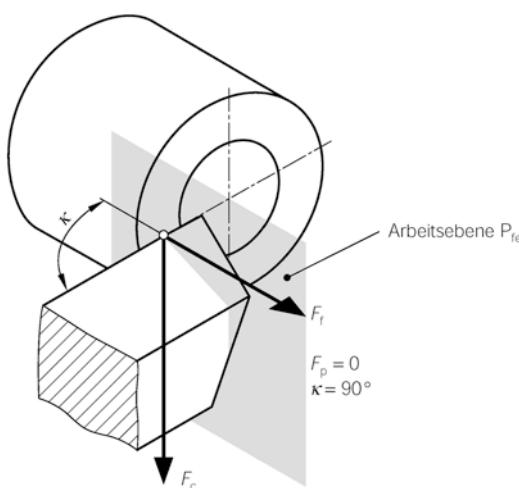


Abb. 4.34 Plan-Längsdrehen eines Rohres; Beispiel für einen Orthogonalprozess

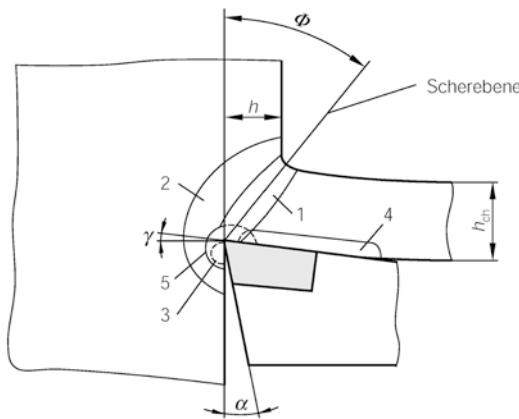


Abb. 4.36 Spanbildungsmodell. (nach Warnecke)
 α Freiwinkel γ Spanwinkel Φ Scherwinkel h Spanungsdicke h_{ch} Spandicke 1 primäre Scherzone (Spanentstehungszone) 2 Verformungsvorlaufzone 3; 4 sekundäre Scherzonen (Reibungszone zwischen Werkzeugfreifläche und gefertigter Fläche bzw. Werkzeugspanfläche und Spanunterseite) 5 Trenngebiet.

4.5.2 Spanstauchung

Verformungen und Reibungsvorgänge in den vorgenannten Spanbildungszonen bewirken die Spanstauchung, die man als Änderung der Spangrößen gegenüber den zugehörigen Spannungsgrößen bezeichnet. Entsprechend den Abmessungen des Spans unterscheidet man.

Spandickenstauchung

$$\lambda_h = \frac{\text{Spandicke } h_{ch}}{\text{Spanungsdicke } h} > 1 \quad (4.15)$$

Spanbreitenstauchung

$$\lambda_b = \frac{\text{Spanbreite } b_{ch}}{\text{Spanungsbreite } b} > 1 \quad (4.16)$$

Durch die Stauchung des Spanquerschnitts

$$\lambda_A = \lambda_h \lambda_b \quad (4.17)$$

wird bewirkt, dass die Spanlänge kürzer ist als der von der Schneide zurückgelegte Schnittweg. Die Spandickenstauchung λ_h lässt sich auch durch das Verhältnis von *Schnittgeschwindigkeit*

v_c und der *Spangeschwindigkeit* v_{sp} als Komponente in Ablaufrichtung des Spans ausdrücken. Durch vektorielle Zusammensetzung der in der Spanentstehungszone auftretenden Geschwindigkeiten wie in Abb. 4.37 erhält man nach Kronenberg

$$\lambda_h = \frac{v_c}{v_{sp}} = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi}. \quad (4.18)$$

4.5.3 Scherwinkelgleichungen

Aus der Geometrie der Spanentstehungszone lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Spandickenstauchung λ_h , dem Spanwinkel γ und dem Scherwinkel Φ ableiten (Abb. 4.37). Es gilt unter der Annahme eines freien, ungebundenen Schnittes (Orthogonalprozess)

$$\tan \Phi = \frac{\cos \gamma}{\lambda_h - \sin \gamma}. \quad (4.19)$$

Die Beziehung ist deshalb von besonderer Bedeutung, weil Spanwinkel und Spandickenstauchung verhältnismäßig einfach gemessen werden können und die hieraus errechneten Werte für den Scherwinkel wesentliche Aussagen über den Spanbildungsvorgang ermöglichen. Weitere aus dem Schrifttum bekannte Scherwinkelgleichungen beziehen sich auf Abhängigkeiten zwischen dem Spanwinkel γ und dem Gleitreibungskoeffizienten μ auf der Spanfläche. Mit Hilfe dieser Gleichungen, der Scherfestigkeit sowie entsprechender geometrischer Zusammenhänge können die Zerspankraft und ihre Komponenten berechnet werden.

4.5.4 Spanarten

Nach ihrer Entstehung unterscheidet man im Wesentlichen wie in Abb. 4.38 vier Spanarten:

- Reiß- oder Bröckelspäne,
- Scherspäne,
- Lamellenspäne,
- Fließspäne.

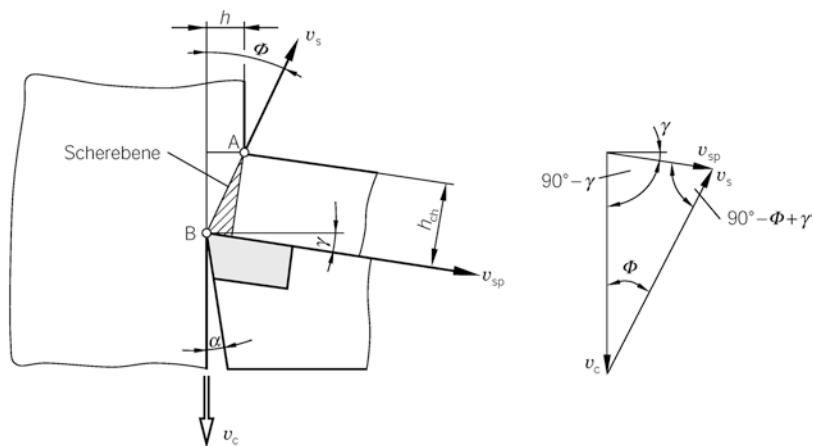


Abb. 4.37 Geometrie und Geschwindigkeitsverhältnisse in der Spanentstehungszone. α Freiwinkel γ Spanwinkel ϕ Scherwinkel h Spanungsdicke h_{ch} Spandicke v_c Schnittgeschwindigkeit v_s Schergeschwindigkeit v_{sp} Spangeschwindigkeit

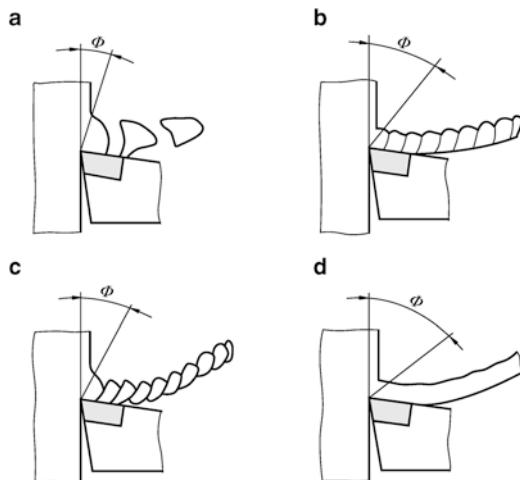


Abb. 4.38 Spanarten: **a** Reißspan, **b** Scherspan, **c** Lamellenspan, **d** Fließspan

Reiß- bzw. Bröckelspäne treten vorwiegend bei spröden Werkstückstoffen auf, z. B. bei Eisen-gusswerkstoffen und Bronzen, und haben meist sehr schlechte Oberflächen zur Folge.

Beim Drehen mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c < 10 \text{ m/min}$ und negativen Spanwinkeln können Reißspäne z. B. auch bei Bau-stählen entstehen.

Scherspäne sind je nach Werkstückstoff in einem Schnittgeschwindigkeitsbereich von 20

bis 80 m/min zu erwarten. Die Spanteile werden in der Scherzone vollkommen voneinander getrennt und verschweißen unmittelbar danach wieder.

Fließspäne entstehen beim Drehen von Bau-stählen mit einer Schnittgeschwindigkeit von ungefähr $v_c = 80 \text{ m/min}$. Der Werkstoff beginnt im Bereich der Scherzone kontinuierlich zu fließen. Die einzelnen Spanlamellen verschweißen sehr stark untereinander und sind i. Allg. mit bloßem Auge nicht mehr wahrnehmbar.

Lamellenspäne sind Fließspäne mit ausgeprägten Lamellen, die durch Verfestigung des Werkstückstoffs während des Schervorgangs entstehen. Sie entstehen bei nicht zu zähen Werkstückstoffen mit ungleichmäßigem Gefüge und größeren Spanungsdicken.

Den Einfluss von Scherwinkel ϕ , Schnittgeschwindigkeit v_c , Spanwinkel γ und Gleitreibungskoeffizienten μ auf die Spanarten zeigt Abb. 4.39. Bei konstantem Reibwert μ steigt der Scherwinkel mit dem Spanwinkel an und verschiebt die dargestellten Zusammenhänge in das Gebiet der Fließspanbildung.

Im Bereich der Scherspanbildung, besonders bei Werkstückstoffen mit hoher Bruchdehnung, kommt es zur Bildung von *Aufbauschneiden*. Dabei werden stark kaltverfestigte harte Schichten aufgestaut, wie dies Abb. 4.40 verdeutlicht. Es bilden sich keilförmige Schneidenansätze,

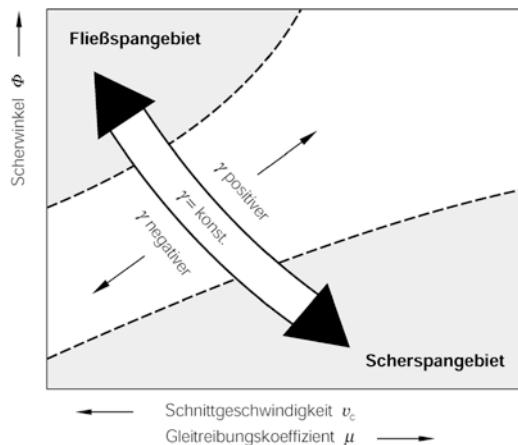


Abb. 4.39 Einfluss von Scherwinkel ϕ , Schnittgeschwindigkeit v_c , Spanwinkel γ und Gleitreibungskoeffizient μ auf die Spanarten. (nach Hucks)

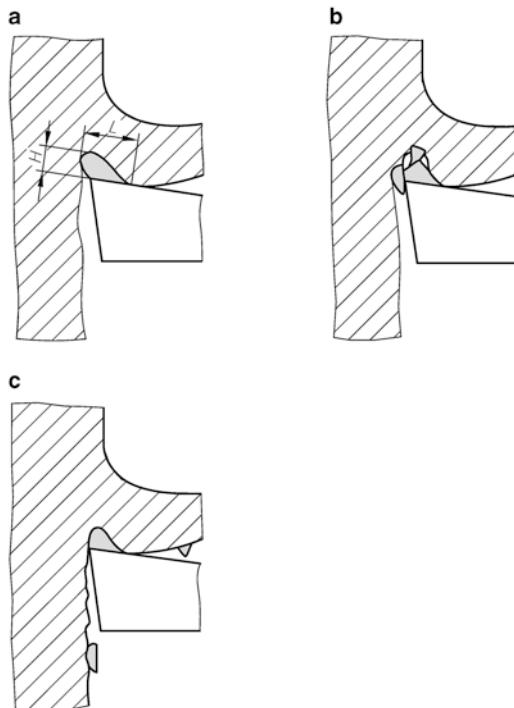


Abb. 4.40 Aufbauschneidenbildung. H Höhe der Aufbauschneide L Länge der Aufbauschneide

die z. T. die Funktion der Schneide übernehmen. Der Bildungsmechanismus kann wie folgt beschrieben werden:

- Kleinste Werkstoffpartikel bleiben zunächst in Schneidennähe haften; es kommt zu Verschweißungen, Abb. 4.40a.
- Durch ständiges Hinzukommen neuer Werkstoffpartikel nimmt die Aufbauschneide kontinuierlich bis zu einer bestimmten Größe zu; hierbei lösen sich Teile der Aufbauschneide durch den Spandruck wieder ab, Abb. 4.40b.
- Die Werkstoffpartikel wandern an der Spanunterseite und der gefertigten Werkstückfläche ab, und es entstehen charakteristische schlechte Oberflächen, Abb. 4.40c.

Bei höheren Schnittgeschwindigkeiten gelangt man an der Wirkstelle in den Bereich der Rekristallisationstemperatur, so dass sich die aufgeschweißten Werkstoffpartikel wieder entfestigen und von der Schneide lösen. Das Diagramm in Abb. 4.41 lässt die Zusammenhänge erkennen.

4.5.5 Spanformen

Außer den verschiedenen Spanarten lässt sich die Gestalt des Spans durch unterschiedliche Spanformen beschreiben. Die Beherrschung der Spanformbildung gewinnt mit zunehmender Automatisierung der Fertigung und mit gesteigerten Schnittgeschwindigkeiten immer mehr an Bedeutung.

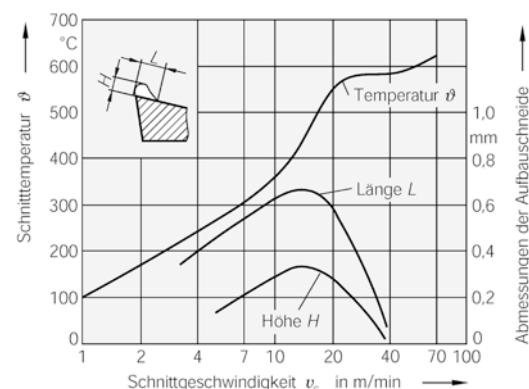


Abb. 4.41 Einfluss von Schnitttemperatur ϑ und Schnittgeschwindigkeit v_c auf die Abmessungen von Aufbauschneiden. (nach Opitz)

Für das Drehen lassen sich verschiedene Spanformen entsprechend Abb. 4.42 klassifizieren. Eine unvorteilhafte Spanbildung ist für den Bedienenden eine Gefahrenquelle. Ungünstige Spanformen beeinflussen die Werkstückqualität und können durch Beschädigungen an dem Werkzeug, der Werkzeugmaschine und an den Späneentsorgungsanlagen erhebliche Störungen im Arbeitsablauf verursachen. Un erwünscht sind besonders Band-, Wirr- und Flachwendelspäne, die im Verhältnis zu ihrem eigentlichen Spanvolumen einen großen Spanraumbedarf beanspruchen. Der Raumbedarf der Späne kann durch die *Spanraumzahl R* ausgedrückt werden, die sich aus dem Verhältnis nach 4.20 ergibt:

$$R = \frac{\text{Raumbedarf der Spanmenge}}{\text{Werkstoffvolumen der gleichen Spanmenge}}. \quad (4.20)$$

Band- und Wirrspäne bilden unerwünschte Formen mit Spanraumzahlen $R > 90$.

Spanform		Spanraumzahl R	Beurteilung
Bandspäne			
Wirrspäne		≥ 90	ungünstig
Wendel- späne		≥ 50	brauchbar
		≥ 25	
Spiralspäne		≥ 8	gut
Spanbruch- stücke		≥ 3	brauchbar

Abb. 4.42 Spanformen bei der Drehbearbeitung und deren Beurteilung

Vorteilhaft sind z. B. kurze zylindrische Wendelspäne, Spiralwendelspäne und Spiralspäne mit Spanraumzahlen im Bereich $R = 25$ bis $R = 8$. Möglichkeiten zur *Beeinflussung der Spanform* ergeben sich durch den

- *Werkstückstoff*, die
- *kinematische Spanbrechung*, die
- *Anwendung von Spanformstufen* und durch das
- *Ändern der Werkzeuggeometrie* und der *Maschineneinstellbedingungen*.

In der Praxis üblich ist die Verwendung von aufgesetzten oder eingesinterten Spanformstufen und Werkstückstoffen mit spanformbeeinflussenden Legierungselementen, z. B. Schwefel, Blei, Selen oder Tellur bei Automatenstählen.

Die Geometrie von Spanformstufen wird weitgehend durch den zu zerspanenden Werkstückstoff und die Eingriffs- bzw. Spanungsgrößen bestimmt. Zur Beurteilung der Spanformung mittels Spanformdiagramme werden in der Praxis Spanformdiagramme, siehe etwa Abb. 4.43, herangezogen, die in Abhängigkeit von den je-

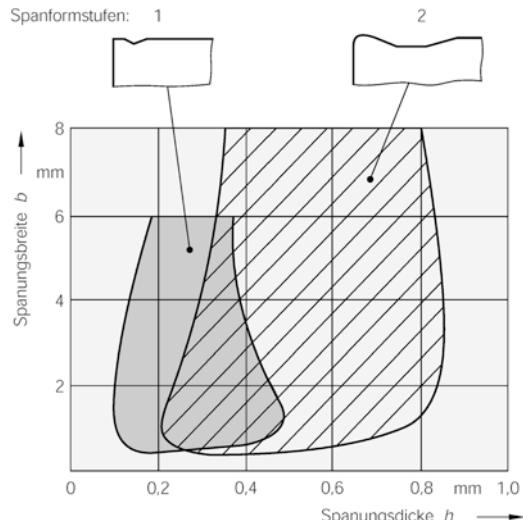


Abb. 4.43 Spanformdiagramm für verschiedene Geometrien von Spanformstufen nach Krupp-Widia (Werkstückstoff: C60, Schneidstoff: mehrlagiges beschichtetes Hartmetall Widalon TK 15, Schnittdaten: $v_c = 200 \text{ m/min}$, $\kappa = 95^\circ$)

weiligen Eingriffs- bzw. Spanungsgrößen die Bereiche mit guter Spanformung kennzeichnen.

4.5.6 Energieumwandlung beim Spanen

Die beim Spanen zugeführte mechanische Energie wird durch Verformungs- und Reibungsvorgänge in den an der Spanentstehung beteiligten Zonen nahezu vollständig in Wärme umgewandelt. Wärme entsteht in der Scherzone, im Trenngebiet und in den Reibungszonen zwischen Freifläche und gefertigter Werkstückfläche bzw. Spanfläche und Spanunterseite, wie aus Abb. 4.44 hervorgeht. 40 bis 75 % der zugeführten Energie wird in der Scherzone in Wärme umgesetzt. Aufgrund der komplexen Verformungs- und Reibungsmechanismen in den Spanentstehungszonen ist es bisher nicht mög-

lich, die auf Werkstück, Werkzeug, Span und Umwelt entfallenden Wärmemengen rechnerisch zu erfassen.

Messungen ergaben, dass der weitaus größte Teil der in den einzelnen Umwandlungsstellen entstehenden Wärme mit dem Span abgeführt wird. Die Wärmeaufteilung ist von den jeweiligen Schnittbedingungen abhängig. Bei hohen Schnittgeschwindigkeiten können bis zu 95 % der umgesetzten Wärmeenergie vom Span aufgenommen werden.

Abb. 4.44 zeigt die Temperaturverteilung im Werkstück, im Span und im Werkzeug beim Zerspanen von Stahl mit einem Hartmetallwerkzeug bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60 \text{ m/min}$.

4.5.7 Schneidstoffe

Als Schneidstoffe bezeichnet man Werkstoffe, die für den Schneideteil von spanenden Werkzeugen verwendet werden. Die Art der Beanspruchungen der Schneidstoffe ist außerordentlich vielfältig und führt zu einer Reihe von zufordernden Eigenschaften, wie z. B.

- Härte und Druckfestigkeit,
- Biegefestigkeit und Zähigkeit,
- Kantenfestigkeit,
- innere Bindefestigkeit,
- Warmfestigkeit,
- geringe Oxidations-, Diffusions-, Korrosions- und Klebneigung,
- Abriebfestigkeit.

Diese Forderungen sind teilweise gegensätzlicher Art; sie lassen sich darum bei der Schneidstoffherstellung nicht gleichzeitig verwirklichen. Tab. 4.1 gibt einen Überblick über Schneidstoffe für das Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden und einige wichtige Eigenschaften.

Die Entwicklung neuer Schneidstoffe hat in den letzten Jahren zu einem sprunghaften Anstieg der Schnittgeschwindigkeiten bei den spanenden Fertigungsverfahren geführt. Abb. 4.45 zeigt – ausgehend vom Zeitpunkt der

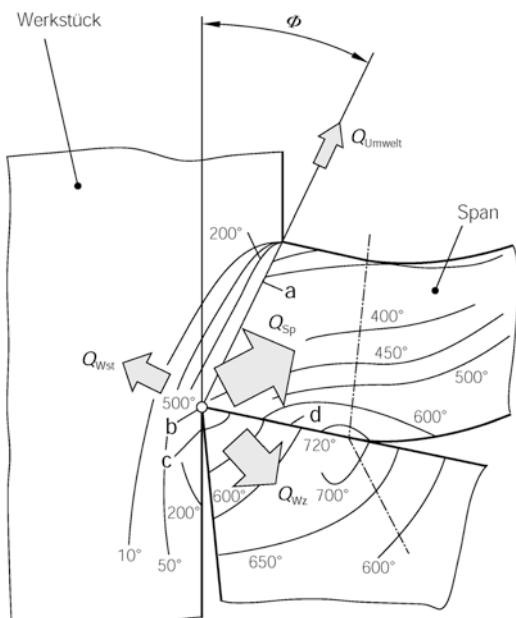
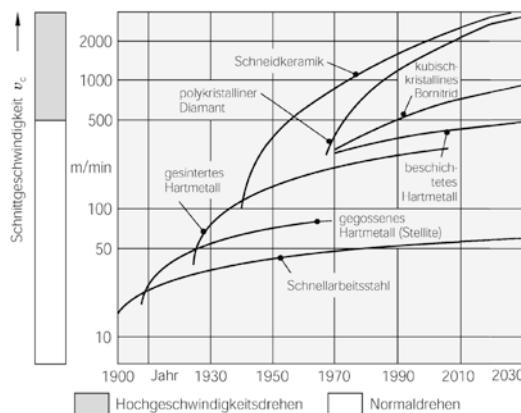


Abb. 4.44 Energieumwandlungsstellen und Temperaturverteilung in Werkstück, Span und Werkzeug beim Zerspanen von Stahl (Schneidstoff: Hartmetall P 20, Werkstückstoff: Stahl mit einer Fließspannung $k_f = 850 \text{ N/mm}^2$, Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60 \text{ m/min}$, Spanungsdicke $h = 0,32 \text{ mm}$, Spanwinkel $\gamma = 10^\circ$). **a** Scherebene **b** Trenngebiet **c** Reibungszone Freifläche **d** Reibungszone Werkzeugspanfläche

Tab. 4.1 Einteilung der Schneidstoffe und einige wichtige Eigenschaften

Schneidstoffe	Eigenschaften					
	Vickershärte HV 30	Temperatur- beständigkeit	Druck- festigkeit	Biege- festigkeit	Dichte	Elastizitäts- modul
		°C	N/mm ²	N/mm ²	kg/dm ³	10 ³ N/mm ²
Werkzeugstähle	700 bis 900	200 bis 300	2000 bis 3000	1800 bis 2500	7,85	220
Schnellarbeitsstähle	750 bis 1000	600 bis 800	2500 bis 3500	2500 bis 3800	8,0 bis 8,8	260 bis 300
Stellite	670 bis 785	700 bis 800	2000 bis 2500	2000 bis 2500	8,3 bis 8,8	280 bis 300
Hartmetalle	1300 bis 1700	1100 bis 1200	4000 bis 5900	800 bis 2200	6,0 bis 15,0	430 bis 630
Schneidkeramik	1400 bis 2400	1300 bis 1800	2500 bis 4500	300 bis 700	3,8 bis 7,0	300 bis 400
Bornitrid	4500	1500	4000	600	3,45	680
Diamant	bis 7000	700	3000	300	3,5	900 bis 1000

**Abb. 4.45** Entwicklung der anwendbaren Schnittgeschwindigkeiten beim Drehen mit verschiedenen Schneidstoffen im Lauf der Jahrzehnte

ersten Anwendung verschiedener Schneidstoffe – die bisherigen und zukünftig zu erwartenden Schnittgeschwindigkeitssteigerungen beim Drehen. Hierbei kann zwischen bisher gebräuchlichen Schnittgeschwindigkeitsbereichen und dem Bereich des *Hochgeschwindigkeitsdrehens* (High Speed Cutting HSC) unterschieden werden.

Der Anwendung in Bezug auf die Schnittgeschwindigkeit leistungsfähigerer neuer Schneidstoffe sind in vielen Bearbeitungsfällen, z. B. beim Gewindeschneiden, Reiben und Räumen, technologische und wirtschaftliche Grenzen gesetzt, so dass auch Werkzeugstähle und besonders Schnellarbeitsstähle zahlreiche Anwendungsbereiche finden.

4.5.7.1 Werkzeugstähle

Man unterscheidet je nach ihrer Zusammensetzung unlegierte und legierte Werkzeugstähle. Unlegierte Werkzeugstähle haben einen C-Gehalt von 0,6 bis 1,3 %. Legierte Werkzeugstähle enthalten zusätzlich bis zu 5 % Cr, W, Mo und V. Durch den Zusatz von carbidbildenden Legierungselementen werden die Verschleißfestigkeit, Anlassbeständigkeit und Warmfestigkeit erhöht. Für die spanende Metallbearbeitung auf modernen Werkzeugmaschinen haben Werkzeugstähle wegen ihrer vergleichsweise geringen Warmhärte von etwa 200 bis 300 °C kaum noch Bedeutung. In der spanenden Fertigung werden Werkzeugstähle heute nur noch für im niedrigen Schnittgeschwindigkeitsbereich arbeitende Handwerkzeuge verwendet.

4.5.7.2 Schnellarbeitsstähle

Schnellarbeitsstähle sind hochlegierte Werkzeugstähle. Ihr Grundgefüge besteht aus angelassenem Martensit mit eingelagerten Molybdän-Wolfram-Doppelcarbiden, Chrom- und Vanadiumcarbiden und nicht in Carbiden gebundenen, in der Stoffmatrix gelösten Anteilen der Legierungselemente W, Mo, V und Co.

Härte und Verschleißwiderstand der Schnellarbeitsstähle sind von der Härte des Grundgefüges sowie von der Anzahl und der Verteilung der ungelösten Carbide abhängig,

Tab. 4.2 Zusammensetzung, Eigenschaften und Anwendung gebräuchlicher Hartmetalle

Bezeichnung nach DIN EN 10027	Werkstoff-Nr. (DIN 17007)	chemische Zusammensetzung in %						Anwendung
		W	Mo	V	Co	Cr	C	
HS18-1-2-5	1.3255	18	0,7	1,6	4,8	4,0	0,80	Für große Spanungsquerschnitte bei der Stahl- und Gussbearbeitung
HS18-1-2-10	1.3265	18	0,85	1,5	10,0	4,0	0,75	
HS12-1-2	1.3318	12	0,85	2,5	–	4,0	0,85	Für mittlere und kleine Spanungsquerschnitte sowie Verschleißbeanspruchung
HS12-1-4-5	1.3202	12	0,8	3,8	4,8	4,0	1,35	
HS6-5-2	1.3343	6,4	5,0	1,9	–	4,0	0,90	
HS6-5-2-5	1.3243	6,4	5,0	1,9	4,8	4,0	0,92	
HS6-5-3	1.3344	6	5,0	3,0	–	4,0	1,2	
HS2-9-1	1.3346	2,0	9	1	–	4,0	0,8	
HS2-9-2	1.3348	1,7	8,6	2,0	–	3,8	1,00	

während die gute Anlassbeständigkeit und Warmhärte (bis etwa 600 °C) hauptsächlich von den in der Stoffmatrix gelösten Legierungsbestandteilen (Carbidbildner) beeinflusst wird.

Tab. 4.2 zeigt die Zusammensetzung und Verwendung gebräuchlicher Schnellarbeitsstähle. Diese werden mit den Kennbuchstaben HS (= High Speed) und der Angabe der prozentualen Anteile der wichtigsten Legierungselemente in der Reihenfolge W-Mo-V-Co bezeichnet. Die Legierungselemente beeinflussen bestimmte Eigenschaften der Schnellarbeitsstähle:

- **Kohlenstoff** ist der Träger der Härte in der Grundmasse und erhöht als Carbidbildner zusätzlich die Verschleißfestigkeit.
- **Chrom** beeinflusst die Durchhärtbarkeit und ist an der Caribildbildung maßgeblich beteiligt.
- **Molybdän** und **Wolfram** steigern die Warmhärte und Anlassbeständigkeit und erhöhen durch Bildung von Sondercarbiden den Verschleißwiderstand. Molybdän kann Wolfram ersetzen und ist bei gleichem Massengehalt aufgrund der halb so großen Dichte wirksamer. Molybdänhaltige Stähle verfügen über eine besonders große Zähigkeit.
- **Vanadium** verbessert die Verschleißeigenschaften.
- **Kobalt** erhöht die Warmhärte und die Anlassbeständigkeit.

Die Eigenschaften von Schnellarbeitsstählen werden im Wesentlichen von den Legierungselementen Wolfram und Molybdän bestimmt, so

dass sich die einzelnen Schnellarbeitsstahlqualitäten nach Legierungsgruppen W-Mo einteilen lassen.

Eine verhältnismäßig neue Entwicklung ist das Beschichten des Werkzeugs mit Hartstoffen auf der Basis von Titancarbid (TiC) und Titan-nitrid (TiN), um den Verschleißwiderstand von Schnellarbeitsstählen zu erhöhen. Durch *Beschichten* von Schnellarbeitsstahlwerkzeugen nach dem *PVD-Verfahren* (Physical Vapor Deposition, physikalische Abscheidung in der Dampfphase) konnten z. B. beim Bohren mit TiN-beschichteten Wendelbohrern beträchtliche Standzeiterhöhungen erzielt werden. Untersessen wird diese Beschichtungstechnik auch bei anderen Werkzeugen, wie z. B. Fräsern, Gewinde- und Verzahnwerkzeugen, weitgehend angewendet.

4.5.7.3 Hartmetalle

Hartmetalle sind gesinterte Stoffsysteme mit Metallcarbiden als Härtträger und einem die Zähigkeit bestimmenden Bindemetall. Als *Härtträger* haben *Wolframcarbid* (WC), *Titan-carbid* (TiC) und *Tantalcarbid* (TaC) sowie *Niobcarbid* (NbC), die im Hartmetall als Mischkristall Ta-(Nb)-C auftreten, die größte Bedeutung erlangt. Als *Bindemetall* wird neben Kobalt (Co) auch Nickel (Ni) und (oder) Molybdän (Mo) verwendet. Hartmetalle lassen sich einteilen in

- WC-Co-Legierungen,

Tab. 4.3 Zusammensetzung, Eigenschaften und Anwendung verschiedener Hartmetalle (mit Schaftkennfarben)

Anwendungsgruppe nach ISO	Eigen-schaf-ten	Zusammensetzung			Vickers-härte HV 30	Biege-festigkeit	Druck-festigkeit	Elastizi-täts-modul	Anwendung		
		WC	TiC+TaC	Co							
		%	%	%		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²			
P02	blau	Verschleißwiderstand (Schnittgeschwindigkeit) ↑ in Pfeilrichtung zunehmend Zähigkeit (Vorschub) ↓	33	59	8	1650	800	5100	440000	z. B. Stahl, Stahlguss, langspanender Temperguss	
P10			55	36	9	1600	1300	5200	530000		
P20			76	14	10	1500	1500	5000	540000		
P30			82	8	10	1450	1800	4800	560000		
P40			74	12	14	1350	1900	4600	560000		
P50			79,5	6,5	14	1300	2000	4000	520000		
M10	gelb		84	10	6	1700	1350	6000	580000	Stahl, GS, Manganhartstahl, legierter GJL, GJS, GJMW, austenitische Stähle, Automatenstähle	
M15			81	12	7	1550	1550	5500	570000		
M20			82	10	8	1550	1650	5000	560000		
M40			79	6	15	1350	2100	4400	540000		
K03	rot		92	4	4	1800	1200	6200	630000	GJL, Hartguss, kurzspanender Temperguss, Stahl gehärtet, NE-Metalle, Kunststoffe	
K05			92	2	6	1750	1350	6000	630000		
K10			92	2	6	1650	1500	5800	630000		
K20			92	2	6	1550	1700	5500	620000		
K30			93		7	1400	2000	4600	600000		
K40			88		12	1300	2200	4500	580000		

- WC-TiC-Ta-(Nb)-Co-Legierungen, sog. beschichtete Hartmetalle,
- Sonderhartmetalle.

Nach DIN ISO 513 teilt man Hartmetalllegierungen in die *Zerspanungsanwendungsgruppen P, M und K* wie in Tab. 4.3 ein. Die WC-TiC-Ta-(Nb)-Co-Legierungen der sog. P-Gruppe haben einen relativ hohen Anteil an TiC und TaC. Anwendungsschwerpunkt ist die Bearbeitung langspanender Stähle. Die weitgehend TiC-TaC-freien Legierungen aus WC-Co gehören zur Zerspanungsanwendungsgruppe K und werden vorwiegend für die Zerspanung von Eisen-Gusswerkstoffen, Nichteisenmetallen und Kunststoffen verwendet. Hartmetalle der M-Gruppe (Schaftkennfarbe gelb) bilden anwendungstechnisch – bei mittleren Gehalten an TiC und TaC – den Übergang zwischen den Gruppen P und K.

Innerhalb jeder Zerspanungshauptgruppe ist durch die Beifügung von Kennziffern eine Aussage über Zähigkeit und Verschleißwiderstand möglich. Mit ansteigender Kennziffer nimmt die Zähigkeit des Hartmetalls zu, während der Verschleißwiderstand abnimmt. Die genormten Zer-

spanungsanwendungsgruppen haben durch das zunehmende Angebot von Hartmetall-Mehr-bereichssorten in letzter Zeit etwas an Bedeutung verloren.

Die verschiedenen *Hartmetallkomponenten* beeinflussen wichtige Schneidstoffeigenschaften:

- *Wolframcarbid* erhöht die Abrieb- und Kantenfestigkeit: jedoch besteht bei höheren Temperaturen eine zunehmende Neigung zu Diffusionsvorgängen.
- *Titancarbid* weist eine geringe Diffusionsneigung auf und verleiht dem Hartmetall dadurch eine hohe Warmverschleißfestigkeit. Die Abrieb-, Binde- und Kantenfestigkeit sowie die Zähigkeit werden mit zunehmendem TiC-Gehalt verringert.
- *Tantalcarbid* wirkt kornverfeinernd und verbessert die Kantenfestigkeit und Zähigkeit. Kobalt bestimmt im Wesentlichen die Zähigkeitseigenschaften.

Für das Fertigbearbeiten von Stahlwerkstoffen mit kleinsten Aufmaßen (**Near-Net-Shape Technologie**) gewinnen wolframcarbidarme

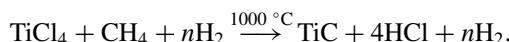
Hartstoff-schicht(en)								
Hartmetall-grundkörper nach ISO 513	TiC	TiN	TiC Ti(C,N) -TiN	Al ₂ O ₃	TiC Al ₂ O ₃	TiC Ti(C,N) -TiN Al ₂ O ₃	HfN	Al-O-N
M15	●		●	●	●	●	●	●
P25	●	●	●				●	
P40	●		●					
K10	●	●	●		●			●

Abb. 4.46 Gebräuchliche Kombinationen von Hartmetallgrundkörpern und Hartstoffschichten

Hartmetalle (Cermets) auf der Basis von Titan-carbonitrid mit Anteilen zwischen 40 bis 60 % zunehmend an Bedeutung. Sie besitzen eine verhältnismäßig hohe Kantenfestigkeit und sind gegenüber mechanischem Abrieb, Oxidations- und Diffusionsverschleiß sehr viel beständiger als Hartmetalle auf Wolframcarbid-Basis.

Beschichtetes Hartmetall besteht aus einem vergleichsweise zähnen Hartmetallgrundkörper mit einer verschleißfesten Hartstoffschicht oder mehreren Schichten. Eine solche Kombination bietet die Möglichkeit, gegensätzliche Schneidstoffeigenschaften, wie Verschleißwiderstand und *Zähigkeit* besser aufeinander abzustimmen.

Zum Beschichten von Hartmetallen wird großtechnisch hauptsächlich das *CVD-Verfahren* (Chemical Vapor Deposition) angewendet. Dabei werden reaktionsfähige Gase über die heiße Hartmetalloberfläche geleitet; hierbei entstehen aus der Gasphase Hartstoffschichten von 3 bis 15 μm Dicke. Beispielsweise erfolgt das Abscheiden von Titancarbid nach der chemischen Reaktion



Heute gebräuchliche Kombinationen von Hartmetallgrundkörpern und Hartstoffschichten zeigt Abb. 4.46.

Durch das Beschichten von Hartmetall mit dünnen Hartstoffschichten wird beim Spanen von Werkstoffen auf Eisenbasis eine deut-

lich höhere chemische Beständigkeit erreicht, der Widerstand gegenüber Abrasion erhöht und durch die wärmeisolierende Wirkung der Hartstoffschichten die Schneidentemperatur gesenkt.

Die verschleißmindernde Wirkung der Hartstoffschichten bleibt nach *Reiter* auch bestehen, wenn diese durchbrochen sind, wie Abb. 4.47 zeigt. Dieser Effekt soll auf der abstützenden Wirkung der Oberflächenschicht gegenüber dem abfließenden Span und der gefertigten Werkstückfläche beruhen. Gleichzeitig könnten durch Abrasion Hartstoffpartikel in die Verschleißzonen gelangen, um damit Diffusionsreaktionen zwischen Span und Kolkmulde zu vermindern.

4.5.7.4 Schneidkeramik

Als Schneidkeramik bezeichnet man Schneidstoffe aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) oder Siliciumnitrid (Si_3N_4) als Basis. Die oxidkeramischen Schneidstoffe werden in der Praxis entsprechend ihrer Zusammensetzung in Reinkeramik- und Mischkeramiksorten unterteilt. *Reinkeramiksorten* haben meist Aluminiumoxidanteile größer als 90 % mit geringen Zusätzen von Zirconiumoxid, Magnesiumoxid u. a. Sie zeigen eine weiße, manchmal auch gelbliche oder rosa Färbung. Die *Mischkeramiksorten* enthalten außer einem Aluminiumoxidanteil von weniger als 90 % einen großen Anteil an Metallcarbiden und sind schwarzgrau bis schwarz gefärbt.

Gegenüber Hartmetallen, deren Härteträger in einer metallischen Bindemittelphase eingelagert sind, werden oxidkeramische Schneidstoffe ohne Verwendung eines die Warmhärte begrenzenden Bindemittels gesintert. Die anwendbaren Schnittgeschwindigkeiten und die

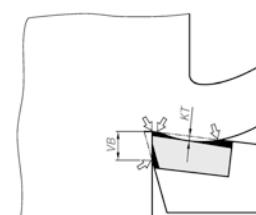


Abb. 4.47 Widerstand gegen Verschleiß bei beschichteten Hartmetallen durch abstützende Wirkung. (nach Reiter)

geschwindigkeitsabhängigen Standzeiten liegen deshalb im Vergleich zu anderen Schneidstoffen deutlich höher. Abb. 4.48 erläutert dies im Einzelnen.

Die verschiedenen *Bestandteile von keramischen Schneidstoffen* beeinflussen folgende Eigenschaften:

- *Aluminiumoxid* als Härteträger verleiht dem Schneidstoff eine hohe Warmhärte und in Verbindung mit der geringen Diffusionsneigung und seiner Oxidationsbeständigkeit gute Verschleißeigenschaften.
- *Titancarbid-/nitridanteile* erhöhen die Härte und die Verschleißfestigkeit und ermöglichen das Zerspanen von Stahlwerkstoffen mit Härten bis zu 64 HRC.
- *Zirconiumoxidanteile* verbessern die Festigkeitseigenschaften.

Wichtige Anwendungsgebiete verschiedener Schneidkeramiksorten beim Drehen zeigt Abb. 4.49. Reinkeramiksorten werden angewendet für die Schrupp- und Schlichtzerspanung von Eisengusswerkstoffen bis zu einer Vickershärte von 400 HV sowie von Stählen bis zu einer Rockwellhärte von 48 HRC. Mischkeramiksorten mit einem großen Anteil von

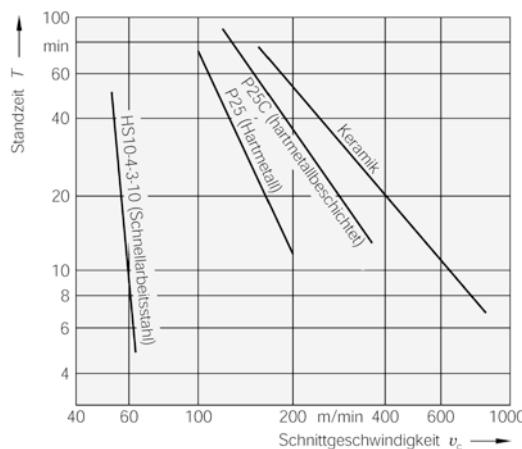


Abb. 4.48 Zusammenhang zwischen Standzeit und Schnittgeschwindigkeit beim Drehen mit verschiedenen Schneidstoffen (Werkstückstoff: C45E (Ck 55 N), Standzeitkriterium $VB = 0,5 \text{ mm}$, Schnitttiefe $a_p = 2 \text{ mm}$, Vorschub $f = 0,5 \text{ mm/U}$), nach VDI 3321

Titancarbid/-nitrid eignen sich vor allem für die Drehbearbeitung von Eisengusswerkstoffen und Stählen mit Härten bis zu 750 HV bzw. 65 HRC.

Allgemein werden die durch Schneidkeramik anwendbaren hohen Schnittgeschwindigkeiten besonders vorteilhaft genutzt, wenn möglichst große Schnittwege zu verwirklichen sind, z. B. beim Drehen von Werkstücken mit günstigem Länge/Durchmesserverhältnis l/d .

Nachteilig bei keramischen Schneidstoffen auf Al_2O_3 -Basis sind die verhältnismäßig geringe Bruchfestigkeit und die hohe Schlag- und Thermoschockempfindlichkeit, so dass die Anwendbarkeit bei unterbrochenem Schnitt begrenzt und der Einsatz von Kühlenschmierflüssigkeiten auf wenige Sonderfälle beschränkt bleiben muss.

Durch Verstärken von Schneidkeramiken auf Al_2O_3 -Basis mit Siliciumcarbid – Whiskern (Einkristallen) ergeben sich weitere Möglichkeiten, die Bruchzähigkeit, Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zur reinen Aluminiumoxidkeramik zu steigern.

Siliciumnitrid (Si_3N_4) ist ab etwa 1984 als neuer Schneidstoff bekannt geworden. Diese nichtoxidische Schneidkeramik zeigt insbesondere bei der spanenden Bearbeitung von Grauguss und hochwarmfesten Werkstoffen Vorteile gegenüber den bisher verwendeten Schneidstoffen. Von Nachteil ist jedoch die chemische Affinität der Siliciumnitride gegenüber Eisen. So eignen sie sich wegen der Bildung von Eisensilicium bei ca. 1200°C nicht zum Zerspanen von Stahlwerkstoffen. Mit Zusätzen von ZrO_2 oder TiN bzw. dem Einlegen von Whiskern, dem Aufbringen von Al_2O_3 -Schichten lassen sich die Verschleißfestigkeit bzw. die Bruchzähigkeit dieses Keramikschneidstoffs verbessern.

Ein Kennwert für die Empfindlichkeit eines Schneidstoffs gegenüber den beispielsweise bei unterbrochenen Schnitten auftretenden thermischen Wechselbelastungen ist die Thermoschockzahl R

$$R = \frac{\sigma_B \lambda}{E \alpha} \quad (4.21)$$

Schneidstoffzusammensetzung			Werkstückstoffe
Feinschichten N6/	Schlachten N8/	Schruppen N10/	
	Al ₂ O ₃ > 90% ZrO ₂ < 10%		Eisen-Gusswerkstoffe: GJL-150, GJL-200, GJL-250, GJL-300 GJS-500-7, GJS-600-3, GJS-700-2 GJMB-450-4
Al ₂ O ₃ > 80% TiC / TiN < 20%	Al ₂ O ₃ > 80% ZrO ₂ < 20%		Einsatzstähle: 16MnCr5, 20MnCr5, 21CrMoV5 Vergütungsstähle: C35, C45, C60, C45G, C53G 34Cr4, 41Cr4, 100Cr6 34CrMo4, 42CrMo4, 51CrV4 Schnellarbeitsstähle: HS18-1-2-5, HS18-1-2-10, HS10-4-3-10 sonstige Stähle: X12CrMoS17 X2NiCoMoTi18-24 X210CrW12, 90MnV8 X32CrMoCoV12-28
	Al ₂ O ₃ > 60% TiC / TiN < 40%		gehärtete Stähle/Eisen-Gusswerkstoffe bis 65HRC bis 750HV

 Reinkeramiksorten  Mischkeramiksorten

Abb. 4.49 Anwendungsfälle für verschiedene Schneidkeramiksorten. (nach Gomoll)

mit der Biegebruchspannung σ_B , der Wärmeleitfähigkeit λ , dem Elastizitätsmodul E und dem Wärmeausdehnungskoeffizienten α .

Nitridkeramiken besitzen mit $R \approx 25$ im Vergleich zu Oxidkeramiken eine um den Faktor 5 höhere Thermoschockbeständigkeit, so dass die Anwendung im unterbrochenen Schnitt und die Verwendung von Kühlenschmierflüssigkeiten problemlos möglich ist.

4.5.7.5 Diamant und Bornitrid

Schneidstoffe auf der Basis von Diamant und Bornitrid werden zunehmend zum Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden benutzt. Diamant ist der härteste Schneidstoff und kann in mono- oder polykristalliner Form für die Zerspanung verwendet werden. Während *monokristalliner Diamant (MKD)* aufgrund seiner be-

grenzten mechanischen Belastbarkeit nur für die Feinbearbeitung mit einer Schnitttiefe bis etwa $a_p = 1,5$ mm eingesetzt werden kann, sind bei *polykristallinem Diamant (PKD)* Schnitttiefen bis zu 12 mm und größere Vorschübe anwendbar.

Ausgangsstoffe für die Herstellung der polykristallinen Diamantschicht sind synthetische Diamanten bestimmter Korngröße, die in einer Hochdruck-Hochtemperatursynthese auf einen Hartmetallgrundkörper meist über eine dünne Zwischenschicht niedrigen Elastizitätsmoduls aufgesintert werden. Die etwa 0,5 bis 1 mm dicke Diamantschicht hat weitgehend isotrope Eigenschaften und ist somit gegenüber den anisotropen Diamanten monokristallinen Aufbaus weniger stoßempfindlich.

Anwendung finden *Diamantwerkzeuge* bei der Bearbeitung von

- Leichtmetallen (Aluminium, Aluminiumlegierungen, Titan),
- Schwermetallen (Kupfer- und Kupferlegierungen, Zinklegierungen),
- Edelmetallen (Platin, Gold, Silber),
- Kunststoffen (faserverstärkte Kunststoffe, Polytetrafluorethylen),
- anderen nichtmetallischen Werkstoffen (z. B. Hartgummi, Grafit, Keramik, Glas, Gestein, Asbest).

Polykristalline Diamantwerkzeuge haben im Bereich der Automobilindustrie bei der Zerspanung von Aluminium-Silicium-Legierungen besondere Bedeutung erlangt. Eisen-Gusswerkstoffe und Stähle dagegen können mit Diamant wegen der Affinität des Diamantkohlenstoffs zum Eisen nicht zerspant werden.

Als Schneidstoff für die Mikrozerspanung erschließen sich dem monokristallinen Diamanten neue Anwendungen. Sowohl für die Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen und Hobeln als auch für neue Fertigungstechnologien wie das Fast-Tool-Drehen. Bei diesem Verfahren nutzen hoch beschleunigte Fast-Tool-Servo-Systeme als Antrieb einen Piezokristall, der durch Anlegen einer Spannung eine ultrapräzise Bewegung der Diamantschneide gestattet.

Kubisch kristallines Bornitrid (CBN) gehört nach dem Diamanten zu den härtesten Schneidstoffen. Wegen der chemischen Beständigkeit gegenüber dem Eisen in Verbindung mit einer verhältnismäßig hohen Druck- und Biegefestigkeit sowie Thermostabilität ist CBN anderen Schneidstoffen besonders bei der Bearbeitung von Stählen mit Härten von 54 HRC bis 68 HRC, hochwarmfesten Legierungen auf Kobalt- und Nickelbasis, Schnellarbeitsstählen und Hartmetallen überlegen.

Die ebenfalls nach dem Verfahren der Hochdruck- und Hochtemperatursynthese hergestellten CBN-Werkzeuge können als massive Wendeschneidplatten oder in Form von mit polykristallinem kubischen Bornitrid (PKB) beschichteten Hartmetallgrundkörpern vorliegen. Die PKB-beschichteten Schneidplatten haben im Vergleich zur massiven Schneidplatte etwa eine 4,5-fache Widerstandsfähigkeit gegenüber Stoß-

belastungen. *CBN-Werkzeuge* ermöglichen beim Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden bereits Oberflächengüten, die in einigen Fällen die Anwendung von Feinbearbeitungsverfahren entbehrlich machen.

4.5.8 Werkzeugverschleiß

Der Werkzeugverschleiß wird hervorgerufen durch mechanische und thermische Beanspruchungen des Werkzeugs, die abhängig von dem Werkstückstoff, dem Schneidstoff und den jeweiligen Schnittbedingungen sind, Abb. 4.50.

Die beim Verschleißvorgang ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse bezeichnet man als *Verschleißmechanismen*. Beim Spanen sind es hauptsächlich fünf Prozesse, auf die die verschiedenen Verschleißerscheinungen am Schneidteil eines Werkzeugs zurückzuführen sind.

Der Mechanismus des *Adhäsionsverschleißes* besteht darin, dass Werkstoffpartikel von frisch entstandenen oxidfreien Oberflächen an der Spanunterseite und dem gefertigten Werkstück an den Werkzeugflächen festkleben und Verschweißungen bilden. Diese Pressschweißungen werden anschließend wieder abgetrennt. Sie können teilweise eine höhere Festigkeit haben als die eigentlichen stofflichen Partner; hierdurch kommt es zu Mikrausbröckelungen im Werkstück und vor allem im Werkzeug. Mikrausbröckelungen durch Aufbauschneidenbildung sind ebenfalls diesem Verschleißmechanismus zuzurechnen.

Diffusionsverschleiß äußert sich als Auskolkung auf der Werkzeugspanfläche und tritt besonders bei Hartmetallwerkzeugen in Erscheinung. Dabei laufen bei Temperaturen oberhalb 800 °C aufgrund der gegenseitigen Löslichkeit der Wirkpartner folgende Diffusionsvorgänge ab:

- Eisen diffundiert in die Kobaltphase,
- Kobalt diffundiert in den Werkstückstoff unter Auflösung des Bindemetallgefüges,
- Auflösung von Wolframcarbiden unter Bildung von Misch- und Doppelcarbiden in Form von $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $(\text{FeW})_6\text{C}$ und $(\text{FeW})_{23}\text{C}_6$.

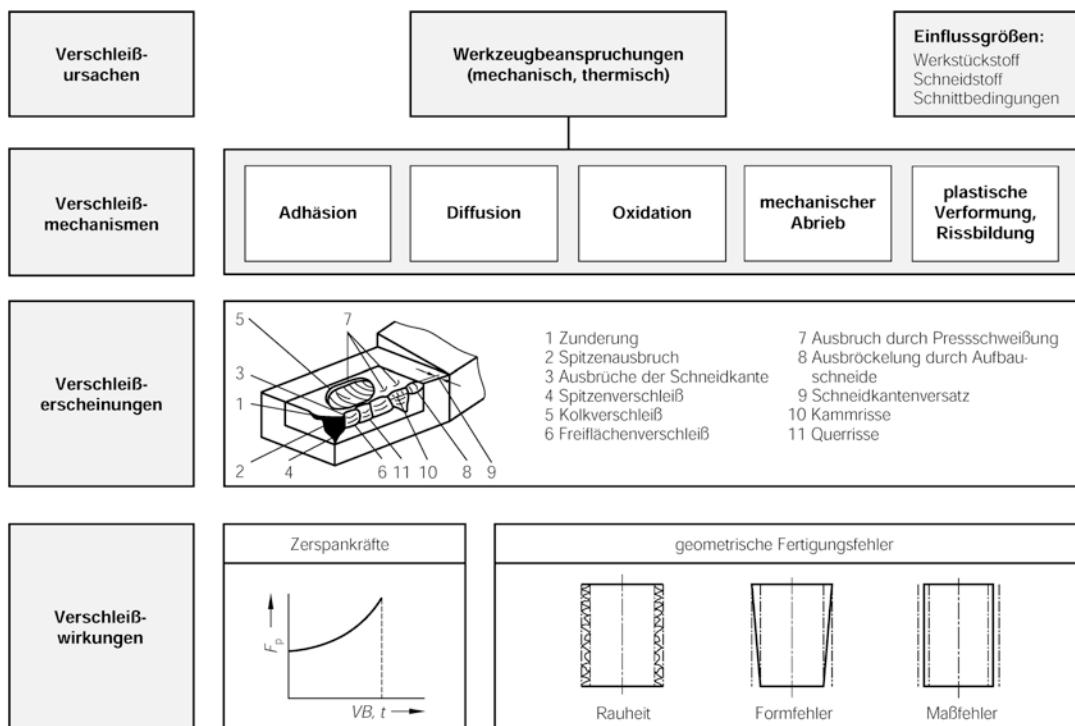


Abb. 4.50 Ursachen, Mechanismen und Auswirkungen des Werkzeugverschleißes

Bei Werkzeugstählen und Schnellarbeitsstählen sind Diffusionsvorgänge kaum zu beobachten, da diese bereits bei Temperaturen erweichen, bei denen noch nicht mit einem spürbaren Diffusionsverschleiß gerechnet werden kann. Auch bei keramischen Schneidstoffen ist Diffusionsverschleiß selten anzutreffen.

Oxidationsverschleiß ist Verschleiß durch Verzunderung des Schneidstoffs. Derartige Oxidationsvorgänge sind äußerlich durch Anlauffarben in der Nähe der Kontaktzonen erkennbar. Bei Hartmetallen kommt es unter Zutritt von Luftsauerstoff ab 700 bis 800 °C zur Bildung von Wolfram-Kobalt-Eisen-Oxidschichten, die einen zerstörenden Einfluss auf die Hartmetallschneide ausüben.

Mit *mechanischem Abrieb* (abrasiver Verschleiß) bezeichnet man das Abtragen von Schneidstoffpartikeln unter dem Einfluss äußerer Kräfte. Abrasiver Verschleiß tritt meist kombiniert mit anderen Verschleißmechanismen auf und ist besonders für die Entstehung des Freiflachenverschleißes entscheidend.

Bei mechanischer oder thermischer Überbeanspruchung der Werkzeugschneide führen *plastische Verformungen* und *Risse* zu Beschädigungen am Schneidteil. Plastische Verformungen an der Schneide entstehen, wenn die Schneidkante bei ausreichender Zähigkeit, aber zu geringem Verformungswiderstand durch hohe Zerspankräfte belastet wird, oder der Schneidstoff infolge zu hoher Temperaturen an der Schneide erweicht.

Bei Fertigungsverfahren mit unterbrochenem Schnitt (z. B. Fräsen) sind die Schneiden starken mechanischen und thermischen Wechselbeanspruchungen unterworfen. Die mechanischen Wechselbeanspruchungen führen vor allem bei Hartmetallschneiden zu *Querrissen* in der Span- und Freifläche des Werkzeugs. Thermische Wechselbeanspruchungen hingegen sind die Ursache für *Kammrissbildung* auf der Spanfläche, deren Verlauf sich mit der Temperaturverteilung im Schneidteil deckt.

Die verschiedenen Verschleißmechanismen treten nicht einzeln auf, sondern überdecken sich. Auswirkungen des Verschleißes sind

- Anstieg der Zerspankräfte; besonders F_f und F_p steigen mit zunehmendem Verschleiß an (sog. *Schlesinger-Kriterium*);
- Fertigungsfehler geometrischer Art (Gestaltabweichungen am Werkstück), z. B. Maß-, Form- und Rauheitsfehler.

4.5.9 Kühlschmierstoffe

Kühlschmierstoffe haben die Aufgabe, die Zerspanbarkeit (Spanbildung, Schnittkräfte, Standvermögen, Oberflächengüte) zu begünstigen, d. h. durch Schmierung die Reibung in den Scherzonen herabzusetzen und durch Kühlen die in diesen Zonen entstehende Verformungs- und Reibungswärme abzuführen. Neben der Schmierfähigkeit und dem Kühlvermögen sind das Reinigungs- und Spülvermögen, der Korrosionsschutz sowie die Gesundheits- und Umweltverträglichkeit weitere wichtige Eigenschaften, die von Kühlschmierstoffen erfüllt werden müssen. Nach DIN 51385 werden Kühlschmierstoffe in nicht wassermischbare und wassermischbare Klassen unterteilt.

Nichtwassermischbare Kühlschmierstoffe (Schneidöle) sind meist Mineralöle mit Wirkstoffzusätzen (Additiven), die bestimmte Eigenschaften (Schmierfähigkeit, Alterungsbeständigkeit, Schaumverhalten u. a.) verbessern sollen. Daneben sind natürliche Öle tierischer oder pflanzlicher Herkunft sowie synthetische Schmierstoffe gebräuchlich. Wassermischbare Kühlschmierstoffe können gleichfalls aus natürlichen Ölen, aus synthetischen Stoffen bzw. aus beiden bestehen, und zwar in Form von Emulsionen oder Lösungen. Eine Emulsion ist ein disperzes System, das durch Mischen von Flüssigkeiten entsteht, die ineinander nicht löslich sind. Es wird dabei zwischen emulgierbaren (Öl-in-Wasser) und emulgierenden (Wasser-in-Öl) Emulsionstypen unterschieden, d. h. Öl bzw. Wasser (innere Phase) ist tropfenförmig in der jeweiligen Trägerflüssigkeit (äußere Phase) verteilt.

Kühlschmierstoffe können ihre Wirkung nur dann voll entfalten, wenn sie in ausreichender Menge und unter optimalem Druck an die Wirkstelle gelangen.

Neben dem technologischen Nutzen können Kühlschmierstoffe eine Gefährdung für Mensch und Umwelt sein. So führt der Ersatz von mineralölbasierten Kühlschmierstoffen durch mineralölfreie Multifunktionsöle zu deutlich geringeren Umwelteinwirkungen. Ebenso wie eine möglichst weitgehende Substitution kühl-schmierstoffintensiver Prozesse durch Minimalmengenschmierung bis hin zur Trockenbearbeitung.

4.5.10 Hart-, Hochgeschwindigkeits- und Trockenbearbeitung

4.5.10.1 Hartbearbeitung

Die spanende Bearbeitung von harten Werkstückstoffen durch Drehen oder Fräsen bietet gegenüber der konventionellen Hartbearbeitung durch Schleifen oder Honen heute in zahlreichen Anwendungsfällen Vorteile hinsichtlich Verfahrensflexibilität, Energiebedarf und Umweltverträglichkeit. Durch das Einsparen von Bearbeitungsschritten verkürzt sich die Prozesskette vom Roh- zum Fertigteil erheblich. Die Hartbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide stellt jedoch besondere Anforderungen an Maschine, Spannsystem und Werkzeug. Es treten hohe spezifische Schnittkräfte bei sehr hohen Zerspantemperaturen auf. So entscheiden die Verschleißfestigkeit und die Kantenstabilität der Werkzeuge sowie die Gesamtsteifigkeit des Bearbeitungssystems Maschine-Werkzeug-Werkstück darüber, ob die höheren Genauigkeitsanforderungen bei der Hartbearbeitung eingehalten werden können. Schneidkeramiken und polykristalline Bornitride (PCBN) bieten als Hochleistungsschneidstoffe werkzeugseitig in hohem Maße alle Voraussetzungen für die Hart-, Hochgeschwindigkeits- und Trockenbearbeitung.

Beim Hartdrehen mit PCBN-Schneidstoffen werden Schnittgeschwindigkeiten zwischen $v_c = 100$ bis 160 m/min und Vorschübe f von 0,05 bis $0,1 \text{ mm}$ angewandt. Die erreichbaren gemittelten Rautiefen R_z liegen bei $R_z \leq 2 \mu\text{m}$.

4.5.10.2 Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC)

Hohe Schnittgeschwindigkeiten führen zu kurzen Schnittzeiten, höheren Werkstückqualitäten und niedrigen Schnittkräften. Der Begriff „Hochgeschwindigkeitsbearbeitung“ lässt sich nur unter Bezug auf das jeweilige Fertigungsverfahren definieren. So umfasst nach Icks z. B. der Bereich des Hochgeschwindigkeitsdrehens industriell angewandte Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 500$ bis 1500 m/min während Schnittgeschwindigkeiten von $v_c < 500$ m/min beim Drehen je nach Werkstück/Werkzeug-Kombination zu den industriell üblichen Schnittgeschwindigkeiten gehören.

Heute ist die Bearbeitung mit hohen Schnittgeschwindigkeiten für das Drehen und Fräsen von Gusseisenwerkstoffen bereits als Stand der Technik anzusehen. Die anwendbaren Schnittgeschwindigkeiten für GJL (GG) liegen im Bereich von $v_c = 600$ bis 1200 m/min beim Drehen und von $v_c = 500$ bis 1000 m/min beim Fräsen.

Zu den neueren Entwicklungen auf dem Gebiet der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung gehört das Bohren mit Siliciumnitrid-Keramikbohrern. Um die Leistungsfähigkeit dieser Werkzeuge nutzen zu können, sind maschinenseitig Drehzahlen von mehr als 10.000 min^{-1} und Antriebsleistungen von mehr als 10 kW erforderlich, verbunden mit einer hohen Maschinensteifigkeit, hoher Dynamik der Antriebe und hohen Verfahrgeschwindigkeiten.

4.5.10.3 Trockenbearbeitung

Trotz aller technologischen Vorteile ist die Anwendung von Kühlenschmierstoffen in mehrfacher Hinsicht problematisch. Für die Umwelt und den damit in Berührung kommenden Menschen stellen Kühlenschmierstoffe sowohl ein erhebliches Gefährdungspotenzial als auch einen beträchtlichen Kostenfaktor dar. Die Trockenbearbeitung vermeidet die mit der Anwendung von Kühlenschmierstoffen verbundenen vielfältigen Probleme. Für die Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden ist dieses teilweise bereits in die Praxis umgesetzt worden. Langfristig kann damit gerechnet werden, dass bei diesen Verfahren die Bearbeitung

trocken erfolgen kann. Die höhere thermische Beanspruchung des Wirkpaars Werkzeug-Werkstück kann heute durch geeignete Hartstoffbeschichtungen der Werkzeuge (z. B. TiN, TiAlN), die Schneidstoffzusammensetzung und die Werkzeuggeometrie kompensiert werden.

Günstige Voraussetzungen für die Trockenbearbeitung bietet das Fräsen. Bei Wegfall der Kühlung in unterbrochenem Schnitt besteht nicht mehr die Gefahr der Kammrissbildung (Thermoschock) und die Eingriffzeiten der Schneiden sind relativ kurz. Kühlung und Spanabfuhr lassen sich beispielsweise durch eine Minimalmengenkühlung ($\dot{V} < 50 \text{ ml/h}$) beherrschen. Technologische Grenzen der Trockenbearbeitung lassen sich ebenso durch Verfahrenssubstitution (z. B. Gewindefräsen statt Gewindebohren) überwinden. Im Hinblick auf eine Trockenbearbeitung gelten Aluminiumlegierungen als kritisch.

4.5.11 Mikrozerspanung

Die Mikrozerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden gewinnt im Zuge der Miniaturisierung von Bauteilen immer größer werdende Bedeutung. Praktisch kommen die Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren – vereinzelt auch Sägen und Hobeln – zum Einsatz.

Alle Werkstückstoffe, wie z. B. Keramik, Silicium, Hartmetall, Stahl, Aluminium, Messing, Kupfer und Kunststoffe können bearbeitet werden. Vorteile der Mikrozerspanung z. B. gegenüber der Ätztechnologie ergeben sich durch die flexible Formgebung und die hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Das gilt insbesondere bei geringen Stückzahlen.

Frä- und Bohrverfahren bieten die Möglichkeit mikromechanische Strukturen von 10 bis $1000 \mu\text{m}$ Größe herzustellen. Die Zeitspannungsvolumina von Mikrozerspanungsprozessen liegen um ein Vielfaches höher als die Abtragraten von Ätzprozessen. Die Integration verschiedener spanender Fertigungsverfahren auf einer Maschine ermöglicht es auch, komplexere Bauteile in einer Aufspannung zu fertigen. In Verbindung

mit anderen trennenden Fertigungsverfahren wie z. B. die Laser- oder Erodierbearbeitung sind beliebige geometrische Strukturen herstellbar.

Die kleinsten Werkzeugabmessungen für Bohr- und Fräswerkzeuge liegen im Bereich von 1/100 mm und erfordern hochgenaue Spindelsysteme mit Drehzahlen bis zu 100.000 U/min. Als Schneidstoff für metallische Werkstoffe wird Hartmetall angewendet. Zunehmend finden Werkzeuge mit PVD-Hartstoffsichten oder CVD-Diamantschichten Anwendung, aber auch monokristalline Diamantwerkzeuge.

Typische Werkzeuge und Beispiele für Bearbeitungsaufgaben zeigt Abb. 4.51.

4.5.12 Standzeitberechnung und Standzeitoptimierung

Die Standzeit eines Werkzeugs wird durch ein vorzgebendes *Standzeitkriterium* in Form einer maximal zulässigen Verschleißgröße begrenzt. Für die Beurteilung des Verschleißverhaltens

einer Schneidstoff-Werkstückstoff-Paarung ist die Abhängigkeit der gewählten Verschleißgrößen von der Schnittzeit von Interesse. Nach *Taylor* übt die Schnittgeschwindigkeit den größten Einfluss auf den Werkzeugverschleiß aus. Die zeitliche Zunahme von Verschleißgrößen für bestimmte Schnittgeschwindigkeiten kann *Verschleißkurven*, siehe etwa Abb. 4.52a, entnommen werden.

Aus den Verschleißkurven lassen sich für das gewählte Standkriterium, z. B. eine zulässige Verschleißmarkenbreite $VB_{zul} = 0,1 \text{ mm}$, die den verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten zuzuordnenden Standzeiten T ermitteln. Mit diesen Werten kann ein *Standzeit-Schnittgeschwindigkeitsdiagramm* entsprechend Abb. 4.52b entwickelt werden. Der Zusammenhang zwischen Standzeit T und Schnittgeschwindigkeit v_c folgt meist angenähert einer Exponentialfunktion und wurde von *Taylor* in Form der Gleichung

$$v_c T^{-\frac{1}{k}} = c_T \quad (4.22)$$

beschrieben.

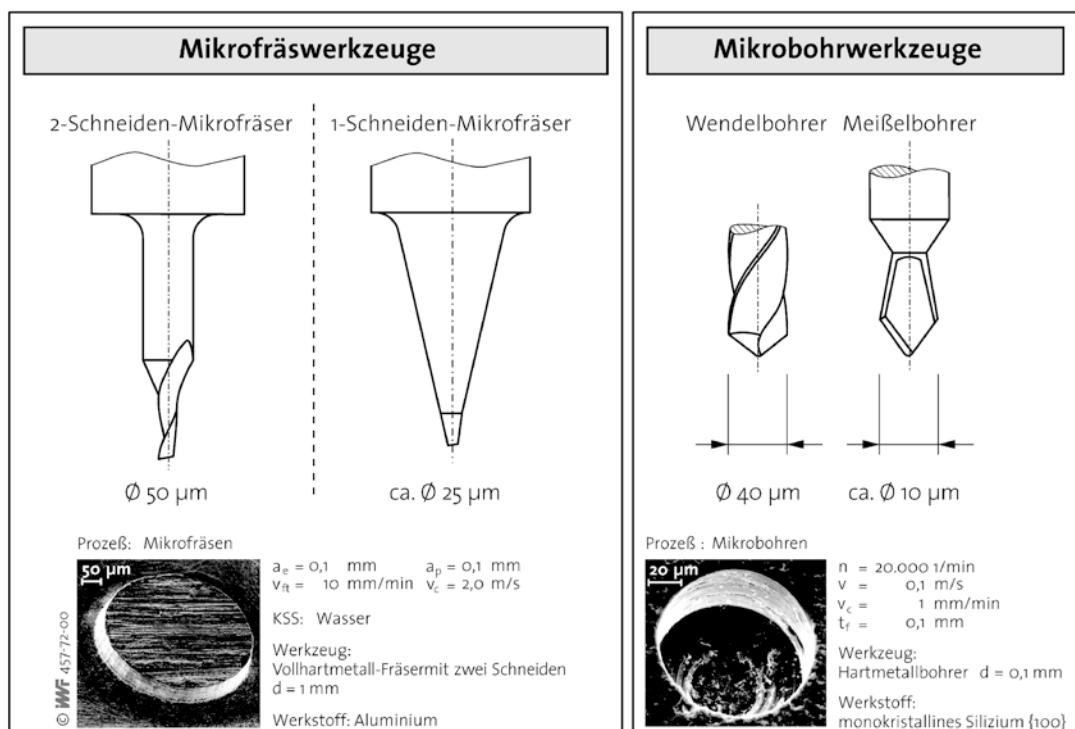


Abb. 4.51 Werkzeuge und Beispiele für Bearbeitungsaufgaben bei der Mikrozerspanung. (nach Hlavac)

Die grafische Darstellung der Standzeit in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit im doppeltlogarithmischen Maßstab entsprechend der Beziehung

$$\log T = k \log v_c = k \log c_T \quad (4.23)$$

führt zu der *Standzeitgeraden* (*Taylor-Gerade*), wie Abb. 4.52c zeigt. Hierin sind die Konstanten k und c_T nicht von der Schnittgeschwindigkeit, sondern nur von der Schneidstoff-Werk-

stückstoff-Paarung abhängig. Die Stoffkonstante k gibt die Steigung der Standzeitgeraden an, während die Stoffkonstante c_T die Schnittgeschwindigkeit für die theoretische Standzeit $T = 1 \text{ min}$ bestimmt.

Eine andere gebräuchliche Form der Standzeitgleichung ist

$$T = c_v v_c^k . \quad (4.24)$$

Hierin ist die Stoffkonstante c_v als Standzeit für eine Schnittgeschwindigkeit $v_c = 1 \text{ m/min}$

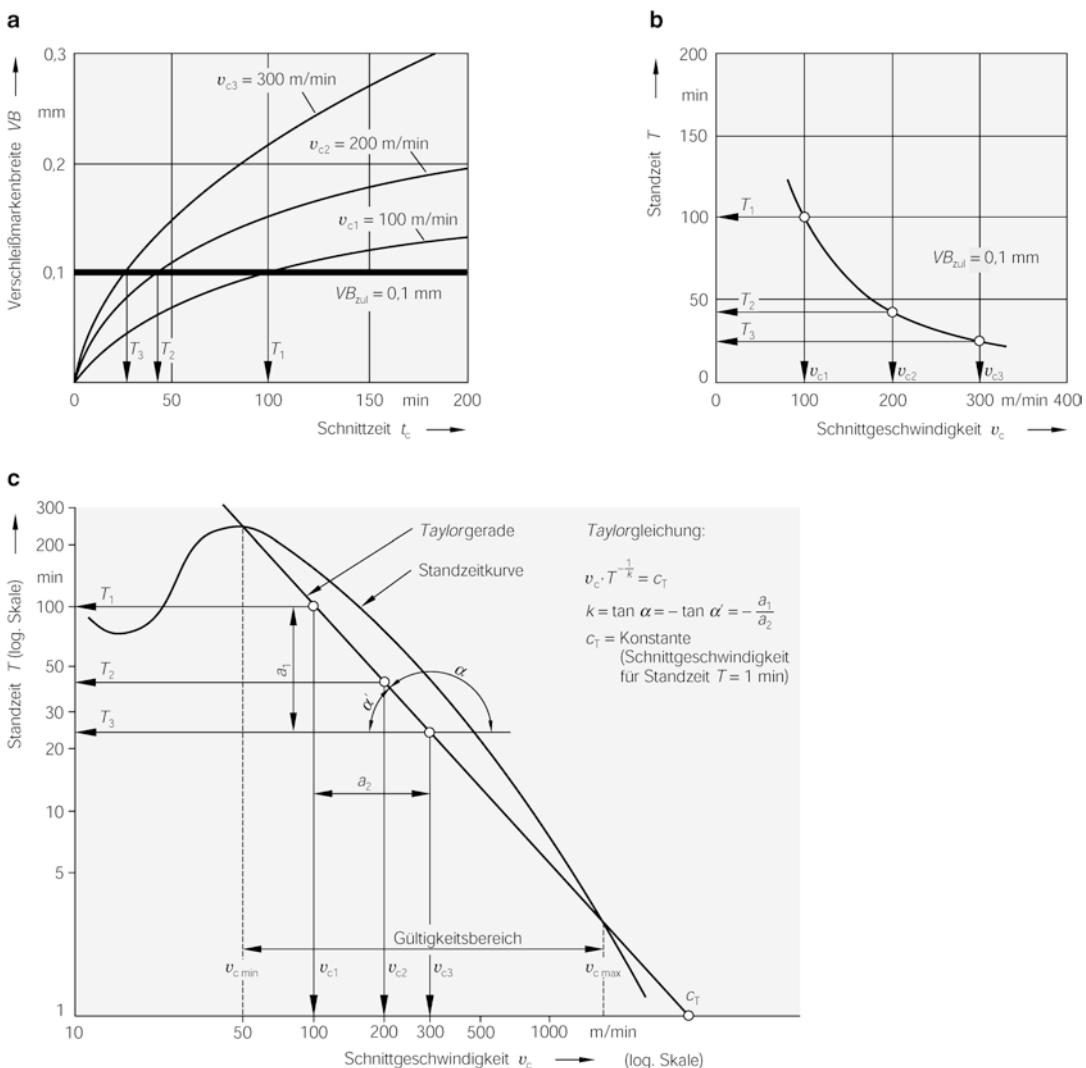


Abb. 4.52 Ermittlung der Standzeit in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit: **a** Verschleißkurven **b** Standzeit-Schnittgeschwindigkeit-Diagramm **c** Standzeitkurve im doppelt-logarithmischen Maßstab

definiert. Im doppelt-logarithmischen System ergibt sich dann für die Standzeitgerade die Beziehung

$$\log T = k \log v_c + \log c_v . \quad (4.25)$$

Die Stoffkonstanten c_v und c_T stehen nach

$$c_v = \frac{1}{c_T^k} \quad (4.26)$$

in Zusammenhang. Die *Taylor-Gerade* liefert wegen des gekrümmten Verlaufs der Standzeitkurve nur in einem verhältnismäßig engen Gültigkeitsbereich eine hinreichende Übereinstimmung zwischen dem tatsächlichen Verlauf der Standzeitkurve und dem näherungsweisen Ansatz nach (Gl. 4.22).

Aus dem Schrifttum sind weitere Standzeitgleichungen bekannt: Man hat versucht, weitere Einflussgrößen auf den Verschleißvorgang zu berücksichtigen und damit eine bessere Annäherung an den tatsächlichen Standzeitkurvenverlauf zu erreichen. Der Vorteil der *Taylor-Gleichung* ist zweifellos darin begründet, dass eine rechnerisch einfach zu handhabende Verschleißgleichung vorliegt, bei der der Aufwand zur Ermittlung der Kenngrößen für bestimmte Schneidstoff-Werkstückstoff-Kombinationen vergleichsweise gering ist.

Die *Optimierungsstrategie* in der Fertigung orientiert sich in der Regel an folgenden Zielsetzungen:

- Minimieren der Fertigungskosten (kostenoptimale Fertigung) und
- Minimieren der Fertigungszeit (zeitoptimale Fertigung).

Unter Zuhilfenahme der *Taylor-Gleichung* lassen sich aus der Fertigungskosten- und der Fertigungszeitgleichung die nach Witthoff geltenden jeweiligen Optimalfunktionen für die Standzeit ableiten.

Abb. 4.53 zeigt *Fertigungskosten* und Anteile der werkzeug- und maschinengebundenen Fertigungseinzelkosten abhängig von der Schnittgeschwindigkeit. Mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit steigen die werkzeug-

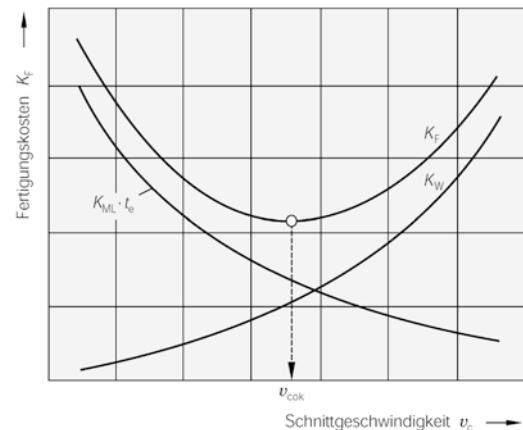


Abb. 4.53 Fertigungskosten je Werkstück in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit (VDI 3321)

gebundenen Kosten K_w wegen des Absinkens der Standzeit T progressiv an, während sich die maschinengebundenen Kosten K_{ML} (multipliziert mit der Fertigungszeit t_e) bei erhöhter Ausbringung degressiv vermindern. Durch Summieren beider Kostenanteile erhält man eine sog. *Becherkurve*. Sie zeigt, dass die Fertigungskosten K_F für die *kostenoptimale Schnittgeschwindigkeit* v_{cok} ein Minimum ergeben.

Für die *Fertigungskosten je Werkstück* gilt unter Vernachlässigung von Rüst- und Nebenzeitannteilen

$$K_F = K_{ML} \cdot t_h + \frac{t_h}{T} \cdot (K_{ML} \cdot t_w + K_{WT}) \quad (4.27)$$

mit

K_{ML}	Maschinen- und Lohnkostensatz,
K_{WT}	Werkzeugkosten je Standzeit,
T	Standzeit,
t_w	Werkzeugwechselzeit,
t_h	Hauptzeit.

Die Hauptzeit für das Fertigungsverfahren Drehen errechnet sich beispielsweise nach der Gleichung

$$t_h = \frac{d_w \pi l_f}{f v_c} . \quad (4.28)$$

Hierin ist:

d_w Werkstückdurchmesser

l_f Vorschubweg (Weg, den der betrachtete Schneidenpunkt im Werkstück in Vorschubrichtung spanend zurücklegt),

f Vorschub,

v_c Schnittgeschwindigkeit.

Durch Einsetzen der *Taylor-Gleichung* (4.22) und (4.28) in die Kostengleichung ergibt sich durch Differentiation die *kostenoptimale Standzeit* zu

$$T_{ok} = -(k+1) \left(t_w + \frac{K_{WT}}{K_{ML}} \right). \quad (4.29)$$

Analog erhält man durch Differentiation der Fertigungszeitgleichung die zeitoptimale Standzeit

$$T_{ot} = -(k+1) \cdot t_w. \quad (4.30)$$

Die Gleichungen zur Standzeitberechnung gelten jeweils nur für ein Werkzeug. Schneiden mehrere Werkzeuge gleichzeitig, nacheinander oder überlagern sie sich in ihrem Eingriff, so müssen die Gleichungen entsprechend erweitert werden. Bei der Anwendung der Standzeitgleichungen ist es wichtig, den Gültigkeitsbereich der *Taylor-Geraden* (v_{cmin}, v_{cmax}) zu kennen. Es besteht sonst die Gefahr, unrealistische Optimalwerte T_{ok} bzw. T_{ot} zu ermitteln.

Abb. 4.54 zeigt, wie die Fertigungskosten und die Fertigungszeit je Werkstück durch den Standzeitvorgabewert beeinflusst werden können. Es wird deutlich, dass das Erreichen eines Fertigungszeitminimums mit einer Erhöhung der Fertigungskosten verbunden ist. Beide Optimierungsziele sind gegensätzlich und lassen sich nicht gleichzeitig verwirklichen.

Die beschriebenen Zusammenhänge bestimmen jedoch nicht allein die anzuwendenden Zerspanwerte. Vielmehr müssen zur Optimierung des Spanens weitere werkstück-, werkzeug- und maschinenseitige Randbedingungen berücksichtigt werden.

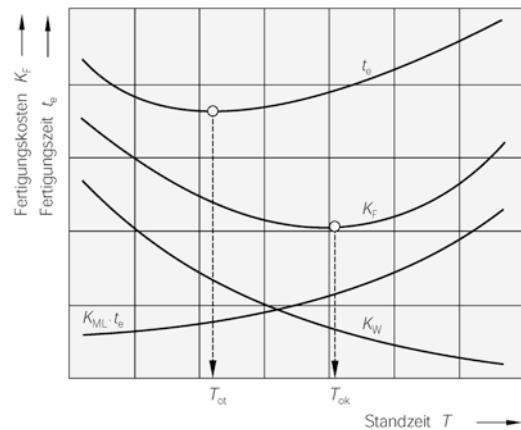


Abb. 4.54 Fertigungszeit und Fertigungskosten je Werkstück in Abhängigkeit von der Standzeit (VDI 3321)

4.5.13 Schnittkraftberechnung

Wie bei den Standzeitgleichungen gibt es auch zur Berechnung der beim Spanen auftretenden Kräfte (Abschn. 4.4.5) verschiedene Ansätze, um diese zu ermitteln oder vorherzusagen. Im Wesentlichen wird die Größe der Schnittkraft von folgenden Einflussgrößen bestimmt:

- Werkstückstoff,
- Vorschub bzw. Spanungsdicke,
- Schnitttiefe bzw. Spanungsbreite,
- Spanungsverhältnis a_p/f ,
- Spanwinkel,
- Einstellwinkel,
- Schnittgeschwindigkeit,
- Schneidstoff,
- Kühlung und Schmierung sowie
- Werkzeugverschleiß.

Haupteinflussgrößen sind der Werkstückstoff und die Eingriffsgrößen Schnitttiefe a_p und Vorschub f bzw. die Spanungsgrößen Spanungsbreite b und Spanungsdicke h , die über den Einstellwinkel κ miteinander verknüpft sind.

Als Berechnungsverfahren für die leistungsführende Schnittkraft F_c hat sich das *Schnittkraftgesetz* von Kienzle weitgehend durchgesetzt.

Untersuchungen zeigten, dass dieses Berechnungsverfahren außer für den Modellfall Drehen ebenso für alle anderen spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden Gültigkeit hat.

Man erhält die Schnittkraft F_c , indem man den Spanungsquerschnitt A mit der *spezifischen Schnittkraft* k_c multipliziert. Die spezifische Schnittkraft ist das Verhältnis der Schnittkraft F zum Spanungsquerschnitt A (bei vereinfachter Betrachtung):

$$k_c = \frac{F_c}{A} \quad \text{in N/mm}^2, \quad (4.31)$$

$$F_c = a_p f k_c = b h k_c \quad \text{in N}. \quad (4.32)$$

Wegen der Abhängigkeit der Form des Spanungsquerschnittes A vom Einstellwinkel κ ist es zweckmäßig, mit den aus den Eingriffsgrößen a_p und f abgeleiteten Spanungsgrößen b und h zu rechnen.

Die spezifische Schnittkraft ist ein werkstoffabhängiger Zerspanungswert, der kaum von der Spanungsbreite b , sondern ausschließlich von der Spanungsdicke h bzw. dem Vorschub f abhängt, wie Abb. 4.55a zeigt.

Kienzle drückte diesen Zusammenhang durch ein Potenzgesetz aus:

$$k_c = k_{c,1.1} h^{-m} \quad \text{in N/mm}^2. \quad (4.33)$$

Die *spezifische Schnittkraft* $k_{c,1.1}$ gibt die auf eine Spanungsbreite $b = 1 \text{ mm}$ und eine Spanungsdicke $h = 1 \text{ mm}$ bezogene Schnittkraft an.

Diese Abhängigkeit wird im Allgemeinen im doppeltlogarithmischen Maßstab als Gerade wie in Abb. 4.55b dargestellt. Der Exponent $m = \tan \alpha$ bezeichnet in diesem Koordinatensystem die Steigung der Geraden $k_c = f(h)$.

Setzt man (Gl. 4.33) in (Gl. 4.32) ein, erhält man die zuerst von Kienzle angegebene *Schnittkraftformel* zum Ermitteln von F_c

$$F_c = b h^{1-m} k_{c,1.1} \quad \text{in N}. \quad (4.34)$$

In (Gl. 4.34) bezeichnet der Exponent $(1 - m)$ den Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft.

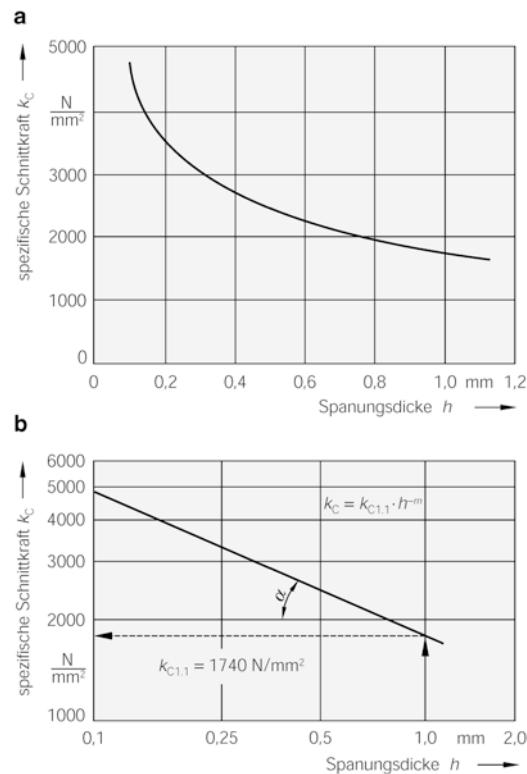


Abb. 4.55 Spezifische Schnittkraft in Abhängigkeit von der Spanungsdicke (Spanungsbreite $b = 1 \text{ mm} = \text{konst.}$). **a** in arithmetischer Darstellung **b** in doppeltlogarithmischer Darstellung

4.6 Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden

Höhere Schnittgeschwindigkeiten und neue Schneidstoffe beim Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden ermöglichen heute eine Werkstückgenauigkeit, die die Anwendung von Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden für die Endbearbeitung in vielen Fällen entbehrlich macht.

Umgekehrt ist es durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Schleiftechnologie gelungen, die Zeitspannungsvolumina in erheblichem Maße zu steigern, so dass Schleifverfahren in bestimmten Anwendungsfällen eine wirtschaftliche Alternative zu spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden bieten.

Abb. 4.56 zeigt die heute unter Großserienbedingungen erreichbaren Werkstückqualitäten und Tendenzen in Abhängigkeit vom Zeitspannungsvolumen für die Fertigungsverfahren Drehen und Schleifen. Die genannten Tendenzen können Ursache von Verfahrenssubstitutionen sein, wobei sich entscheidende Produktionsvorteile dann ergeben, wenn die jeweiligen werkstückbezogenen Fertigungsanforderungen möglichst mit *einem* Fertigungsverfahren für die Vor- und Fertigbearbeitung erfüllt werden können.

Mit den Fortschritten hinsichtlich Produktivität, Flexibilität, Qualität und Umweltverträglichkeit beim Drehen und Schleifen wird immer wieder die Frage diskutiert, welche dieser Fertigungstechnologien insgesamt gesehen leistungsfähiger sei. Hierauf kann es jedoch keine allgemeingültige Antwort geben, da die werkstückseitigen Merkmale und Bearbeitungsanforderungen zu komplex und unübersichtlich geworden sind. Um die ökonomischen und ökologischen Fertigungsbedingungen miteinander in Einklang zu bringen, wird die Hartbearbeitung zunehmend mit definierter Schneide praktiziert. Dabei ergeben sich Vorteile hin-

sichtlich der Kosten und der Verfahrensflexibilität. Außerdem kann in vielen Fällen auf Kühlenschmierstoffe verzichtet werden. Inzwischen wurden auch Werkzeugmaschinen für das kombinierte Drehen und Schleifen in einer Aufspannung entwickelt. Sie ermöglichen es für die jeweiligen Formelemente, die optimale Technologie anzuwenden (s. a. Abschn. 4.6.6).

Verfahrensmerkmale und Berechnungsgrundlagen der wichtigsten Fertigungsverfahren seien im Folgenden beschrieben.

4.6.1 Drehen

Das Drehen ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit geschlossener, meist kreisförmiger Schnittbewegung und beliebiger, quer zur Schnittrichtung liegender Vorschubbewegung. Die Drehachse der Schnittbewegung ist werkstückgebunden, d. h., sie behält ihre Lage zum Werkstück unabhängig von der Vorschubbewegung bei.

Beim Drehen führt in der Regel das Werkstück die umlaufende Schnittbewegung aus

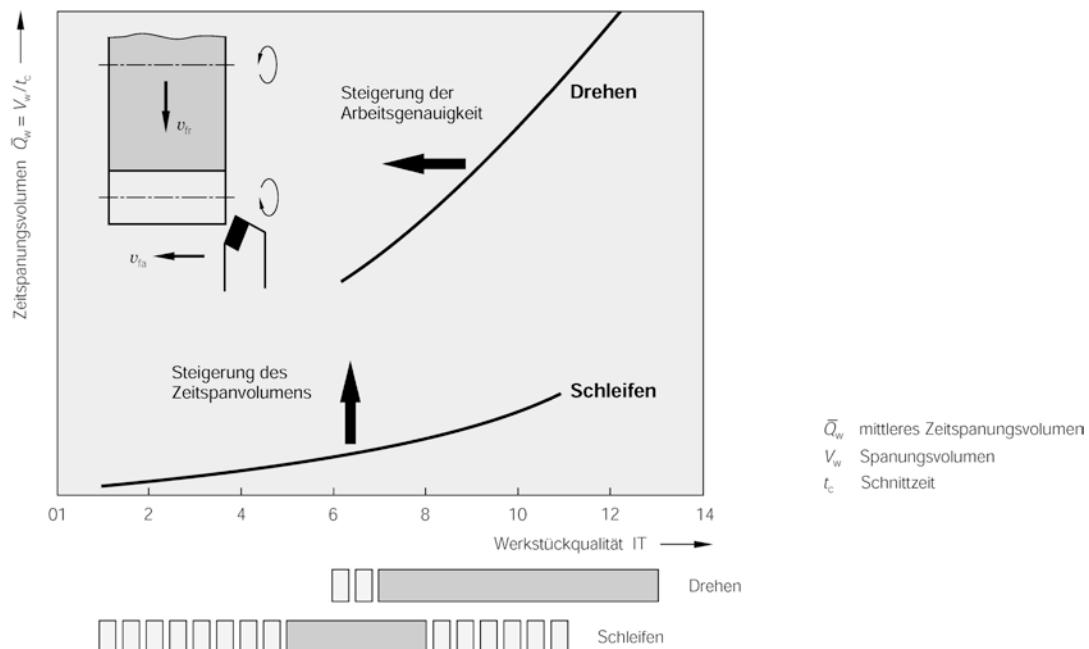


Abb. 4.56 Anwendungsbereiche und Tendenzen beim Drehen und Schleifen



Abb. 4.57 Einteilung der Drehverfahren nach DIN 8589, Teil 1

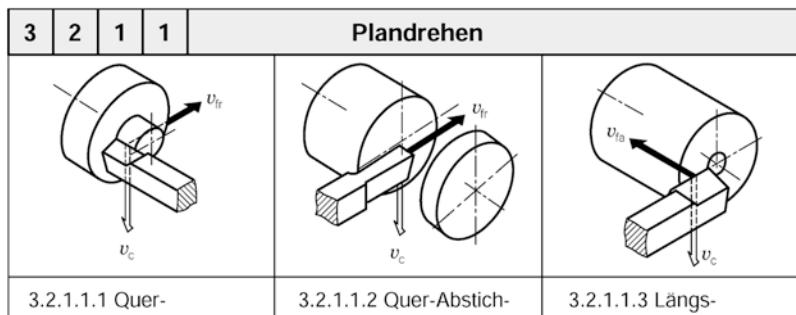


Abb. 4.58 Plandrehverfahren

und das Werkzeug die erforderlichen Vorschub- und Zustellbewegungen. Die Werkstücke sind Rotationskörper¹.

4.6.1.1 Drehverfahren

Drehverfahren zählen zu den am häufigsten angewendeten spanenden Fertigungsverfahren. Ausgehend von DIN 8589-1, werden die Drehverfahren in der vierten Stelle der Ordnungsnummer nach Merkmalen der zu erzeugenden Flächengestalt entsprechend Abb. 4.57 unterteilt. In der fünften Stelle der Ordnungsnummer wird Drehen nach den Ordnungsgesichtspunkten:

- Richtung der Vorschubbewegung und
- Werkzeugmerkmale

und beim Formdrehen nach der Art der Steuerung unterteilt.

Mit **Plandrehen** bezeichnet man Drehverfahren zur Erzeugung einer senkrecht zur Drehachse liegenden ebenen Fläche. Abb. 4.58 verdeutlicht die drei Verfahrensvarianten: *Quer-Plandrehen*, *Quer-Abstech-Plandrehen* und *Längs-Plandrehen*. Beim Quer-Plandrehen erfolgt der Vorschub senkrecht zur Drehachse des Werkstücks, während beim Längs-Plandrehen der Vorschub parallel zur Drehachse des Werkstücks gerichtet ist. Das Quer-Abstechdrehen wird zum Abtrennen eines Werkstücks oder von Werkstückteilen angewendet. Bei allen Plandrehverfahren mit senkrecht zur Drehachse des Werkstücks gerichteter Vorschubbewegung ist zu beachten, dass sich die Schnittgeschwindigkeit mit zunehmendem Vorschubweg (abnehmendem Drehdurchmesser) ändert, wenn

¹ Drehen: eine Kurzeinführung (BZI Remscheid) [youtube wissensfloater](#)

nicht ein Anpassen der Werkstückdrehzahl an den jeweiligen Drehdurchmesser erfolgt.

Runddrehen ist Drehen zum Erzeugen von zur Drehachse des Werkstücks koaxial liegenden kreiszylindrischen Flächen. Einige wichtige Runddrehverfahren zeigt Abb. 4.59.

Gegenüber dem herkömmlichen *Längs-Runddrehen* mit parallel zur Drehachse gerichteter (axialer) Vorschubbewegung haben besonders die Runddrehverfahren *Breitschlichtdrehen* und *Schälđrehen* in bestimmten Anwendungsfällen zu wichtigen Verfahrensalternativen geführt.

Breitschlichtdrehen ist ein Längs-Runddrehen mit großem Vorschub unter Verwendung eines Werkzeugs mit sehr großem Eckenradius und sehr kleinem Einstellwinkel der Nebenschneide.

Der Betrag des Vorschubs ist bei diesem Verfahren stets kleiner als die Länge der Nebenschneide zu wählen.

Beim **Schälđrehen** verwendet man meist umlaufende Werkzeuge mit mehreren im Eingriff befindlichen Schneiden bei kleinem Einstellwinkel der Hauptschneide und großem Vorschub.

Beide Verfahren ermöglichen im Vergleich zum Längs-Runddrehen jeweils eine erhöhte

axiale Vorschubgeschwindigkeit und damit auch eine erhöhte *Flächenleistung* P_A . Diese ist definiert als die auf die Schnittzeit bezogene gefertigte Werkstückoberfläche. Für das Längs-Runddrehen gilt

$$P_A = f v_c . \quad (4.35)$$

Durch Erhöhen des Vorschubs nimmt beim Längs-Runddrehen die *theoretische Rautiefe* $Rt.th$ der gefertigten Werkstückoberfläche mit dem Quadrat des Vorschubs zu. In Abhängigkeit vom Vorschub f und der Eckenrundung r errechnet sich die theoretische Rautiefe nach *Brammertz* in erster Näherung nach

$$Rt.th \approx \frac{f^2}{8r} . \quad (4.36)$$

Die mit größerem Vorschub zu erwartende erhöhte Werkstückrautiefe kann beim Breitschlichtdrehen durch die Verwendung eines Werkzeugs mit verhältnismäßig großer Nebenschneide und einem Einstellwinkel κ_n im Bereich von 0° bis 1° umgangen werden. Abb. 4.60 zeigt einen Vergleich der Eingriffsverhältnisse beim Längs-Runddrehen und Breitschlichtdrehen.

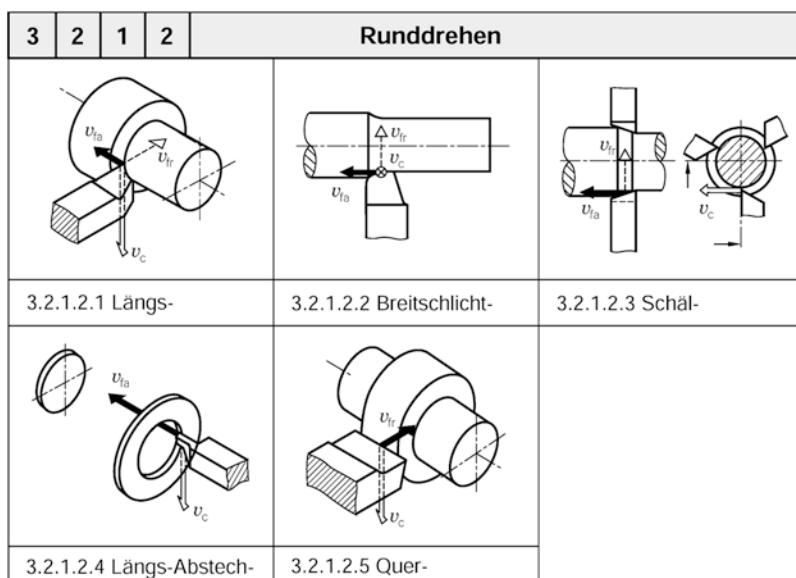


Abb. 4.59 Runddrehverfahren

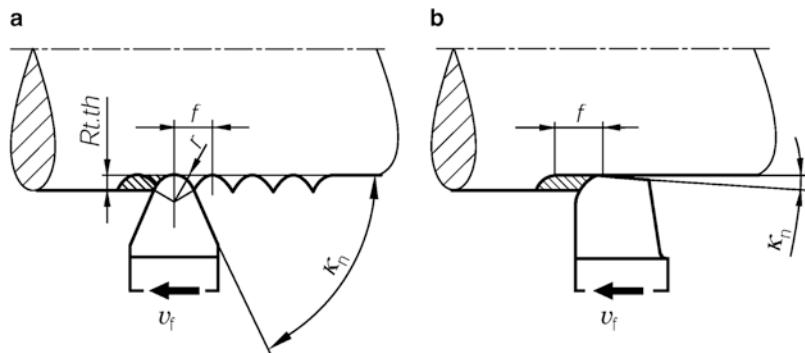


Abb. 4.60 Eingriffsverhältnisse beim **a** Längs-Runddrehen und **b** Breitschlitzdrehen. (nach Nedeß)
Rt.th theoretische Rautiefe r Eckengerundung f Vorschub v_f Vorschubgeschwindigkeit κ_n Einstellwinkel der Nebenschneide

Das *Längs-Abstechdrehen* dient zum Abstechen runder Scheiben aus plattenförmigen Rohteilen.

Quer-Runddrehen erfolgt mit senkrecht zur Drehachse gerichteter Vorschubbewegung; hierbei muss die Werkzeugschneide mindestens so breit wie die zu fertigende Kreiszylinderfläche sein.

Beim *Schraubdrehen* wie in Abb. 4.61 werden schraubenförmige Flächen mittels Profilwerkzeugen gefertigt. Die Steigung der Schraube entspricht dabei dem Vorschub je Umdrehung.

Man unterscheidet nach der Art des verwendeten Werkzeugs das

- Gewindedrehen,
- Gewindestrehlen und
- Gewindeschneiden.

Das *Gewindedrehen* ist ein Schraubdrehen mit einem einprofiligen Gewinde-Drehmeißel, während beim *Gewindestrehlen* das Gewinde mit einem Werkzeug erzeugt wird, das in Vorschubrichtung mehrere mit zunehmender Schnitttiefe gestaffelte Schneidenprofile aufweist (Gewindestrehler) und das Gewinde in einem Überlauf zu erzeugen vermag.

Das *Gewindeschneiden* ist dagegen ein Schraubdrehen zum Erzeugen eines Gewindes mit einem mehrschneidigen Gewindeschneideisen oder Gewindeschneidkopf.

Unter **Profildrehen** versteht man das Drehen mit einem werkstückgebundenen Werkzeug (Profilwerkzeug) zum Erzeugen rotationssymmetrischer Flächen. Abb. 4.62 vermittelt eine Übersicht.

Längs-Profildrehen ist Profildrehen mit Vorschub parallel zur Drehachse des Werkstücks;

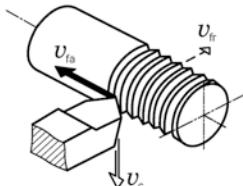
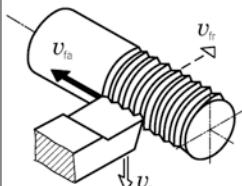
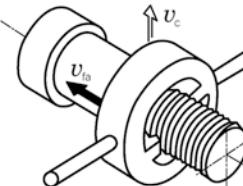
3	2	1	3	Schraubdrehen
				
3.2.1.3.1 Gewindedrehen	3.2.1.3.2 Gewindestrehlen	3.2.1.3.3 Gewindeschneiden		

Abb. 4.61 Schraubdrehverfahren

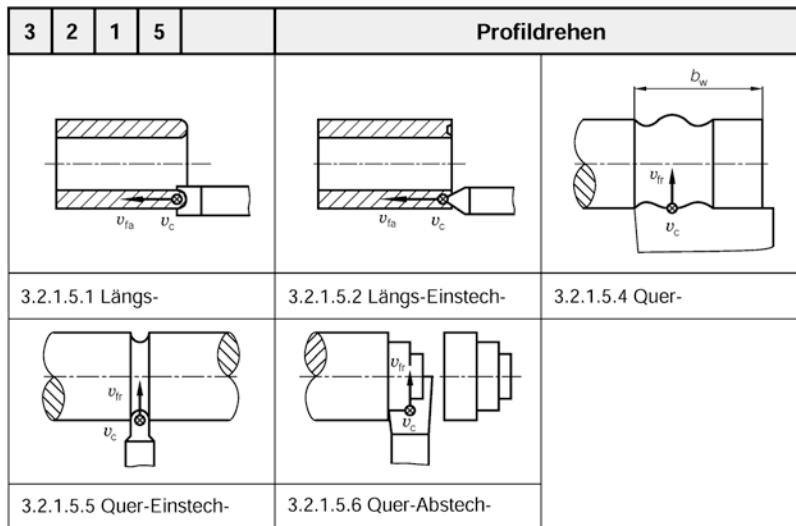


Abb. 4.62 Profildrehverfahren

hierbei ist die Schneide des Profildrehmeißels mindestens so breit wie das zu erzeugende Profil. Beim *Längs-Profilinstechdrehen* wird mit einem Profildrehmeißel ein ringförmiges Profil (Einstich), z. B. eine Nut, an der Stirnfläche eines Werkstückes eingestochen. Mit Hilfe des *Quer-Profildrehens* mit Vorschub senkrecht zur Drehachse des Werkstückes können rotations-symmetrische Profile auf der ganzen Breite erzeugt werden. Um jedoch bei Quer-Profildrehoperationen ein Rattern aufgrund von Instabilitäten der Werkzeugeinspannung zu vermeiden, sind Profile auf eine Breite von $b_w = 15 \text{ mm}$ (in Sonderfällen bis zu 30 mm) zu begrenzen.

Beim *Quer-Profilinstechdrehen* wird mit einem Profildrehmeißel ein ringförmiger Einstich an der Umfangsfläche des Werkstückes erzeugt. Als *Quer-Profilabstechdrehen* bezeichnet man einen Drehvorgang, bei dem ein Profildrehmeißel gleichzeitig das Werkstück oder Teile des Werkstückes absticht.

Formdrehen ist Drehen, bei dem durch die Steuerung der Vorschub- bzw. Schnittbewegung (z. B. Unrunddrehen) die Form des Werkstückes erzeugt wird. Nach der Art der Steuerung von Bewegungen kann zwischen

- *Freiformdrehen*,
- *Nachformdrehen*,

- *Kinematisch-Formdrehen* und
- *NC-Formdrehen*

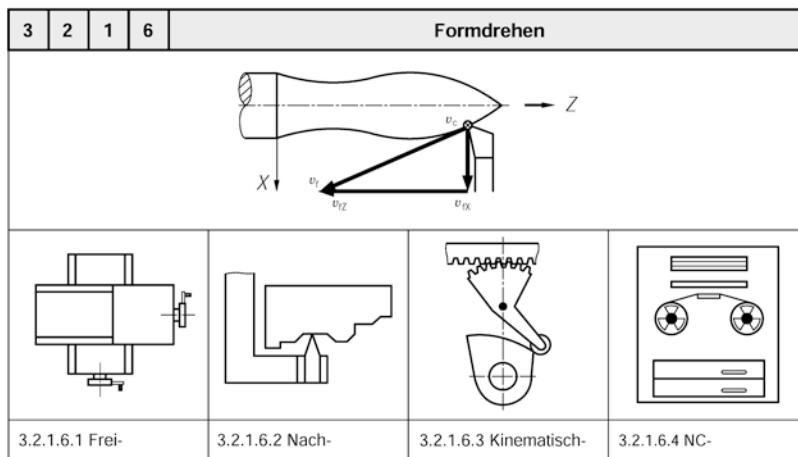
unterschieden werden, wie aus Abb. 4.63 hervorgeht. Beim Freiformdrehen wird die Vorschubbewegung von Hand gesteuert (z. B. beim Drechseln). Nachformdrehen (Kopierdrehen) ist Formdrehen, bei dem die Vorschubbewegung über ein zweidimensionales Bezugsformstück gesteuert wird. Beim Kinematisch-Formdrehen erfolgt die Steuerung der Vorschubbewegung kinematisch mit Hilfe eines mechanischen Getriebes.

Eine weitere Alternative ist das NC-Formdrehen, bei dem die Werkstückform durch Steuerung der Vorschubbewegung mittels eingegebener Daten und Verwenden einer numerischen Steuerung erzeugt wird.

4.6.1.2 Drehwerkzeuge

Die Form und die Abmessungen der Werkzeuge zum Drehen sind abhängig von der Bearbeitungsaufgabe. Moderne Werkzeuge für die spanende Bearbeitung mit definierten Schneiden sind aus verschiedenen Komponenten aufgebaut. Allgemein kann man zwischen

- Schneidensystem,
- Befestigungs- bzw. Klemmsystem und
- Werkzeuggrundkörpersystem

**Abb. 4.63** Formdrehverfahren

unterscheiden. Der Hauptvorteil einer Aufteilung in mehrere Teilsysteme besteht dabei in einer verbesserten Anpassung des Werkzeugsystems an die jeweilige Bearbeitungsaufgabe.

Der Schnellarbeitsstahl hat als Schneidstoff beim Drehen in der Serienfertigung gegenüber Hartmetall und keramischen Schneidstoffen zunehmend an Bedeutung eingebüßt. Lediglich für Bearbeitungsaufgaben, die eine besondere Schneidstoff-Zähigkeit erfordern, sowie bei Profilwerkzeugen (bessere Schleifbarkeit) werden Schneiden aus Schnellarbeitsstahl noch bevorzugt.

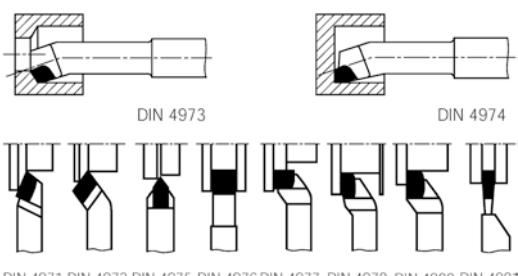
Werkzeugformen für verschiedene Bearbeitungsaufgaben beim Drehen mit aufgelöten Schneidplatten aus Hartmetall zeigt Abb. 4.64. Bei der Schneidenbefestigung durch Löten besteht die Gefahr von Rissbildung, besonders durch unterschiedliche Wärmeausdehnungs-

koeffizienten von Schneidplatte und Werkzeuggrundkörper sowie infolge unsachgemäßen Nachschleifens.

Mechanische Befestigungs- bzw. Klemmsysteme vermeiden diese Nachteile und gestatten durch das Verwenden genormter Wendeschneidplatten nach DIN ISO 1832 einen schnelleren Schneidenwechsel unter Wegfall der Kosten für Nachschleifarbeiten.

Abb. 4.65 zeigt einige Beispiele für gebräuchliche Befestigungs- bzw. Klemmsysteme. Konstruktionsprinzipien sind

- Befestigung mittels Klemmfinger,
- Befestigung mit Klemmfinger über verstellbar angebrachte Spanformplatten,
- Befestigung mit Klemmpratze mit mechanisch betätigter, über Exzenter stufenlos verstellbarer Spanformstufe,
- Befestigung mittels eines über eine Spannschraube betätigten Winkelhebels,
- Schraubenbefestigung ohne Spanformstufe,
- Schraubenbefestigung mit Spanformstufe.



DIN 4971 DIN 4972 DIN 4975 DIN 4976 DIN 4977 DIN 4978 DIN 4980 DIN 4981

Abb. 4.64 Werkzeugformen beim Drehen für verschiedene Bearbeitungsaufgaben

Befestigungs- und Klemmsysteme lassen sich unterscheiden in solche für Wendeschneidplatten ohne (Abb. 4.65a, b und c) und mit Befestigungslöch, Abb. 4.65d, e und f.

Weiterhin können Positiv- oder Negativplatten eingesetzt werden. Positivplatten besitzen einen Keilwinkel $< 90^\circ$ und ermög-

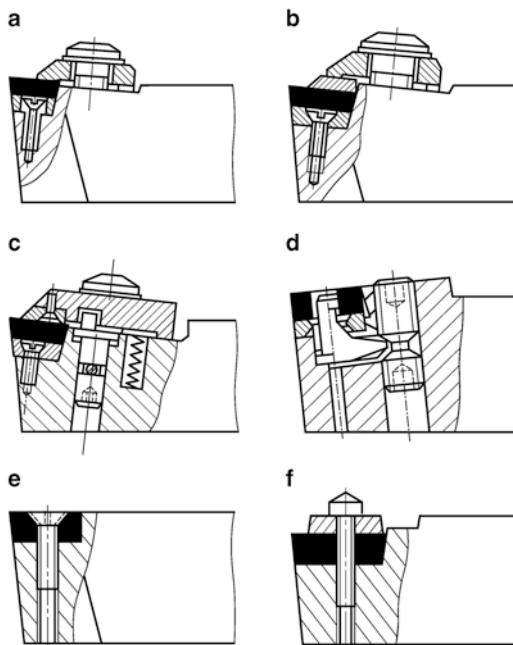


Abb. 4.65 Klemmsysteme für Wendeschneidplatten (nach Krupp-Widia): **a** mit Klemmfinger **b** mit Klemmfinger und Spanformplatte **c** mit Klemmplatze und über Exzenter verstellbarer Spanformstufe **d** mit Winkelhebel **e** mit Schraubenbefestigung ohne Spanformstufe **f** mit Schraubenbefestigung und Spanformstufe

lichen in Klemmsystemen positive Spanwinkel in Abb. 4.65a, b und c, während Negativplatten einen Keilwinkel von 90° aufweisen und negative Spanwinkel in Abb. 4.65d ergeben. Die Anzahl der verwendbaren Schneiden ist bei Negativplatten doppelt so groß wie bei Positivplatten gleicher Grundform.

4.6.1.3 Zeitberechnung

Ein wichtiges Entscheidungskriterium für die Auswahl von spanenden Fertigungsverfahren ist das Zeitspannungsvolumen Q_w . Es berechnet sich aus dem Spannungsvolumen V_w und der Schnittzeit t_c :

$$Q_w = \frac{V_w}{t_c} \quad \text{in } \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}. \quad (4.37)$$

Die *Schnittzeit* t_c ist der wesentliche Anteil an der *Hauptnutzungszeit* t_h . Nach Verband für Arbeitsstudien – REFA e. V. – ist die Hauptnutzungszeit definiert als die Zeit, in der das

Werkzeug am Werkstück die beabsichtigte Änderung der Werkstückform und (oder) Werkstückoberfläche vollzieht, also seiner Zweckbestimmung entsprechend genutzt wird. Es gilt

$$t_h = t_c + t_a + t_{\ddot{u}}. \quad (4.38)$$

Die Schnittzeit t_c ist der Quotient aus dem *Vorschubweg* l_f und der Vorschubgeschwindigkeit v_f . Für die Vorschubgeschwindigkeit $v_f = \text{konst}$. gilt

$$t_c = \frac{l_f}{v_f} \quad \text{in s}. \quad (4.39)$$

Zusätzlich zur Werkstücklänge l_w ist gegebenenfalls der *Anschittweg* l_{ak} in Abhängigkeit vom Einstellwinkel κ zu berücksichtigen.

Zur Berechnung der Hauptnutzungszeit sind außer der Schnittzeit auch die *Anlaufzeit* t_a und die *Überlaufzeit* $t_{\ddot{u}}$ zu berücksichtigen.

Die Berechnungsgleichungen für die Schnittzeiten und die Zeitspannungsvolumina sind für das Längs-Runddrehen in Abb. 4.66 angegeben.

Zur Berechnung der Schnittzeit beim Quer-Plandrehen muss zwischen dem Drehen mit konstanter Drehzahl und konstanter Schnittgeschwindigkeit unterschieden werden. Die Beziehungen sind in Abb. 4.67 wiedergegeben.

4.6.2 Bohren, Senken, Reiben

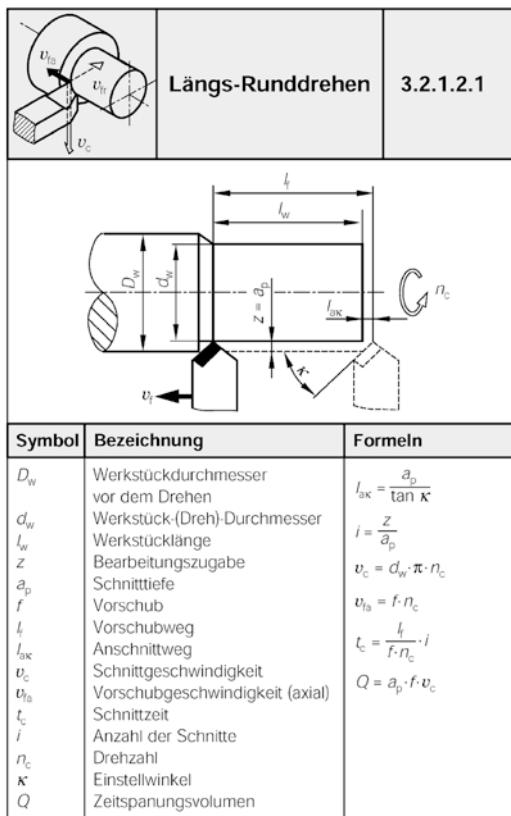
Bohren ist Spanen mit kreisförmiger Schnittbewegung, bei dem die Drehachse des Werkzeugs und die Achse der zu erzeugenden Innenfläche identisch sind und die Vorschubbewegung im Vergleich zum Innendrehen nur in Richtung dieser Drehachse verlaufen darf.

Senken ist Bohren zum Erzeugen von senkrecht zur Drehachse liegenden Planflächen oder symmetrisch zur Drehachse liegenden Kegelflächen bei meist gleichzeitigem Erzeugen von zylindrischen Innenflächen.

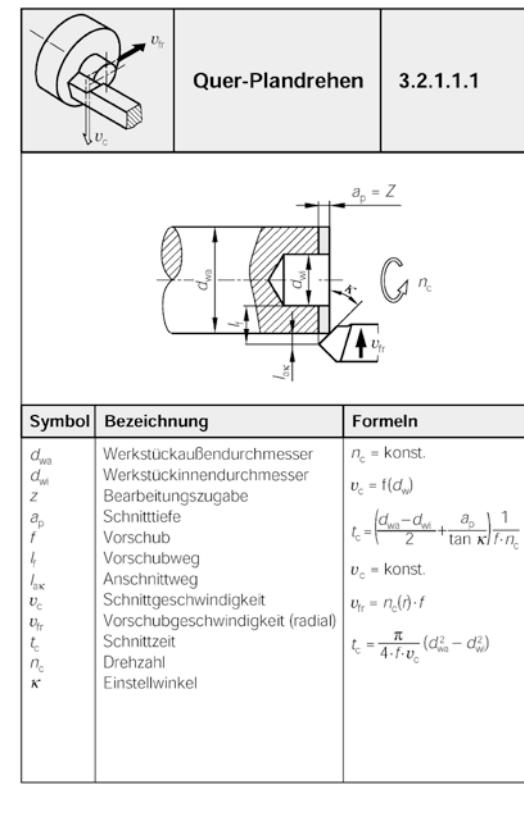
Reiben ist ein Aufbohren zwecks Erhöhung der Oberflächengüte bei geringen Spanungsdicken.

4.6.2.1 Bohrverfahren

Die Einteilung der Bohrverfahren nach DIN 8589, Teil 2, zeigt Abb. 4.68. Unter *Plansenken*



Längs-Runddrehen		3.2.1.2.1
Symbol	Bezeichnung	Formeln
D_w	Werkstückdurchmesser vor dem Drehen	$l_{\text{ax}} = \frac{a_p}{\tan \kappa}$
d_w	Werkstück-(Dreh)-Durchmesser	$l = \frac{Z}{a_p}$
l_w	Werkstücklänge	$v_c = d_w \cdot \pi \cdot n_c$
z	Bearbeitungszugabe	$v_{\text{fa}} = f \cdot n_c$
a_p	Schnitttiefe	$t_c = \frac{l}{f \cdot n_c}$
f	Vorschub	$Q = a_p \cdot f \cdot v_c$
l_f	Vorschubweg	
l_{ax}	Anschneidweg	
v_c	Schnitgeschwindigkeit	
v_{fa}	Vorschubgeschwindigkeit (axial)	
t_c	Schnittzeit	
i	Anzahl der Schnitte	
n_c	Drehzahl	
κ	Einstellwinkel	
Q	Zeitspannungsvolumen	



Quer-Plandrehen		3.2.1.1.1
Symbol	Bezeichnung	Formeln
d_{w0}	Werkstückaußendurchmesser	$n_c = \text{konst.}$
d_{w0}	Werkstückinnendurchmesser	$v_c = f(d_{w0})$
Z	Bearbeitungszugabe	$t_c = \left(\frac{d_{w0} - d_{w0}}{2} + \frac{a_p}{\tan \kappa} \right) \frac{1}{f \cdot n_c}$
a_p	Schnitttiefe	$v_c = \text{konst.}$
f	Vorschub	$v_{\text{fr}} = n_c(r) \cdot f$
l_f	Vorschubweg	$t_c = \frac{\pi}{4 \cdot f \cdot v_c} (d_{w0}^2 - d_{w0}^2)$
l_{ax}	Anschneidweg	
v_c	Schnitgeschwindigkeit	
v_{fr}	Vorschubgeschwindigkeit (radial)	
t_c	Schnittzeit	
n_c	Drehzahl	
κ	Einstellwinkel	

Abb. 4.66 Zeitberechnung beim Längs-Runddrehen

versteht man Senken zur Erzeugung von senkrecht zur Drehachse der Schnittbewegung liegenden ebenen Flächen, wie Abb. 4.69 zeigt. Es kann zwischen dem *Planansenken* und dem *Planeinsenken* unterschieden werden. Durch Planansenken werden am Werkstück hervorstehende Planflächen gefertigt. Das Planeinsenken dient zum Erzeugen von im Werkstück vertieften Planflächen; hierbei entsteht gleichzeitig eine kreiszylindrische Innenfläche.

Beide Verfahrensvarianten können mit Senkwerkzeugen mit und ohne Führungszapfen ausgeführt werden.

Rundbohren kennzeichnet einen Bohrvorgang zum Erzeugen einer kreiszylindrischen, koaxial zur Drehachse der Schnittbewegung gelegenen Innenfläche. In der fünften Stelle der nach DIN festgelegten Ordnungsnummer werden Rundbohrverfahren nach Merkmalen des Werkzeugeingriffs unterteilt. Man unterscheidet zwischen

Abb. 4.67 Zeitberechnung beim Quer-Plandrehen

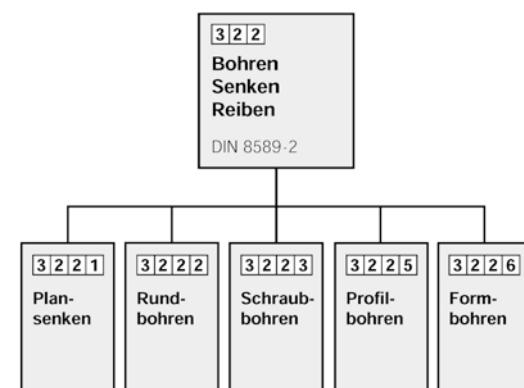
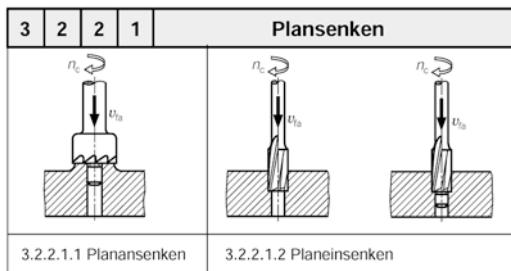


Abb. 4.68 Einteilung der Bohrverfahren. (nach DIN 8589-2)

- *Bohren ins Volle*,
- *Kernbohren*,
- *Aufbohren* und
- *Reiben*.

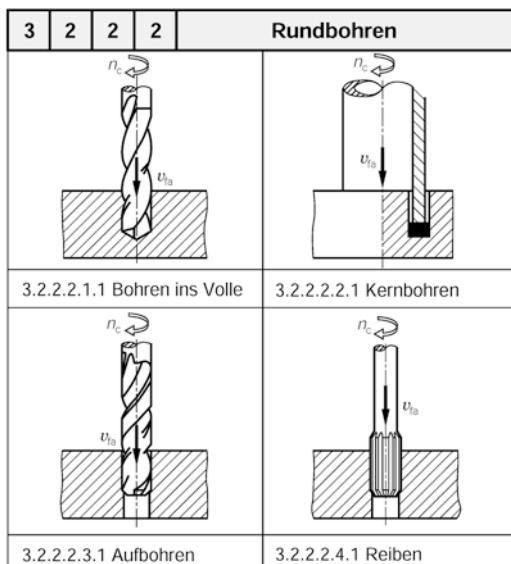
**Abb. 4.69** Plansenkenverfahren

Weitere Besonderheiten des Bohrwerkzeugs werden durch die Unterteilung in der sechsten Stelle der Ordnungsnummer angegeben. Beispiele für das Rundbohren mit symmetrisch angeordneten Hauptschneiden zeigt Abb. 4.70.

Beim Rundbohren ins Volle wird mit dem Werkzeug ohne Vorbohren in den Werkstückstoff gebohrt.

Kernbohren ist Bohren, bei dem das Bohrwerkzeug den Werkstückstoff ringförmig zerstört und gleichzeitig mit der Bohrung ein kreiszylindrischer Kern entsteht bzw. übrig bleibt.

Mit *Aufbohren* bezeichnet man solche Bohrverfahren, die zur Vergrößerung einer bereits vorgefertigten Bohrung (z. B. durch Gießen oder Vorbohren) dienen.

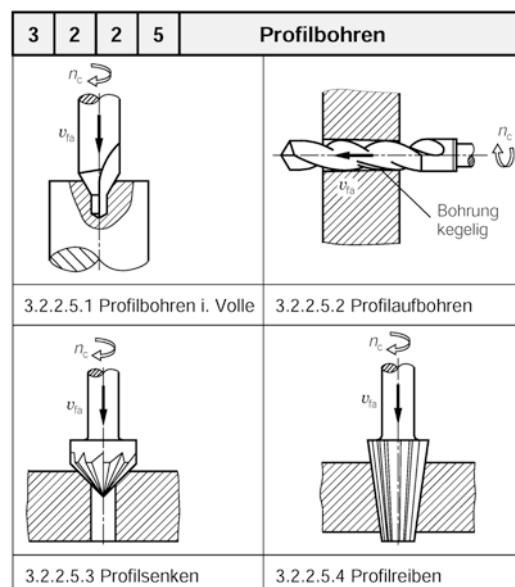
**Abb. 4.70** Rundbohrverfahren

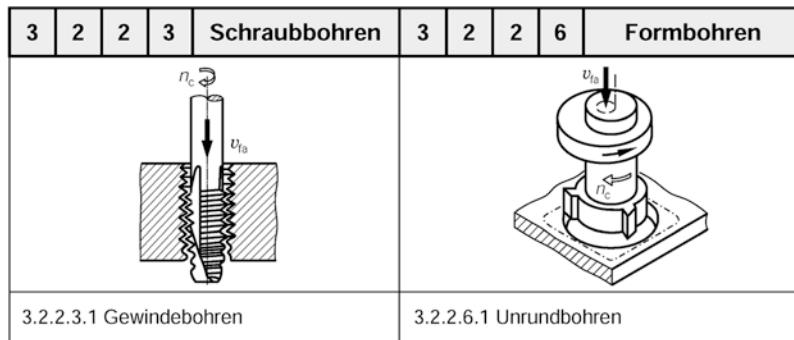
Reiben ist als weitere Untergruppe des Rundbohrens definiert. Beim *Rundreiben* werden maß- und formgenaue, kreiszylindrische Innenflächen mit hoher Oberflächengüte durch Aufbohren mit geringer Spanngesdike erzielt. Es kann dabei je nach Art des verwendeten Reibwerkzeugs zwischen mehrschneidigem Reiben (Abb. 4.70) und einschneidigem Reiben unterschieden werden.

Einige ausgewählte Profilbohrverfahren sind in Abb. 4.71 dargestellt. *Profilbohren ins Volle* ist Bohren in den vollen Werkstückstoff zum Erzeugen von rotationssymmetrischen Innenprofilen, die durch das Hauptschneidenprofil des Bohrwerkzeugs bestimmt sind (z. B. Profilbohren mit Zentrierbohrer).

Beim *Profilaufbohren* wird das jeweilige Innenprofil durch Aufbohren hergestellt (z. B. Aufbohren einer kegeligen Innenfläche für Kegelstifte). Weitere Profilbohrverfahren sind das *Profilsenken* und das *Profilreiben*.

Schraubbohren ist Bohren mit einem Schraubprofil-Werkzeug in ein vorhandenes bzw. vorgebohrtes Loch, hierbei entstehen koval zur Schnittbewegung liegende Innen schraubflächen, z. B. beim Gewindebohren mit einem Gewindebohrer, siehe Abb. 4.72.

**Abb. 4.71** Profilbohrverfahren

**Abb. 4.72** Schraub- und Formbohren

Formbohren sind Bohrverfahren mit gesteuerter Schnitt- bzw. Vorschubbewegung zur Erzeugung von Innenflächen, die von der kreiszylindrischen Form abweichen. Abb. 4.72 zeigt das Unrundaufbohren eines gegossenen oder vorgebohrten Loches.

4.6.2.2 Bohrwerkzeuge

Die Bauformen von Bohrwerkzeugen sind äußerst vielfältig. Trotz der Vielzahl von standardisierten Bohrwerkzeugen nimmt der Anteil von an die jeweilige Bearbeitungsaufgabe angepassten Sonderwerkzeugen ständig zu.

Für die Fertigungsverfahren Bohren lassen sich zeitlich aufeinanderfolgende Fertigungsstufen unterscheiden. In Abb. 4.73 sind den nach DIN 8589-2 definierten Fertigungsverfahren und den daraus abgeleiteten Fertigungsstufen für bestimmte zu erzeugende Formelemente typische Bohrwerkzeuge zugeordnet.

Der *Wendelbohrer* zählt zu den am meisten verwendeten Bohrwerkzeugen. Je nach der Größe des *Seitenspanwinkels* γ_x (Drallwinkel) und des *Spitzenwinkels* σ können verschiedene Wendelbohrertypen unterschieden werden, wie Abb. 4.74 verdeutlicht.

Mit Wendelbohrern lassen sich i. Allg. Bohrungen mit einem Verhältnis Bohrtiefe/Bohrungsdurchmesser $l_w/d_w < 5$ ohne Schwierigkeiten erzeugen. Mit speziellen Tiefbohrwerkzeugen können heute l_w/d_w -Verhältnisse im Bereich von 150 bis 200 erreicht werden. Tiefbohrwerkzeuge finden heute aber auch zum Fertigen von Bohrungen mit höheren An-

forderungen an die Maßgenauigkeit (IT 7 bis IT 10) und an die Form- und Lagegenauigkeit Anwendung.

Werkzeuge zum Tiefbohren sind

- *Einlippenbohrwerkzeuge*,
- *Bohrköpfe nach dem Einrohrsystem (BTA-Bohrwerkzeuge*²),
- *Bohrköpfe nach dem Doppelrohrsystem (Ejektor-Bohrwerkzeuge)*.

Abb. 4.75 zeigt Rundbohrverfahren mit Tiefbohrwerkzeugen. Beim Rundbohren ins Volle mit Einlippenbohrer wird ein Bohrwerkzeug mit unsymmetrisch angeordneten Schneiden benutzt. Die Kühlsmierflüssigkeit wird dabei durch das Innere des meist rohrförmigen Werkzeugschafts zugeführt. Span- und Kühlsmierflüssigkeitsabfluss erfolgen durch eine äußere Spannut im Werkzeugschaft. Einlippen-Tiefbohrwerkzeuge benötigen zum Anbohren stets eine besondere Führungseinrichtung.

Beim Rundbohren mit einem Bohrkopf nach dem Einrohrsystem (*BTA-Verfahren*) wird die Kühlsmierflüssigkeit von außen zwischen Werkzeugschaft und Bohrungswand zugeführt. Die anfallenden Späne werden dann von der Kühlsmierflüssigkeit in das Innere des Bohrkopfes gespült und durch das Bohrrohr abgeführt. Die Kühlsmierflüssigkeit wird über

²Verfahren entwickelt von der Boring und Trepanning Association.

Fertigungsstufen	Beispielwerkzeuge					
Bohren ins Volle	3.2.2.2.1					
Aufbohren, Profilsenken, Profilaufbohren	3.2.2.2.3			3.2.2.5.1	3.2.2.5.3	
Planansenken Planeinsenken	3.2.2.1.1	3.2.2.1.2	3.2.2.1.1	3.2.2.1.2	3.2.2.1.1	3.2.2.1.2
Reiben	3.2.2.2.4					
erzeugtes Formelement						

Abb. 4.73 Werkzeuge für verschiedene Fertigungsstufen beim Bohren. (nach Meyer)

Wendelbohrertyp	Seitenspanwinkel γ_x	Spitzenwinkel σ	Anwendung
N	18 bis 30°	118 bis 130°	unleg. und legierte Stähle GJL, GJS GJMW, GS Al-Leg. mit >11% Si
H	10 bis 15°	118°	Mg-Legierungen austenitische Stähle
W	35 bis 45°	140°	Cu Cu-Legierungen weiche Kunststoffe

Abb. 4.74 Wendelbohrertypen nach DIN 1414-1/2 und ihre Anwendung

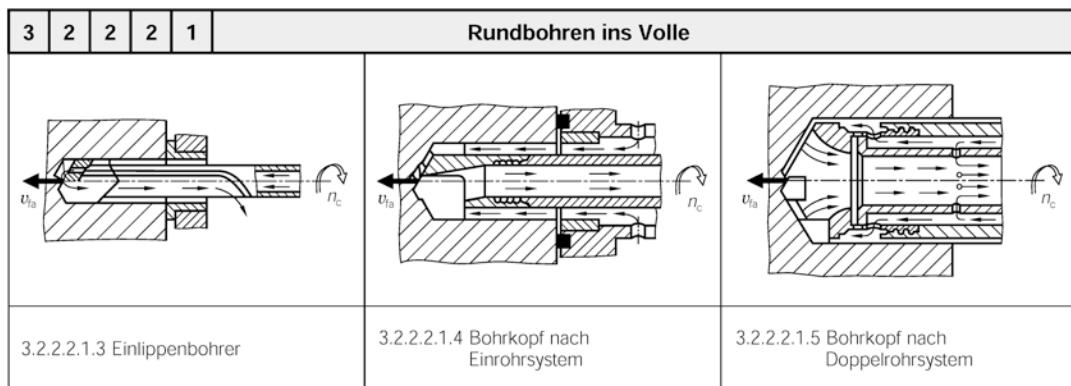


Abb. 4.75 Anwendung von Tiefbohrwerkzeugen beim Rundbohren ins Volle

ein besonderes Zuführsystem eingebracht, das den zwischen Werkstück und Werkzeug gebildeten Ringraum abdichtet und mit Hilfe der eingesetzten Bohrbuchse den Werkzeugschaft führt.

Das Bohren mit einem Bohrkopf nach dem Doppelrohrsystem (*Ejektorbohrverfahren*) ist dadurch gekennzeichnet, dass die Kühlenschmierflüssigkeit zwischen zwei konzentrisch angeordneten Rohren zugeführt und mit den Spänen durch das Innere des Späneabflussrohres wieder abgeführt wird. Der Spänetransport wird von dem mit Düsen versehenen Innenrohr begünstigt. Nach dem Ejektor-Prinzip entsteht ein Unterdruck, so dass man bei diesem Verfahren mit wesentlich geringeren Kühlenschmierflüssigkeitsdrücken auskommt.

4.6.2.3 Zeitberechnung

Die Schnittzeit beim Bohren lässt sich wie beim Drehen aus Vorschubweg, Vorschub und Drehzahl berechnen. Beim Bohren wird im Allgemeinen ein Sicherheitsabstand von 1 mm zwischen Werkzeug und Werkstück vorgesehen. Die Überlaufwege sind bei den einzelnen Bohrverfahren unterschiedlich. Beim Rundbohren ins Volle mit einem Wendelbohrer beträgt der Überlaufweg $l_{\bar{u}} = 2 \text{ mm}$. Der die Hauptnutzungszeit bestimmende Weg des Bohrwerkzeugs L in mm beträgt somit

$$L = l_w + l_{ak} + 1 \text{ mm} + l_{\bar{u}} . \quad (4.40)$$

Abb. 4.76 gibt die Eingriffsverhältnisse und einige wichtige Berechnungsgleichungen für das Rundbohren ins Volle mit einem Wendelbohrer an.

4.6.3 Fräsen

Fräsen ist ein spanendes Fertigungsverfahren, das mit meist mehrzahnigen Werkzeugen bei kreisförmiger Schnittbewegung und senkrecht oder auch schräg zur Drehachse gerichteter Vorschubbewegung nahezu beliebig geformte Werkstückflächen zu erzeugen vermag. Wesentliche Verfahrensmerkmale sind die im Gegensatz zu anderen Verfahren (z. B. Drehen und Bohren) sich stetig verändernden Eingriffsverhältnisse. Unterbrochener Schnitt und die in Abhängigkeit vom Vorschubrichtungswinkel nicht konstanten Spanungsdicken und damit verbundenen Schnittkraftschwankungen erfordern ein gutes dynamisches Verhalten des Systems Werkstück – Werkzeug – Werkzeugmaschine.

4.6.3.1 Fräswerfahren

Fräswerfahren werden nach DIN 8589-3 in *Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil- und Formfräsen*

Symbol	Bezeichnung	Formeln
d_w	Bohrdurchmesser	
l_w	Bohrtiefe nach dem Durchbohren	$l_{\alpha\kappa} = \frac{a_p}{\tan \kappa} = \frac{d_w}{2 \cdot \tan \frac{\sigma}{2}}$
A	Spanungsquerschnitt	
a_p	Schnittbreite	$A = b \cdot h = a_p \cdot f_z$
b	Spanungsbreite	
h	Spanungsdicke	$v_c = d_w \cdot \pi \cdot n_c$
v_c	Schnittgeschwindigkeit	
v_{fa}	Vorschubgeschwindigkeit (axial)	$v_{fa} = z \cdot f_z \cdot n_c$
t_c	Schnittzeit	
Q	Zeitspannungsvolumen	$t_c = \frac{l_w + l_{\alpha\kappa}}{f \cdot n_c}$
z	Anzahl der Schneiden	
κ	Einstellwinkel	
σ	Spitzenwinkel	$Q = \frac{d_w^2 \cdot \pi}{4} \cdot f \cdot n_c$
$l_{\alpha\kappa}$	Anschnittweg	
n_c	Drehzahl	$f = z \cdot f_z$
$f(f_z)$	Vorschub (Vorschub je Schneide)	

Abb. 4.76 Zeitberechnung beim Rundbohren ins Volle mit einem Wendelbohrer

unterteilt, wie aus Abb. 4.77 hervorgeht. Nach Art des Werkzeugeingriffs kann zwischen dem

- *Umfangsfräsen*,
- *Stirnfräsen* und
- *Stirn-Umfangsfräsen*

unterschieden werden. Hierbei erzeugen jeweils die am Umfang liegenden Hauptschneiden, die an der Stirnseite des Fräswerkzeugs liegenden Nebenschneiden oder die am Umfang bzw. der Stirnseite wirkenden Haupt- und Nebenschneiden gleichzeitig die gewünschte Werkstückform.

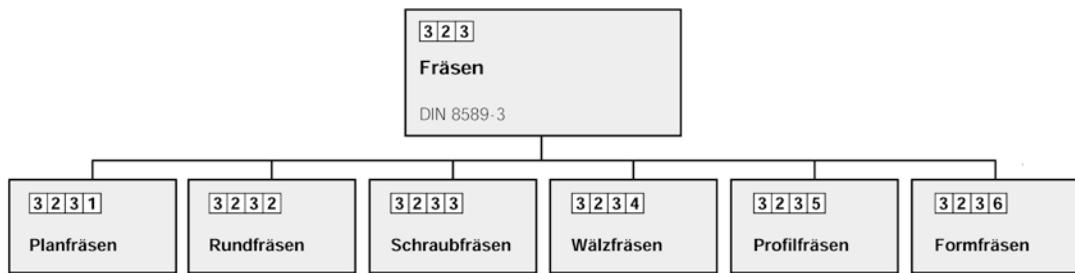


Abb. 4.77 Einteilung der Fräswerfahren. (nach DIN 8589-3)

Planfräsen ist Fräsen mit geradliniger Vorschubbewegung zur Erzeugung ebener Flächen. Verfahrensvarianten des Planfräsons sind in Abb. 4.78 gezeigt.

Beim Rundfräsen lassen sich kreiszyklindrische Flächen mit außen- oder innenverzahnten Fräsern erzeugen. Werkzeug- und Werkstückdrehachse stehen bei üblichen Rundfräswerfahren parallel zueinander.

Als wirtschaftliche Alternative zum Drehen haben sich in bestimmten Anwendungsfällen Rundfräswerfahren entwickelt, bei denen die Werkzeugdrehachse annähernd senkrecht zur Werkstückdrehachse angeordnet ist (sog. Drehfräsen), Abb. 4.79.

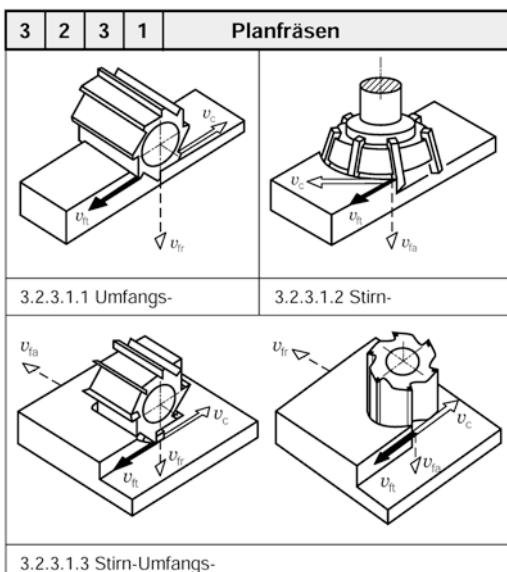


Abb. 4.78 Planfräswerfahren

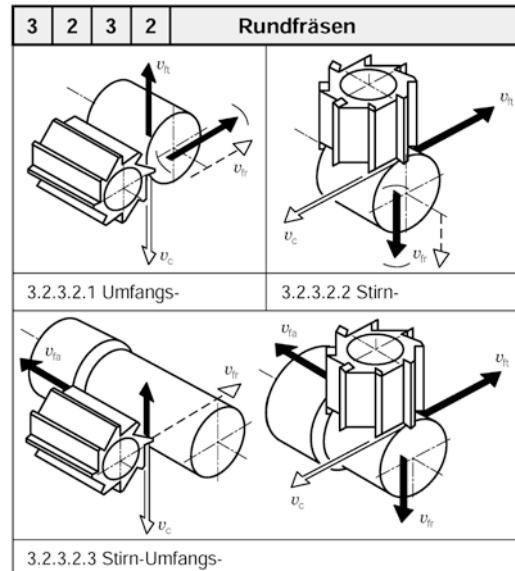


Abb. 4.79 Rundfräswerfahren

Mit *Schraubfräsen* bezeichnet man Fräswerfahren, bei denen unter wendelförmiger Vorschubbewegung schraubenförmige Flächen am Werkstück entstehen (z. B. Gewinde und Zylinderschnecken).

Zum Schraubfräsen gehören wie in Abb. 4.80 das Langgewindefräsen und das Kurzgewindefräsen. Langgewindefräsen ist Schraubfräsen mit einem einprofiligen Gewindefräser, dessen Achse in Richtung der Gewindesteigung geneigt ist und dessen Vorschub der Gewindesteigung entspricht. Das Kurzgewindefräsen erfolgt dagegen mit einem mehrprofiligen Gewindefräser, dessen Achse zur Werkstückachse parallel liegt und dessen Vorschub der Gewindesteigung

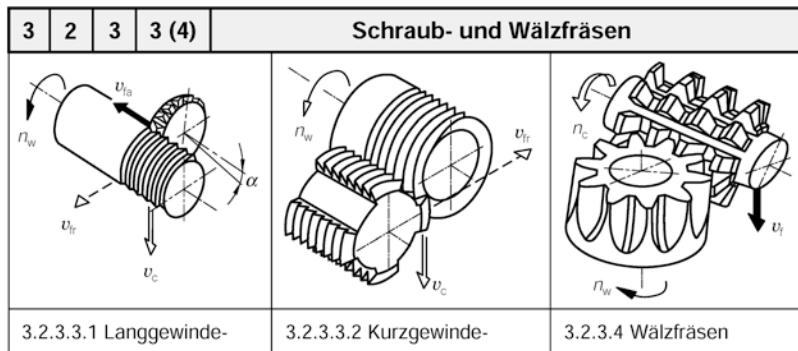


Abb. 4.80 Schraub- und Wälzfräsenverfahren

entspricht. Zur Herstellung des Gewindes ist dabei lediglich etwas mehr als eine Werkstückumdrehung erforderlich.

Wälzfräsen ist eines der wichtigsten Fertigungsverfahren zur Herstellung von Verzahnungen. Beim Wälzfräsen führt ein Fräser mit Bezugsprofil eine mit der Vorschubbewegung simultane Wälzbewegung aus. Dabei wälzen Werkzeug und Werkstück ähnlich wie eine Schnecke in einem Schneckenradgetriebe während des Zerspanvorgangs gegeneinander ab (Abb. 4.80).

Profilfräsen ist Fräsen unter Verwendung eines Werkzeugs mit werkstückgebundener Form. Es dient zur Erzeugung gerader (geradlinige Vorschubbewegung), rotationssymmetrischer (kreisförmige Vorschubbewegung) und beliebig in einer Ebene gekrümmte Profilflächen (gesteuerte Vorschubbewegung). Einige Beispiele für das Profilfräsen zeigt Abb. 4.81.

Formfräsen ist Fräsen, bei dem die Vorschubbewegung in einer Ebene oder räumlich gesteuert ist und dadurch die gewünschte Form des Werkstücks erzeugt wird. Zu dieser Verfahrensgruppe gehören das in Abb. 4.82 dargestellte.

- *Freiformfräsen*,
- *Nachformfräsen*,
- *Kinematisch-Formfräsen* und
- *NC-Formfräsen*.

Ein weiterer Gesichtspunkt für die Unterscheidung von Fräsenverfahren ist die Richtung der Vorschubbewegung gegenüber der Schnittbewegung. Man unterscheidet zwischen *Gleichlauf*- und *Gegenlauffräsen*. Die beiden Frässarten sind in Abb. 4.83 schematisch dargestellt.

Beim Gleichlauffräsen sind die Drehrichtung des Fräzers und die Werkstückbewegung im Bereich des Werkzeugeingriffs gleichgerichtet. Das Gleichlauffräsen mit Walzenfräser ist dadurch gekennzeichnet, dass mit Beginn des Schneideneingriffs der Vorschubrichtungswinkel φ größer oder gleich 90° ist und beim Austritt einen Maximalwert von 180° annimmt, Abb. 4.83a.

Das Gegenlauffräsen ist ein Fräsen, bei dem im Bereich des Werkzeugeingriffs die Drehrichtung des Fräzers und die Werkstückbewegung einander entgegengerichtet sind. Beim Gegenlauffräsen mit Walzenfräser kann der Vorschubrichtungswinkel φ im Eingriffsbereich Werte im Bereich $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ annehmen, Abb. 4.83b.

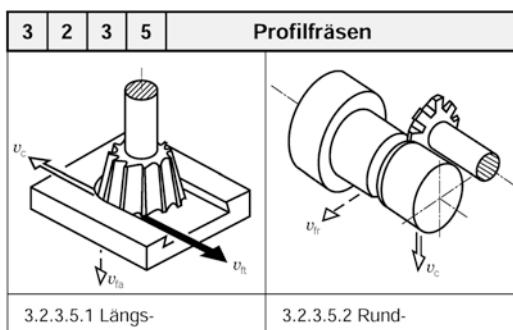
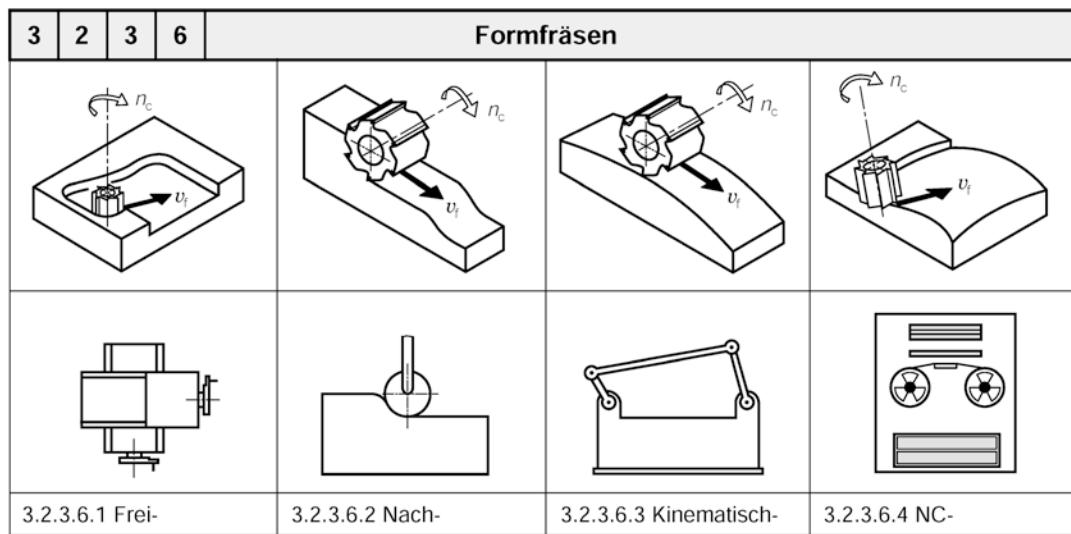
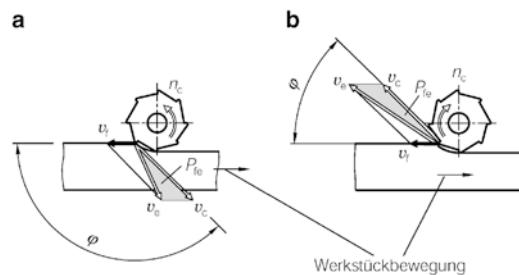


Abb. 4.81 Profilfräsenverfahren

**Abb. 4.82** Formfräsenverfahren**Abb. 4.83** Werkzeug- und Werkstückbewegungen beim Umfangfräsen : a Gleichlauffräsen ($\varphi > 90^\circ$) b Gegenlauffräsen ($\varphi < 90^\circ$). (nach DIN 6580)

Beim Gleichlauffräsen ist die Schnittkraft *gegen* den Maschinentisch gerichtet. Der Vorschubantrieb muss daher spielfrei sein, weil der Fräser sonst den Maschinentisch ruckartig in Vorschubrichtung ziehen und das Werkstück aus der Aufspannung reißen könnte. Es empfiehlt sich, das Werkstück stets gegen einen festen Anschlag zu spannen. Gegenüber dem Gegenlauffräsen nimmt die Spanungsdicke beim Gleichlauffräsen zwischen Schneidenein- und -austritt zunehmend ab, so dass sich die Schnittkraft ebenfalls verringert und Auffederungseffekte vermieden werden können. Beim Gleichlauffräsen lassen sich dadurch in der Regel bessere Oberflächengüten erzielen.

4.6.3.2 Fräswerkzeuge

Fräswerkzeuge sind nicht nach einheitlichen Gesichtspunkten unterteilt. Je nach konstruktions- und anwendungsbezogenen Merkmalen unterscheidet man u. a.

- Walzenfräser,
- Walzenstirnfräser,
- Scheibenfräser,
- Prismenfräser,
- Winkelstirnfräser,
- Halbkreisfräser,
- Messerköpfe,
- Kreissägewerkzeuge,
- Schafffräser,
- Langlochfräser,
- Schlitzfräser,
- T-Nutenfräser,
- Wälzfräser,
- Gewindefräser und
- Satzfräser.

Abb. 4.84 zeigt, dass grundsätzlich vier verschiedene *Fräswerkzeugtypen* definiert werden können. Demnach lassen sich die hauptsächlich angewendeten Fräswerkzeuge in *Umfangs-, Stirn-, Profil- und Formfräser* unterteilen.

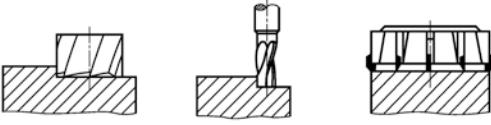
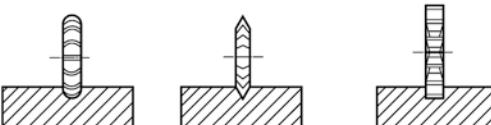
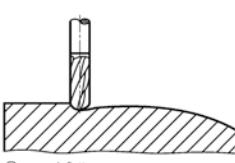
Fräsertyp	Wirkprofil	Wirkfläche	Beispiele
1 Umfangs-(walzen-)fräser	werkstück-ungebunden	Umfangsfläche (kreiszylindrisch)	 Walzenfräser
2 Stirnfräser	werkstück-ungebunden	Seiten(-Stirn)- u. Umfangsflächen	 Walzenstirnfräser Schafträser Messerkopf
3 Profilfräser	werkstück-gebunden	Profilfläche	 Halbkreisfräser Prismenfräser Scheibenfräser
4 Formfräser	werkstück-ungebunden	Formfläche beliebig	 Gesenkfräser

Abb. 4.84 Fräswerkzeuge und einige typische Anwendungen

Außer den Fräswerkzeugen aus Schnellarbeitsstahl werden zunehmend Hartmetallwerkzeuge angewendet. Zum Fräsen von Gusswerkstoffen werden inzwischen auch Wendeschneidplatten aus weniger stoßempfindlichen Mischkeramiksorten häufiger eingesetzt. Bei der Bearbeitung von Nichteisenmetallen können Schneidplatten aus polykristallinem Diamant erfolgreich verwendet werden. Schneidplatten aus polykristallinem Bornitrid bieten beim Fräsen von schwer zerspanbaren Eisenwerkstoffen aber eine wirtschaftliche Fertigungsalternative.

4.6.3.3 Zeitberechnung

Wichtige Berechnungsgleichungen sind in Abb. 4.85 und 4.86 am Beispiel des Umfangs-Planfrässens und Stirn-Planfrässens zusammengestellt.

Die Schnittzeit und das Zeitspannungsvolumen beim Fräsen werden im Wesentlichen

durch die Größe der Vorschubgeschwindigkeit bestimmt. Die Vorschubgeschwindigkeit v_f ist wiederum vom *Vorschub je Zahn* f_z (Zahnvorschub) abhängig, der mittelbar über die Drehzahl des Fräswerkzeugs n_c aber auch von der Größe der Schnittgeschwindigkeit beeinflusst wird. Als Vorschub je Zahn oder je Schneide bezeichnet man den Abstand zweier hintereinander entstehender Schnittflächen, gemessen in der Vorschubrichtung und in der Arbeitsebene. Es ist demnach

$$f_z = f/z. \quad (4.41)$$

Hierbei ist z gleich der Anzahl der Zähne oder Schneiden. Ist $z = 1$, wie z. B. beim Drehen oder beim Fräsen mit Einzahnfräser, so wird

$$f_z = f. \quad (4.42)$$

Vom Zahnvorschub abgeleitet ist der *Schnittvorschub* f_c . Als Abstand zweier unmittelbar hinter-

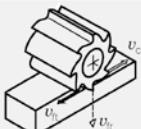
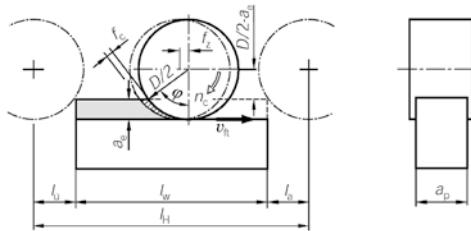
	Umfangs-Planfräsen	3.2.3.1.1																																																
																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Bezeichnung</th> <th>Formeln</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>l_w</td> <td>Werkstücklänge</td> <td>$l_H = l_w + l_o + l_u$</td> </tr> <tr> <td>l_o</td> <td>Anlaufweg</td> <td></td> </tr> <tr> <td>l_u</td> <td>Überlaufweg</td> <td>$l_o = \sqrt{D \cdot a_e - a_e^2}$</td> </tr> <tr> <td>$l_H$</td> <td>Hublänge</td> <td></td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>Fräserdurchmesser</td> <td>$v_c = D \cdot \pi \cdot n_c$</td> </tr> <tr> <td>$z$</td> <td>Zähnezahl des Fräzers</td> <td></td> </tr> <tr> <td>a_p</td> <td>Schnittbreite</td> <td>$v_t = z \cdot f_z \cdot n_c$</td> </tr> <tr> <td>$a_e$</td> <td>Arbeitseingriff</td> <td></td> </tr> <tr> <td>f_z</td> <td>Vorschub je Zahn</td> <td>$t_c = \frac{l_w + l_o}{v_t}$</td> </tr> <tr> <td>$n_c$</td> <td>Drehzahl</td> <td></td> </tr> <tr> <td>v_t</td> <td>Vorschubgeschwindigkeit (tangential)</td> <td>$f_c \approx f_z \cdot \sin \varphi; f_z = \frac{f}{z}$</td> </tr> <tr> <td>$v_c$</td> <td>Schnittgeschwindigkeit</td> <td></td> </tr> <tr> <td>t_c</td> <td>Schnittzeit</td> <td>$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_t$</td> </tr> <tr> <td>$f_c$</td> <td>Schnittvorschub</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Q_w</td> <td>Zeitspannungsvolumen</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Symbol	Bezeichnung	Formeln	l_w	Werkstücklänge	$l_H = l_w + l_o + l_u$	l_o	Anlaufweg		l_u	Überlaufweg	$l_o = \sqrt{D \cdot a_e - a_e^2}$	l_H	Hublänge		D	Fräserdurchmesser	$v_c = D \cdot \pi \cdot n_c$	z	Zähnezahl des Fräzers		a_p	Schnittbreite	$v_t = z \cdot f_z \cdot n_c$	a_e	Arbeitseingriff		f_z	Vorschub je Zahn	$t_c = \frac{l_w + l_o}{v_t}$	n_c	Drehzahl		v_t	Vorschubgeschwindigkeit (tangential)	$f_c \approx f_z \cdot \sin \varphi; f_z = \frac{f}{z}$	v_c	Schnittgeschwindigkeit		t_c	Schnittzeit	$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_t$	f_c	Schnittvorschub		Q_w	Zeitspannungsvolumen			
Symbol	Bezeichnung	Formeln																																																
l_w	Werkstücklänge	$l_H = l_w + l_o + l_u$																																																
l_o	Anlaufweg																																																	
l_u	Überlaufweg	$l_o = \sqrt{D \cdot a_e - a_e^2}$																																																
l_H	Hublänge																																																	
D	Fräserdurchmesser	$v_c = D \cdot \pi \cdot n_c$																																																
z	Zähnezahl des Fräzers																																																	
a_p	Schnittbreite	$v_t = z \cdot f_z \cdot n_c$																																																
a_e	Arbeitseingriff																																																	
f_z	Vorschub je Zahn	$t_c = \frac{l_w + l_o}{v_t}$																																																
n_c	Drehzahl																																																	
v_t	Vorschubgeschwindigkeit (tangential)	$f_c \approx f_z \cdot \sin \varphi; f_z = \frac{f}{z}$																																																
v_c	Schnittgeschwindigkeit																																																	
t_c	Schnittzeit	$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_t$																																																
f_c	Schnittvorschub																																																	
Q_w	Zeitspannungsvolumen																																																	

Abb. 4.85 Zeitberechnung beim Umfangs-Planfräsen

einander entstehender Schnittflächen wird er ebenfalls in der Arbeitsebene, jedoch senkrecht zur Schnittrichtung gemessen (vgl. Verfahrensschema Abb. 4.85 und 4.86). Es gilt

$$f_c \approx f_z \sin \varphi. \quad (4.43)$$

Bei Zerspanvorgängen mit $\varphi = 90^\circ$ und einschneidigen Werkzeugen, wie z. B. beim Drehen und Hobeln, ist

$$f_c = f_z = f. \quad (4.44)$$

4.6.4 Hobeln und Stoßen

Hobeln und Stoßen ist Spanen mit wiederholter meist geradliniger Schnittbewegung und schrittweiser, senkrecht zur Schnittrichtung liegender Vorschubbewegung. Hobel- und Stoßverfahren unterscheiden sich lediglich in der Aufteilung

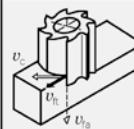
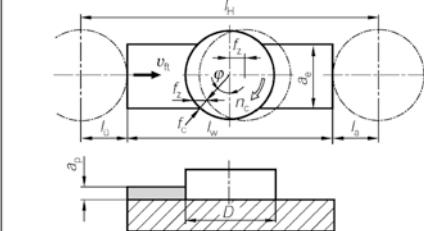
	Stirn-Planfräsen	3.2.3.1.2																																																
																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Bezeichnung</th> <th>Formeln</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>l_w</td> <td>Werkstücklänge</td> <td>$l_H = l_w + l_o + l_u$</td> </tr> <tr> <td>l_o</td> <td>Anlaufweg</td> <td></td> </tr> <tr> <td>l_u</td> <td>Überlaufweg</td> <td>$l_o + l_u = D$</td> </tr> <tr> <td>l_H</td> <td>Hublänge</td> <td></td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>Fräserdurchmesser</td> <td>$v_c = D \cdot \pi \cdot n_c$</td> </tr> <tr> <td>$z$</td> <td>Zähnezahl des Fräzers</td> <td></td> </tr> <tr> <td>a_p</td> <td>Schnittbreite</td> <td>$v_t = z \cdot f_z \cdot n_c$</td> </tr> <tr> <td>$a_e$</td> <td>Arbeitseingriff</td> <td></td> </tr> <tr> <td>f_z</td> <td>Vorschub je Zahn</td> <td>$t_c = \frac{l_w + l_o}{v_t}$</td> </tr> <tr> <td>$n_c$</td> <td>Drehzahl</td> <td></td> </tr> <tr> <td>v_t</td> <td>Vorschubgeschwindigkeit (tangential)</td> <td>$t_n = \frac{l_H}{v_t}$</td> </tr> <tr> <td>v_c</td> <td>Schnittgeschwindigkeit</td> <td></td> </tr> <tr> <td>t_c</td> <td>Schnittzeit</td> <td>$f_c \approx f_z \cdot \sin \varphi; f_z = \frac{f}{z}$</td> </tr> <tr> <td>$f_c$</td> <td>Schnittvorschub</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Q_w</td> <td>Zeitspannungsvolumen</td> <td>$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_t$</td> </tr> </tbody> </table>	Symbol	Bezeichnung	Formeln	l_w	Werkstücklänge	$l_H = l_w + l_o + l_u$	l_o	Anlaufweg		l_u	Überlaufweg	$l_o + l_u = D$	l_H	Hublänge		D	Fräserdurchmesser	$v_c = D \cdot \pi \cdot n_c$	z	Zähnezahl des Fräzers		a_p	Schnittbreite	$v_t = z \cdot f_z \cdot n_c$	a_e	Arbeitseingriff		f_z	Vorschub je Zahn	$t_c = \frac{l_w + l_o}{v_t}$	n_c	Drehzahl		v_t	Vorschubgeschwindigkeit (tangential)	$t_n = \frac{l_H}{v_t}$	v_c	Schnittgeschwindigkeit		t_c	Schnittzeit	$f_c \approx f_z \cdot \sin \varphi; f_z = \frac{f}{z}$	f_c	Schnittvorschub		Q_w	Zeitspannungsvolumen	$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_t$		
Symbol	Bezeichnung	Formeln																																																
l_w	Werkstücklänge	$l_H = l_w + l_o + l_u$																																																
l_o	Anlaufweg																																																	
l_u	Überlaufweg	$l_o + l_u = D$																																																
l_H	Hublänge																																																	
D	Fräserdurchmesser	$v_c = D \cdot \pi \cdot n_c$																																																
z	Zähnezahl des Fräzers																																																	
a_p	Schnittbreite	$v_t = z \cdot f_z \cdot n_c$																																																
a_e	Arbeitseingriff																																																	
f_z	Vorschub je Zahn	$t_c = \frac{l_w + l_o}{v_t}$																																																
n_c	Drehzahl																																																	
v_t	Vorschubgeschwindigkeit (tangential)	$t_n = \frac{l_H}{v_t}$																																																
v_c	Schnittgeschwindigkeit																																																	
t_c	Schnittzeit	$f_c \approx f_z \cdot \sin \varphi; f_z = \frac{f}{z}$																																																
f_c	Schnittvorschub																																																	
Q_w	Zeitspannungsvolumen	$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_t$																																																

Abb. 4.86 Zeitberechnung beim Stirn-Planfräsen

von Schnitt- und Vorschubbewegung auf Werkstück und Werkzeug. Beim Hobeln wird die Schnittbewegung vom Werkstück, beim Stoßen durch das Werkzeug ausgeführt. Große Fortschritte beim Fräsen bewirkten, dass das Hobeln auf vielen Gebieten durch das Fräsen ersetzt wurde. Die Anwendungsgebiete des Hobeln und Stoßens beschränken sich heute auf das Herstellen von Werkstückflächen, die durch andere spanende Fertigungsverfahren nur schwer oder nicht wirtschaftlich zu fertigen sind.

4.6.4.1 Hobel- und Stoßverfahren

Hobel- und Stoßverfahren sind wegen der gleichen Kinematik beim Zerspanvorgang in DIN 8589-4 zusammengefasst worden, wie dies Abb. 4.87 zeigt. Nach der Art der zu erzeugenden Flächen, kinematischen und werkzeugbezogenen Gesichtspunkten ergeben

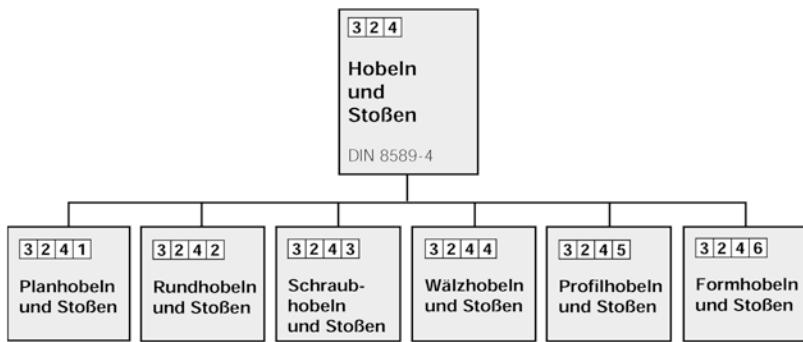


Abb. 4.87 Einteilung der Hobeln- und Stoßverfahren. (nach DIN 8589-4)

sich für das Hobeln und Stoßen Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil- und Formverfahren. Abb. 4.88 zeigt die Kinematik einiger wichtiger Hobel- bzw. Stoßverfahren.

4.6.4.2 Hobelwerkzeuge

Die Werkzeuge entsprechen in ihrem Aufbau den Werkzeugen zum Drehen. Als Schneidstoffe werden vorwiegend Schnellarbeitsstähle verwendet. Infolge des unterbrochenen Schnittes bleibt die Anwendung von Hartmetallwerkzeugen beim Hobeln und Stoßen auf die zähen Anwendungsgruppen beschränkt.

Hobelwerkzeuge werden überwiegend zur Bearbeitung von langen, schmalen Plan- und Profilflächen eingesetzt. Ein typisches Beispiel ist das Bearbeiten von Führungen und Aussparungen an Werkzeugmaschinengestellen wie in Abb. 4.89.

4.6.4.3 Zeitberechnung

Die Schnitt- und die Rückhubgeschwindigkeit sind beim Hobeln und Stoßen nicht konstant, da das Werkstück bzw. das Werkzeug bei jedem Hub beschleunigt und wieder abgebremst werden muss. Bei der Berechnung der Zeit beim Hobeln ist daher von einer mittleren Schnitt- bzw. Rückhubgeschwindigkeit auszugehen. Abb. 4.90 gibt die wichtigsten Berechnungsgleichungen auf der Grundlage der jeweiligen Werkzeugwege für das Planhobeln und -stoßen an.

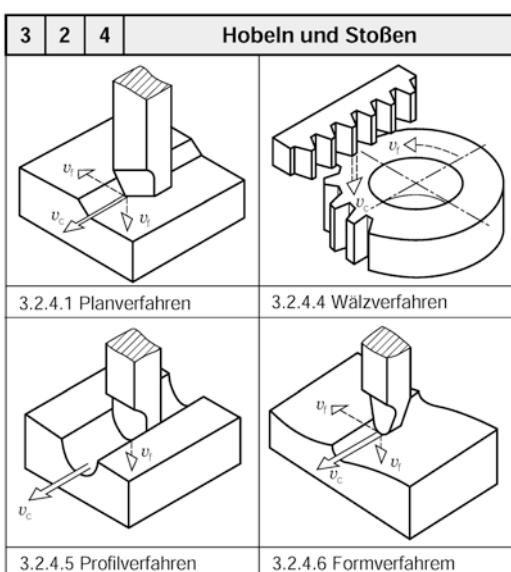


Abb. 4.88 Plan-, Wälz-, Profil- und Formverfahren beim Hobeln und Stoßen

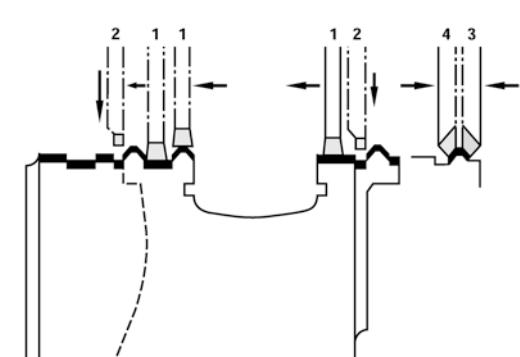


Abb. 4.89 Hobelwerkzeuge für typische Bearbeitungen: 1 Breitschlitzhobelmeißel 2 Nutenhobelmeißel 3 gerader Hobelmeißel 4 gerader Hobelmeißel

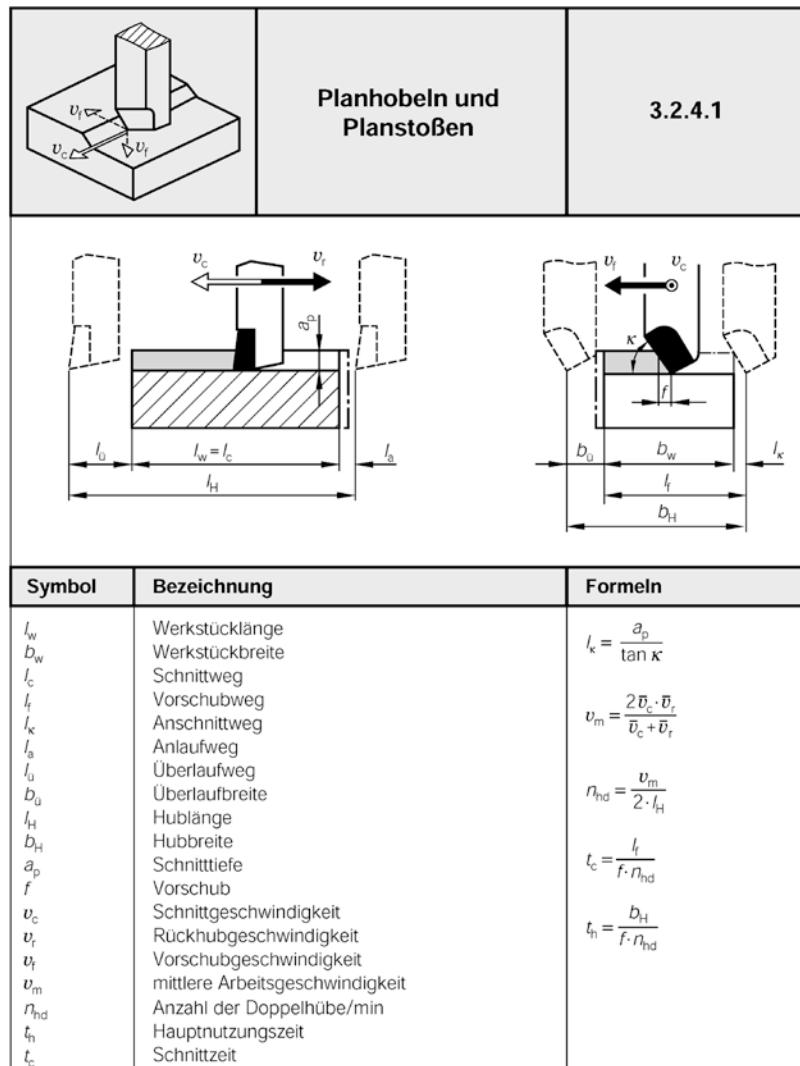


Abb. 4.90 Zeitberechnung beim Planhobeln und -stoßen

4.6.5 Räumen

Räumen ist nach DIN 8589-5 ein spanendes Fertigungsverfahren, bei dem der Werkstoffabtrag mit einem mehrschneidigen Werkzeug erfolgt, dessen Schneiden hintereinander liegen und jeweils um eine Spanungsdicke h gestaffelt sind. Die Vorschubbewegung kann durch die Relativlage der Schneiden entfallen, da der Vorschub gleichsam im Werkzeug „installiert“ ist. Räumwerkzeuge gestatten es, eine kompli-

zierte Fertigteileigometrie meist in einem Durchgang zu erzeugen. Die dadurch gegenüber anderen Fertigungsverfahren wesentlich kürzeren Schnittzeiten kennzeichnen das Räumen als typisches Fertigungsverfahren in der Massenfertigung. Die mit Räumverfahren erreichbaren Schnittgeschwindigkeiten liegen i. Allg. im Bereich von $v_c = 1 \text{ m/min}$ bis $v_c = 15 \text{ m/min}$. Beim Hochgeschwindigkeitsräumen können heute bereits Schnittgeschwindigkeiten bis zu $v_c = 50 \text{ m/min}$ verwirklicht werden.

4.6.5.1 Räumverfahren

Je nach Art der zu erzeugenden Werkstückfläche lässt sich das Räumen in *Plan-, Rund-, Schraub-, Profil- und Formräumen* unterteilen, wie aus Abb. 4.91 hervorgeht.

Weiterhin kann je nach Lage der zu bearbeitenden Werkstückflächen zwischen *Außenräumen* und *Innenräumen* unterschieden werden. Das Außenräumen ist vorwiegend beim Plan- und Profilräumen gebräuchlich. Eine besondere Variante des Außenräumes ist das *Kettenräumen*. Hierbei werden die Werkstücke entweder auf einem Rundtisch oder auf speziellen Schlitten, die mittels Ketten bewegt werden, am feststehenden Räumwerkzeug entlanggeführt. Da bei diesem Verfahren keine Rückhubbewegung erforderlich ist und gleichzeitig mehrere Werkstücke mit dem Werkzeug im Eingriff sein können, ist die Ausbringung (Anzahl der gefertigten Werkstücke je Zeiteinheit) beim Kettenräumen sehr hoch.

Das Profilräumen wird zum Herstellen von komplizierten Innen- und Außenprofilen angewandt. Einige typische Profile für das Außen- und Innenräumen zeigt Abb. 4.92.

Beim Räumen von ebenen und kreiszylindrischen Flächen oder Profilen entsprechend Abb. 4.93 führt das Werkzeug oder das Werkstück eine geradlinige Schnittbewegung aus. Wenn der geradlinigen Schnittbewegung zusätzlich eine Drehbewegung des

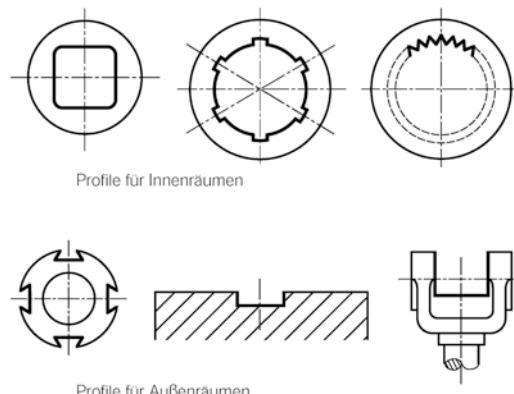


Abb. 4.92 Herstellbare Profile beim Außen- und Innenräumen

Werkstücks oder Werkzeugs überlagert wird, lassen sich schraubenförmige Flächen fertigen. Das Erzeugen einer Formfläche ist mit einer gesteuerten, kreisförmigen Schnittbewegung möglich. Formräumverfahren sind das Schwenkräumen (ohne Werkstückbewegung) und das Drehräumen (mit rotierender Werkstückbewegung).

4.6.5.2 Räumwerkzeuge

Innenräumwerkzeuge sind meist einteilig ausgeführt und werden bevorzugt aus Schnellarbeitsstahl hergestellt. Bei der Bearbeitung von Grauguss werden auch mit Hartmetallschneiden bestückte Räumwerkzeuge eingesetzt.

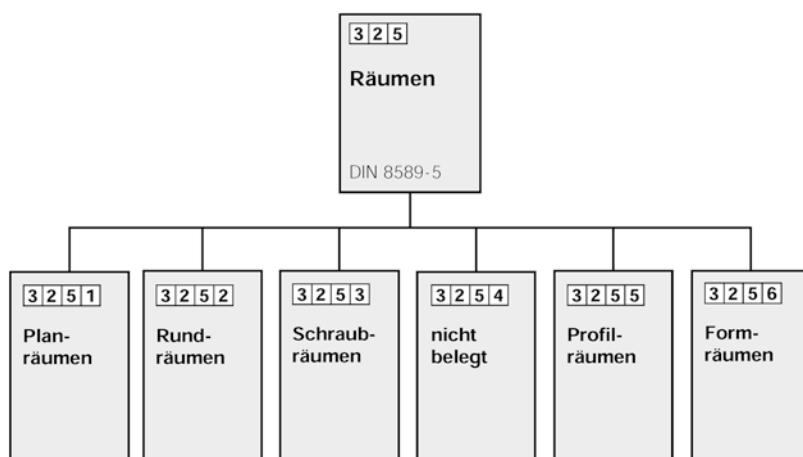


Abb. 4.91 Einteilung der Räumverfahren. (nach DIN 8589-5)

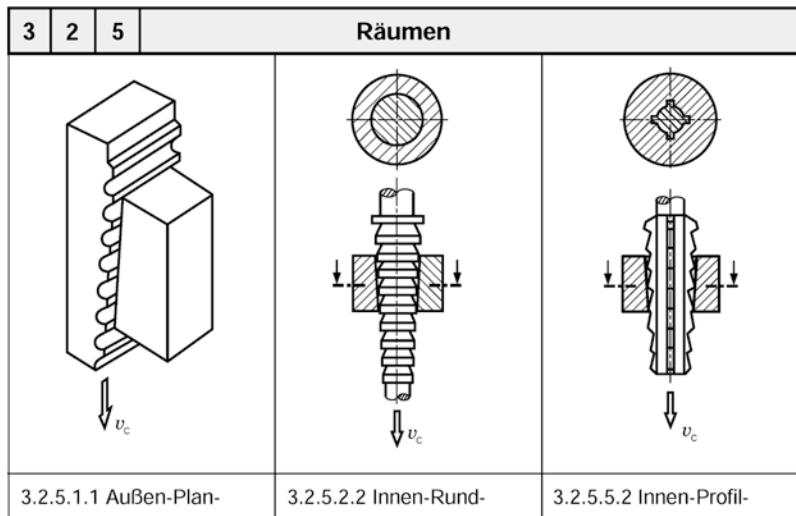


Abb. 4.93 Plan-, Rund- und Profilräumverfahren

Bei größeren zu räumenden Volumen kann der Zahnungsteil auch aus mehreren auswechselbaren Räumbuchsen bestehen.

Außenräumwerkzeuge sind besonders bei schwierigen Werkstückformen aus mehreren Zahnungsteilabschnitten zusammengesetzt. Sie lassen sich dadurch leichter herstellen, nachschleifen und gegebenenfalls über Keilleisten nachstellen.

Den Aufbau eines Innenräumwerkzeugs zeigt Abb. 4.94. Es besteht aus Schaft, Aufnahme, Zahnungsteil, Führungsstück und Endstück. Am Schaft wird das Werkzeug eingespannt, damit es durch das Werkstück gezogen werden kann. Der Aufnahme- oder Einführungs-

teil hat die Aufgabe, die Werkstücke zu zentrieren. Die Zahnungslänge setzt sich aus Schrupp-, Schlicht- und Reserveteil zusammen, die nacheinander zum Eingriff kommen. Die Reservezahnung dient zur Kompensation der durch Nachschleifen bewirkten Maßänderungen (Kalibrieren).

Die Schneidengeometrie eines Räumwerkzeugs ist nach DIN 1416 in Abhängigkeit von der Zahnteilung t festgelegt. Abb. 4.95 zeigt hierzu Einzelheiten.

Das Spanraumvolumen der Spankammer ist so zu bemessen, dass diese den Span während des Schnitts aufnehmen kann. Die Größe der Spankammer ist abhängig von der Spanungsdi-

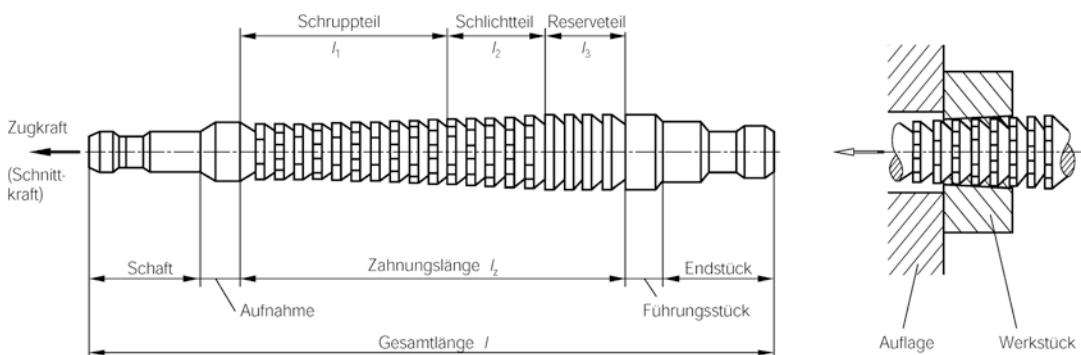


Abb. 4.94 Aufbau eines Innenräumwerkzeugs

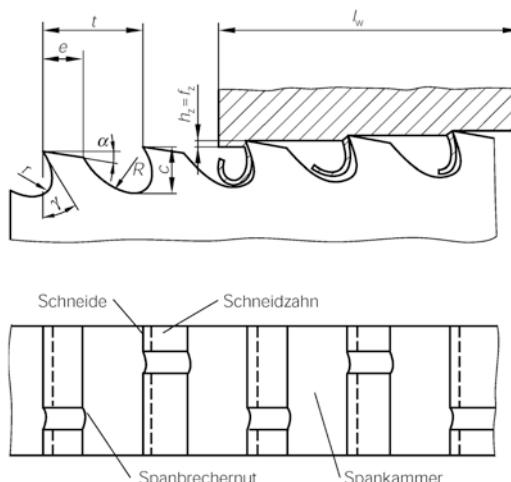


Abb. 4.95 Eingriffsverhältnisse und Schneidengeometrie beim Räumen. (nach DIN 1416)

α Freiwinkel γ Spanwinkel c Spankammertiefe e Zahnrücken t Zahnteilung R, r Spanflächenradien h_z Spanungsdicke je Zahn l_w Spanngslänge

cke h , die beim Räumen dem Vorschub je Zahn f_z entspricht, der Spanungs- bzw. Werkstücklänge l_w und der Spanraumzahl R . Die Spanraumzahl (Abschn. 4.5.5) ist werkstückstoffabhängig. Als vorteilhaft haben sich für die Spanraumzahl R beim Räumen für spröde, bröckelnde Werkstückstoffe Werte von 3 bis 6 und für zähe, langspanende Werkstückstoffe Werte von 4 bis 8 erwiesen.

Die Angaben beziehen sich auf das Profilräumen. Die unteren Werte gelten für das Schruppen, die oberen für das Schlichten. Die Zahnteilung t kann nach der empirischen Gleichung

$$t = (2,5 \text{ bis } 3) \cdot \sqrt{hl_wR} \text{ in mm (4.45)}$$

ermittelt werden. Beim Schruppen und Schlichten ergeben sich aufgrund der unterschiedlich anfallenden Spanmengen auch variierende Zahnteilungen.

Damit für die jeweilige Bearbeitungsaufgabe günstige Spanformen zu erhalten sind, werden in die einzelnen Schneiden Spanbrechernuten eingearbeitet.

Die Anordnung der aufeinanderfolgenden Schneiden bezeichnet man als *Zahnstaffelung*.

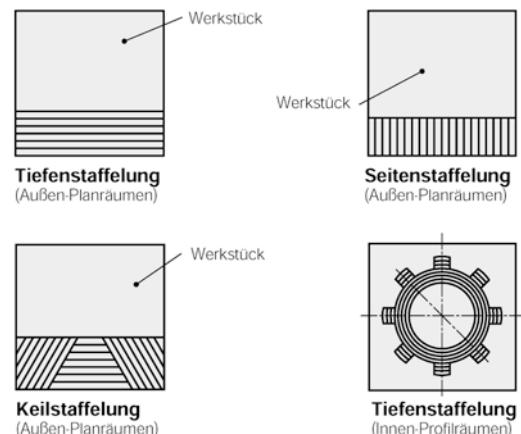


Abb. 4.96 Staffelungsarten und Zerspanschemata beim Räumen. (nach DIN 1415)

Nach DIN 1415 lassen sich verschiedene Staffelungsarten definieren, wie aus Abb. 4.96 hervorgeht. Bei der *Tiefenstaffelung* dringen die Schneiden senkrecht zu der zu fertigenden Werkstückfläche in ganzer Schneidenbreite in den Werkstückstoff ein und spanen diesen bei geringen Spanungsdicken ab.

Bei der *Seitenstaffelung* dringen die Schneiden parallel (tangential) zu der zu fertigenen Werkstückfläche in den Werkstückstoff ein und spanen diesen streifenweise bei großer Spanungsdicke ab. Die endgültige Werkstückoberfläche wird anschließend meist mit einem Schneidenteil in Tiefenstaffelung erzeugt. Besonders Oberflächen von gegossenen und geschmiedeten Werkstücken lassen sich damit ohne größere Werkzeugbeanspruchungen räumen. Gegenüber der Tiefenstaffelung ergeben sich bei der Seitenstaffelung jedoch längere Werkzeuge. Eine Sonderform ist die sogenannte *Keilstaffelung*.

4.6.5.3 Zeitberechnung

Bei der Berechnung der Zeiten beim Räumen ist zwischen den Zeiten für den Arbeits- und Rückhub zu unterscheiden. Dabei bestimmt der eigentliche Räum- bzw. Arbeitshub die Hauptzeit, während der in der Regel mit einer höheren Geschwindigkeit erfolgende Rückhub beim Räumen als Nebennutzung (mittelbare Nutzung) angesehen wird.

Da das Räumen mit einem mehrschneidigen Werkzeug erfolgt, dessen Schneiden jeweils gestaffelt zum Eingriff kommen, ist bei der Berechnung des Zeitspannungsvolumens von der Eingriffszähnezahl z_e auszugehen. Wenn für alle Schneiden die gleiche Spanungsdicke je Zahn h_z angenommen wird, gilt

$$Q_w = z_e h_z b v_c \quad (4.46)$$

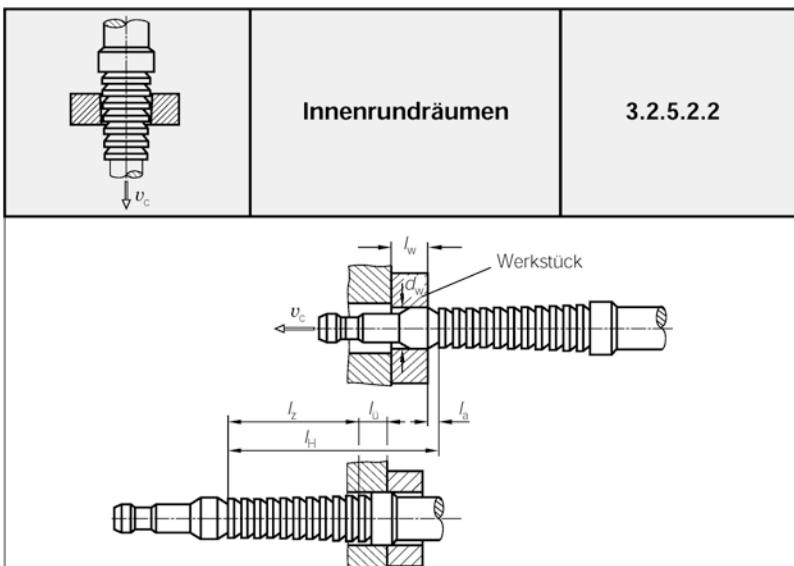
mit

$$z_e = \frac{l_w}{t} . \quad (4.47)$$

Die wichtigsten Gleichungen für die Zeitberechnung beim Innenrundräumen zeigt Abb. 4.97.

4.6.6 Auswahl spanender Fertigungsverfahren

Die Auswahl von Fertigungsverfahren wird von den geometrischen und technologischen Merkmalen und Kenngrößen einer Bearbeitungsaufgabe bestimmt. Exemplarisch seien diese



Symbol	Bezeichnung	Formeln
l_w	Werkstücklänge	$l_H = l_w + l_a + l_u + l_z$
d_w	Werkstückdurchmesser	
l_a	Anlaufweg	$t_c = \frac{l_w + l_z}{v_c}$
l_u	Überlaufweg	
l_z	Zahnungslänge	$t_h = \frac{l_H}{v_c}$
l_H	Hublänge	
v_c	Schrittgeschwindigkeit	$z_e = \frac{l_w}{t}$
t_c	Schnittzeit	
t_h	Hauptnutzungszeit	$A = z_e \cdot h_z \cdot b$
z_e	Eingriffszähnezahl	
t	Zahnteilung	$b = d_w \cdot \pi$
A	Spanungsquerschnitt	
b	Spanungsbreite	$Q = A \cdot v_c$
h_z	Spanungsdicke je Zahn	
Q	Zeitspannungsvolumen	

Abb. 4.97 Zeitberechnung beim Innenrundräumen

für wellenförmige Bauteile betrachtet, die mit 75 % einen erheblichen Anteil des Werkstückspektrums darstellen, und anhand eines Beispiels aus der Großserienfertigung beurteilt.

Ausgangspunkt sind zunächst die werkstückseitigen Fertigungsanforderungen. Wellenförmige Bauteile werden beschrieben durch die Werkstückkontur (Komplexeil), die zu fertigenden Teilformelemente, die Abmessungen von Roh- und Fertigteil und den hieraus abgeleiteten geometrischen und technologischen Kenngrößen sowie den formelementspezifischen Toleranzen und Oberflächenmerkmalen, dem Werkstückstoff und den verlangten Stoffeigenschaften, Abb. 4.98.

Technologische Merkmale, die die Auswahl spangebender Fertigungsverfahren bestimmen, betreffen die Art des Rohteils, die realisierbaren Zeitspanvolumina, die Spanbildung und Zerspankräfte, den Verschleiß, die Temperatur, Oberflächengüte und die Einhaltung vorgegebener Maß-, Form- und Lagegenauigkeiten, Abb. 4.99.

Die Einhaltung der verlangten Werkstückqualität und die damit verbundene Prozess-Sicherheit ist besonders für die Serienfertigung

ein entscheidendes Beurteilungskriterium. So werden beispielsweise beim messgesteuerten Drehen kleinerer Werkstückdurchmesser Maß- und Formgenauigkeiten von IT 8 bis IT 7 problemlos eingehalten.

Anhand eines typischen Bearbeitungsbeispiels aus der Großserienfertigung für die Automobilindustrie wird deutlich, wie die Varianz von Werkstückkontur und die formelementbezogenen Konstruktionsmerkmale wichtige geometrische und technologische Kenngrößen für die Verfahrensauswahl bestimmen, Abb. 4.100.

So sind z. B. das Verhältnis der Bearbeitungszugaben Z oder der Stabilitätsgrad λ wichtige Kenngrößen, die die Auswahl von Fertigungsverfahren beeinflussen.

Die Anforderungen an die Fertigung für diese Bearbeitungsaufgabe sind in Abb. 4.101 den jeweiligen Formelementen zugeordnet. Neben der Beurteilung anwendbarer Fertigungsverfahren gestattet die formelementbezogene Analyse der Fertigungsanforderungen eine Überprüfung von Gestaltungsbereichen hinsichtlich ihrer Fertigungsgerechtigkeit. Können z. B. Formelemente wie Einstiche oder Fasen vereinheitlicht werden

Kontur der Welle	
Art der Formelemente	
Abmessungen von Roh- und Fertigteil	
Geometrische Kenngrößen	$\lambda = \frac{b_w}{\sum d_{wi}} \quad D = \frac{d_{wmax}}{d_{wmin}}$
Formelement-spezifische Toleranzen und Oberflächenmerkmale	
Werkstückstoff, Stoffeigenschaften	

Abb. 4.98 Auswahl spangebender Fertigungsverfahren abhängig von der Werkstückkontur, den Formelementen, dem Zerspanvolumen und der Oberflächengüte

Rohteil	
Zeitspanvolumen	$\rightarrow t_{ci} = \frac{V_{wi}}{\bar{Q}}$ <p>Forderung : $\bar{Q} \uparrow, V_{wi} \downarrow$</p>
Spanbildung	<p>z.B. Spanformen</p>
Kräfte	
Verschleiß	
Temperatur	
Oberflächengüte	
Maß-, Form-, Lagegenauigkeit	

Abb. 4.99 Technologiebezogene Auswahlkriterien beim Spanen wellenförmiger Teile, wie z. B. Zeitspanvolumen, Spanbildung, Zerspankräfte sowie Oberflächengüte und Maß-, Form- und Lagegenauigkeit

oder gar entfallen? Können abzutrennende Zerspanvolumina durch konstruktive Maßnahmen reduziert oder Forderungen an die Werkstückgenauigkeit weiter minimiert bzw. vereinheitlicht werden?

In Weiterführung der auf das Formelement bezogenen Betrachtungsweise lassen sich alle nach DIN 8580 bekannten Fertigungsver-

fahren, die geeignet sind, die geometrischen und technologischen Fertigungsanforderungen zu erfüllen, in einer Verfahrensmatrix darstellen, wie sie in Abb. 4.102 dargestellt ist.

Sie zeigt die Verfahrensalternativen, die in einer ersten Schätzung zusammenhängende Konturbereiche (Formelementkomplexe) erstellen können und eine minimale Anzahl von

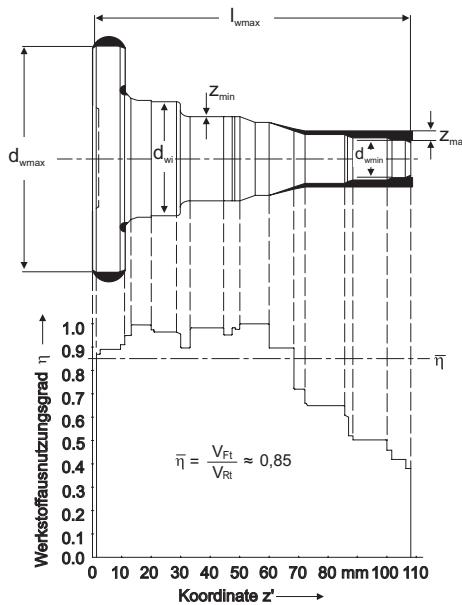


Abb. 4.100 Bearbeitungsbeispiel aus der Automobilindustrie: Einfluss der Werkstückkontur auf die geometrischen und technologischen Kenngrößen

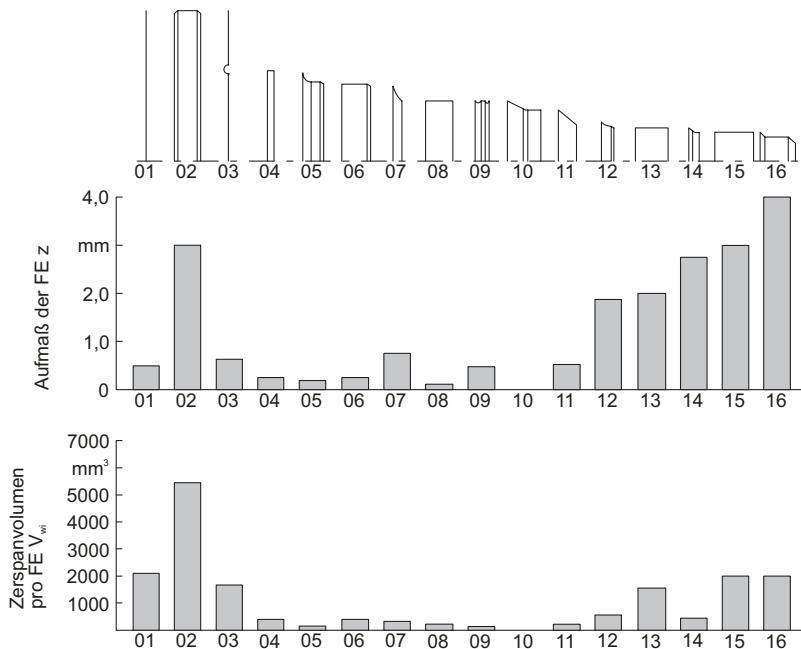


Abb. 4.101 Fertigungsanforderungen für verschiedene Formelemente, siehe Beispiel in Abb. 4.100

Fertigungsverfahren zum Erzeugen der gesamten Werkstückkontur benötigen. Im vorliegenden Fall sind das die Fertigungsverfahren **Formdrehen** und **Profilschleifen**, Abb. 4.102.

Für beide Verfahrensalternativen ließe sich nun eine feinere Unterteilung nach den in DIN 8589, Teil 0 festgelegten Ordnungskriterien zu grunde legen und schrittweise eine nach den die Produktivität bestimmenden Faktoren Zeiten, Kosten, Qualität, Prozess-Sicherheit sowie Umweltverträglichkeit optimierte Fertigungsfolge ermitteln.

4.7 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden

Die Bezeichnung „Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden“ soll darauf hinweisen, dass einerseits die Schneidengeometrie bei der Herstellung der Werkzeuge nicht fest vorgegeben werden kann und andererseits die Werkzeuge mehrere Schneiden gleichzeitig zum Einsatz bringen. Die Anordnung der Schneiden und die für die Zerspanung wichtigen Winkel an den einzelnen Schneiden sind also nicht bekannt. Als Schneidwerkstoff werden

Formelement	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
Fertigungsverfahren																
Plandrehen	●															
Runddrehen				●				(●)				(●)		●		
Profildrehen							●				●	●		●		
Formdrehen	●	●	●	●	●	●	●	(●)	●	●	●	●	(●)	●	●	●
Planfräsen	●															
Rundfräsen				●			(●)				(●)		●			
Profilfräsen					●					●	●	●		●		
Formfräsen	●			●			●	(●)		●		●		●		
Hobeln, Stoßen	●															
Räumen	●															
Abtrennsägen	●															
Planschleifen	●															
Rundschleifen				●					●				●		●	
Profilschleifen	●	●	(●)	●	●	●	●	●	(●)	●	●	●	●	●	●	●
Formschleifen	●				●			●	●			●		●		
Bandschleifen	●	●					●				●		●		●	

● normal erfüllbar

(●) durch Sondermaßnahmen

Abb. 4.102 Verfahrensmatrix für die Abschätzung zusammenhängender Konturbereiche (Formelementkomplexe) zwecks Minimierung der Anzahl von Fertigungsverfahren zum Erzeugen der gesamten Werkstückkontur. Im vorliegenden Fall sind das die Fertigungsverfahren Formdrehen und Profilschleifen

verschiedene Hartstoffe in Kornform mit Durchmessern im Bereich von 0,5 bis 350 µm eingesetzt. Diese sog. Schneidkörner können je nach Bearbeitungsverfahren in gebundener oder loser Form eingesetzt werden. Zu den gebundenen Werkzeugen gehören Schleifscheiben, Schleifbänder und Honsteine. Die losen Schneidkörner werden beim Läppen und Polieren als Suspension eingesetzt. Untersuchungen der Topografie an Schleifscheiben und Honsteinen ergaben, dass die meisten der Schneidkörner vorwiegend negative Spanwinkel aufweisen.

4.7.1 Schleifen

Nach DIN 8589 ist Schleifen ein Fertigungsverfahren mit vielschneidigen Schleifwerkzeugen (Schleifscheiben, -bänder oder -steine), deren geometrisch unbestimmte Schneiden auf diesen gebunden angeordnet oder schichtweise auf Trägern aufgebracht sind. Die Schneidkörner bestehen aus natürlichen oder synthetischen Schneidstoffen. Typisch für das Schleifen sind negative Spanwinkel der Schneiden bis zu -90° . Die Spandicken sind im Verhältnis zur Größe der Schneidkorndurchmessers meist klein. Die mittleren Korndurchmesser bewegen sich in der Größenordnung von 0,5 bis 350 µm. Schnittgeschwindigkeiten und Energiebedarf sind verglichen mit anderen spanenden Fertigungsverfahren relativ hoch. Die Schnittgeschwindigkeiten beim Schleifen liegen im Normalfall bei 25 bis 45 m/s. Beim Hochgeschwindigkeitschleifen mit CBN werden bereits Schnittgeschwindigkeiten zwischen 200 bis 500 m/s erreicht. Mit entsprechenden Konditionierungsverfahren müssen die Schleifwerkzeuge durch Abrichten (Profilieren und Schärfen) und Reinigen schleiffähig gehalten werden.

4.7.1.1 Grundlagen

Begriffe und Kenngrößen Schleifens

Die wichtigsten Geschwindigkeiten für Schleifprozesse sind die Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten. Sie werden auf einen bestimmten Wirkpunkt auf der aktiven Oberfläche

des Schleifkörpers bezogen. Dieser Referenzpunkt wird beim Umfangsschleifen zur Bestimmung von Kenngrößen in die Ebene senkrecht zur Schleifscheibenachse und Hauptvorschubbewegung (dem „prinzipial point“ D) gelegt.

Konsequent genommen ist die Schnittgeschwindigkeit die Relativgeschwindigkeit zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück. Sie wird auch als Wirkgeschwindigkeit v_e bezeichnet. Die Wirkgeschwindigkeit ist die vektorielle Summe von Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit

$$v_e = v_c + v_f.$$

Die Umfangsgeschwindigkeit v_s , entspricht der Schnittgeschwindigkeit, wenn die Vorschubgeschwindigkeit erheblich kleiner als die Umfangsgeschwindigkeit ist. Es gilt dann

$$v_c = v_s = d_s \cdot \pi \cdot n_s \quad (4.48)$$

mit

d_s Schleifscheibendurchmesser

n_s Schleifscheibendrehzahl

Die Vorschubgeschwindigkeit v_f ist die momentane Geschwindigkeit der Vorschubbewegung eines bestimmten Punktes der Kontaktfläche relativ zum Werkstück. Die Vorschubgeschwindigkeiten lassen sich auf tangentiale (v_{ft}), axiale (v_{fa}) und radiale (v_{fr}) Komponenten aufteilen. Sie bewirken eine stetige Spanabnahme während eines Hubes oder einer Umdrehung

Eine wesentliche Kenngröße zur Beurteilung des Schleifprozesses ist das Zeitspanvolumen Q_W . Dies gibt an, wie viel Werkstoff pro Zeiteinheit zerspart wird:

$$Q_W = v_{ft} \cdot A_D \quad (4.49)$$

mit

v_{ft} Vorschubgeschwindigkeit, in Umfangsrichtung der Schleifscheibe wirkend

A_D Spanungsquerschnitt der Schleifscheibe

Für das Planschleifen ist v_{ft} die Tischvorschubgeschwindigkeit und für das Rundschleifen die

Umfangsgeschwindigkeit des Werkstücks v_w . Der Spanungsquerschnitt A_D errechnet sich aus der Zustellung a_e und der Eingriffsbreite a_p :

$$A_D = a_e \cdot a_p . \quad (4.50)$$

Häufig wird das Zeitspanvolumen auf 1 mm der Eingriffsbreite bezogen. Daraus ergibt sich das sogenannte bezogene Zeitspanvolumen Q'_w :

$$Q'_w = \frac{Q_w}{a_p} \quad (4.51)$$

bzw

$$Q'_w = a_e \cdot v_f . \quad (4.52)$$

Eine weitere Prozesskenngröße ist die Äquivalente Spanungsdicke h_{eq} . Sie kennzeichnet eine fiktive Spanschicht und berechnet sich aus dem bezogenen Zeitspanvolumen und der Schnittgeschwindigkeit. Für gerade Umfangsschleifscheiben gilt:

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_c} . \quad (4.53)$$

Die dahinter stehende Modellvorstellung ist, dass der durch die Zustellung und die Vorschubgeschwindigkeit definierte zerspante Werkstoff durch die Kontaktzone abtransportiert werden muss. Es gilt die Kontinuitätsgleichung:

$$a_e \cdot v_f = h_{eq} \cdot v_c . \quad (4.54)$$

Eine genauere Berechnung unter Berücksichtigung der Schneidenabstände und des äquivalenten Schleifscheibendurchmessers findet sich bei Pahlitzsch und Helmerding. Die äquivalente Spandicke wird mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit kleiner und mit zunehmendem Zeitspanvolumen größer.

Sie lässt sich aus den abgespantem Volumen auf Werkstück- und Schleifscheibenseite ableiten (Abb. 4.103).

Abgespantes Volumen auf Werkstückseite:

$$V_w = v_f \cdot A_D \cdot t_c = Q_w \cdot t_c$$

Abgespantes Volumen auf Schleifscheibenseite:

$$V_w = h_{eq} \cdot b_s \cdot v_c \cdot t_c$$

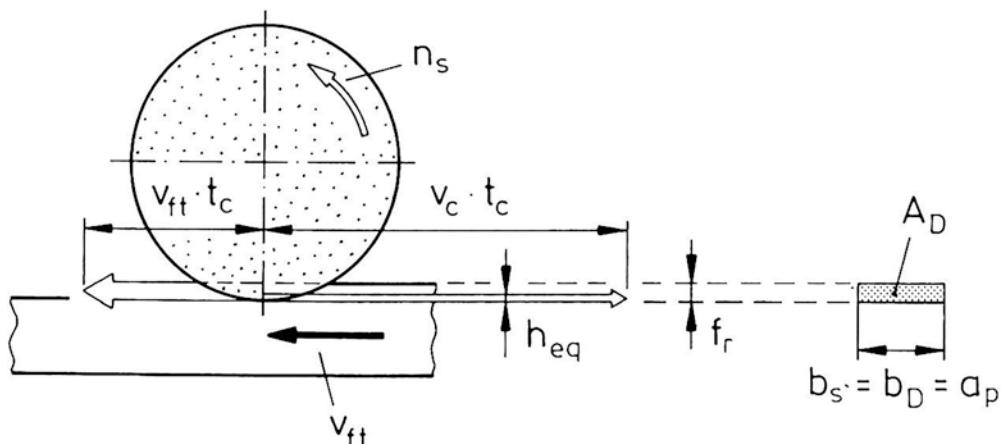


Abb. 4.103 Äquivalente Spanungsdicke beim Plan-Umfangsschleifen nach Saljé

$$h_{eq} = Q_w / (b_s \cdot v_c) = v_{ft} \cdot A_D / (b_s \cdot v_c) = v_{ft} \cdot f_r / v_c$$

Je nach Schleifverfahren stellen sich unterschiedlich große Kontaktlängen zwischen der Schleifscheibe und dem Werkstück ein (Abb. 4.104). Je größer die Kontaktlänge l_g ist, desto schlechter sind die Bedingungen für eine effiziente Kühlsmierstoffzufuhr und desto höher ist damit die Gefahr der thermischen Überlastung des Werkstücks. Im Vergleich der Umfangsschleifverfahren, wie Außenrundschleifen oder Planschleifen sind beim Innenrundschleifen bei gleichen Zeitspannungsvolumina Q'_w und gleichen Spanungsquerschnitten A_D die größten geometrischen Kontaktflächen A_{wkg} zu erwarten. Die Kontaktlänge l_g lässt sich aus der Zustellung und dem äquivalenten Werkstückdurchmesser d_{eq} mit folgender Näherungsgleichung berechnen:

$$l_g = \sqrt{a_e \cdot d_{eq}} . \quad (4.55)$$

Durch den äquivalenten Schleifscheibendurchmesser d_{eq} lassen sich die Schleifverfahren untereinander vergleichen und die Kontaktlänge für die Verfahren leicht ermitteln:

$$d_{\text{eq}} = \frac{d_s \cdot d_w}{d_w \pm d_s} \quad (4.56)$$

mit

d_s Schleifscheibendurchmesser,

d_w Werkstückdurchmesser

Die geometrische Kontaktlänge l_g ist abhängig von den Krümmungsverhältnissen von Schleifscheibe und Werkstück und erreicht im Vergleich zum Außenrund- und Planschleifen beim Innenrundschleifen den größten Wert. Die Krümmungsverhältnisse werden in Gl. (4.56) durch das sich ändernde Vorzeichen berücksichtigt (+ für Außenrundschleifen und -für Innenrundschleifen).

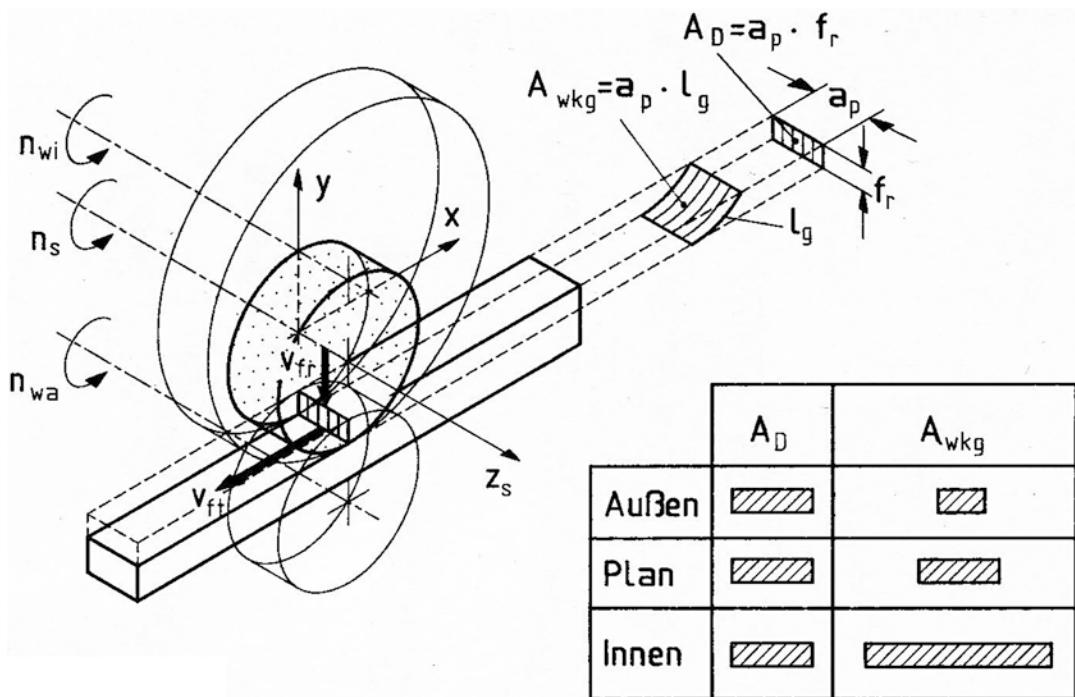


Abb. 4.104 Vergleich der Kontaktflächen bei verschiedenen Umfangsschleifverfahren nach Klyk

Spanbildung beim Schleifen

Die Spanbildung beim Schleifen unterscheidet sich aufgrund der sehr viel kleineren Spanungsdicken von der Spanbildung der Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide. Die Eindringtiefe des Schneidkorns beträgt abhängig von der Körnung nur einige zehntel Mikrometer. Ein einzelnes Korn gleitet zunächst über den Werkstückstoff, ohne in diesen einzudringen (Abb. 4.105). Zu Beginn des eigentlichen Schnittvorganges ergibt sich eine elastische Verformung der Werkstückoberfläche, die sich dann zu einer plastischen Umformung mit Grataufwürfen wandelt. Ab einer bestimmten Grenzspandicke werden die Festigkeitswerte im Werkstoff überschritten und es kommt zum Scheren des Werkstoffes mit der Ausbildung eines Spans. Die Spanbildung tritt erst ein, wenn eine ausreichende Spandicke erreicht ist. Im Prinzip verläuft der Spanbildungsprozess ähnlich wie beim Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden. Jedoch wird der Werkstoff seitlich von der Schneide verdrängt und der Spannungszustand ist dreiachsig und nicht zweiachsig.

4.7.1.2 Schleifwerkzeuge

Die Schleifwerkzeuge können je nach gekörntem Schleifmittel in konventionelle und hochharte Schleifwerkzeuge eingeteilt werden. Zu den konventionellen Schneidstoffen zählen verschiedene Arten von Elektrokorund und Siliziumkarbid. Als hochharte Schneidstoffe werden natürliche und synthetische Diamanten und kubisch kristallines Bornitrid (CBN) eingesetzt.

Der konventionelle Schleifwerkzeugaufbau besteht aus einem Dreistoffsyste: dem Schneidkorn, der Bindung und den Poren. Die Schneidkörner müssen von ihren Werkstoffkennwerten (Härte und Zähigkeit) in der Lage sein, den Werkstückstoff zu zerspanen. Die Bindung hat die Aufgabe, die Schneidkörner zu halten und zu stützen. Die Poren sollen die Schleifspäne aufnehmen und aus der Kontaktzone heraus transportieren sowie den Kühlsmierstoff in der Kontaktzone zur Wirkung zu bringen.

Hochharte Schleifwerkzeuge (Schleifscheiben) besitzen einen Trägerkörper aus Keramik, Kunstharz oder Metall, auf dem Schleifsegmente mit CBN oder Diamant (gehalten in einem Bindungssystem) aufgeklebt werden.

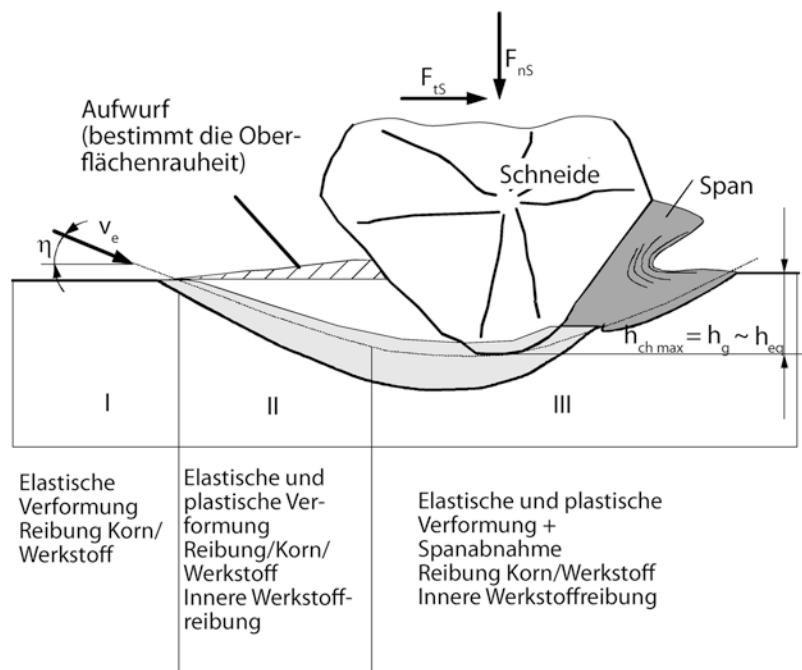


Abb. 4.105 Spanbildung beim Schleifen nach König

Schneidstoffe und Bindung

Die heute vorwiegend eingesetzten Schneidstoffe sind Edelkorund (Elektrokorund), Siliziumkarbid, kubisches Bornitrid (CBN) sowie synthetischer und natürlicher Diamant.

Elektrokorund wird mit zunehmendem Reinheitsgehalt als Normalkorund, Halbedelkorund und Edelkorund (weiß oder rosa) bezeichnet. Aufgrund eines anderen Herstellungsverfahrens wird heute auch das SolGel Korund eingesetzt, das wegen vieler sog. Nebenschneiden, die bei entsprechender Belastung durch Mikrosplitterung entstehen, sehr schnittfreudig ist. Normal-Korund wird aufgrund höherer Zähigkeit zum Schruppschleifen von Stahl und Stahlguß eingesetzt. Edelkorund ist spröder und eignet sich zum Feinschleifen und für Schleifaufgaben mit größeren Berührungsflächen.

Das Siliziumkarbid ist härter und scharfkantiger als Korund und wird für die Hartmetall-, Keramik- und Glasbearbeitung eingesetzt. Heute wird vorwiegend das sog. grüne Siliziumkarbid eingesetzt, da es gegenüber den anderen Sorten eine höhere Härte aufweist.

Das kubisch kristalline Bornitrid (CBN) ist nach Diamant das härteste Schleifmittel. Es wird insbesondere beim Hochgeschwindigkeits-schleifen eingesetzt. Es hat eine höhere Wärmebeständigkeit gegenüber Diamant und es lassen sich mit CBN nahezu alle Werkstückstoffe problemlos schleifen. Die einzige Ausnahme bilden die Nickel-, Titan- und Kobaltbasis-legierungen aus dem Triebwerksbau wegen des hohen abrasiven Verschleißes der Körner.

Diamantschneidkörner eignen sich hervorragend für die Schleifbearbeitung von nicht-eisenhaltigen Werkstoffen. Aufgrund der hohen chemischen Affinität des Kohlenstoffs zum Eisen in Stahlwerkstoffen kommt es zu einem starken chemischen Verschleiß. Dazu ist noch der starke Rückgang der Härte ab Temperaturen von ca. 800 °C zu berücksichtigen, weil dann das Diamantgitter des Kohlenstoffs in sein Grafitgitter umklappt. Typische Einsatzgebiete für Diamantschneidkörner sind Schleifaufgaben an Gestein, Keramik, Glas sowie speziellen Kunststoffen und Aluminiumlegierungen.

Die Bindungen stellen das Gerüst des Schleifkörpers dar. Sie halten die Schneidkörner in Position und stellen je nach Bindungstyp mehr oder weniger Poren zum Kühlsmierstoff- und Spänetransport zur Verfügung. Es wird in anorganische und organische Bindungen unterteilt. Zu den anorganischen Bindungen zählen die keramische und die metallische Bindung. Kunstharz und Gummibindungen sind typische Vertreter organischer Bindungen.

Bestandteile keramischer Bindungen sind Ton, Kaolin, Quarz, Feldspat und Fritten (gesintertes Kornmaterial). Schleifscheiben mit keramischer Bindung sind spröde und stoßempfindlich. Da sie temperaturbeständig und chemisch widerstandsfähig gegen Öl und Wasser sind, werden sie außer zum Trockenschliff auch zum Nassschliff eingesetzt.

Metallische Bindungen sind entweder gesintert und bestehen aus Bronze, Stahl oder Hartmetall. Sie können auch durch einen galvanischen Abscheidungsprozess aufgebracht werden. Für einlagig belegte hochharte Schleifscheiben wird eine galvanisch aufgebrachte Nickelschicht verwendet.

Kunstharzbindungen werden vorwiegend aus Polyester und Phenoplasten aufgebaut. Die mit diesen Bindungen hergestellten Schleifscheiben besitzen keine Poren und müssen unbedingt nach dem Profilieren geschärft werden, damit der für das Schleifen erforderliche Schneidkornüberstand erzeugt wird. Die Bindung besitzt eine hohe Festigkeit und gleichzeitig eine gewisse Elastizität, so dass große Zeitspannungsvolumen geschliffen werden können.

Gummibindungen aus synthetischem Kautschuk sind nachgiebiger als Kunstharzbindungen, jedoch dürfen sie nicht zu hohen Schleiftemperaturen ausgesetzt werden. Sie werden deshalb für Schlichtschleif- oder Finish-schleifaufgaben eingesetzt.

Konventionelle Schleifscheiben mit Korund- und Siliziumkarbid-Schneidkörnern

Die konventionellen Schleifscheiben werden in eine vorgegebene Form gepresst, verdichtet und anschließend in speziellen Öfen zur Ausbildung

der Bindungskräfte gebrannt. Es gibt eine große Anzahl an Formen, die in der DIN 69111 zusammengestellt sind. Generell wird in Umfangs- und Seitenschleifscheiben sowie in Schleifstifte unterschieden, Abb. 4.106).

Die Bezeichnungen für Schleifwerkzeuge werden ebenfalls genormt. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass diese Schleifscheibenbezeichnungen nicht konsequent von den Schleifscheibenherstellern angewendet werden. Daher dient die folgende Erläuterung eher dazu, die prinzipielle Bezeichnung von Schleifscheiben vorzustellen.

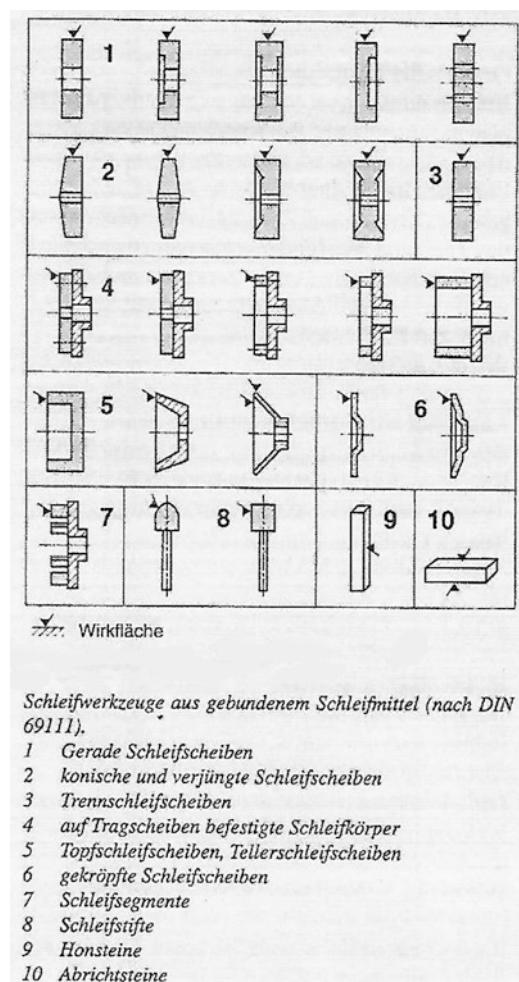


Abb. 4.106 Prinzipielle Schleifscheibentopografie nach DIN 69111.

- 1 Gerade Schleifscheiben
- 2 konische und verjüngte Schleifscheiben
- 3 Trennschleifscheiben
- 4 auf Tragscheiben befestigte Schleifkörper
- 5 Topschleifscheiben, Tellerschleifscheiben
- 6 gekröpfte Schleifscheiben
- 7 Schleifsegmente
- 8 Schleifstifte
- 9 Honsteine
- 10 Abrichtsteine

Aus der Bezeichnung können die Abmessungen, die Schneidkornart, die Härte, das Gefüge, die Bindungsart und die zulässige Umfangsgeschwindigkeit entnommen werden. Die grundsätzlichen Bezeichnungen sind in Abb. 4.107 zusammengestellt.

Nach FEPA ist die Bezeichnung für die Schneidkorngröße durch die Anzahl der quadratischen Siebmaschen auf einem Zoll (25,4 mm) gegeben. Um die mittlere Schneidkorngröße zu ermitteln, muss die Diagonale der Masche berechnet werden. Daraus ergibt sich etwa die Größenordnung des Schneidkorndurchmessers. Häufig werden auch Schneidkornmischungen eingesetzt, so dass kleinere Schneidkörner die größeren in der Schleifscheibe besser stützen können. Je größer die Zahl für die Körnung nach FEPA ist, desto kleiner ist der reale Schneidkorndurchmesser. Die Schneidkorngröße beeinflusst maßgeblich die spätere Werkstückrautiefe. Diese nimmt mit größer werdenden Korndurchmessern zu. Für das Schruppschleifen und für langspanende Werkstoffe werden die größeren Schneidkorndurchmesser verwendet.

F 400 x 100 x 127 DIN 69 126 A-60-K-8-V45	
Randform	F
Außendurchmesser	400
Breite	100
Bohrungsdurchmesser	127
Schleifmittel	A
Körnung	60
Härtegrad	K
Gefüge	8
Bindung	V
zul. Umfangsgeschw.	45

Schleifmittel	
Korund	A
Siliciumcarbid	C

Körnung	
grob	6
mittel	30
fein	70
sehr fein	220
	8 20 280 ... 1200

Härtegrad				
äußerst weich	A	B	C	D
sehr weich	E	F	G	
weich	H	I	J	K
mittel	L	M	N	O
hart	P	Q	R	S
sehr hart	T	U	V	W
äußerst hart	X	Y	Z	

Gefüge	
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	offenes Gefüge
	geschlossenes Gefüge

Bindungstyp	
V	Keramische Bindung
S	Silikatbindung
R	Gummibindung
RF	Gummibindung faserstoffverstärkt
B	Kunstharzbindung
BF	Kunstharzbindung faserstoffverstärkt
E	Schellackbindung
M	Magnesitbindung

Abb. 4.107 Schleifscheibenspezifikation nach DIN ISO 525 für konventionelle Schleifscheiben

Die Härte eines Schleifkörpers ergibt sich aus der Bindungsfestigkeit und der Verdichtung bei der Herstellung der Schleifscheiben. Sie kann unabhängig von der Spezifikationsangabe gemessen werden. Geeignete Härtemessverfahren sind das *Zeiss-Mackensen Sandstrahlverfahren* oder die E-Modulbestimmung durch eine Schwingungsanalyse der Schleifscheibe. Je tiefer der Sandstrahleindruck auf der Schleifscheibenoberfläche ist, desto weicher ist die Schleifscheibe. Der E-Modul ist für weiche Schleifscheiben geringer als für härtere. Je härter eine Schleifscheibe ist, desto geringer wird im Allg. der Schleifscheibenverschleiß.

Es wird zwischen geschlossenen bis offenen Gefügestrukturen der Schleifscheiben unterschieden, die sich auf die Standfestigkeit der Schleifscheibe bzw. des zu schleifenden Profils auswirken. Die Härte der Schleifscheibe wird daher auch von der Struktur mitbestimmt. Einige Schleifscheibenhersteller haben die Gefügekennzahlen noch erweitert (z. B. bis 20), so dass sie für ihre eigene Herstellung feinere Zwischenabstufungen vornehmen können. Große Gefügekennziffern werden bei langspanenden und temperaturempfindlichen Werkstoffen eingesetzt.

Die Bindungsarten werden durch die Kennbuchstaben V für keramische Bindung und B für die Kunstharszbindung gekennzeichnet.

Die letzte Spezifikationsangabe gibt Auskunft über die größte zulässige Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit in m/s. Nicht alle Bindungstypen sind in der Lage, hohe Umfangsgeschwindigkeiten auszuhalten. Eine Überschreitung der angegebenen Umfangsgeschwindigkeit kann zu einem Reißen des Schleifkörpers führen. Die dabei wirkenden Kräfte können so hoch werden, dass die Schleifmaschine irreparabel beschädigt wird. Daher ist es zwingend, diese Angabe zu beachten.

Schleifwerkzeuge mit Diamant- und CBN-Schneidkörnern

Der wesentliche Unterschied zu konventionellen Schleifscheiben ist der Grundaufbau hochharter Schleifscheiben. Ein dünner Schleifbelag aus Schneidkörnern und Bindung wird auf einem

Trägerkörper platziert. Der Trägerkörper kann aus Stahl, Kunstharsz, Aluminium oder auch aus Faserverbundwerkstoff aufgebaut werden. Der Trägerkörperwerkstoff wird unter dem Gesichtspunkt der Massereduzierung und des Dämpfungsverhaltens ausgewählt.

Die Eigenschaften von Schneidkörnern und Bindungen wurden schon zuvor erläutert und können je nach Anwendungsfall auch für die hochharten Schleifscheiben ausgewählt werden. Die Kennzeichnung für hochharte Schleifscheiben unterscheidet sich in einigen Punkten von der konventioneller Schleifscheiben, Abb. 4.108.

Die Schneidkorngröße wird direkt in Mikrometern angegeben. Zur Anwendung kommt vorwiegend der Bereich von 91 bis 181 μm . Die Angabe über die Bindungshärte ist nur noch grob unterteilt von sehr hart bis weich. Mit der Angabe der Schneidkornkonzentration kann ein-

1A1-500-15-2-305-B 151-KSS-TYB-V240	
Schleifscheibenform	1A1
Außendurchmesser	500
Belagsbreite	15
Belaghöhe	2
Bohrungsdurchmesser	305
Kornart	B
Korngröße	151
Bindungstyp	KSS
Bindungshärte	T
Einsatzgebiet	Y
Grundkörper	B
Konzentration	V240
Kornart	
Diamant	D
CBN	B
Bindungshärte	
sehr hart	T
hart	R
mittel	N
weich	J
Grundkörper	
Aluminum	A
Kunstharsz	B
Konzentration	
Bezeichnung	Kt/cm ³
C 25	1,1
C 30	1,65
C 50	2,2
C 75	3,3
C 100	4,4
C 125	5,5
C 135	6,0
C 150	6,6
Bezugssystem I	Bezeichnung
	Vol. %
Bgs. II	
V 120	12
V180	18
V240	24

Abb. 4.108 Schleifscheibenspezifikation nach DIN ISO 6104 für hochharte CBN- und Diamantschleifscheiben

geschätzt werden, wie viele Schneiden effektiv an der Zerspanung beteiligt sein könnten. Die Angabe C 100 weist darauf hin, dass 4,4 Karat (1 Karat = 0,2 g) pro Kubikzentimeter Schleifbelag enthalten sind. Je höher die Schneidkornkonzentration, desto weniger wird das einzelne Schneidkorn belastet.

Schleifscheibenaufspannung

Die Schleifscheiben werden auf einem Aufspanndorn zwischen zwei Spannflanschen kraftschlüssig gehalten. Konventionelle Schleifscheiben können problemlos aufgeschoben werden. Die Flansche werden mit Spannschrauben drehmomentüberwacht festgezogen. Zum Ausgleich von Unebenheiten und zur Vermeidung von Spannungen werden zwischen die Spannflanschen und die Schleifscheibe Papier- oder Kunststoffzwischenlagen gelegt.

Nach dem Aufspannen muss die Schleifscheibe ausgewuchtet werden. Dies kann durch Massenverschiebung erfolgen, was heute schon automatisch durch elektromotorische Verstellung der Auswuchtgewichte am Spindelkopf geschieht. Letzter Arbeitsgang vor dem Schleifen ist dann in jedem Fall das Konditionieren der Schleifscheibe.

4.7.1.3 Schleifprozess und Konditionierverfahren

Der Schleifprozess muss so ausgewählt werden, dass die geforderte Werkstückqualität reproduzierbar und sicher hergestellt werden kann. Die Werkstückqualität enthält zu erfüllende Maß- und Formtoleranzen, eine Werkstückrautiefe und einen Gefüge- bzw. Randzonenzustand.

Die Schleifscheibe verändert sich kontinuierlich mit zunehmender Bearbeitungszeit. So kommt es durch den fortschreitenden Schleifscheibenverschleiß dazu, dass die vorgegebene Werkstückqualität nicht mehr erreicht wird. Dann ist ein Konditionieren der Schleifscheibe erforderlich.

Rauheit

Oberflächenbeschaffenheiten in der spanenden Bearbeitung lassen sich nach DIN 4760 in unterschiedliche Gestaltabweichungen einteilen.

Die Norm ist in sechs unterschiedliche Ordnungen gegliedert. In der Schleifbearbeitung ist vor allem die Rauheit, die in der 3. bis zur 6. Ordnung beschrieben wird, die wichtigste Oberflächenkenngroße. Die gängigsten Rauheitskenngrößen sind die maximale Rautiefe R_{\max} , der arithmetische Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z , Abb. 4.109. Für die Bestimmung von R_z wird die Auswertelänge R_z in fünf gleiche Teilstücke getrennt. In jedem dieser Abschnitte wird die Rautiefe Z_1 bis Z_5 ermittelt. R_z ergibt sich dann aus der Mittelung der fünf Werte.

Die Abbott-Kurve (Abb. 4.110) ist eine weitere Möglichkeit, die Rauheit nach DIN EN ISO 13565 zu bewerten. Sie ermöglicht eine getrennte Beurteilung der Kernrautiefe R_k , der Spitzenhöhe R_{pk} und der Riefentiefe R_{vk} . Hierzu wird der Materialanteil über der Lage der Schnittfläche aufgetragen. An diese Materialanteilkurve wird in einem zweiten Schritt eine Sekante mit einer Länge von 40 % der Materialanteilkurve und einer kleinstmöglichen Steigung angelegt. Durch Verlängern dieser Geraden wird R_k bestimmt. Als nächstes kann der kleinste (größte) Materialanteil M_{rl} (M_{r2}) des Rauheitskernprofils bestimmt werden. Dieser ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Materialanteilkurve mit einer parallel zur Abszisse verlaufenden Geraden, die bis zum Startpunkt (Endpunkt) der Ausgleichsgeraden bei 0 % (100 %) verschoben wird. Die reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} (Riefentiefe R_{vk}) ist die Höhe des Dreiecks A_1 (A_2) mit der Basislage M_{rl} ($100\% - M_{r2}$). Hierbei ist der Flächeninhalt von A_1 (A_2) so zu wählen, dass dieser dem Körper entspricht, der durch die Ordinate, die Materialanteilkurve und die zuvor verschobene Parallele aufgespannt wird.

Angewendet wird die Bestimmung dieser Rauheitskennwerte vor allem bei der Bewertung von Gleit-, Wälz-, oder Dichtoberflächen wie gehonten Zylinderlaufflächen. Hier werden kleine Werte von R_k und R_{pk} angestrebt, damit ein möglichst großer Traganteil entsteht sowie ein hoher Wert für R_{vk} , der als Maß für das Ölhaltevolumen gilt.

Die Rauheit wird im einfachsten Fall mit taktilen Messgeräten (sog. Tastschnittgeräten) er-

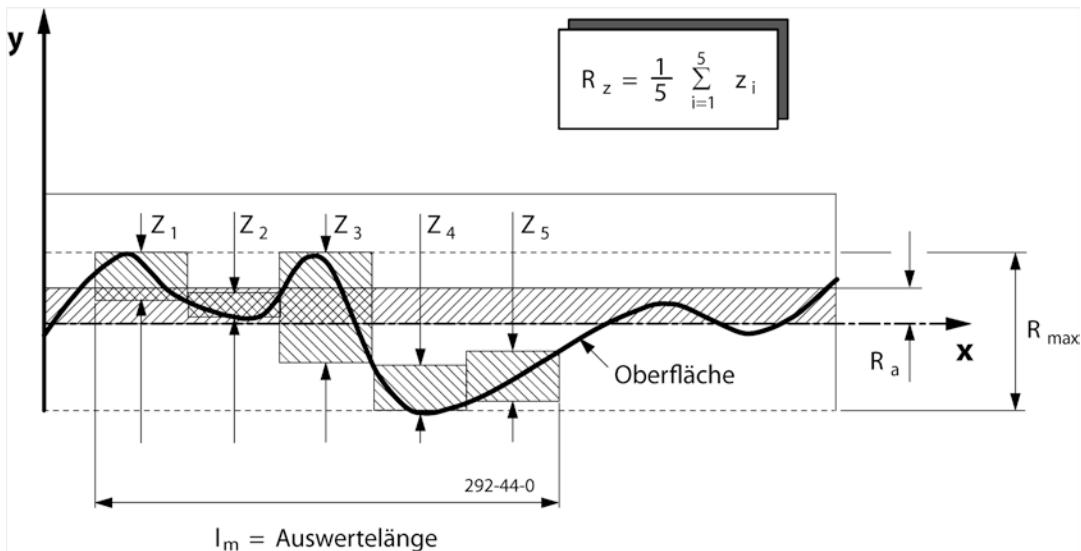


Abb. 4.109 Ermittlung der Rauheitskennwerte R_a ; R_z und R_t

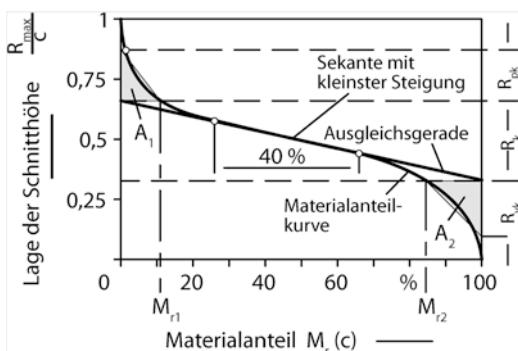


Abb. 4.110 Abbott-Kurve bzw. Materialanteilkurve

fasst. Durch das Abtasten der Oberfläche mit Hilfe einer Tastnadel ist die Erstellung eines Profilschnittes möglich, anhand dessen die Rauheitskennwerte ermittelt werden können. Heute werden aber auch optische Messverfahren wie die Laserinterferometrie eingesetzt. Sie ermöglichen ganze Oberflächentopografien in einer hohen Auflösung darzustellen und zu vermessen.

Schleifscheibenverschleiß

Die Schleifscheibentopografie verändert sich durch die Beanspruchung beim Schleifen. Dabei sind die Einstellbedingungen wie das Zeitspan-

volumen, die Schnittgeschwindigkeit, die Eingriffstiefe und der Vorschub maßgeblich für den späteren Schleifscheibenverschleiß. Generell nimmt der Schleifscheibenverschleiß mit höherem Zeitspanvolumen zu. Die Konditionierungsbedingungen sind so zu wählen, dass die Einschleifzeit möglichst gering ist und somit die richtige Rautiefe gleich beim ersten Werkstück erzielt wird. Zu jeder Schleifbelastung passt eine Wirktopografie der Schleifscheibe, die sich über einen langen Zeitraum immer wieder regeneriert. Diesen Zustand nennt man Selbstschärfereffekt. Für einfache Profilgeometrien ist dieser Zustand erwünscht. Beim Profilschleifen kann jedoch sehr schnell ein Formfehler entstehen, weshalb dort der Selbstschärfereffekt gering gehalten werden muss.

Generell wird bei Schleifscheiben zwischen Makro- und Mikroverschleiß unterschieden. Der Makroverschleiß beinhaltet den Radialverschleiß und den Kantenverschleiß und damit die Form- und Profilgenauigkeit der Schleifscheibe. Makroverschleiß der Schleifscheibe führt also zu Profilfehlern und Maßabweichungen am Werkstück und Rundlaufabweichungen an der Schleifscheibe (Abb. 4.111).

Neben dem Makroverschleiß unterliegt die Schleifscheibe auch einem Mikroverschleiß, der

sich auf die Schnittfähigkeit der Schleifscheibe auswirkt. Es werden vier Mikroverschleißmechanismen unterschieden, zwei Mechanismen des Kornverschleißes und zwei des Bindungsverschleißes. Kornverschleiß tritt aufgrund der Reibung zwischen Korn und Werkstück im Schleifprozess auf. Je nach Kornspezifikation und Prozessparametern überwiegt der abrasive Verschleiß, der durch Mikrobrüche im Korn und einer daraus resultierenden Kornanflachung charakterisiert ist oder Makrobrüche, durch die neue Schneidkanten entstehen. Bei zähen Körnungen wie z. B. Normalkorund überwiegt der abrasive Verschleiß, während z. B. Edelkorund weiß aufgrund der höheren Reinheit spröder ist und daher eher zur Bildung von neuen Schneiden neigt. Sehr hohe Belastungen im Schleifprozess führen dazu, dass ganze Körner aus der Bindung gerissen werden. Dies wird als Kornausbruch bezeichnet. Dem Kornausbruch geht in der Regel ein Bindungsverschleiß in Form von abrasivem Verschleiß und Bruch der Bindung voraus (Abb. 4.112).

Alle Verschleißmechanismen treten im Prozess parallel auf. Daher sollten Schleifscheibe und Prozessparameter so ausgewählt werden,

dass der Verschleiß möglichst minimiert wird. Insbesondere bei Anwendungen, die eine sehr hohe Profilgenauigkeit erfordern, sollen härtere Schleifscheiben verwendet werden, die eine höhere Verschleißbeständigkeit aufweisen.

Das Verschleißverhalten der Schleifscheiben wird über den Verschleißquotienten G , der sich aus zerspantem Werkstückvolumen V_w und Schleifscheibenverschleißvolumen V_s zusammensetzt, definiert:

$$G = \frac{V_w(t)}{V_s(t)} = \frac{\text{zerspantes Werkstoffvolumen}}{\text{Scheibenverschleißvolumen}} . \quad (4.57)$$

Der Verschleißquotient liegt im Bereich von $G = 20\text{--}60$ bei Edelkorund und Siliziumkarbid und bei über 500 für hochharte Schleifscheiben.

Konditionieren

Beim Konditionieren durch Profilieren, Schärfen und reinigen werden Schleifscheiben regeneriert bzw. schleiffähig (Abb. 4.113). Der Prozeß „Abrichten“ trifft eigentlich nur für konventionelle Schleifscheiben mit Kornwerkstoffen aus Aluminiumoxyd oder Siliziumkarbid zu. Beim „Abrichten“ dieser wird i. a. gleich-

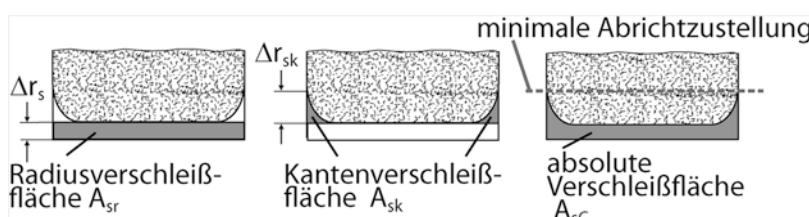


Abb. 4.111 Makroverschleiß der Schleifscheibe (CIRP Keynote STC-G 2011)

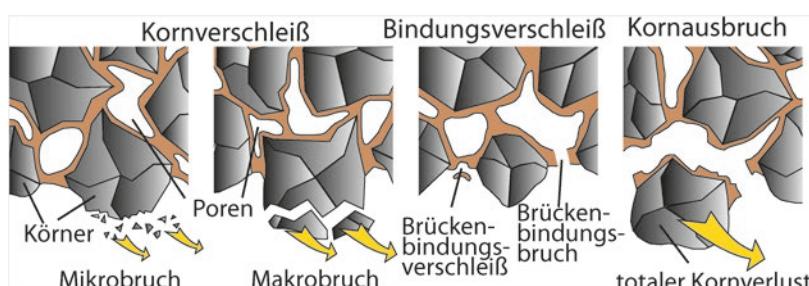


Abb. 4.112 Mikroverschleißmechanismen (CIRP Keynote STC-G 2011)

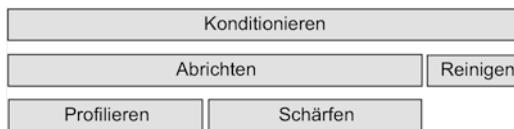


Abb. 4.113 Konditionieren (CIRP Keynote STC-G 2011)

zeitig profiliert und geschärft. Beim Profilieren ist eine genaue Makrogeometrie, z. B. für Rundheit und Zylindrizität das Ziel. Beim Schärfen ist die Mikrogeometrie der aktiven Scheibenfläche so zu beeinflussen, dass das Schleifwerkzeug schleiffähig ist und eine bestimmte Ausgangsrautiefe entsteht. Schärfe und Rautiefe werden beeinflusst von Größe, Form und Lage der Schneidkörner im Schneidenraum und Größenordnung und Anordnung der Bindemittel und Poren. Schärfen hat die Aufgabe, Bindemittel zurückzusetzen und die Schneidkörner hervortreten zu lassen, um beim Schleifen Spanräume zu schaffen. Beim Reinigen sind im Schneidenraum zurückgebliebene Werkstückstoffe und verschlissene Körner oder gelockerte Bindungsanteile zu entfernen.

Der Abrichtprozess bestimmt die Wirkrautiefe R_{ts0} der Schleifscheibe und damit das Prozessverhalten. Um die Wirkrautiefe zu bestimmen, kann ein besonderer Schleifprozess durchgeführt werden, bei dem die Oberflächentopografie der Schleifscheibe auf einem Werkstück abgebildet wird. Alternativ kann auch die Oberfläche der Schleifscheibe direkt mittels optischer Verfahren (z. B. konfokale Mikroskopie) ermittelt werden. Bei allen Abrichtprozessen ist zu beachten, dass die Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe beim Abrichten v_{sd} der Schnittgeschwindigkeit beim Schleifen v_c entspricht.

Konditionieren konventioneller Schleifscheiben

Zum Abrichten werden Abrichtwerkzeuge nach den Bewegungsverhältnissen in stehende und bewegte Abrichtwerkzeuge eingeteilt (Abb. 4.114).

Bei den stehenden Abrichtwerkzeugen werden Einkornabrichter, Abrichtplatten und Viel-

kornabrichter unterschieden (Abb. 4.115). Der Abrichtprozess ist hierbei vergleichbar mit einem Drehprozess. Der Schleifkörper rotiert, während das Abrichtwerkzeug an der Schleifkörperoberfläche entlang geführt wird, so dass auf der Oberfläche quasi eine Gewindeform erzeugt wird (Abb. 4.116). Diese ist abhängig von der Wirkbreite des Abrichters b_d , Zustellung des Abrichters a_{ed} , dem Vorschub des Abrichters f_{ad} und wird über den Überdeckungsgrad U_d definiert. Er beinhaltet die aktive Zustellbreite a_{pd} und den Abrichtvorschub f_{ad} .

$$U_d = \frac{a_{pd}}{f_{ad}} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{2 \cdot r_p \cdot a_{ed}}}{f_{ad}} . \quad (4.58)$$

Durch Einsetzen der folgenden Gleichungen für die aktive Zustellbreite a_{pd} und die Wirkbreite des Abrichtwerkzeugs b_d :

$$a_{pd} = \frac{1}{2} \cdot (b_d + f_{ad}) \quad (4.59)$$

$$b_d = \sqrt{8 \cdot r_p \cdot a_{ed}} \quad (4.60)$$

und unter der Annahme, dass die Schnittbreite gleich der Wirkbreite ist, ergibt sich für den Überdeckungsgrad:

$$U_d = \frac{b_d}{f_{ad}} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{8 \cdot r_p \cdot a_{ed}}}{f_{ad}} . \quad (4.61)$$

Je höher der Überdeckungsgrad U_d , bzw. je geringer der Abrichtvorschub f_{ad} ist, desto geringer ist die Wirkrautiefe der Schleifscheibe und damit auch die Rautiefe eines mit dieser Schleifscheibe geschliffenen Werkstücks.

Für konventionelle Schleifscheiben sollte die Zustellung pro Abrichthub 10 bis 30 μm betragen. Sind höhere Zustellungen erforderlich, erfolgt das Abrichten in mehreren Hüben. Moderne Schleifmaschinen sind mit einem AE-Sensor (acoustic emission sensor) ausgerüstet. Anhand der Intensität des AE-Signals ist erkennbar, ob der Abrichter kontinuierlich in Kontakt mit der Schleifscheibe ist. Um den Abrichterverschleiß zu minimieren, ist für eine ausreichende Kühlung zu sorgen. Diese beträgt bei einem Einkorndiamanten etwa 10 l/min.

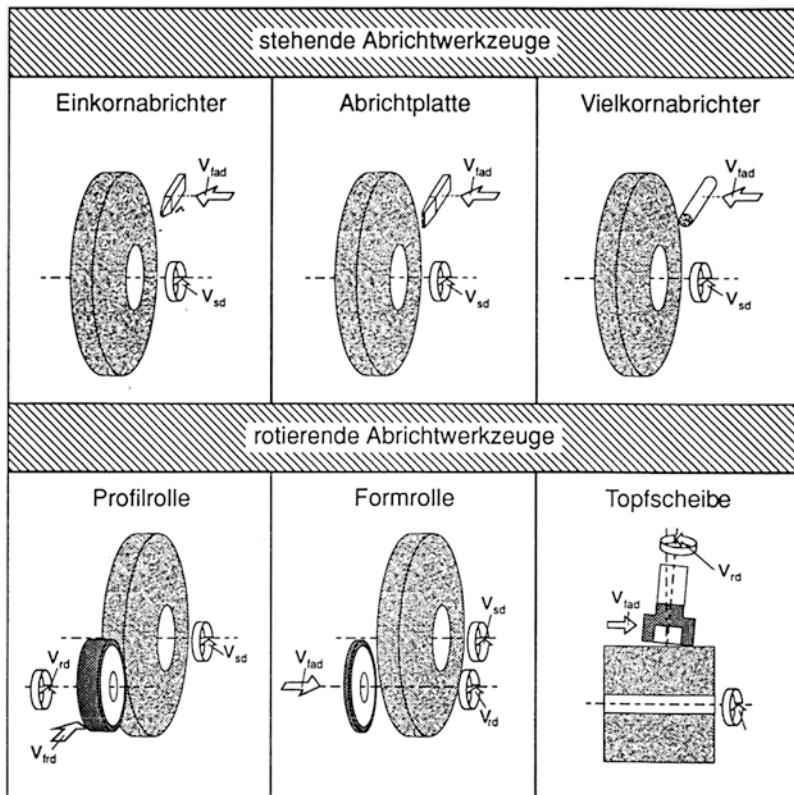
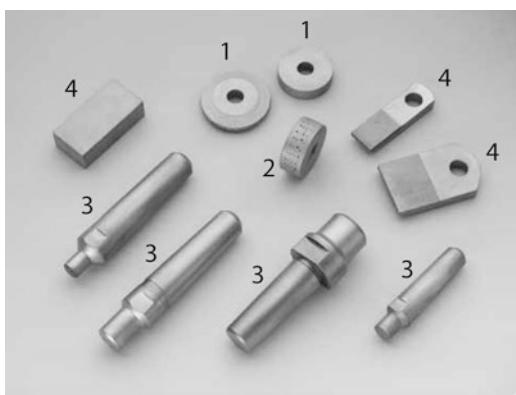


Abb. 4.114 Kinematik häufig eingesetzter Abrichtverfahren



Quelle: Fa. Ernst Fr. Weinz WEKA GmbH & Co

Abb. 4.115 Übersicht stehender Abrichtwerkzeuge (1 Abrichtrad, 2 Abrichtrolle, 3 Abrichtigel, 4 Abrichtplatte)

Als rotierende Abrichtwerkzeuge werden vorwiegend einschichtig oder mehrschichtig belegte Diamantrollen eingesetzt. Das Abricht-

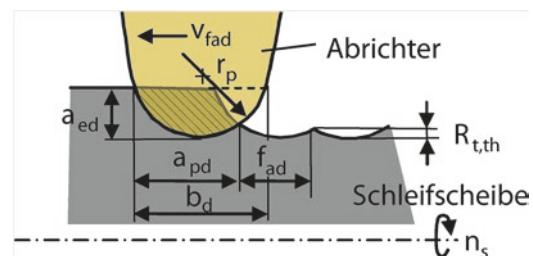


Abb. 4.116 Schnittquotienten beim Abrichten (CIRP Keynote STC-G 2011)

ergebnis wird dabei durch den Geschwindigkeitsquotienten beim Abrichten q_d deutlich beeinflusst. Dies setzt sich aus den Umfangsgeschwindigkeiten der Schleifscheibe v_{cd} und der Abrichtrolle v_{rd} zusammen:

$$q_d = \frac{v_{rd}}{v_{cd}} \quad (4.62)$$

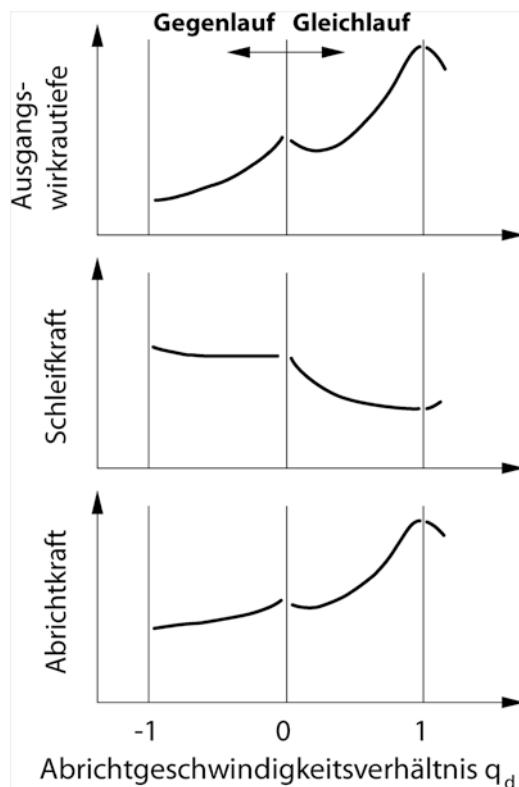


Abb. 4.117 Einfluss des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses auf die Abrichtkraft, Schleifkraft und Wirkrautiefe der Schleifscheibe (CIRP Keynote STC-G 2011)

Der Geschwindigkeitsquotient nimmt negative Werte an, wenn Abrichtrolle und Schleifscheibe gegenläufig rotieren und positive, wenn sie im Gleichlauf rotieren.

Für die Schlichtbearbeitung sollte ein Geschwindigkeitsverhältnis im Gegenlauf gewählt werden, da hier eine geringe Wirkrautiefe der Schleifscheibe und somit auch eine geringe Werkstückrautiefe erzielt wird. Für die Schrubbearbeitung sollte hingegen ein positiver Abrichtgeschwindigkeitsquotient gewählt werden, da hierdurch die Schleifkräfte reduziert werden und die Schleifscheibe aufgrund der höheren Wirkrautiefe schnittfreudiger ist (Abb. 4.117).

Die rotierenden Abrichter werden in Form- und Profilrollen unterteilt. Profilrollen haben die negative Form des zu erzeugenden Schleifscheibenprofils und sind daher optimal geeignet, um die Schleifscheibe in der Massenproduktion schnell abzurichten. Aufgrund des sehr hohen Diamantanteils sind die Werkzeuge jedoch sehr teuer, so dass zur flexiblen Fertigung Formrollen eingesetzt werden, die das erforderliche Profil äquivalent zum stehenden Abrichter NC-gesteuert abfahren (Abb. 4.118).

Zum Abrichten mit Diamantabrichttrollen gibt es in den Schleifmaschinen spezielle Abrichtvorrichtungen, die spielfrei und schwingungsfrei gelagert sind. Rundlaufabweichungen der Abrichtrolle würden zu einer schlechten Profilübertragung und unrunden Schleifscheiben führen. Dies bewirkt Rattermarken am Werkstück und eine reduzierte Lebensdauer der Abrichtrollen.

Konventionelle Schleifscheiben können auch während des Schleifprozesses kontinuierlich abgerichtet werden. Dieses Verfahren wird

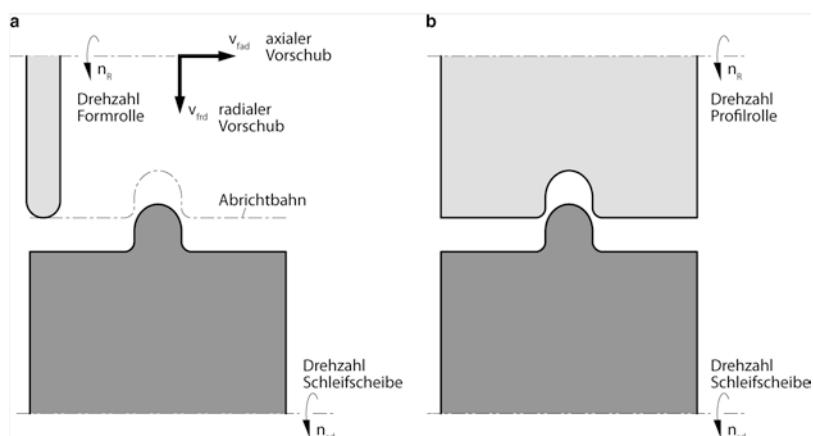


Abb. 4.118 Formabrichten (a) und Profilabrichten (b)

als Continuous Dressing (CD) bezeichnet. Es ist besonders geeignet, um schwer zerspanbare Werkstoffe, wie z. B. Nickelbasislegierungen, wirtschaftlich schleifen zu können (Fertigung von Turbinenschaufeln). Durch den kontinuierlichen Abrichtvorschub verringert sich der Schleifscheibendurchmesser stetig. Die Compensation des dadurch entstehenden Fehlers in der Schleifscheibenzustellung wird in der Maschinensteuerung berücksichtigt (Abb. 4.119).

Abrichten von hochharten Schleifscheiben

Das Abrichten hochharter Schleifscheiben mit keramischer Bindung erfolgt äquivalent zum

Abrichten konventioneller Schleifscheiben. Es werden jedoch ausschließlich rotierende Abrichtwerkzeuge eingesetzt, da stehende Abrichtwerkzeuge zu schnell verschleißt.

Bei allen kunstharzgebundenen und einigen keramisch gebundenen Schleifscheiben wird die Schleifscheibentopografie jedoch durch das Profilieren so eingeebnet, dass anschließend ein Schärfen erforderlich wird.

Am häufigsten wird das Blockschärfen eingesetzt, Abb. 4.120. Hierfür wird ein quaderförmiger Block aus keramisch gebundenem Siliziumkarbid oder Korund eingesetzt. Die hochharten Körner der Schleifscheibe führen dazu, dass die Körner des Schärfblocks splittern oder aus der Bindung gerissen werden. Diese Kornsplitter setzen zunächst die Poren des Schärfblocks zu, so dass sich viele Schneiden bilden. Der Schärfprozess wird solange durchgeführt, bis etwa ein halber Korndurchmesser Kornüberstand erzielt wird. Ein Weiterführen des Schärfprozesses würde dazu führen, dass die Körner nicht mehr in der Bindung gehalten werden. Hinter den Schneidkörnern bilden sich durch den Schärfprozess Bindungsrücken, da diese Stellen nicht durch den Schärfblock erreicht werden. Diese unterstützen den Halt der Körner in Schnittrichtung. Beim Schärfen muss eine ausgewogene Schmiermittelversorgung gewährleistet werden, da der Kühlenschmierstoff in Kombination mit dem Schärfblockabrieb eine breiartige Substanz bildet, die für das Zurücksetzen der Schleifscheibenbindung erforderlich ist.

Bei Schleifscheiben mit einschichtiger, galvanischer Bindung wird der Spanraum durch

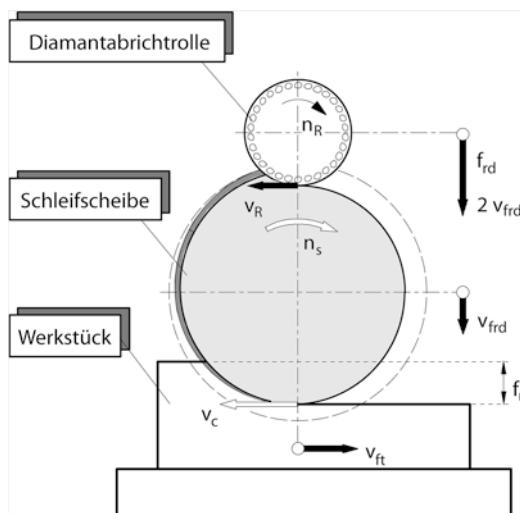


Abb. 4.119 CD-Schleifen bzw. kontinuierliches Abrichten

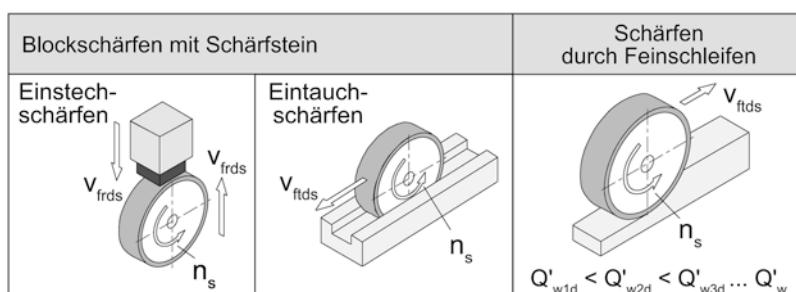


Abb. 4.120 Schärfprozesse mit gebundenem Korn (CIRP Keynote STC-G 2011)

elektrolytische Verfahren erzeugt. Ein Profilieren dieser Werkzeuge ist nicht möglich. Allerdings kann das sog. Touchdressing eingesetzt werden, bei dem die Schleifscheibe durch die Abrichtrolle nur touchiert wird und so die Rundlaufgenauigkeit erhöht.

Schleifkraft und Schleifleistung

Komponenten der Schleifkraft sind die Normal-, die Tangential- und die Vorschubkraft (Abb. 4.121).

Die Normalkraft F_n steht senkrecht auf der zu bearbeitenden Fläche und ist verantwortlich für die Verformungen von Maschine, Werkstück und Werkzeug. Die Tangentialkraft $F_t = F_c$ wirkt, bezogen auf das Werkstück, tangential zur Scheibenoberfläche in Richtung der Schnittbewegung und bestimmt die im Schleifprozess notwendige Schleifleistung. Die Vorschubkraft F_a bzw. F_f wirkt in Vorschubrichtung und ist quotentenmäßig klein.

Werden die Schleifkraftkomponenten auf die Breite des aktiven Scheibenprofils bezogen, so ergeben sich die bezogenen Schleifkräfte F'_n , F'_t und F'_f . Das gilt aber nur für rechteckige Eingriffsquerschnitte. Für Profile beliebiger Kontur ist dies nicht rückrechenbar. Wesentliche

Einflussgröße auf den Betrag der Schleifkraft ist das Zeitspanvolumen.

Zur rechnerischen Bestimmung der Schleifkraft gibt es eine Reihe von empirisch ermittelten Gleichungen, die anhand von Schleifversuchen bezüglich ihrer Parameter angepasst werden. Eine physikalisch begründete Berechnungsformel gibt es bisher noch nicht. Die Tangentialkraft kann mit Hilfe des Spanungsquerschnitts A_D , der spezifischen Schleifkraft k_{cgrind} und der äquivalenten Spandicke h_{eq} von der Größenordnung her berechnet werden:

$$F'_t \approx k_{\text{cgrind}} \cdot A_D \quad (4.63)$$

$$F'_t \approx h_{\text{eq}} \cdot k_{\text{cgrind}} \cdot \dots \quad (4.64)$$

Mit der schon bekannten Beziehung für die äquivalente Spandicke ergibt sich:

$$h_{\text{eq}} \approx \frac{v_f a_e}{v_c} \approx \frac{Q'_w}{v_c} \quad (4.65)$$

so gilt:

$$F'_t \approx \frac{Q'_w}{v_c} \cdot k_{\text{cgrind}} \cdot \dots \quad (4.66)$$

Für die energetische Beurteilung des Schleifprozesses wird die Schnittleistung P_c herangezogen. Sie berechnet sich aus der Tangentialkraft und der Schnittgeschwindigkeit:

$$P_c = F_t \cdot v_c \quad (4.67)$$

Zur Auslegung der Arbeitsspindel kann mit der Schnittleistung die erforderliche Motorleistung P_M berechnet werden, wenn der Wirkungsgrad η bekannt ist:

$$P_M = \frac{P_c}{\eta} \quad (4.68)$$

Eine wichtige Kenngröße für den Schleifprozess ist der Schleifkraftquotient:

$$\mu = \frac{F_n}{F_t} = \frac{F'_n}{F'_t} \quad (4.69)$$

Allgemein liegt der Kraftquotient zwischen $\mu = 2$ und $\mu = 3$. Wird er bei gleichbleibender Normalkraft kleiner, ist das ein Indiz für eine schnittfreudige Schleifscheibe.

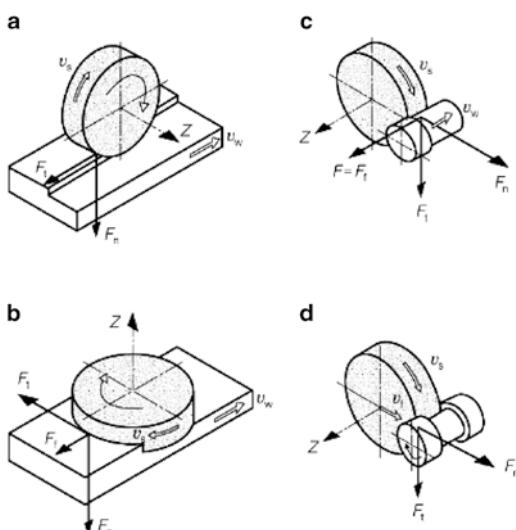


Abb. 4.121 Schleifkräfte und ihre Verteilung: **a** Plan-Umfangsschleifen, **b** Planseitenschleifen, **c** Außenrundlängsschleifen und **d** Außenrundeinstechschleifen

Schleiftemperatur und Kühlung

Schleifkräfte und -temperaturen in der Randzone des Werkstückes stehen in einem engen Zusammenhang. Die für den Zerspanvorgang benötigte Schleifleistung P_c wird bis 90 % in Wärme umgewandelt, die vorwiegend in das Werkstück übergeht. Die in der Kontaktzone entstehende Wärme beeinflusst nicht nur das Werkstück, sondern auch die Schleifscheibe. Infolge der Temperaturbelastung entstehen Oxidations- und Diffusionsvorgänge am Schneidkorn und führen zur Abstumpfung durch Druckerweichung. Im Werkstück kann das zu Gefügeumwandlungen und thermischen Schädigungen führen. Daher sollte ein möglichst hoher Anteil der Wärme über den Kühlsmierstoff und die Späne abgeführt werden.

Je nach Anwendungsfall werden als Kühlsmierstoffe meist Mineralöl oder Öl-in-Wasser-Emulsionen oder Lösungen auf Wasserbasis eingesetzt. Die Hauptaufgaben des Kühlsmierstoffs sind:

- Reduktion der Reibung zwischen Korn und Werkstück,
- Späneabfuhr,
- Werkstückkühlung,
- Schleifscheibenreinigung,
- Korrosionsschutz.

Durch eine Reduktion der Reibung werden die Schleifkraft und die Schleiftemperatur reduziert. Dies führt auch zu einem geringeren Werkzeugverschleiß, zudem können auch geringere Rauheiten erzielt werden. Die höchste Reibungsreduktion wird bei Einsatz von Öl erreicht, dadurch sind auch die Schleiftemperaturen geringer, (Abb. 4.122). Insbesondere beim Hochgeschwindigkeitsschleifen ist eine ausreichender Absaugung der Öldämpfe erforderlich und eine Brandlöschanlage empfehlenswert, da der entstehende Ölnebel entzündlich ist. Die Entwicklung geht zu einem vermehrten Einsatz von Lösungen, um künftig auf Mineralöle zu verzichten.

Die Kühlsmierstoffzuführung ist von besonders hoher Bedeutung für den Schleif-

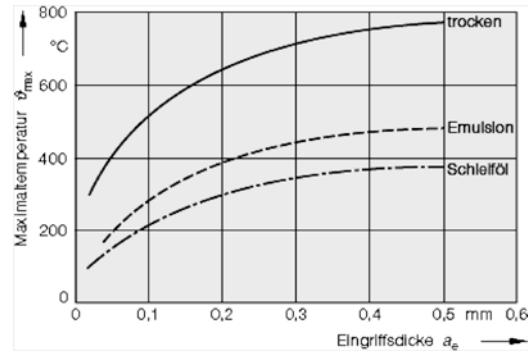


Abb. 4.122 Maximale Schleiftemperatur in Abhängigkeit von der Zustelltiefe und verschiedenen Kühlungsarten nach König

prozess. Nur bei einer optimalen Düsenauslegung und -ausrichtung wird gewährleistet, dass ein leistungsfähiger Prozess bei guter Oberflächenqualität des Werkstücks durchgeführt werden kann. Die erforderliche Kühlsmierstoffmenge beträgt ca. 2 l/min pro 1 mm Schleifscheibenbreite. Der Druck sollte so gewählt werden, dass die Kühlsmierstoffaustrittsgeschwindigkeit etwa der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit entspricht und damit das Luftpolster, das sich auf dem Schleifscheibenumfang bildet, durchbricht.

Einfluss verschiedener Einstellgrößen auf das Schleifergebnis

Wird bei konstantem Zeitspanvolumen die Schnittgeschwindigkeit v_c erhöht, nimmt die Schleifkraft ab. Dies liegt an der verminderten äquivalenten Spandicke h_{eq} und der damit geringeren Belastung der Schneidkörner. Deshalb wird auch der Schleifscheibenverschleiß reduziert. Insgesamt dringen die Schneidkörner weniger tief in den Werkstoff ein, wodurch die Werkstückrautiefe geringer wird. Die Schnittleistung wird allerdings nicht reduziert, da sie das Produkt aus Tangentialkraft und Schnittgeschwindigkeit ist. Meistens bleibt die Schnittleistung konstant oder nimmt leicht zu. Eine thermische Entlastung der Kontaktzone tritt daher bei dieser Veränderung der Einstellgrößen nicht auf.

Das bezogene Zeitspanvolumen

$$Q'_w = v_w \cdot a_e = v_{ft} \cdot a_e \quad (4.70)$$

kann sowohl durch die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit als auch der Zustelltiefe gesteigert werden. Eine Erhöhung von v_w bewirkt eine Temperaturverminderung im Werkstück, weil die in der Kontaktzone entstehende Wärme nicht genug Zeit hat, in den Werkstoff abzufließen.

Mehrstufiger Schleifprozess

Bei großem Zeitspanvolumen wird in kurzer Zeit viel Werkstoff zerspant. Allerdings ist die Werkstückrautiefe bei dieser Vorgehensweise sehr hoch. Daher empfiehlt sich, das Aufmaß in mehreren Schritten zu zerspanen. Idealerweise wird zwei- oder dreistufig gearbeitet (Abb. 4.123). Dabei wird zuerst mit einem hohen Zeitspanvolumen geschruppt und viel Werkstoff entfernt. Anschließend folgt der Schlichtprozess mit geringem Zeitspanvolumen zur Verbesserung der Werkstückrautiefe und der Maß- und Formhaltigkeit. Wenn beim Schleifen große elastische Verspannungen aufgetreten sind, ist ein dritter Prozess anzuschließen, das sog. Ausfunken. Dabei wird die durch die Schleifkraft entstandene Verspannung zwischen Werkstück und Schleifscheibe abgebaut.

Für eine optimale Abstimmung der einzelnen Schleifstufen werden Regelalgorithmen genutzt, mit denen die Prozessstufen durch eine Führungsgröße erkannt und die Umstellzeitpunkte der Schleifstufen festgelegt werden können. Eine Möglichkeit zur Prozessregelung bietet

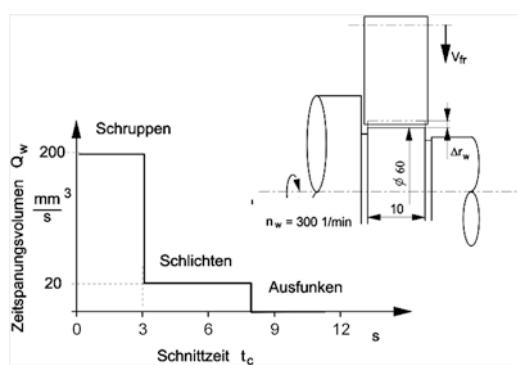


Abb. 4.123 Mehrstufiger Schleifprozess

sich z. B. beim Außenrundschleifen, indem im Prozess die Veränderung des Werkstückdurchmessers gemessen wird und die Durchmesserabnahme pro Zeit, die dem Zeitspanvolumen entspricht, über die Vorschubgeschwindigkeit auf einen konstanten Wert geregelt wird.

Die Aufmaße werden aber zur Ressourcenschonung immer kleiner, so dass zur Regelung schnelle Verarbeitungsgeschwindigkeiten der Signale und reaktionsschnelle Antriebe in der Maschine erforderlich sind.

Wird die Regelung auf eine Qualitätskenngröße ausgerichtet, so wird dies als ACO-Regelung (Adaptiv Control Optimization) bezeichnet. Wenn die Regelung auf eine Schleifprozesskenngröße (Kraft, Zeitspanvolumen, usw.) abgestimmt wird, handelt es sich um eine ACC-Regelung (Adaptiv Control Constraint).

4.7.1.4 Schleifverfahren

Die Schleifverfahren werden nach DIN 8589-1 in der vierten Stelle der Ordnungsnummer nach Merkmalen der herzustellenden Flächenform in Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil- und Formschleifen eingeteilt. Die Vielfalt der Schleifverfahren ergibt sich aus den verschiedenen Formen der Werkstücke und den Werkzeugen sowie den erforderlichen Relativbewegungen. Durch Planschleifverfahren werden beispielsweise ebene Flächen und durch Rundschleifverfahren kreiszylindrische Flächen erzeugt.

Die Schnittgeschwindigkeit wird bei allen Verfahren durch die Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe bestimmt. Die Vorschubgeschwindigkeiten können sowohl auf der Werkstückseite als auch auf der Schleifscheibenseite liegen. Je nach Schleifaufgabe werden sowohl kontinuierliche Vorschubbewegungen als auch diskontinuierliche Vorschubbewegungen durchgeführt.

Weiterhin unterscheidet man:

- Außen- und Innenschleifen
- Art des Schleifwerkzeuges (Umfangs- und Seitenschleifscheiben)
- Art der Vorschubbewegung (Längs- und Einstech- bzw. Querbewegung)

Einige sich daraus ergebende Plan- und Rundschleifverfahren zeigt Abb. 4.124. Die Schnittbewegung ist durch die Schnittgeschwindigkeit v_c gekennzeichnet und die Vorschubbewegung durch die Bewegungsrichtungen bezogen

auf das Schleifwerkzeug mit den Vorschubgeschwindigkeiten v_{fa} , v_{fr} , v_{ft} (a für axial, r für radial, t für tangential). Die Vorschubbewegung kann schrittweise (diskontinuierlich) oder stetig (kontinuierlich) erfolgen.

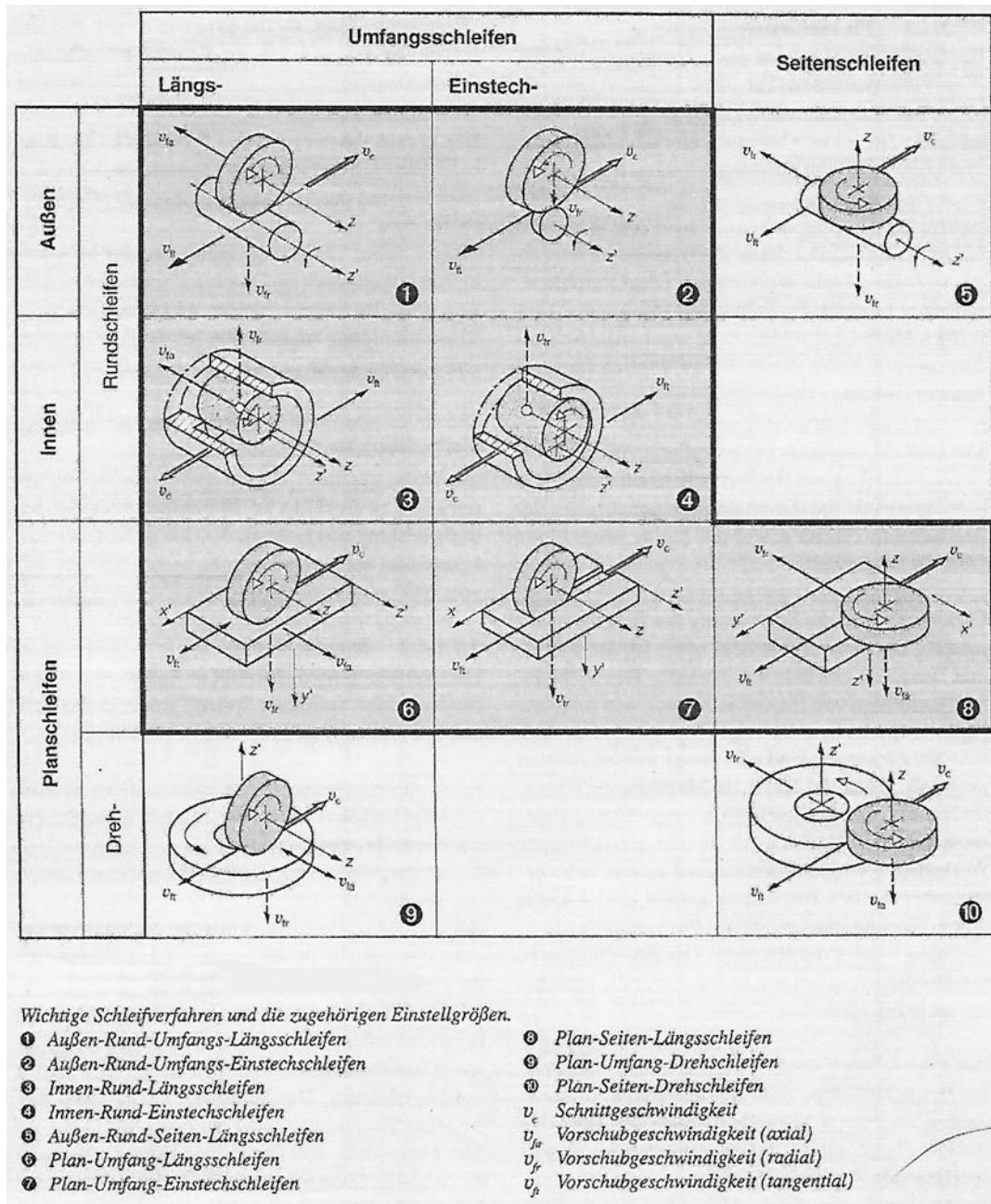


Abb. 4.124 Einteilung und Bewegungsabläufe der Schleifverfahren

Planschleifen

Unterschieden wird das Plan-Umfangs- und Plan-Seitenschleifen (Abb. 4.124). Die Vorschubbewegung erfolgt beim Plan-Umfangs-Längsschleifen translatorisch und kann sowohl werkstückseitig als auch werkzeugseitig ausgeführt werden. Dabei wird der Werkstückstoff von der Umfangsfäche der Schleifscheibe je nach Drehrichtung im Gegenlauf (Vorschub- und Schnittrichtung auf der Werkstückoberfläche gegensinnig) oder im Gleichlauf (Vorschub- und Schnittrichtung auf der Werkstückoberfläche gleichsinnig) abgetragen. Das Gleichlaufschleifen belastet die Schneiden infolge des Eingriffs schlagartig, da es zu Schnittbeginn den größten Spanungsquerschnitt verursacht. Während beim Gegenlaufschleifen die Schneiden anfänglich Schleifspäne mit kleinerer Spanungsdicke erzeugen, die dann stetig anwachsen und nicht mehr mit der Werkstückoberfläche in Kontakt kommen. Das Plan-Seitenschleifen wird mit Topfschleifscheiben oder Schleifräder mit Segmenten ausgeführt. Die Vorschubbewegung des Werkstücks kann dabei rotatorisch und stetig auf Drehtischen oder translatorisch und pendelnd auf Plantischen erfolgen. Wegen dieser Verfahrensvielfalt und der Möglichkeit, Werkstücke im Durchlaufverfahren schleifen zu können, wird das Seitenschleifen überwiegend in der Massenfertigung angewendet (z. B. von Zylinderblöcken).

Rundschleifen

Rundschleifverfahren lassen sich einteilen in Außen- und Innenrundschleifverfahren zwischen Spitzens und in das spitzenlose Außen- und Innenrundschleifen. Das **Außenrundschleifen zwischen Spitzens** wird unterteilt in Längsschleifen, Längsschälschleifen, Einstech- und das Schrägeinstechschleifen.

Beim Außenrund-Umfangs-Längsschleifen erfolgt zunächst die Zustellung a_e der Schleifscheibe und anschließend eine Längsbewegung der Schleifscheibe parallel zur Werkstückachse. Die Zustellung erfolgt entweder an beiden Seiten nach jedem Hub oder an einer Seite nach jedem Doppelhub. Um die Formgenauigkeit der Kanten des Werkstücks zu gewährleisten, sollte die Schleifscheibe an jeder Seite überlaufen.

Am Ende des Schleifprozesses erfolgen mehrere Leerläufe ohne Zustellung beim sog. Ausfunkeln, um den Rundlauf des Werkstücks zu verbessern. Häufig wird das Verfahren auch als Längsschleifen bezeichnet. Bei einer hohen Zustellung außerhalb des Werkstücks, die dann in einem Hub den Werkstoff entfernt, ist auch der Begriff Längsschälschleifen geläufig. Ähnlich wie beim Tiefschleifen sind hier die Vorschübe geringer.

Beim Außenrund-Umfangs-Querschleifen, auch bezeichnet als Einstechschleifen, erfolgt eine kontinuierliche, radiale Zustellung der Schleifscheibe ohne Längsvorschub. In diesem Verfahren können auch (über den Einsatz profilerter Schleifscheiben) Profile auf dem Werkstückumfang erzeugt werden. Zudem können über einen Satz von Schleifscheiben mehrere Umfangsflächen parallel bearbeitet werden. Bei langen Werkstücken erfolgt eine Abstützung durch Lünetten, um Formfehler durch Ausbiegungen zu vermeiden.

Das Außenrund-Schrägeinstechschleifen wird eingesetzt, um eine Stirnfläche und Umfangsfläche zeitgleich zu bearbeiten. Die Vorschübe in radialer und axialer Richtung können hierfür unabhängig voneinander eingestellt werden. Die Gleichungen zur Berechnung von Eingriffsquerschnitt, Zeitspanvolumen, Haupt- und Schleifzeit für das Außenrundschleifen können Abb. 4.125 entnommen werden

Beim **Innenrundschleifen** werden am häufigsten zylindrische oder kegelige Bohrungen geschliffen. Die Verfahren sind prinzipiell äquivalent zum Außenrundschleifen. Allerdings kann nur mit geringeren Vorschüben gearbeitet werden. Ein Problem des Innenrundschleifens ist die große Kontaktlänge zwischen Schleifscheibe und Werkstück, die zu thermischen Schädigungen des Werkstücks und bei höheren Schnittgeschwindigkeiten zu thermischen Problemen in der Schleifspindel führen kann. Zudem ist die Zuführung des Kühlsmierstoffs erschwert. Die Schleifscheibe zum Innenrundschleifen ist in der Regel auf einem Dorn befestigt, der aufgrund seiner Auskraglänge und des geringen Durchmessers nur eine geringe Steifigkeit aufweist. Daher erfolgt durch die Prozess-

	Außenrund-Einstechschleifen	Außenrund-Längsschleifen
Eingriffsquerschnitt A_e (mm^2)	$A_e = a_e \cdot a_p = f_r \cdot b_w$	$A_e = a_e \cdot a_p = f_a \cdot a_w$
Zeitspanvolumen Q (mm^3/s)	$Q = A_e \cdot v_{fl} = f_r \cdot b_w \cdot d_w \cdot \pi \cdot n_w$	$Q = A_e \cdot v_{fl} = a_e \cdot d_w \cdot \pi \cdot f_a \cdot n_a$
mittleres Zeitspanvolumen \bar{Q} (mm^3/s)		$\bar{Q} = \frac{l_w \cdot Q}{l_a} \cdot v_{fa} = \text{konst}$
Hauptzeit t_h (s)		$t_h = \frac{z_w \cdot b_w (2)}{a_p \cdot a_e \cdot n_w}$
Schleifzeit t_c (s)	$t_c = \frac{V_w}{Q} = \frac{z_w}{b_w \cdot f_r}$	$t_c = \frac{z_w \cdot l_w}{a_e \cdot f_a \cdot n_w}$

Gleichungen zur Berechnung von Eingriffsquerschnitt, Zeitspanvolumen, Haupt- und Schleifzeit für das Außenrund-Einstech- und das Außenrund-Längsschleifen (in Klammern Faktor 2, wenn nach jedem Doppelhub zugestellt wird).

Abb. 4.125 Gleichungen zur Berechnung von Eingriffsquerschnitt, Zeitspanvolumen, Haupt- und Schleifzeit für das Außenrundschleifen (in Klammern Faktor 2, wenn nach jedem Doppelhub zugestellt wird)

kräfte eine Durchbiegung des Schleifdorns, die zu Form- und Maßfehlern führen kann. Bei der Wahl des Schleifscheibendurchmessers sollte das Verhältnis von Schleifscheibendurchmesser d_s und Werkstückdurchmesser d_w den Quotienten $d_s/d_w = 0,65$ bis $0,75$ nicht überschreiten. Gleichungen zur Berechnung von Eingriffsquerschnitt, Zeitspanvolumen, Haupt- und Schleifzeit beim Innenschleifen sind Abb. 4.126 zu entnehmen.

Spitzenlossschleifen

Beim spitzenlosen Außenrundschleifen liegt das Werkstück auf einer Auflageschiene. Geführt wird es zwischen Schleifscheibe, Auflageschiene und Regelscheibe (Abb. 4.127). Der Abstand zwischen der Schleifscheibe und der

Regelscheibe, die im Gleitlauf rotieren, bestimmt den Werkstückdurchmesser. Die Regelscheibe besteht aus Kunstharz oder Hartgummi und ist beim Einstechschleifen zylindrisch und beim Durchgangsschleifen als Rotationshyperboloid ausgelegt

Mit Vorteil lassen sich im Durchlauf glatte zylindrische Werkstücke und im Einstechverfahren zylindrische Werkstücke mit Absätzen oder Profilen fertigen. Für das Durchlaufschleifen ist die Regelscheibe schräg gestellt, so dass eine Axialkraft eine Verschiebung des Werkstückes nach vorne bewirkt. Der Winkel der Schräglage bestimmt die Durchlaufgeschwindigkeit. Die Drehzahl der Regelscheibe ist kleiner als die der Schleifscheibe und bremst das Werkstück, so dass durch die

	Einstechschleifen	Längsschleifen
Eingriffsquerschnitt A_e (mm²)	$A_e = a_o \cdot a_p = l_w \cdot f_t$	$A_e = a_o \cdot a_p = a_o \cdot f_a$
Zeitspanvolumen Q (mm³/s)	$Q = A_e \cdot v_n = f_t \cdot l_w \cdot d_w \cdot \pi \cdot n_w$	$Q = A_e \cdot v_n = a_o \cdot f_a \cdot d_w \cdot \pi \cdot n_a$
mittleres Zeitspanvolumen \bar{Q} (mm³/s)		$\bar{Q} = Q \cdot \frac{l_w}{l_H}$
Hauptzeit t_h (s)	$t_h = \frac{Z_w}{a_o \cdot n_w}$	$t_h = t_c \cdot \frac{l_w}{l_H}$
Schleifzeit t_c (s)	$t_c = t_h$	$t_c = \frac{Z_w \cdot d_w \cdot \pi \cdot l_w}{Q}$

Gleichungen zur Ermittlung von Eingriffsquerschnitt, Zeitspanvolumen, Haupt- und Schleifzeit für das Innenrund-Einstech- und Innenrund-Längsschleifen.

Abb. 4.126 Gleichungen zur Ermittlung von Eingriffsquerschnitt, Zeitspanvolumen, Haupt- und Schleifzeit für das Innenrundschleifen

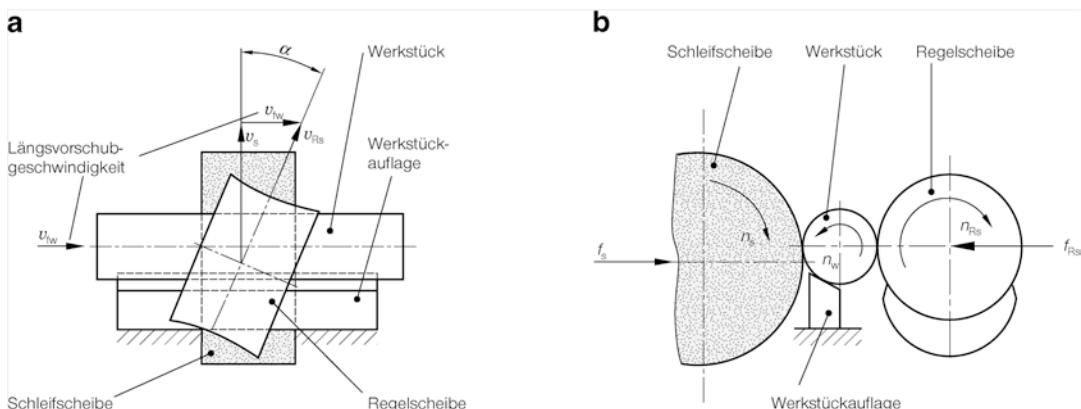


Abb. 4.127 Spitzenloses Außenrundschleifen, **a** Seitenansicht, **b** Ansicht in Achsenrichtung

Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Schleifscheibe eine Spanabnahme erfolgen kann. Das Spitzenlossschleifen eignet sich insbesondere für die Massenfertigung, da hohe Zerspanraten und große Stückzahlen bei geringen Durchlaufzeiten erreicht werden. Das Spitzenlossschleifen ist besonders dann von Vorteil, wenn lange, zylindrische Bauteile zu fertigen sind, da auch ohne Anwendung von Lünetten keine Durchbiegung des Werkstücks erfolgt. Zudem entfällt das Einspannen und Zentrieren der Bauteile.

Wälzschleifen

Oberflächenrauheit und geometrische Genauigkeit von gehärteten Zahnrädern können nur durch Schleifen erreicht werden. Das Wälzschleifen wird bei der Feinbearbeitung von größeren gerad- und schrägverzahnten Außenstirnrädern eingesetzt. Das Schleifscheibenprofil entspricht einem Zahn oder mehreren

Zähnen einer Zahnstange. Während des Schleifens wälzt sich das Schleifscheibenprofil auf der Werkstückoberfläche ab. Man unterscheidet das diskontinuierliche Wälzschleifen mit einer Teilbewegung und das kontinuierliche Wälzschleifen ohne Teilbewegung, Abb. 4.128.

Das Teilwälzverfahren (*Maag-Schleifverfahren*) arbeitet mit Teller- oder Doppelkegelscheiben. Die Schleifscheiben sind normalerweise unter 15° oder 20° schräg gestellt. Geschliffen wird mit dem Umfang und der Seite des Tellerrades. Mit diesem Verfahren lassen sich bevorzugt Korrekturen an der Zahnprofilform durchführen. Die Schleifscheibe führt in der Zahnlücke eine hin- und hergehende Schleibbewegung aus. Ist der Zahn fertiggeschliffen, wird zum nächsten weiter geteilt.

Beim kontinuierlichen Wälzschleifen (*Reishauer-Schleifverfahren*) kämmt eine Schleifschncke mit einem Werkstück ähnlich dem Wälzfräsen. Während der synchronisierten

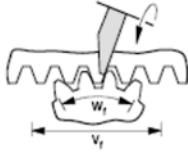
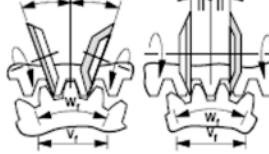
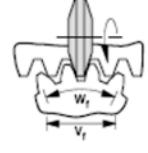
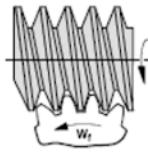
Wälzschleifen	Im Teilverfahren (diskontinuierlich)		
	Teller-(Plan-) Schleifscheibe	mit einer Stirnschleifscheibe	mit 2 Stirnschleifscheiben
Doppelkegel Schleifscheibe			
Schleifschncke	mit Doppelkegelscheibe		mit Kegelmantelscheiben mit mehreren Doppelkegelscheiben
mit Schleifschncke			

Abb. 4.128 Wälzschleifen

Wälzbewegung von Werkstück und Werkzeug wird die Schleifschnecke in Richtung der Werkstückachse verschoben.

Profilschleifen

Durch das Profilschleifen lassen sich an Plan- und Rundflächen Profile erzeugen. Die Profilschleifscheiben haben eine werkstückgebundene Form. Beim Profilschleifen wird vor der Schleifbearbeitung das Negativprofil durch Abrichten in die Schleifscheibe eingebracht. Dies kann mit Formdiamanten, Diamantformrollen und Diamantprofilrollen erfolgen. Besitzt die Schleifscheibe schon das Negativprofil des Werkstücks, dann wird nur noch eine Vorschubbewegung bei der eigentlichen Schleifbearbeitung benötigt.

Für den Einsatz konventioneller Schleifscheiben hat sich für große Werkstückzahlen das *Continuous Dressing (CD)*- Schleifen etabliert. Hierbei wird während des Schleifens kontinuierlich das Profil und die Schnittfähigkeit durch eine Diamantprofilrolle erzeugt.

Der kleinste Profilradius an der Schleifscheibe ist dabei die Begrenzung für die möglichen Zeitspanvolumina. Wenn der Profilradius durch den Schleifscheibenverschleiß seine geforderte Kontur verliert, muss wieder profiliert werden.

Schleifscheiben mit CBN- oder Diamantschneidkörnern halten das Profil länger als konventionelle Schleifscheiben. Allerdings müssen die hochharten Schleifscheiben konditionierbar sein, weil sonst der einmal verschlissene Profilradius nicht mehr regeneriert werden kann. Das Profilschleifen kann auf Planschleifmaschinen sowohl im Pendelschliff als auch im Tiefschliff erfolgen.

Tiefschleifen

Das Tiefschleifen erfolgt mit der gesamten Profiltiefe und einer langsamen Vorschubgeschwindigkeit. Dabei entstehen je nach Zeitspanvolumen sehr hohe Schleifkräfte. Eine gute Kühlung ist erforderlich, damit kein Schleifbrand auf dem Werkstück entsteht. Für die Endbearbeitung kann der letzte Schliff auch

mit einer geringen Zustellung und einer hohen Tischvorschubgeschwindigkeit erfolgen.

Gerade das Tiefschleifen kann z. B. substituierend für das Fräsen eingesetzt werden. Der Einsatz von CBN- und Diamantschleifscheiben beim Tiefschleifen erweitert das Anwendungsbereich für die Massenfertigung technisch hochwertiger Werkstücke. Das Tiefschleifen hat sich insbesondere beim Schleifen von Profilen als gängiges Verfahren etabliert (Beispiele s. Richtlinie VDI 3390 Tiefschleifen, 2014-03).

4.7.2 Einsatz von Sensorik beim Schleifen

Die Prozessüberwachung zur Sicherung der Endqualität der Werkstücke erfordert die Integration entsprechender Messtechnik. Die verwendete Sensorik dient dabei zur Ermittlung von Werkzeug- und Werkstückkennwerten sowie zur Erfassung der Maschinenfunktion und der Einflüsse äußerer Störgrößen. Neben den unterschiedlichen Messprinzipien lassen sich die Verfahren durch ihre örtliche und zeitliche Anordnung in In-Prozess, Prozessnah und Post-Prozess unterteilen. Abb. 4.129 listet eine Auswahl an Kenngrößen und Sensorsystemen auf.

	Kenngroße	Sensorsystem
In-Prozess	Temperatur Schleifkräfte Acousitic Emission Schwingungen Scheibenverschleiß	Thermokamera, Pyrometer Piezosensor Kombisensor (AE/Kraft) Piezosensor Radarsensor
Prozessnah	Schleiffrisse Scheibenverschleiß Maß, Form, Lage	Wirbelstromsensor Laserscanner Induktive Taster
Post-Prozess	Maß, Form, Lage Rauheit Scheibenverschleiß Härte, Brand, ...	Koordinatenmessmaschine Tastenadel Profilprojektor Gefügeschliffe

Abb. 4.129 Auswahl an Kenngrößen und Sensorsystemen für die Schleifbearbeitung

In-Prozess-Sensoren liefern Daten zu den Prozesskräften, Schwingungen oder aber zum Schleifscheibenverschleiß. Sie müssen besonders robust und unempfindlich gegen äußere Einflüsse (z. B. Kühlenschmierstoffe) sein. Prozessnahe Verfahren finden direkt im Anschluss an die Bearbeitung statt und dienen in erster Linie, wie auch die zeitlich und örtlich versetzte Erfassung im Post-Prozess, zur Beurteilung der Werkstückmerkmale.

Neben der Überwachung der Maschinenzustände und der Beurteilung der Werkstücke dienen die Daten der Sensoren der In-Prozessmessung zur Prozessregelung. Ziel dieser AC-Systeme (Adaptive Control) ist die Reduzierung der Prozesszeit sowie die Sicherung und Verbesserung der Werkstückqualität. Abb. 4.130 zeigt das Prinzip eines solchen AC-Systems, bei dem mit Hilfe eines Radarsensors eine verschleißkompensierende Regelung eines CD-Schleifvorganges aufgebaut wurde.

Bei einem ungeregelten Prozess und einer festeingestellten kontinuierlichen Vorschub-

geschwindigkeit der Konditionierrolle kann es zu einem Kontaktverlust zwischen Schleifscheibe und Konditionierrolle kommen. Dieser entsteht vor allem durch einen zu hohen bzw. ungleichmäßigen Verschleiß der Schleifscheibe. Dadurch verliert die Konditionierrolle ihre Wirkung. Um dies auszuschließen, misst eine Radarsensor berührungslos den Abstand zur Schleifscheibenoberfläche bzw. die Durchmesserveränderung der Schleifscheibe. Je nach Verschleißverhalten kann durch ein Regelsystem der Abrichtvorschub v_{frd} so angepasst werden, dass ein permanenter Konditionervorgang möglich ist.

4.7.3 Mikroschleifen

Mikrosysteme kommen heute in unzähligen technischen Systemen zur Anwendung. So z. B. als winzige Sensoren in der Produktion und einer Vielzahl von mikrotechnischen Produkten mit großer Bandbreite der Anwendungen. Zur

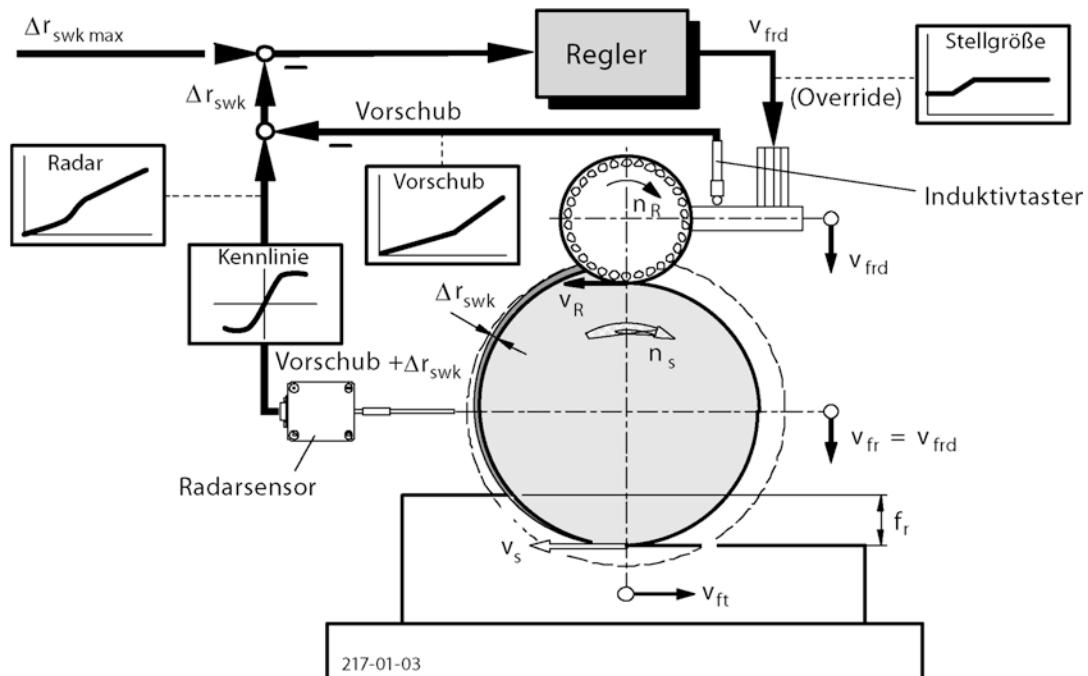


Abb. 4.130 Regelkreis zur Überwachung und Regelung des Schleifscheibenverschleißes mit einem Klein-Radar-Sensor nach Lange

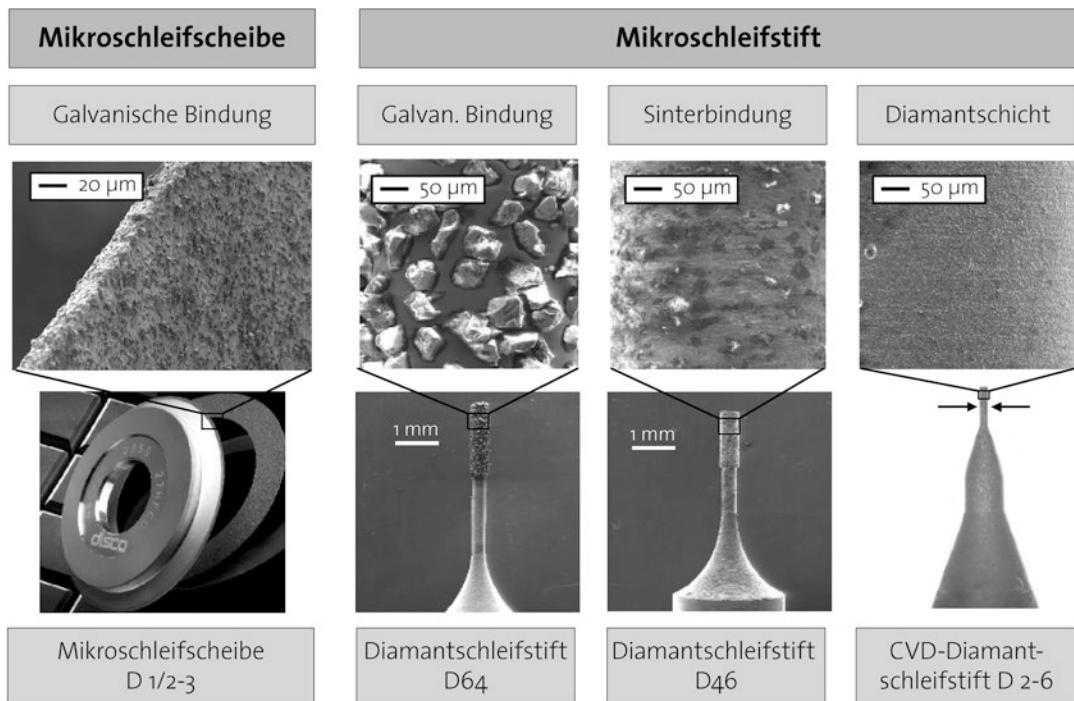


Abb. 4.131 Schleifwerkzeuge für das Mikroschleifen

Herstellung von Strukturen mit Abmessungen im Mikrometerbereich in spröde und harte Werkstoffe eignet sich das Mikroschleifen besonders.

Es erfolgt mit miniaturisierten Umfangsschleifscheiben und Schleifstiften (Abb. 4.131). Für das Schleifen sprödharter, nicht eisenhaltiger Werkstoffe wird Diamant, für gehärteten Stahl CBN als Schneidstoff verwendet.

Mikroschleifscheiben kommen vorwiegend beim Präzisions-Trennschleifen und Präzisions-**Profilschleifen** zum Einsatz. Diese Werkzeuge bestehen aus Abrasiv-Körnern in einer Kunstharz-, Sintermetall- oder Nickelbindung. Die hier zum Einsatz kommenden Abrasivkörner haben mittlere Korndurchmesser im Bereich zwischen $2 \mu\text{m}$ und $45 \mu\text{m}$. Die Breite der Schleifscheiben variiert zwischen $20 \mu\text{m}$ und 1 mm . Während sich Mikroschleifscheiben vorwiegend für geradlinige Strukturen eignen, bieten Mikroschleifstifte die Möglichkeit, geschlossene Strukturen beliebiger Form

herzustellen. Auch die Herstellung kleinsten Bohrungen ist möglich.

Konventionelle Mikroschleifstifte sind heute bis zu einem minimalen Durchmesser von $0,2 \text{ mm}$ verfügbar. Die Grundkörper dieser Werkzeuge bestehen aus hochfestem Stahl oder Hartmetall. Die Schneidkörner werden durch galvanische oder gesinterte Bindungen auf dem Grundkörper gehalten. Diesem Werkzeugaufbau sind jedoch Grenzen gesetzt. Zurzeit werden bei diesen Schleifstiften keine kleineren Schneidkorndurchmesser als $15 \mu\text{m}$ verwendet. Bei sehr kleinen Schleifstiftdurchmessern steigt die Bruchgefahr, auch bei geringen Schleifkräften. Mit CVD-beschichteten Hartmetallschleifstiften lässt sich hier eine weitere Reduzierung des Werkzeugdurchmessers erreichen. Die CVD-Diamantschicht zeichnet sich durch eine rauhe und schneidfreudige Struktur aus. Aufgrund der geringen Schichtdicke ist es hier möglich, Schleifstiftdurchmesser von minimal $60 \mu\text{m}$ zu realisieren (Abb. 4.132). Neben dem Vorteil der

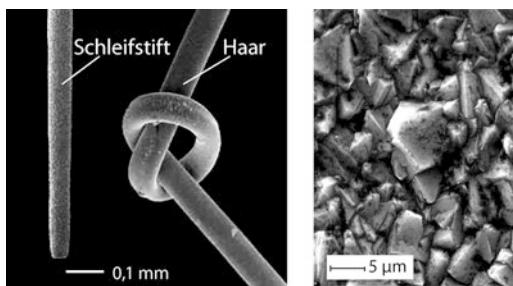


Abb. 4.132 Kleinster Diamant-Mikroschleifstift (REM-Aufnahmen: Fraunhofer Institut Braunschweig)

kleineren Werkzeugdurchmesser bietet die freie und flexible Formgebung des Grundkörpers eine Fülle von denkbaren Schleif-Geometrien. Die raue Diamantschicht ist etwa $10 \mu\text{m}$ dick und besitzt Strukturkorngrößen zwischen 1 bis $10 \mu\text{m}$. Mit dieser kleinen Strukturkorngröße ist allerdings auch der Spanraum des Werkzeuges sehr gering, was zum Zusetzen der Schleifstifte führen kann. Eine Konditionierung dieser Diamantschleifstifte ist aufgrund des einschichtigen Aufbaus nur schwer möglich. Daher ist die geometrische Genauigkeit bei der Herstellung der Grundkörper entscheidend für die Form- und die Rundlaufgenauigkeit dieser Werkzeuge.

Mikroschleifscheiben mit einer metallischen Bindung müssen vor ihrem Einsatz konditioniert werden. Hierfür wird mit den Mikroschleifscheiben in einen Schärfstein eingeschliffen, um die metallische Bindung zurückzusetzen und damit den Kornüberstand sowie den Spanraum zu vergrößern. Kunstharzbindungen haben im Vergleich zu metallischen Bindungen selbstschärfende Eigenschaften, da aufgrund ihrer geringen Härte und Haltekräfte Abrasivkörner leichter aus der Bindung gerissen werden, bevor sie abstumpfen. Diese Schleifscheiben weisen immer eine gute Schleiffähigkeit auf. Nachteil dieser Werkzeuge ist allerdings, dass sie sehr schnell verschleißt.

Mikroschleifscheiben erlauben die Herstellung gerader Nuten oder Trennschliffe. Als Konditionierwerkzeuge kommen Siliciumkarbid-Topfschleifscheiben oder Diamantprofilrollen zum Einsatz. Das Profilieren der empfindlichen und filigranen Werkzeuge für das Mikroschleifen

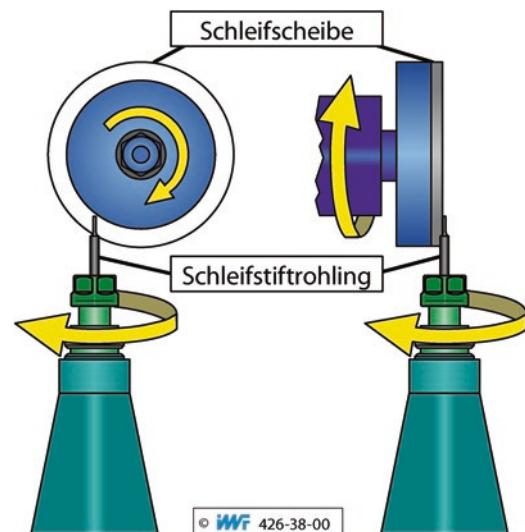


Abb. 4.133 Profilieren von MikroschleifwerkzeugenB

erfordert eine stabile, schwingungsarme Konditionierzvorrichtung.

Abb. 4.133 zeigt eine Konditionierzvorrichtung für das Profilieren von Mikro-Schleifstiften und Schleifscheiben. Ein Kipp- und Zentriertisch ermöglicht hier eine präzise Ausrichtung und Positionierung des Mikroschleifwerkzeuges gegenüber dem Konditionierwerkzeug. Die Werkzeugeinspannung erfolgt über Präzisionsspannzangen und eine Hohlschaft-Kegelaufnahme. Sie stellen einen reproduzierbaren Werkzeugwechsel sicher. Das Profilieren der Mikroschleifwerkzeuge wird wegen des geringen Zerspanungsvolumens in dieser Vorrichtung ohne Kühlsmierstoff durchgeführt.

Bei Zerspanungsprozessen unterscheidet man als Werkstofftrennmechanismen in das „Duktile Zerspanen“ und das „Spröde Zerspanen“. Die duktile Zerspanung ermöglicht beim Mikroschleifen die Fertigung hoher Oberflächengüten bei kleinsten Kantenausbrüchen. Die Beeinflussung der Werkstücksrandszone durch Mikrorisse und Versatz wird vermieden. Die duktile Zerspanung hat somit einen entscheidenden Einfluss auf das erreichbare Bearbeitungsergebnis. Sie erlaubt Mikrostrukturen mit Abmessungen von 5 bis 6 μm in einkristallines Silizium und Hartmetall zu schleifen.

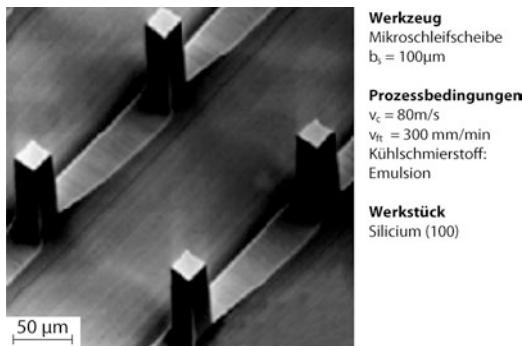


Abb. 4.134 Optimierte Prozessparameter für die Mikrostrukturierung

Für das Erreichen eines bestmöglichen Schleifergebnisses ist eine auf den Werkstückstoff bezogene Prozessoptimierung erforderlich, wie Abb. 4.134 beispielhaft zeigt. So kann die für einen duktilen oder spröden Zerspanungsmodus erforderliche Spandicke über die gewählten Einstellgrößen variiert werden. Beim Mikroschleifen mit Umfangsschleifscheiben liegen die gewählten Schnittgeschwindigkeiten im Bereich von $v_c = 60$ bis 100 m/s . Die Vorschubgeschwindigkeiten sind dagegen sehr klein. Die Zustellungen sind im Vergleich zur Schleifscheibenbreite relativ hoch. Daher handelt es sich beim Mikroschleifen im Allg. um einen Tiefschleifprozess.

Neben dem Schleifen verfügen auch andere spanende Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide über ein großes Potenzial im Bereich der Mikrostrukturierung. So ist das Honen beispielsweise sehr gut für eine Endbearbeitung kleiner Bohrungen geeignet. Derzeit werden Werkzeuge entwickelt, um Bohrungen kleiner als 1 mm zu honen. Auch das Polieren von Mikrostrukturen gewinnt eine immer stärkere Bedeutung, da die Anforderungen an die Oberflächenqualität von Mikrostrukturen und -Bauteilen stetig steigen.

4.7.4 Honen

Honen ist nach DIN 8589 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden, wobei die

vielschneidigen Werkzeuge eine aus zwei Komponenten bestehende Schnittbewegung ausführen. Da mindestens eine Komponente hin- und hergehend ist, weist die bearbeitete Oberfläche sich definiert überkreuzende Spuren auf. Beim Honen wird wie beim Schleifen mit einem Werkzeug aus gebundenem Korn der Werkstoff unter ständiger Flächenberührung zerspannt. Das Honen dient der Endbearbeitung von meist zylinderförmigen Innen- und Außenflächen und ist aufgrund des hohen Traganteils der gehonten Oberflächen sowie der erreichbaren Maß- und Formgenauigkeiten besonders für tribologisch stark beanspruchte Bauteile oder Flächen mit Dichtungsfunktion geeignet. Die Hauptanwendungsfälle liegen daher im Motorenbau und der Fertigung von Lager- und Hydraulikkomponenten. Durch die Verwendung verschiedener Schneid- und Kühlsmierstoffe sind fast alle technisch relevanten Werkstoffe honbar.

4.7.4.1 Kinematik beim Honen

Die Kinematik des Honverfahrens setzt sich aus einer axialen, einer tangentialen und einer radialem Komponente zusammen. Die axiale Komponente verläuft oszillierend und wird durch gleichmäßige Hub- und Senkbewegungen des Werkzeugs erreicht. Die tangentiale Bewegungskomponente resultiert aus der gleichmäßigen Werkzeugrotation. In radialer Richtung erfolgt die kraft- oder weggebundene Zustellung des Werkzeugs auf das Werkstück. Das Honen lässt sich in Außenrund-, Innenrund- und Planhonen unterteilen, Abb. 4.135. Nach der Länge der Hubbewegung wird zwischen Langhub- und Kurzhubhonen unterschieden. Die weiterführenden Betrachtungen beziehen sich auf das Langhub-Innenrundhonen.

Die resultierende Schnittgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Betrag der Vektorsumme der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten, wobei die radiale Vorschubgeschwindigkeit im Vergleich zu den anderen Komponenten vernachlässigt werden kann (Abb. 4.136):

$$v_c = \sqrt{v_a^2 + v_t^2} . \quad (4.71)$$

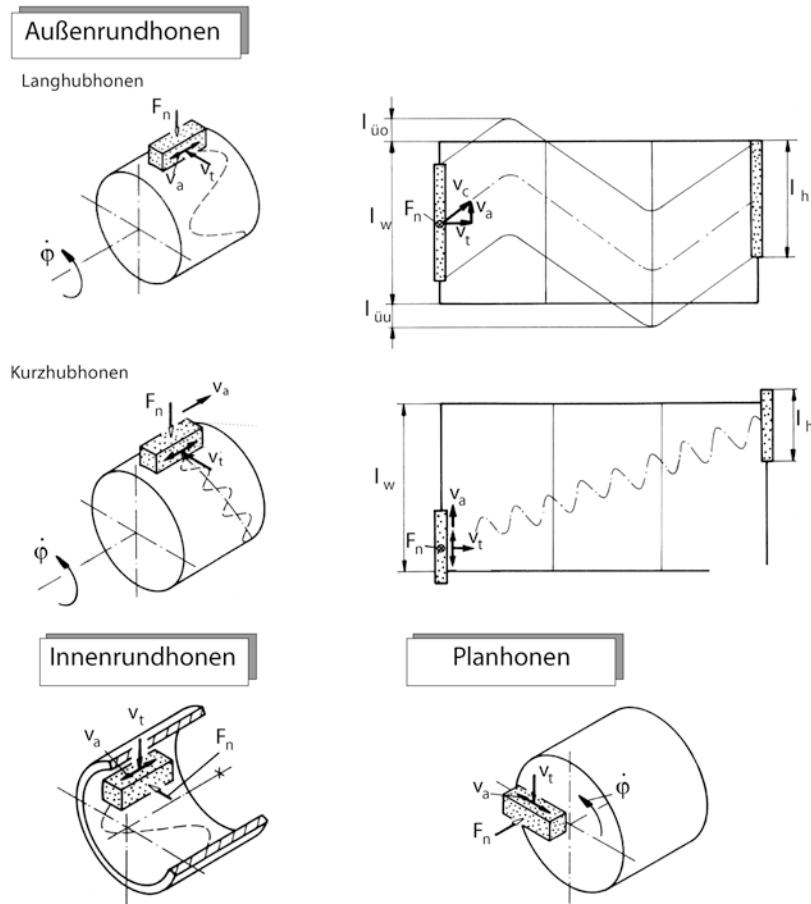


Abb. 4.135 Kinematik und Verfahren beim Honen

Durch die oszillierende Hubbewegung und die gleichmäßige Rotation entstehen auf der Werkstückoberfläche die für das Honen charakteristischen kreuzförmigen Riefen. Der Kreuzungswinkel („Honwinkel“) α ist von der axialen und tangentialen Geschwindigkeit abhängig:

$$\alpha = 2 \arctan \frac{v_a}{v_t}. \quad (4.72)$$

Analog zu den Geschwindigkeitskomponenten setzt sich die Zerspankraft aus einer axialen Komponente F_a , einer tangentialen Komponente F_t und einer radialen Komponente F_n („Honnormalkraft“) zusammen:

$$F_c = \sqrt{F_a^2 + F_t^2 + F_n^2} \quad (4.73)$$

Da das Honen unter ständiger Flächenberührung des Werkzeugs mit der Werkstückoberfläche erfolgt, verteilt sich die Honnormalkraft F_n über die Honleistenfläche auf den Honleistenanpressdruck p_n . Die Aufweitung des Honwerkzeugs, also die radiale Zustellung, wird durch die Umlenkung einer axial eingeleiteten Zustellkraft F_z über einen Doppelkonus realisiert (Abb. 4.137). Durch den Konuswinkel γ findet auch eine Kraftübersetzung statt, so dass der Honleistenanpressdruck in Abhängigkeit der Zustellkraft angegeben werden kann:

$$p_n = \frac{F_z}{m \cdot l_h \cdot b_h \cdot \tan \gamma} \quad (4.74)$$

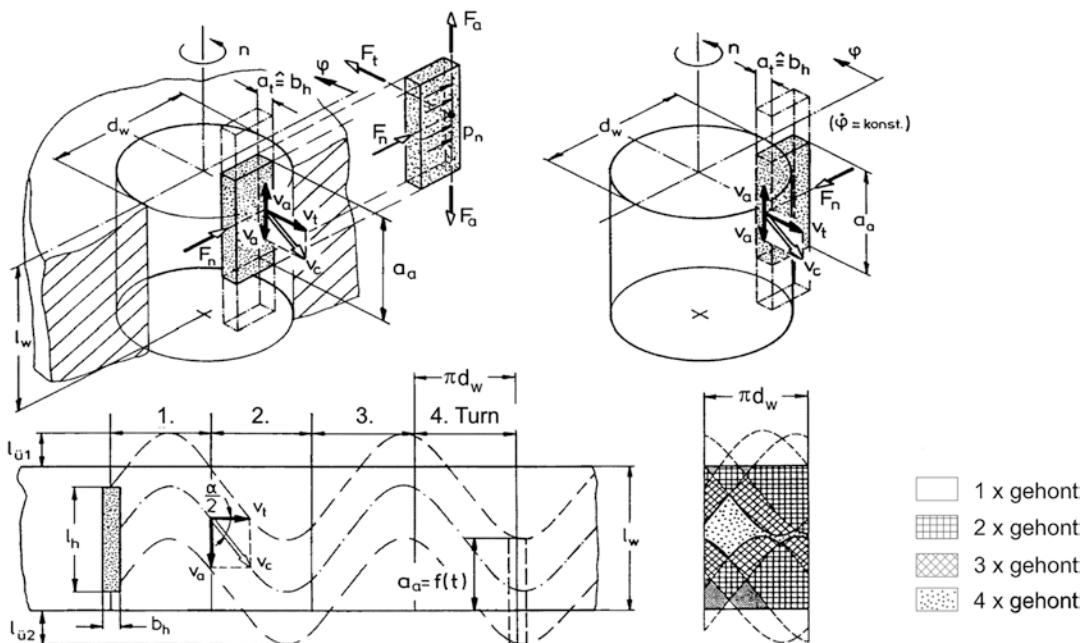


Abb. 4.136 Geschwindigkeiten und Kräfte beim Langhuhonen

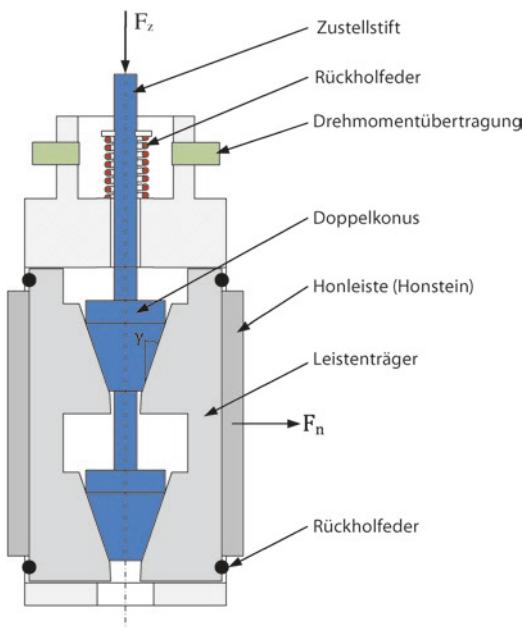


Abb. 4.137 Schnittdarstellung eines Honwerkzeugs zur Bohrungsbearbeitung

Hierbei ist m die Anzahl der Honleisten und l_h bzw. b_h sind die Länge bzw. Breite der Honleiste.

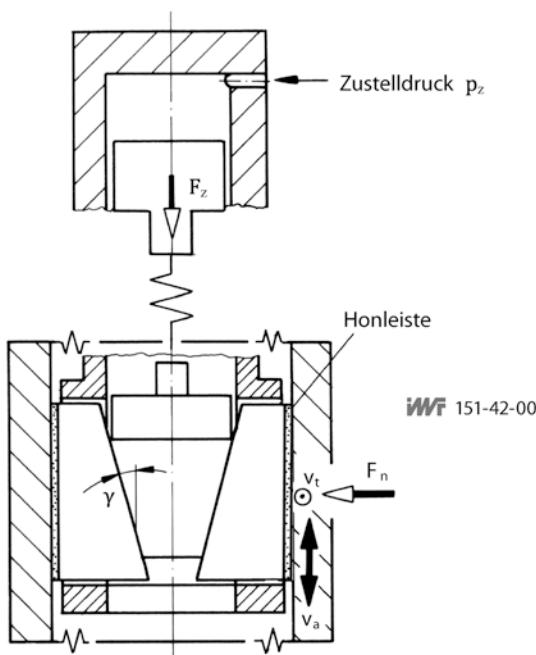
Für die Aufbringung der Zustellkraft werden kraft- und formschlüssige Zustellsysteme eingesetzt (Abb. 4.138). Bei der kraftabhängigen Zustellung wird ein Kolben mit der Kolbenfläche A_k mit einem Zustelldruck p_z beaufschlagt („hydraulische Zustellung“). Die formschlüssige Zustellung erfolgt durch die Umsetzung des Zustellmoments M_z eines Schrittmotors über ein Gewindegetriebe und wird auch als elektro-mechanische Zustellung bezeichnet. Die elektro-mechanische Zustellung kann durch Vorgabe eines Stellweges weggesteuert, oder durch Regelung des Zustellmomentes auch kraftgeregt erfolgen.

Die erreichbare Zylinderformgenauigkeit hängt beim Honen von der korrekten Auslegung der Honleistenlänge l_h , der Honleistenbreite b_h und der oberen und unteren Überlaufänge l_{u1} und l_{u2} ab (siehe Abb. 4.136 links unten). Der mittlere Bereich der Bohrung wird bei einer vorgegebenen Anzahl von Umdrehungen öfter übergehont, als der obere und der untere Bereich (siehe Abb. 4.136 rechts unten). Dies allein hätte einen tonnenförmigen Formfehler zur Folge. Durch die obere und untere Über-

lauflänge verkleinert sich jedoch die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück, wodurch sich bei konstanter Honnormalkraft ein höherer Honleistenanpressdruck und damit

eine erhöhte Zerspanrate ergeben. In der Regel sollte die Honleistenlänge daher in etwa 2/3 der Bohrungslänge, und die Überlauflänge in etwa 1/3 der Honleistenlänge betragen, Abb. 4.139.

Kraftabhängige Zustellung (hydraulische Zustellung)



Formschlüssige / wegabhängige Zustellung (elektro-mechanische Zustellung)

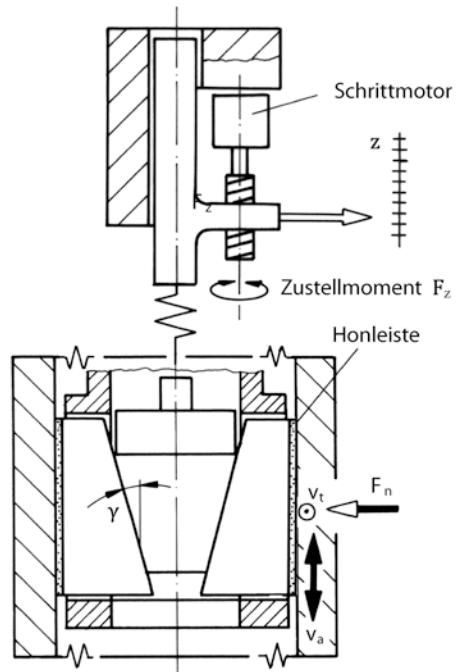


Abb. 4.138 Kraft- und formschlüssige Zustellsysteme

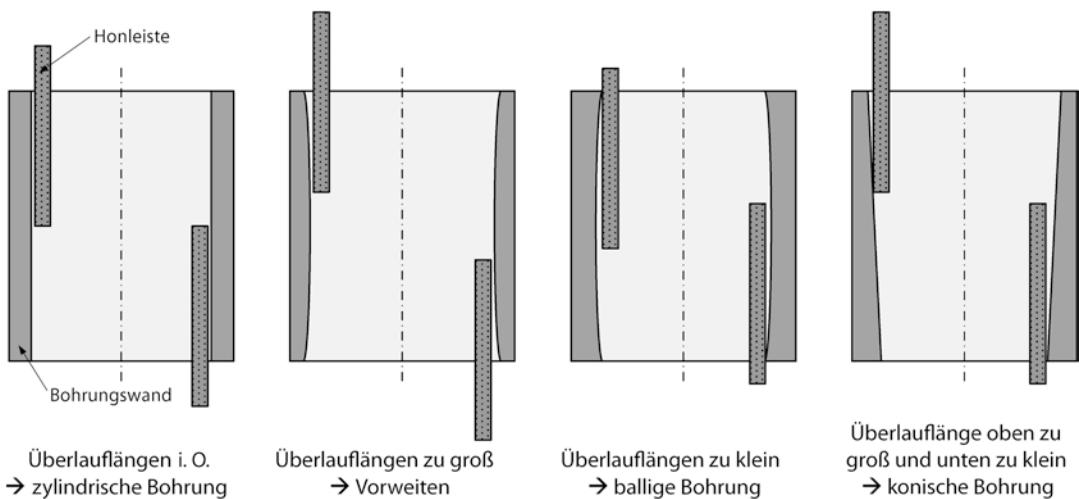


Abb. 4.139 Einfluss des Honleistenüberlaufs auf die Bohrungsform. (nach Flores)

Zusätzlich müssen Länge und Breite der Honleiste ausreichend groß dimensioniert sein, um Formfehler zu eliminieren.

Für den Fall von Bohrungen, in denen die Überlauflänge durch konstruktive Gegebenheiten beschränkt ist, z. B. bei Sacklochbohrungen, muss durch eine Anpassung der Hubsteuerung das Auftreten eines Konizitätsfehlers verhindert werden. In diesen Fällen wird der Prozess meist so angepasst, dass das Werkzeug in dem Bereich des begrenzten Überlaufs mehrere Kurzhübe ausführt.

Durch das Honen lassen sich auch Winkel- und Lagefehler der Bohrung ausgleichen. Hierzu werden dem Werkzeug bzw. dem Werkstück einzelne rotatorische und translatorische Freiheitsgrade zugeordnet. Am weitesten verbreitet ist jedoch die doppelgelenkige Werkzeugaufnahme mit zwei übereinander angeordneten Kardangelenken. Hierdurch kann das Werkzeug der Bohrung nachlaufen und Fluchtungsfehler zwischen der Spindel- und der Bohrungssachse ausgleichen.

Sind Werkzeug und Werkstück starr gelagert, kann durch das Honen auch eine Korrektur der

Bohrungsposition erfolgen. Das Verfahren wird in diesem Fall auch als Positionshonen bezeichnet.

4.7.4.2 Werkzeuge beim Honen

Die beim Honen eingesetzten Werkzeuge können in aufweitbare (Durchmesser von ca. 5 mm bis zu 1000 mm) und nicht aufweitbare Werkzeuge (Durchmesser kleiner 5 mm) unterteilt werden. Bei den aufweitbaren Werkzeugen findet während des Zerspanvorgangs eine kontinuierliche Aufweitung statt, bis der Solldurchmesser der Bohrung erreicht ist. Je nach Bohrungsdurchmesser können Werkzeuge mit einer oder mit mehreren Schneideleisten zum Einsatz kommen. Bei kleineren Bohrungen kommt oft das sog. Dornhonen zur Anwendung. Hierbei wird ein vollflächig mit Schneidbelag besetztes Werkzeug, das eine konische Schneidenzone und eine auf den Soll-durchmesser eingestellte zylindrische Kalibrierzone aufweist, eingesetzt, Abb. 4.140. Da sich der auftretende Schneidbelagverschleiß direkt auf das Endmaß der Bohrung auswirkt, wei-

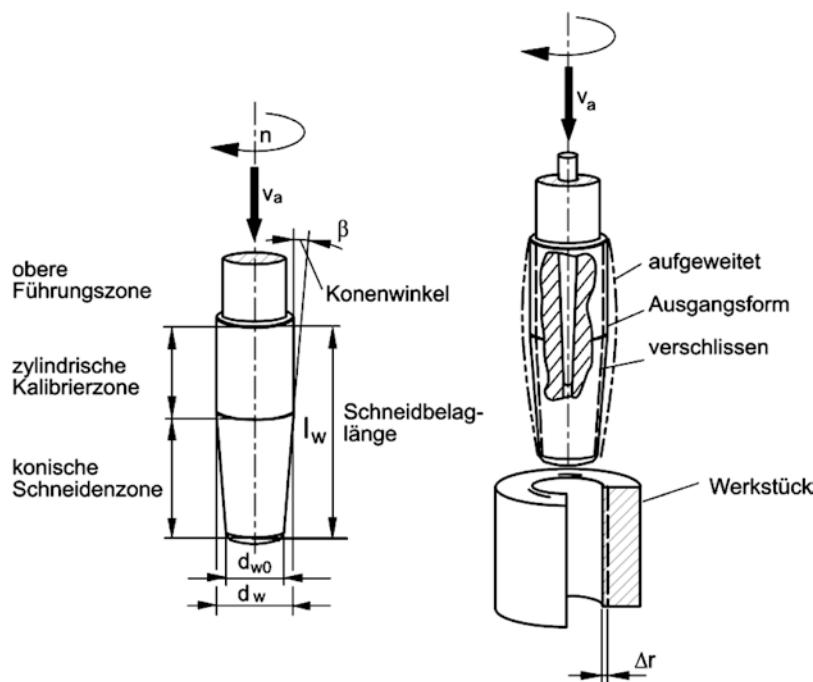


Abb. 4.140 Prinzipieller Aufbau eines Dornhonwerkzeugs mit konischer Schneidenzone. (nach Kappmeyer)

sen Dornhonwerkzeuge oft einen Aufweitemechanismus auf. Dieser dient jedoch nicht wie bei den aufweitbaren Werkzeugen einer In-Prozess-Zustellung. Beim Dornhonen führt das Werkzeug nur wenige Doppelhübe aus, da der Hauptanteil der Zerspanungsarbeit bereits beim ersten Abwärtshub geleistet wird.

Die beim Honen verwendeten Schneidstoffe sind (wie auch beim Schleifen), Aluminiumoxid (Korund – Al_2O_3), Siliziumkarbid (SiC), kubisches Bornitrid (CBN) und Diamant. Ebenfalls analog zum Schleifen kommen keramische Bindungen und pulvermetallurgisch oder galvanisch hergestellte metallische Bindungen zum Einsatz. Die auftretenden Verschleißformen bei metallischer Bindung können in Bindungs- und Kornverschleiß unterteilt werden, Abb. 4.141. Der Bindungsverschleiß beinhaltet je nach Bindungsart Partikelverschleiß und Auskolkungen um einzelne Schneidkörner. Die Verschleißmechanismen der Schneidkörner sind das Abstumpfen und Ausbrechen sowie das Splittern.

Durch die richtige Abstimmung von Schneidstoff und Bindungshärte kann ein Selbstschärfefekt der Honleisten erzielt werden, wodurch die Schneideigenschaften der Honleiste über die gesamte Standzeit konstant bleiben. In diesem Fall wird ein Schneidkorn solange in der Bindung gehalten, bis es abgestumpft ist und durch die steigende Schnittkraft am Korn aus der Bindung bricht. Dadurch kommen neue Schneidkörner zum Einsatz. Für die Schruppbearbeitung werden häufig Schneidkörner mit starker Splitterneigung eingesetzt, da durch die Kornsplitterung viele scharfe Schneidkanten am Korn vorhanden sind und sich dadurch ein hohes Zeitspanvolumen erzielen lässt (Abb. 4.142).

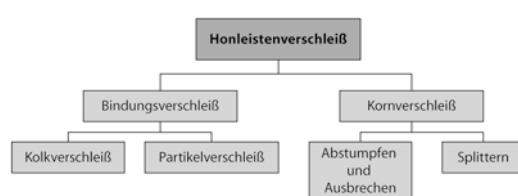


Abb. 4.141 Verschleißmechanismen an Honleisten.
(nach Flores)

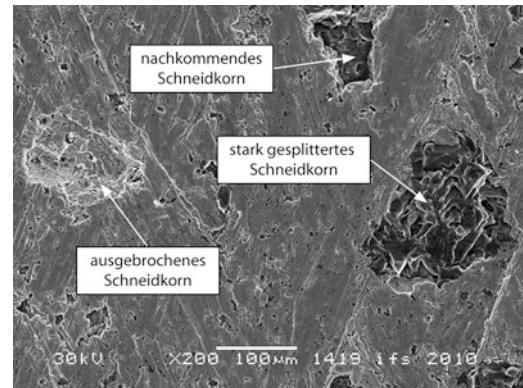


Abb. 4.142 Kornsplitterung und -ausbruch an D213 Diamanthonleiste

4.7.4.3 Honprozess

Beim Honen werden hohe Anforderungen an die Prozesssicherheit gestellt, da die zu honenden Werkstücke oft schon einen langen Weg entlang der Wertschöpfungskette durchlaufen haben. Ausschuss ist daher mit hohen Kosten verbunden, weil gehönte Oberflächen meist Funktionsoberflächen darstellen. So können Fehler in der Prozessführung beim Honen der Zylinderlaufbahnen von Verbrennungsmotoren z. B. zu unzulässig hohem Ölverbrauch oder sogar zu Motorschäden führen. Daher sind die Einflüsse einzelner Prozesseingangs- und Störgrößen auf das Honergebnis von besonderer Bedeutung. Für die wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens sind zudem die Auswirkungen einzelner Größen z. B. auf die Honzeit (errebbare Taktzeit) und den Honleistenverschleiß zu bewerten. Die Eingangsgrößen des Honprozesses können nach Einstellgrößen, Werkzeug-eigenschaften, Werkstückeigenschaften und Kühlsmierung unterteilt werden (Abb. 4.143).

Zu den Einstellgrößen gehören die an der Honmaschine einstellbaren Parameter wie der Zustelldruck (hydraulische Zustellung), die Zustellgeschwindigkeit (elektro-mechanische Zustellung), die Position der Hubumkehrpunkte und damit die Hublage und -länge. Mit steigendem Zustelldruck bzw. höherer Zustellgeschwindigkeit steigt auch der Honleistenanpressdruck und damit verbunden die

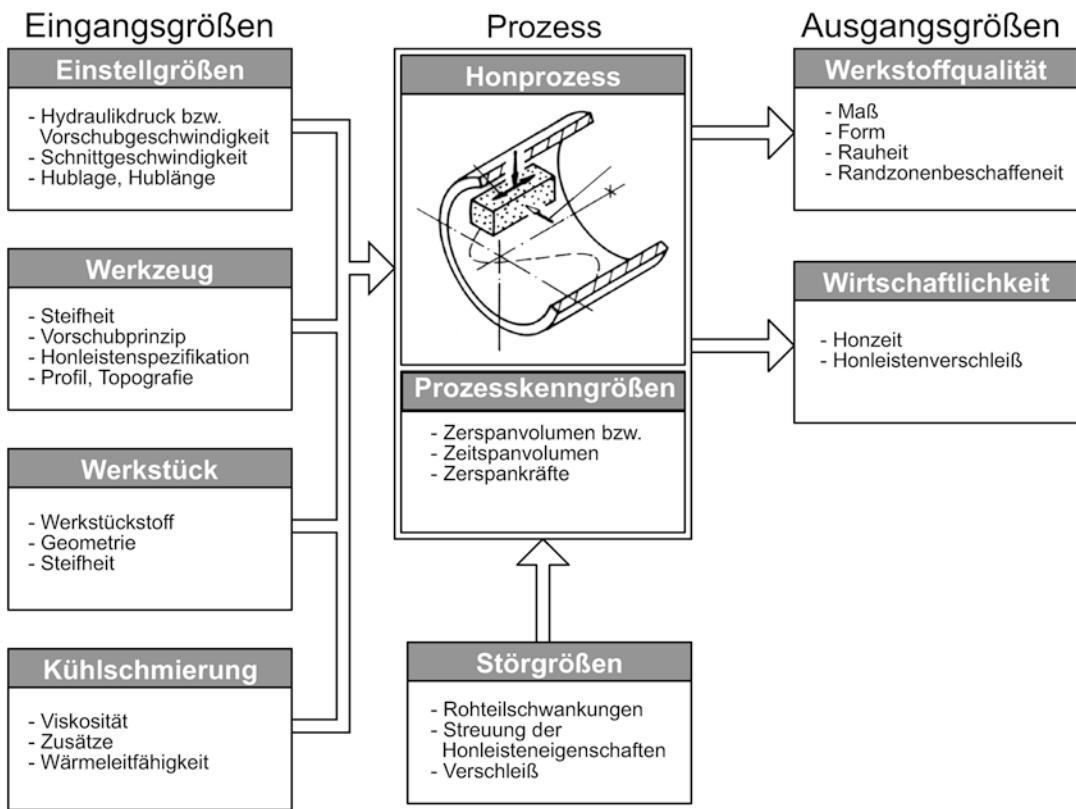


Abb. 4.143 Systemdarstellung des Honprozesses nach v. See

Korneindringtiefe. Zusätzlich sind mit steigender Korneindringtiefe auch Schneidkörner an der Zerspanung beteiligt, die weniger weit aus der Bindung herausragen. In der Folge erhöht sich auch das erzielte Zeitspanvolumen. Gleichzeitig steigen jedoch der Honleistenverschleiß durch die höhere Belastung der Schneidkörner und die Rauheit der gehonten Oberfläche durch die tieferen Bearbeitungsriefen. Die ebenfalls steigenden Zerspanungskräfte bewirken eine zunehmende elastische Verformung des Werkstücks während der Bearbeitung, was zu einer verringerten Form- und Maßgenauigkeit führt.

Neben den Maschineneinstellgrößen wird der Honprozess maßgeblich durch das verwendete Honwerkzeug beeinflusst. Die konstruktiven Eigenschaften, die Zustellkraftübersetzung durch den Konuswinkel, Reibungsverluste durch die mechanischen Kraftübertragungselemente

und Beschaffenheit der Honleiste wirken sich auf das Honergebnis aus.

Das Werkstück beeinflusst den Honprozess in erster Linie durch die Härte der zu honenden Fläche. Mit zunehmender Härte sinkt die Korneindringtiefe bei gegebenem Honleistenanpressdruck. In der Folge nehmen das erzielbare Zeitspanvolumen und die Rauheit der gehonten Oberfläche ab.

Das Honergebnis kann auch durch die Eigenschaften des eingesetzten Kühlschmierstoffs beeinflusst werden. Verwendet werden sowohl wasserbasierte Emulsionen als auch spezielle Honöle. Da die Schnittgeschwindigkeiten beim Honen im Vergleich zum Schleifen sehr gering sind, spielt die Kühlung eine untergeordnete Rolle. Die Hauptaufgabe des Kühlschmierstoffes besteht somit in der Schmierung und der Späneabfuhr, um ein Zusetzen der Hon-

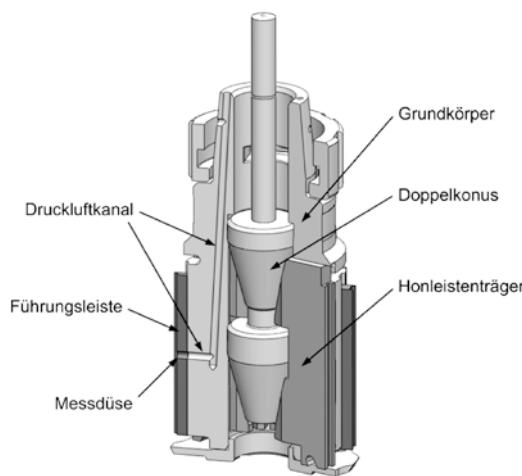


Abb. 4.144 Schnittdarstellung durch ein Honwerkzeug für pneumatische Durchmessermessung

leiste mit Honspänen zu verhindern. Durch die Verwendung höherviskoser Öle bildet sich ein dickerer Schmierfilm zwischen Werkstück und Honleiste, wodurch die Korneindringtiefe und damit die Rauheit der gehonten Oberfläche und das Zeitspanvolumen abnehmen. In der Großserienfertigung kommen häufig Emulsionen zum Einsatz.

Zu den wichtigsten Störgrößen zählen Rauheits- und Aufmaßschwankungen des Rohteils. Für den Ausgleich von Schwankungen des Ausgangsdurchmessers beim Innenrundhonen wird häufig die pneumatische In-Prozess-Durchmessermessung eingesetzt. Hierbei wird

nach dem Düse-Prallplatte-Prinzip Druckluft durch Kanäle im Werkzeug auf die Werkstückoberfläche geblasen und der abstands- und damit durchmesserabhängige Staudruck gemessen (Abb. 4.144). Hierdurch kann der Honprozess bei Erreichen eines definierten Solldurchmessers automatisch abgebrochen werden.

4.7.4.4 Anwendungsbeispiele

Plateauhonen

Das Plateauhonen dient der Erzeugung einer Laufbahntopografie, die schon der eingelaufenen Laufbahn entspricht. So eine Fläche verfügt über einzelne tiefe Riefen, die zwischen Plateaus mit sehr hohem Traganteil verlaufen. Die Riefen dienen der guten Ölhaftung und durch den hohen Traganteil der Plateauflächen werden der Verschleiß der Laufbahn und der Kolbenringe sowie ein geringer Ölverbrauch und eine deutlich kürzere Einlaufzeit von Motoren erzielt. Die plateauartige Topografie wird durch das Vorhonen mit einer grobkörnigen Diamant-honleiste (z. B. D 150) und das anschließende Fertighonen mit einer feinkörnigen Honleiste erreicht. Beim Vorhonen wird zunächst eine rauhe Oberfläche erzielt, deren Rauheitsspitzen durch das Fertighonen entfernt werden (Abb. 4.145).

Formhonen

Das Formhonen stellt eine Weiterentwicklung des konventionellen Honverfahrens für die Bearbeitung von Zylinderkurbelgehäusen von Ver-

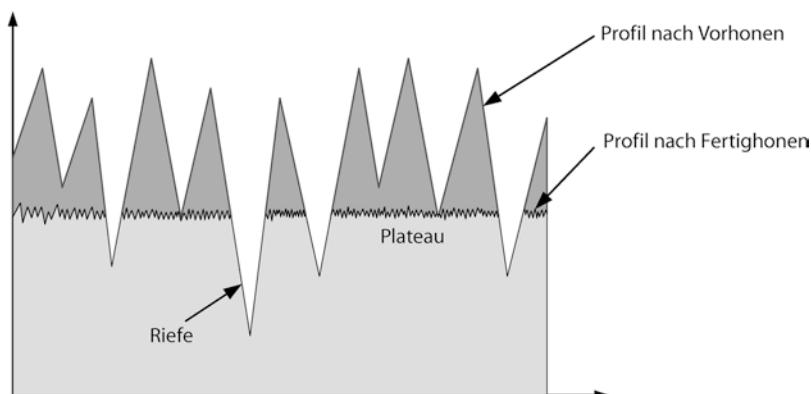


Abb. 4.145 Schematischer Profilschnitt beim Plateauhonen nach Vor- und Fertighonen

brennungsmotoren dar. Durch das Honen können hohe Zylinderformgenauigkeiten erreicht werden. Im Fall des Zylinderkurbelgehäuses führen jedoch die sog. kaltstatischen Verzüge durch die Montagekräfte von Zylinderkopf und Nebenaggregaten zu einer Abweichung von der Zylinderform. Zusätzlich beeinflussen auch die thermisch induzierten Spannungen während des Motorbetriebs die Laufbahnform. Während des Motorbetriebs stellt sich also eine Form der Zylinderlaufbahn ein, die deutlich von der zylindrisch gehonten Form abweicht (Abb. 4.146). In der Folge muss die Vorspannung der Kolbenringe erhöht werden, um unzulässig hohen Ölverbrauch und Blow-by zu vermeiden. Dadurch steigen jedoch auch die Verluste durch Reibung der Kolbenringe auf der Zylinderlaufbahn. Für den Ausgleich der kaltstatischen Verzüge wird heutzutage oft mit sog. Honbrillen gearbeitet, die die Montageverzüge des Zylinderkopfes bereits einstellen, bevor die Zylinderbohrung gehont wird.

Beim Formhonen wird durch ein mit Piezostellern aktiv zustellbares Honwerkzeug mit kurzen Honleisten eine bereits unrunde Geometrie der Laufbahn erzeugt, die die später auftretenden Verzüge vorhält. Somit stellt sich für einen vorab bestimmten Betriebspunkt des Motors eine ideal zylindrische Form der Lauffläche ein.

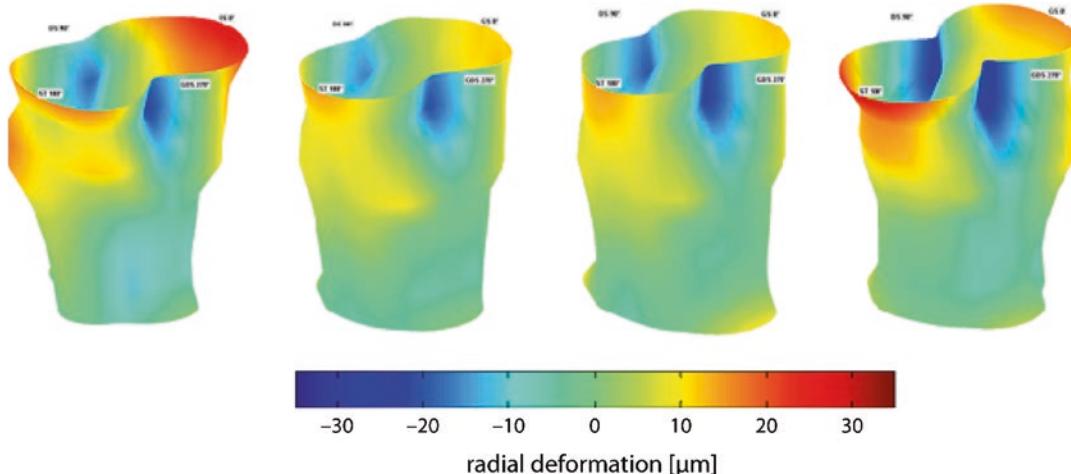


Abb. 4.146 Radiale Deformation der Zylinderlaufbahnen nach Wiens (Vierzylinder-Reihenmotor der Oberklasse)

4.7.5 Läppen und Feinschleifen mit Läppkinematik

Für Werkstücke mit höchsten Anforderungen hinsichtlich Oberflächenqualität sowie Form- und Maßgenauigkeit wird in der Regel das Läppen oder immer häufiger auch das Feinschleifen mit Läppkinematik eingesetzt.

4.7.5.1 Läppen

Läppen ist Spanen mit losem, in einer Paste oder Flüssigkeit verteiltem Korn, dem Läppgemisch, das auf einem meist formübertragenden Gegenstück (Läppwerkzeug) bei möglichst ungeordneten Schneidbahnen der einzelnen Körner geführt wird (DIN 8589).

4.7.5.1.1 Grundlagen

Beim Läppen wird im Gegensatz zum Honen und Schleifen mitlosem Korn gearbeitet. Es können nahezu alle Werkstoffe bearbeitet werden, z. B. alle Metalle, Keramiken, Gläser, Naturstoffe, Halbleiter und Kunststoffe, aber auch Grafit. Die Voraussetzung für die Bearbeitungsfähigkeit ist ein homogenes Gefüge. Zudem dürfen sich die Werkstoffe nicht durch ihr Eigengewicht oder eine Belastung elastisch oder plastisch verformen. Die beim Läppen erreichbaren Qualitäten liegen bei einem arith-

metischen Mittenrauwert $R_a = 0,02$ bis $16 \mu\text{m}$, einer Planparallelität zwischen 1 bis $2 \mu\text{m}$ und einem Ebenheitsfehler $< 0,6 \mu\text{m}$.

Hauptvorteile des Verfahrens sind die Werkstückbearbeitung ohne Einspannung, die Möglichkeit, auch kleinste Bauteile mit einer Dicke $< 0,1 \text{ mm}$ (z. B. Wafer) zu fertigen sowie die Vermeidung von Wärme- und Spannungsverzug an der geläpperten Oberfläche.

Beim Läppen treten zwei parallele Mechanismen auf, die zur Entfernung von Werkstückstoff führen. Das Läppkorn wird in einer Flüssigkeit oder Paste in den Arbeitsspalt zwischen Werkstück und Werkzeug gebracht. Hier wird ein Teil der Körner im Werkzeug eingebettet. Das wirkt ähnlich wie gebundene Körner. Es kommt zu einer Spanbildung am Werkstück. Die restlichen Körner rollen zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück ab. Dabei drücken sie sich so in das Werkstück ein, dass eine Kraterstruktur entsteht. Dies ist mit einer ständigen plastischen Verformung des Werkstücks verbunden, wodurch die Werkstückrandzone bis zu einer Tiefe von 4 bis $24 \mu\text{m}$ verfestigt wird. Dadurch versprödet der Werkstoff bis zur Überschreitung der Werkstofftrennfestigkeit und kleine Partikel platzen ab.

Einfluss von Prozesskenngrößen auf das Läppergebnis

Neben der Läppscheibe, dem Läppmittel und dem Werkstückstoff wird das Läppergebnis durch die an der Maschine einstellbaren Prozesskenngrößen Läppdruck und Läppdauer beeinflusst. Mit steigender Läppgeschwindigkeit steigt auch die Zerspanrate. Aufgrund des Einsatzes von losem Korn führt eine überhöhte Drehzahl jedoch dazu, dass das Läppkorn durch die Zentrifugalkraft aus dem Arbeitsspalt gefördert wird. Daher sollte die Läppgeschwindigkeit nur zwischen $0,1$ und $0,5 \text{ m/s}$ liegen.

Läppkorn und Läppflüssigkeit bilden das Läppmittel, das einen Läppfilm zwischen Werkzeug und Werkstück erzeugt. Dieser hat die Aufgabe, neue Läppkörner in den Prozess zu führen. Höhere Läppdrücke führen dazu, dass die Läppkörner ständig splittern und somit neue Schneiden entstehen. Darüber hinaus bestimmen der Mischungsquotient von Läppkorn und Läpp-

flüssigkeit sowie die zugeführte Menge an Läppmittel das Zerspanverhalten. Das Mischungsverhältnis sollte etwa zwischen 150 und 200 g/l betragen. Ein zu dicker Läppfilm bei kleinen Körnungen würde eine Werkstoffzerspanung verhindern, so dass eine dünnflüssigere Läppsuspension erforderlich ist.

Am häufigsten werden Läppkörner mit einem mittleren Korndurchmesser $< 20 \mu\text{m}$ eingesetzt. Weiterhin werden Körnungen zwischen $0,1 \mu\text{m}$ für feinste Oberflächen und bis zu $150 \mu\text{m}$ für die Schrubbearbeitung gewählt. Um die Gefahr der Kratzerbildung zu senken, sollten die Korndurchmesser innerhalb einer Korngröße möglichst identisch sein. Abhängig vom zu bearbeitenden Werkstoff werden meist Siliziumkarbid oder Edelkorund als Kornwerkstoff eingesetzt, aber auch Diamant und Bornitrid finden Anwendung, wenn harte Werkstoffe wie Keramiken oder Hartmetall bearbeitet werden sollen (Tab. 4.4).

Insbesondere bei weichen Werkstückstoffen führen große Läppkörner und höhere Läppdrücke zu großen Riefen und tiefen Eindrücken auf der Oberfläche und damit auch zu einer höheren Rauheit (Abb. 4.147). Ebenso steigt die Rauheit bei hoher Läppkorndichte, da die Bewegung der Körner eingeschränkt wird und diese damit am Splittern gehindert werden. Größere Körner bleiben daher länger am Läppprozess beteiligt. Eine Erhöhung der Läppfilmdicke verhindert das Eindringen der Läppkörner in die Werkstückoberfläche, so dass die Rauheit reduziert wird. Auch eine längere Läppdauer führt zu

Tab. 4.4 Günstige Kombinationen von Läpppulver und Werkstückstoff (nach Wolters und Klocke)

Läppkornspezifikation	Bearbeiteter Werkstoff
Korund	Weiche Stähle, Leicht- und Buntmetalle (Kupfer, Bronze), Grafit, Halbleiterwerkstoffe (Silizium, Germanium), Grauguss
Siliziumkarbid	Vergütete und legierte Stähle, Grauguss, Glas, Porzellan
Borkarbid	Hartmetalle, technische Keramiken
Diamant	Hartmetalle, technische Keramiken

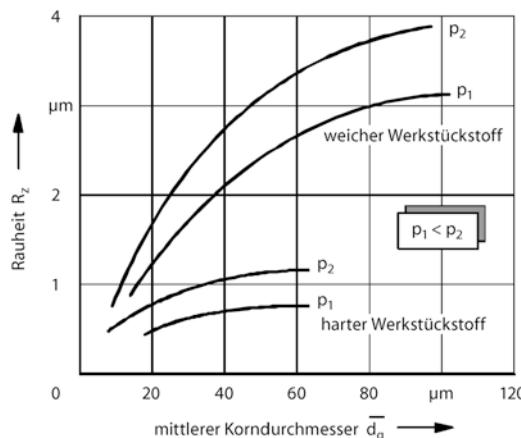


Abb. 4.147 Rauheit in Abhängigkeit vom Läppdruck und mittleren Korndurchmesser. (nach Lichtenberg)

einer reduzierten Rauheit, da der Anteil an gesplitteten Körnern zunimmt und der Korndurchmesser sinkt.

Eine Steigerung des Läppdrucks führt nicht nur zu einer erhöhten Rauheit, sondern auch zu einem gesteigerten Zeitspanvolumen. Der Grenzläppdruck ist erreicht, wenn der Läppfilm abreißt und die Körner stark splittieren. Das Zeitspanvolumen lässt sich zudem über eine Erhöhung der Kornkonzentration steigern, da immer mehr Körner am Läppprozess beteiligt werden. Ist die Zahl der Läppkörner hingegen zu hoch, so hindern sich die Körner gegenseitig an ihrer Bewegung und das Zeitspanvolumen sinkt (Abb. 4.148).

Die Läppflüssigkeit sorgt für die erforderliche Schmierung und Kühlung im Läppprozess, um eine Randzonenschädigung der Werkstücke zu verhindern.

In der Praxis werden meist Läppscheiben mit einer Härte zwischen 140–220 HB eingesetzt, da diese einen geringen Formverschleiß aufweisen. Dabei werden drei Gruppen von Läppscheiben unterschieden. Für weiche Werkstoffe (z. B. Kupfer) werden geglühte Scheiben eingesetzt. Ungeglühte Scheiben werden für die Bearbeitung von Grauguss und weichem Stahl verwendet. Für gehärtete Stähle und Keramiken ist hingegen die Verwendung von gehärteten Scheiben erforderlich. Während bei den geglühten

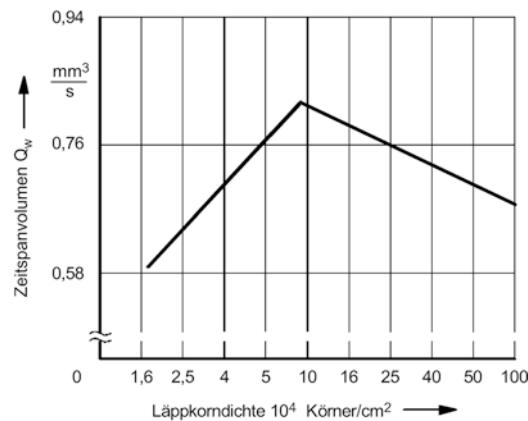


Abb. 4.148 Einfluss der Läppkorndichte auf das Zeitspanvolumen. (nach Lichtenberg)

Scheiben die Läppkörner vorwiegend in die Läppscheibe eingedrückt werden und spanend wirken, rollen sie bei den gehärteten Scheiben eher ab. Um die Einsatzdauer der Läppkörner zu verkürzen, sind große Läppscheiben meist mit Nuten versehen. Da häufiger neue Schneiden in Einsatz kommen, führt das zu einem gesteigerten Zeitspanvolumen.

4.7.5.1.2 Läppverfahren

Die Läppverfahren lassen sich in Plan-, Rund-, Schraub-, Profil- und Wälzläppen einteilen. Zusätzlich existieren Sonderläppverfahren, durch die jedoch nur die Oberflächenqualität verbessert werden kann, während die Maß- und Formgenauigkeit nicht beeinflusst werden.

Planläppen

Am häufigsten wird das Läppen ebener Bauteile auf Ein- und Zweiseitenmaschinen durchgeführt. Dabei liegen die Werkstücke in sog. Käfigen, die wiederum von Laufringen gehalten werden, die um das Zentrum der Läppscheibe abrollen. Bei Einscheibenmaschinen erfolgt der Antrieb meist über Reibungskopplung. Die Drehbewegung der Laufringe bewirkt, dass die Läppscheibe kontinuierlich abgerichtet wird und daher plan bleibt. Um den erforderlichen Läppdruck aufzubringen, werden die Werkstücke über Gewichte oder eine pneumatisch arbeitende Belastungseinheit belastet (Abb. 4.149).

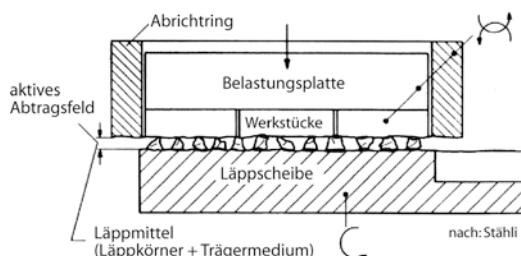


Abb. 4.149 Prinzip des Läppens

Die Zweiseibenmaschinen haben den Vorteil, dass beide Seiten der Werkstücke parallel bearbeitet werden. Die Läuferringe haben hierbei einen Zahnkranz, der an einem äußeren Zahnkranz abrollt und von einem inneren Zahnkranz angetrieben wird. Wie auch beim Einscheibensystem ergeben sich hierdurch zykloidi sche Bahnformen der Werkstücke (Abb. 4.150). Die Drehrichtung und Rotationsgeschwindigkeit der Läuferringe müssen daher so an die Läppscheibengeschwindigkeit angepasst werden, dass ein möglichst gleichmäßiger Läppscheiben verschleiß auftritt und die Läppscheiben eben bleiben. So kann gewährleistet werden, dass die Werkstücke eine hohe Planparallelität und Maßgenauigkeit aufweisen. Das Abrichten der Läppscheiben erfolgt beim Zweiseiben system über ein Einläppen beider Scheiben aufeinander oder durch Abdreh einrichtungen.

Rundläppen

Das Außenrundläppen wird äquivalent zum Planläppen auf Zweiseibenmaschinen durchgeführt, wobei mehrere Werkstücke zeitgleich bearbeitet werden. Auch hier erfolgt die Führung der Werkstücke über Käfige, die in den Laufringen liegen.

Beim Innenrundläppen wird das Werkzeug hingegen kardanisch aufgehängt. Dadurch können Fluchtungsfehler zwischen dem Werkzeug und der Bohrung ausgeglichen werden. Der Durchmesser des Läppwerkzeugs kann wie beim Honen über einen Kegel innerhalb eines begrenzten Bereichs eingestellt werden. Auch die Kinematik besteht wie beim Honen aus einer Überlagerung einer Drehbewegung mit einer Oszillation in axialer Richtung.

4.7.5.2 Polieren

Das Polieren unterscheidet sich vom Läppen nur in der verwendeten Korngröße. Daher können auch dieselben Werkstoffe bearbeitet werden wie beim Läppen.

Der Poliervorgang besteht aus dem Schleifen und Einebnen der Oberfläche. Hierzu wird loses Polierkorn auf ein nachgiebiges Trägerwerkzeug gebracht, so dass die losen Körner eingebettet werden und nicht auf dem Trägerkörper abrollen wie beim Läppen. Die scharfen und har ten Körner tragen den Werkstoff schleifend ab.

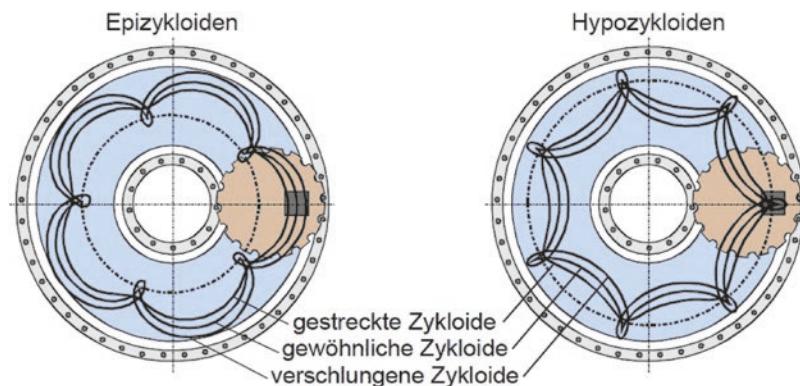


Abb. 4.150 Bahnkurven der Werkstücke beim Läppen. (nach Ardel)

Das Einebnen bzw. Gätten der Oberfläche wird dann ohne Werkstoffabtrag durch abgerundete Körner bewirkt. Zwischen dem Werkstück und dem Trägerkörper erfolgt eine starke Reibung, die zu Temperaturen von 200 bis 600 °C führen kann. Diese hohen Temperaturen begünstigen zusätzlich die Einebnung der Oberfläche. Dabei entstehen die sogenannten *Beilby-Schichten*, bei denen teilweise angeschmolzener Werkstückstoff in die Täler des Rauheitsprofils fließt. Hierbei wird die Kristallstruktur zunächst aufgehoben und es erfolgt eine Rekristallisierung in feineren Kristallen. Auf diese Weise wird die Randzone des Werkstücks bis zu einer Tiefe von 10 µm kaltverfestigt und so die Korrosionsresistenz erhöht.

Der beim Polieren eingesetzte Trägerwerkstoff besteht in der Regel aus Sisalfasern oder textilen Werkstoffen. Als Kornwerkstoff kommen Kreide, Tonerde, Eisenoxid, Chromoxid oder Diamant in einem pastenförmigen oder flüssigen Bindemittel zum Einsatz. Die flüssigen Bindemittel können gleichmäßiger aufgetragen werden, wodurch der Verbrauch reduziert wird.

Der zu bearbeitende Werkstoff hat einen hohen Einfluss auf das Polierergebnis. Die besten Ergebnisse werden an homogenen Werkstoffen erzielt. Scharfe Kanten und Übergänge sollten hingegen vermieden werden, da sie zu einer Beschädigung des weichen Trägerkörpers führen. Um die Polerdauer so gering wie möglich zu halten, sollte das Werkstück so vorbearbeitet werden, dass es eine gleichmäßige Oberflächentopografie aufweist. Das fertig polierte Werkstück weist in der Regel eine glänzende Oberfläche auf. Je höher die Werkzeugumfangsgeschwindigkeit, desto geringer ist der erreichte Glanz, da die Wirkhärte des Polierwerkzeugs mit der Umfangsgeschwindigkeit steigt. Um den Glanzgrad zu erhöhen, können geringere Korngrößen oder weichere Trägerkörper eingesetzt werden.

4.7.5.3 Feinschleifen mit Läppkinematik

Das Läppen wird heute zunehmend durch das Feinschleifen mit Läppkinematik verdrängt. Läppen wird jedoch dann eingesetzt, wenn eine gleichmäßige Oberflächentextur ohne Riefen

gefordert ist. Die ersten Maschinen zum Feinschleifen mit Läppkinematik waren Läppmaschinen, bei denen die Läppscheibe gegen eine Schleifscheibe ausgetauscht wurde. Die Zerspanung erfolgt dabei wie bei anderen Schleifprozessen unter Einsatz eines Kühlenschmiermittels.

Durch die Verwendung eines gebundenen Korns können wesentlich höhere Schnittgeschwindigkeiten realisiert werden als beim Läppen und damit wird auch das Zeitspanvolumen deutlich erhöht. Der Anpressdruck liegt bei 35–170 kPa. Der Prozess ist charakterisiert durch einen kühlen Schliff und geringe Randzonenschädigung. Die erreichbaren Rauheiten liegen unter $R_z = 1 \mu\text{m}$, die Ebenheiten und Planparallelitäten liegen < 2 µm. Gegenüber dem Läppen fallen wesentlich geringere Entsorgungskosten an und der Reinigungsaufwand der bearbeiteten Werkstücke ist deutlich geringer. Ein Spannen der Bauteile ist wie beim Läppen nicht erforderlich, sondern lediglich eine Führung der Werkstücke in Transportscheiben.

Als Kornwerkstoff werden vorwiegend Diamant und CBN eingesetzt, da sie eine hohe Verschleißbeständigkeit haben und das Abrichten der Schleifscheiben (mit Durchmessern bis zu 1500 mm) sehr aufwendig ist. Die Korngrößen liegen bis zu 180 µm für hohe Zerspanraten und < 20 µm bei Rauheitsanforderungen unter $R_z = 1 \mu\text{m}$. Die Bindung der Körner erfolgt meist in Keramik oder Kunstharz. Diese Bindungen haben den Vorteil einer geringen Wärmedehnung und weisen nur eine sehr geringe Verformbarkeit auf. Für große Durchmesser werden Schleifscheiben mit Pellets oder Schleifsegmenten eingesetzt.

Feinschleifen mit Läppkinematik unter Verwendung von Folienwerkzeugen

Ein weiterer Ansatz zum Feinschleifen mit Läppkinematik ist die Anwendung von Folienwerkzeugen anstelle von Schleifscheiben. Das wird beim Maschinenkonzept „Fine Grinder“ verwirklicht. Hier wird die rauheitsbestimmende Komponente, die Schleiffolie, von der formbestimmenden Komponente, der Trägerplatte getrennt. Es tritt kein Formverschleiß des Werk-

zeugs auf. Die Schleiffolie wird mit konstantem Vorschub über die Trägerplatte geführt und befindet sich in einem Kassettensystem, so dass die Folie nur einmal verwendet wird. Dadurch wird wie beim Läppen erreicht, dass dem Prozess kontinuierlich neue Schneidkörner zugeführt werden und so ein konstantes Zerspanvolumen erreicht wird.

Die Werkstücke befinden sich in Werkstückhaltern, die wiederum über einen Anpressstempel und eine Kupplung mit dem Antrieb verbunden sind. Die Drehzahlen von Werkstückhalter und Tisch können unabhängig voneinander eingestellt werden, so dass beliebige Drehzahlquotienten eingestellt werden können. Der Anpressdruck wird pneumatisch aufgebracht (Abb. 4.151).

Bei gleicher Schnittgeschwindigkeit und konstantem Anpressdruck sind die Zerspanraten höher als beim konventionellen Feinschleifen mit Läppkinematik und beim Läppen. Zudem liegt die erzielte Rautiefe noch unter der beim Läppen. Deutlich ist zu erkennen, dass die Werkstückhöhenreduktion beim konventionellen Feinschleifen mit Läppkinematik einen degressiven Verlauf aufweist, da die Schleifscheibe verschleißt und sich zusetzt, während beim Läppen und beim Einsatz von Folienwerkzeugen aufgrund der kontinuierlichen Schleif- bzw. Läppmittelzufuhr eine mit der Bearbeitungszeit

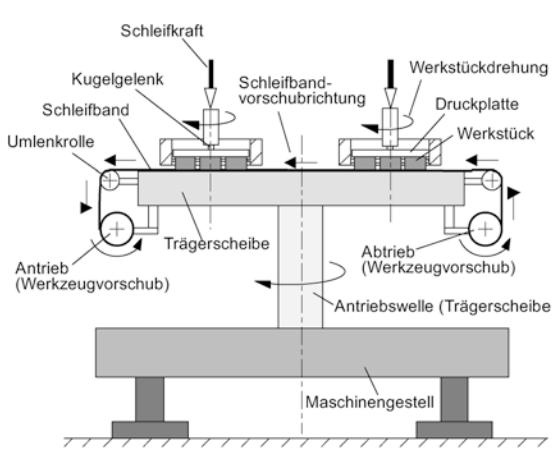
linear steigende Werkstückhöhenreduktion erreicht wird (Abb. 4.152).

4.7.6 Gleitschleifen

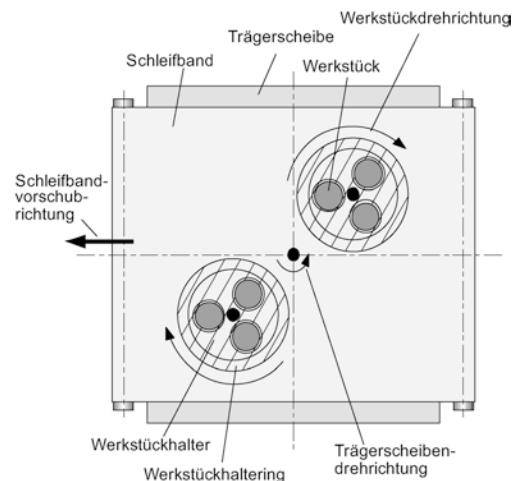
Beim Gleitschleifen bewegen sich viele einzelne Schleifkörper, so genannte Chips, relativ zur Werkstückoberfläche und führen dabei zu einer Spanabnahme. Die spanende Wirkung der Schleifkörper wird unterstützt durch eine wasserlösliche Chemikalienmischung (Compound).

Angewendet wird dieses Verfahren hauptsächlich zur Vorbehandlung von Oberflächen vor einer galvanischen Metallbeschichtung, z. B. Verchromen oder Vernickeln. Die Maß- und Formgenauigkeit des Werkstücks kann durch Gleitschleifen nicht mehr verbessert werden. Angewendet wird es zum Entgraten, Entzündern, Entrostern, Reinigen sowie zum Glätten und Polieren von Massen- oder auch Einzelteilen. Bearbeitet werden können alle Metalle, Kunststoffe und Holz.

Als Chips werden Naturstein, Basalt, Dolomit, Quarzstein, Schmirgel, Bimsstein sowie gebrochene synthetische Schleifkörper mit großem Abtragsvermögen und vorgeformte keramisch oder metallkeramisch bzw., organisch



Seitenansicht



Draufsicht

Abb. 4.151 Maschinenkonzept zur Verwendung von Folienwerkzeugen für das Feinschleifen mit Läppkinematik

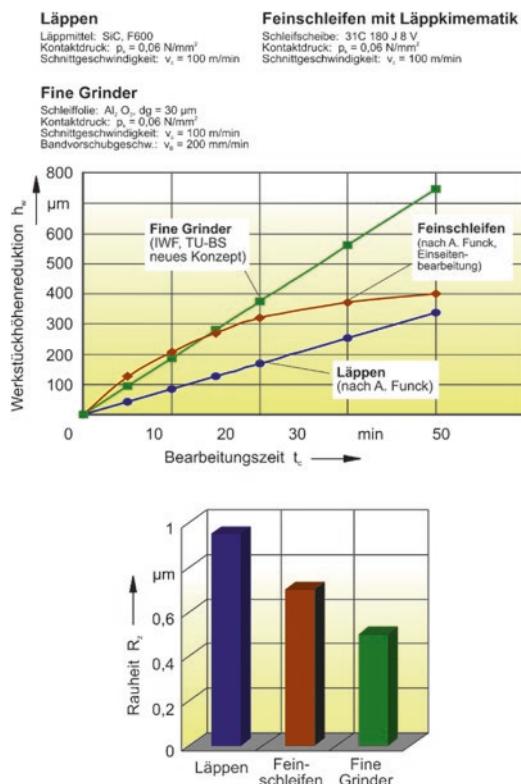


Abb. 4.152 Verfahrensvergleich Läppen, Feinschleifen mit Schleifscheiben und Feinschleifen mit Folienwerkzeugen (Fine Grinder)

gebundene synthetische Schleifkörper (z. B. Kugel, Zylinder, Kegel u. a.) verwendet. Die Art der Schleifkörper richtet sich nach dem zu bearbeitenden Werkstückstoff, dem Rohzustand des Werkstücks und der zum Einatz kommenden Anlage.

Die Compoundlösung hat die Aufgabe, die Schleifwirkung zu verstärken sowie die Chips und Werkstücke zu reinigen und für den Korrosionsschutz zu sorgen. Dabei sollte sie abwassertechnisch neutral sein und eine einfache Reinigung der Werkstücke ermöglichen.

Der Mischungsquotient zwischen Schleifkörpervolumen und Werkstückvolumen beeinflusst das Zerspanverhalten und die erreichbare Oberflächenqualität. Für einfache Werkstücke ist ein Mischquotient von 3:1 ausreichend. Bei komplizierten Prozessen (z. B. Bearbeitung lan-

ger Bauteile) kann ein Mischquotient von 10:1 erforderlich sein.

Je nach Erzeugung der Relativbewegung wird das Gleitschleifen in das Trommel-, Vibrations- und Fliehkraftverfahren eingeteilt. Beim Trommelverfahren werden die Schleifkörper und Werkstücke durch die Rotation mitgenommen, bis die Schwerkraft zu einem Abgleiten führt. Die Umfangsgeschwindigkeit bestimmt die Gleitbewegung, die Schleifkraft wird von der Schwerkraft bestimmt. Mit steigender Umfangsgeschwindigkeit tritt neben dem Gleiten auch noch ein Rollen auf (Abb. 4.153).

Beim Vibrationsschleifen wird die Relativbewegung durch Schwingungen bewirkt. Diese werden über eine drehbar gelagerte Unwuchtmasse oder einen direkt angebrachten Schwingungsmotor erzeugt. Es werden Schwingungen in horizontaler und in vertikaler Richtung aufgebracht, die zu einer Umläufigbewegung führen. Diese zwingt die Werkstücke dazu, den Behälter der Anlage zu durchlaufen. In der Anfangsphase steigt die Zerspanrate mit der Frequenz und der Bearbeitungsdauer, da eine Vielzahl an Schleifkörpern an den Werkstücken vorbeigeführt wird. Zudem wird die Rauheit deutlich reduziert. Das Verfahren ist besonders für dünnwandige Bauteile geeignet, da diese in kurzer Zeit bearbeitet werden können.

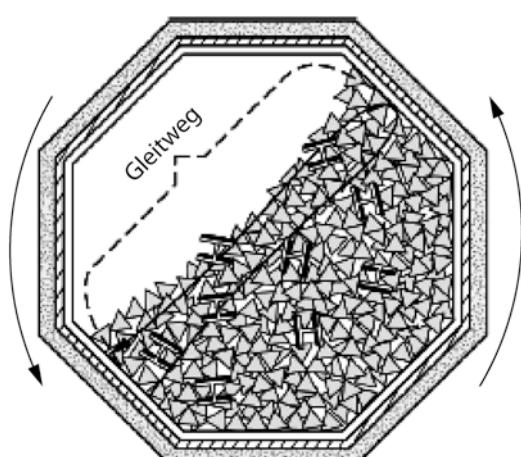


Abb. 4.153 Drehbare Trommel mit Werkstücken und Schleifkörpern, schematisch

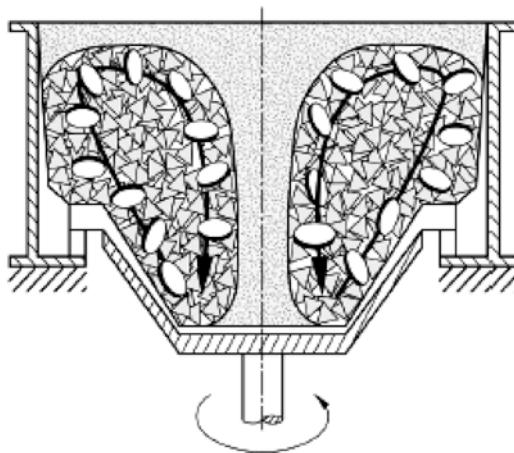


Abb. 4.154 Fliehkraftverfahren: feststehender Behälter mit rotierendem Boden

Um höhere Zeitspanvolumina zu erreichen, wird das Fliehkraftverfahren eingesetzt. Es nutzt die Zentrifugalkraft aus. Die tellerförmige Bodenplatte der Anlage rotiert so schnell, dass die Schleifkörper und Werkstücke nach außen an die Behälterwand gedrückt werden. Es entsteht eine bogenförmige Fließbewegung, bei der Schleifkörper und Werkstücke zunächst am Rand nach oben gefördert werden und dann zur Mitte des Tellers zurück sinken, Abb. 4.154.

4.8 Abtragende Verfahren

Als Abtragen wird nach DIN 8580 das Fertigen durch Abtrennen von Stoffteilchen von einem festen Körper auf nichtmechanischem Wege bezeichnet. Sowohl das Entfernen von Werkstoffschichten als auch das Trennen von Werkstückteilen aus dem Grundwerkstoff werden in diesem Sinn als Abtragen bezeichnet. Aufgrund der nicht vorhandenen bzw. sehr geringen Prozesskräfte und der erreichbaren sehr hohen Genauigkeiten werden die abtragenden Bearbeitungsverfahren sehr häufig im Formen- und Werkzeugbau, in der Mikrosystemtechnik und auch in der Luftfahrtindustrie eingesetzt.

Nach DIN 8590 unterteilt sich die Gruppe der abtragenden Verfahren in die Untergruppen Thermisches Abtragen, Chemisches Abtragen und Elektrochemisches Abtragen (siehe Abb. 4.155). Die weitere Einteilung der abtragenden Verfahren erfolgt wie in Abb. 4.156 dargestellt.

4.8.1 Thermisches Abtragen

Zu den thermischen Abtragverfahren (Abb. 4.156) gehören alle Fertigungsverfahren, bei denen der Werkstoffzusammensetzung durch Wärmeeinfluss

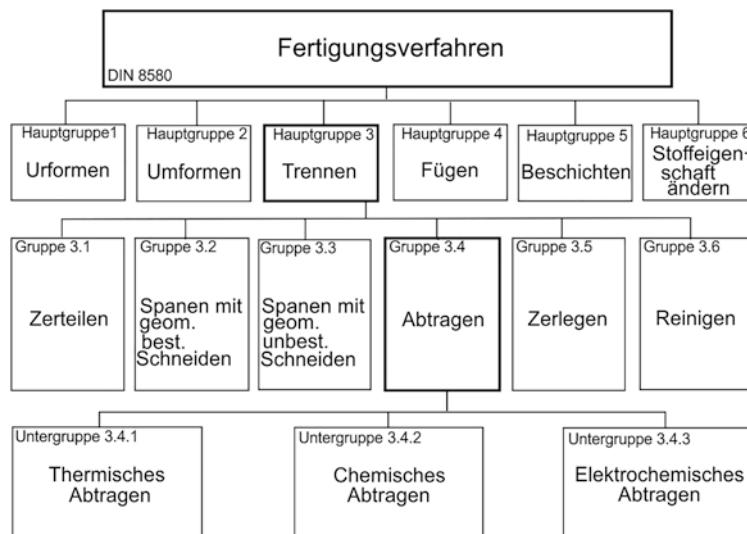


Abb. 4.155 Einteilung der Gruppe 3.4 Abtragen nach DIN 8580

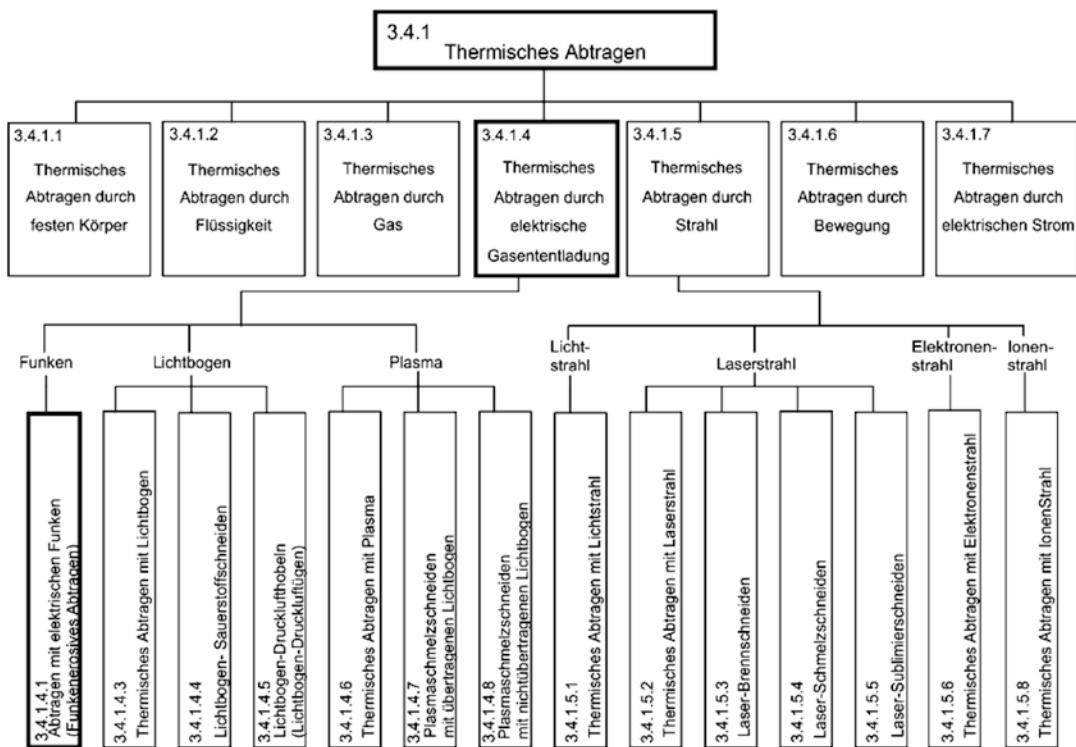


Abb. 4.156 Unterteilung der Untergruppe 3.4.1 Thermisches Abtragen nach DIN 8590

aufgehoben wird. Neben dem Abtragen durch Funkenerosion (Erodieren) und Abtragen durch Strahl (Licht, Laser, Elektronen) gehört das thermische Abtragen durch Gas zu dieser Gruppe. Da die Verfahren des thermischen Schneidens (Autogenes Brennschneiden, Brennhobeln, Plasmaschneiden, Laserschneiden) eine sehr große Bedeutung für die Blechteilherstellung und für die Fugenvorbereitung beim Schmelzschweißen besitzen, werden sie in diesem Buch (im Gegensatz zur DIN 8590) extra im Abschn. 4.9 behandelt. Das gilt ebenso für das Wasserstrahlschneiden (Abschn. 4.10) als ein in der industriellen Praxis häufig verwendetes Trennverfahren. Das Wasserstrahlschneiden wird als Untergruppe 3.3.6 (Strahlspanen) in der DIN 8580 eingeordnet und gehört nach DIN 8589 zur Gruppe 3.3 „Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden“. Das Strahlspanen ist ein Fertigungsverfahren, bei dem das Strahlmittel (Werkzeuge) in Strahlgeräten durch verschiedene Systeme beschleunigt und zum

Aufprall auf die zu bearbeitende Oberfläche eines Werkstückes gebracht werden.

Funkenerosives Abtragen (Erodieren) Die funkenerosiven Bearbeitungsverfahren umfassen alle Verfahren, bei denen der Werkstoffabtrag an elektrisch leitfähigen Werkstücken durch elektrische Entladungen (Funken) in einem elektrisch nicht leitfähigen Medium (Dielektrikum) stattfindet. Die Werkzeugelektrode bildet sich dabei im Werkstück unter Zugabe des Arbeitsspaltes (engl. GAP) ab. Die Form wird erzeugt durch räumlich und zeitlich voneinander getrennte, hochdynamische Entladungen hoher Frequenz. Hierbei wird das Material der Werkstückelektrode an den Fußpunkten des sich bildenden Plasmakanals so stark erwärmt, dass es teilweise verdampft oder schmilzt und durch das Dielektrikum weggespült werden kann. Gleichzeitig wird die bearbeitete Stelle durch das Dielektrikum gekühlt. Die Abbildungsgenauigkeit

des Verfahrens wird neben den verwendeten Elektrodenwerkstoffen vor allem durch die Wahl der Einstellparameter beeinflusst. Dies sind vor allem die Entladedauer t_e , die Pausendauer t_0 , der Entladestrom i_e und die Entladestromspannung u_e . Die Entladeenergie W_e ist die in der Entladestrecke während einer Entladung umgesetzte Energie. Sie bestimmt im Wesentlichen das durch eine Entladung abgetragene Materialvolumen V_{We} .

$$W_e = \int_{t_e} u_e(t) \cdot i_e(t) dt \approx U_e \cdot i_e \cdot t_e \quad (4.75)$$

Zur Bewertung eines funkenerosiven Bearbeitungsprozesses werden die Abtragrate V_w (pro Zeiteinheit abgetragenes Werkstückvolumen), die Verschleißrate V_E (je Zeiteinheit abgetragenes Werkzeugelektrodenvolumen) und der relative Verschleiß ϑ (Verhältnis zwischen Verschleißrate V_E und Abtragrate V_w) verwendet. Vorteilhafte Eigenschaften der funkenerosiven Fertigungsverfahren sind vor allem die Möglichkeit, alle elektrisch leitfähigen Werkstoffe (Mindestleitfähigkeit $> 0,01 \text{ S/cm}$) unabhängig von deren mechanischen Eigenschaften (Härte, E-Modul usw.) zu bearbeiten. Aufgrund des thermischen Abtragprozesses können sich an der Oberfläche der bearbeiteten Werkstücke

thermisch beeinflusste Randzonen (engl. White Layer) bilden, die wesentlich andere Werkstoffeigenschaften aufweisen als das Grundmaterial. Durch eine geeignete Wahl der Einstellparameter und mehrere hintereinander ausgeführte Bearbeitungsvorgänge bei reduzierter Energie dichte kann diese Wärmeeinflusszone auf eine Dicke $< 1 \mu\text{m}$ verringert werden, Abb. 4.157 und 4.158.

Die Verfahren der Funkenerosion können nach Abb. 4.159 eingeteilt werden in:

- funkenerosives Senken, Bohren und Gravieren,
- funkenerosives Schneiden mit Draht oder Blatt,
- funkenerosives Bahnerodieren.

Diese Verfahren können mit verschiedenen Bewegungen überlagert und mit weiteren Bearbeitungsverfahren kombiniert werden.

Funkenerosives Senken (Senkerodieren) Da alle Erodierverfahren abbildende Verfahren sind, benötigt jede zu fertigende Struktur eine spezielle angepasste Werkzeugelektrode. Breite Anwendung findet diese Variante im Bereich des Spritzgussformenbaus, der Herstellung von

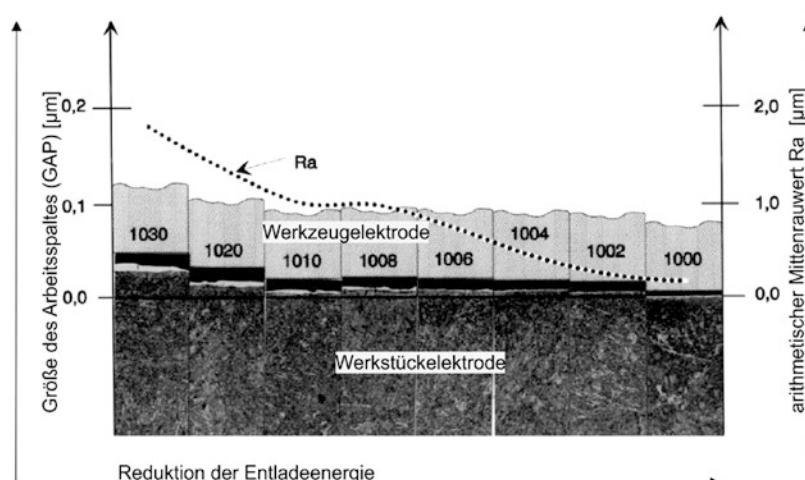


Abb. 4.157 Einfluss der Entladeenergie auf den Arbeitsspalt, den White Layer und die Oberflächenrauheit. (nach Georg Fischer Machining Solutions GmbH)



Abb. 4.158 Durch ECM gefertigte Honeycomb-Wabenstruktur und Stirnverzahnung auf einem Wellenende

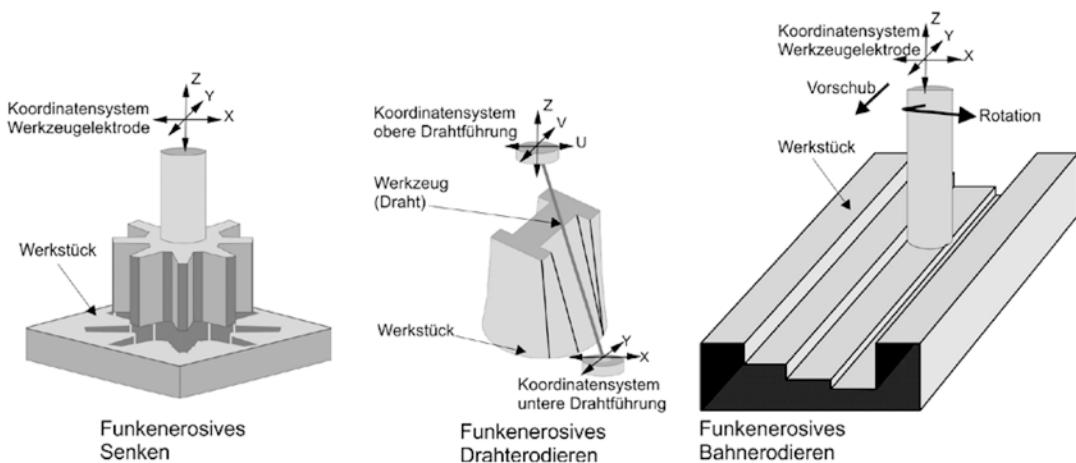


Abb. 4.159 Varianten der funkenerosiven Fertigungsverfahren (Fürster, R. und A. Fürster: Einführung in die Fertigungstechnik. Springer Vieweg, 1. Aufl. 2018)

Düsen und dem Bau von Stanz- und Tiefziehwerkzeugen. Als Werkzeugelektrodenwerkstoffe der Senkerosion werden vor allem Kupfer und Grafit verwendet, für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik auch Hartmetall und Wolframkupfer. Die verwendeten Werkzeugelektrodenwerkstoffe unterscheiden sich hauptsächlich durch ihr Abtrag- und Verschleißverhalten und auch durch ihren Wärmeausdehnungskoeffizienten. Den größten Einfluss auf die

Abtrag- und Verschleißkennwerte beim Senkprozess hat die Entladenenergie W_e , die durch den Entladestrom i_e und die Entladedauer t_e variiert werden kann. Grafit hat eine andere Verschleißkennlinie als Kupfer. Während der relative Verschleiß von Kupfer mit steigendem Entladestrom (Impulsdauer = konst.) wächst, nimmt er bei Grafit ab. Daher werden Grafitelektroden sehr häufig für Schrupparbeiten bei hohem Entladestrom und langer Impulsdauer verwendet.

Da der Wärmeausdehnungskoeffizient von Grafit nur ca. 1/4 von Kupfer beträgt, ist auch die Bearbeitungsgenauigkeit bei der Schruppbearbeitung höher. Positiv wirkt sich ebenfalls die geringere Dichte von Grafit aus, da dadurch große Werkzeugelektroden deutlich leichter werden. Bei hochgenauen Bearbeitungen im Bereich von mikrosystemtechnischen Anwendungen werden häufig Kupfer und Wolframkupfer als Werkzeugelektrodenwerkstoffe verwendet, da bei geringen Entladenergien der Verschleiß dieser Werkstoffe geringer und damit die Bauteilgenauigkeit höher ist. Als Dielektrika werden beim Senkerodieren fast ausschließlich Kohlenwasserstoffe verwendet, da sie aufgrund ihrer hohen elektrischen Durchschlagfestigkeit deutlich bessere Abbildegrenzen ermöglichen.

Funkenerosionsanlagen bestehen grundsätzlich aus drei Einheiten: der Maschine mit Steuerung, dem Generator, dem Dielektrikumsaggregat mit Filter, Pumpe und Ionentauscher.

Moderne Anlagen sind häufig mit Robot- und Handlingsystemen zum automatischen Werkzeug- und/oder Werkstückwechsel ausgerüstet, die eine autonome Fertigung im 3-Schicht-Betrieb ermöglichen. EDM-Anlagen mit komplexen Steuerungen garantieren die maximale Positionierunsicherheiten von ca. 0,2 bis 1 μm zwischen Werkstück- und Werkzeugelektrode.

Die Vorschubbewegung bei der Senkerosion wird meist in der z-Achse durch die an der Pinole befestigte Elektrode ausgeführt, kann aber auch in allen anderen Achsen erfolgen. Der Vorschubbewegung werden häufig verschiedene Bewegungen überlagert (z. B. Planetärerosion, Schwingung der Werkzeugelektrode usw.), um eine Verbesserung der Spülbedingungen zu erreichen, eine Homogenisierung der Oberfläche zu ermöglichen und den Elektrodenverschleiß zu kompensieren. Den Aufbau einer funkenerosiven Fertigungsanlage für den Senkerosionsprozess zeigt Abb. 4.160.

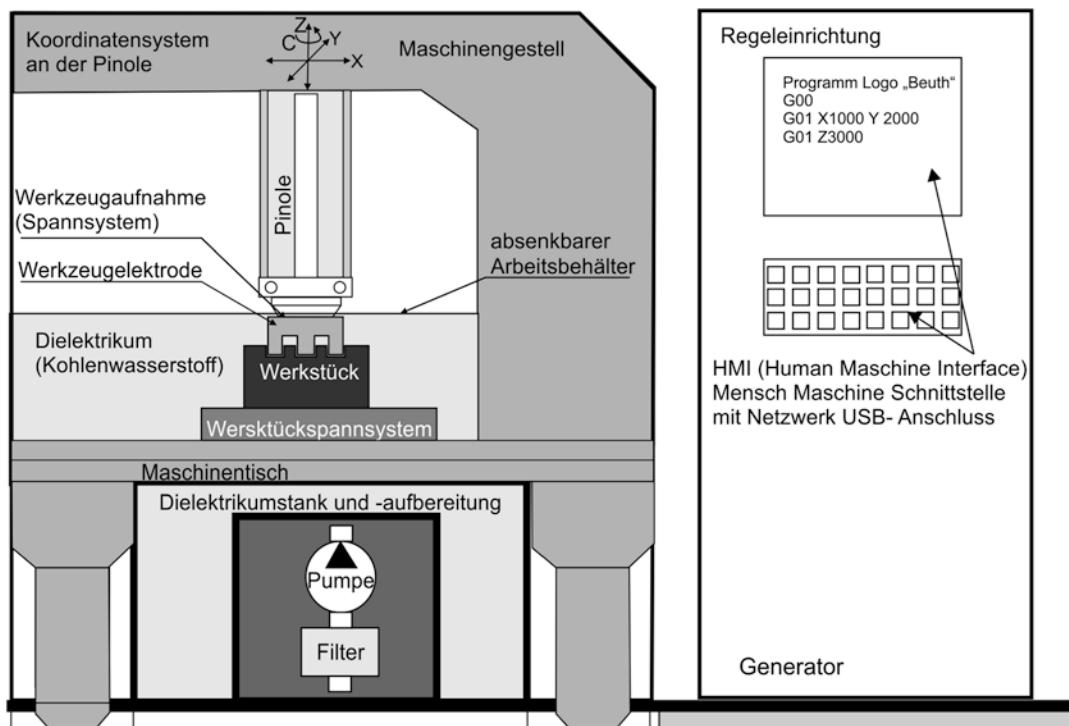


Abb. 4.160 Funkenerosive Fertigungsanlage

Funkenerosives Schneiden mit Draht (Draht-erodieren) Das funkenerosive Schneiden mit Draht hat sich zur Herstellung zylindrischer, runder bzw. konischer Formen in fast allen industriellen Anwendungsfeldern etabliert. Es können im Werkzeug- und Formenbau Schneidwerkzeuge (Stempel und Matrize), Ziehwerkzeuge und auch die Tannenbaumprofile im Turbinenbau durch Drahterosion aus sehr harten und auch zähen Werkstoffen gefertigt werden.

Als Drahtwerkstoffe (Werkzeugelektrode) werden vor allem Messing-, Kupfer- und Zinkbeschichtete Messingdrähte verwendet, für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik auch Wolfram-, Molybdän- und Stahldrähte. Die Zinkschicht verdampft während der Entladung und verbessert die Zündfähigkeit im Arbeitsspalt und erschwert das Aneinanderhaften der Abtragpartikel. Es werden Drahtdurchmesser zwischen 70 und 250 μm verwendet.

Als Dielektrikum wird meist entionisiertes Wasser verwendet, da es aufgrund seiner Viskosität bessere Spüleigenschaften aufweist.

Allerdings ist die elektrische Durchschlagfestigkeit auch geringer, so dass der Arbeitsspalt größer wird und damit die minimal erreichbaren Innenradien auch größer werden. Für hochgenaue Anforderungen werden auch Drahterosionsysteme verwendet, die mit einem Kohlenwasserstoff als Dielektrikum arbeiten.

Eine Drahterosionsanlage besteht aus einem Gestell mit den oberen und unteren Drahtführungssystemen, dem Antrieb für den umlaufenden Draht und dem auf einem Kreuztisch angeordneten Arbeitsbehälter mit dem aufgespannten Werkstück. Das Werkstück bewegt sich dabei relativ zum Draht, so dass durch Überlagerung der Bewegungen in x - und y -Richtung beliebige Formen erzeugt werden können. Da die oberen und unteren Drahtführungsköpfe unabhängig voneinander bewegbar sind, können auch konische Konturen gefertigt werden, Abb. 4.161.

Dem Haupt- oder Vollschnitt folgen häufig noch mehrere Nachschnitte mit reduzierter Entladenenergie, um die thermisch beeinflusste Zone

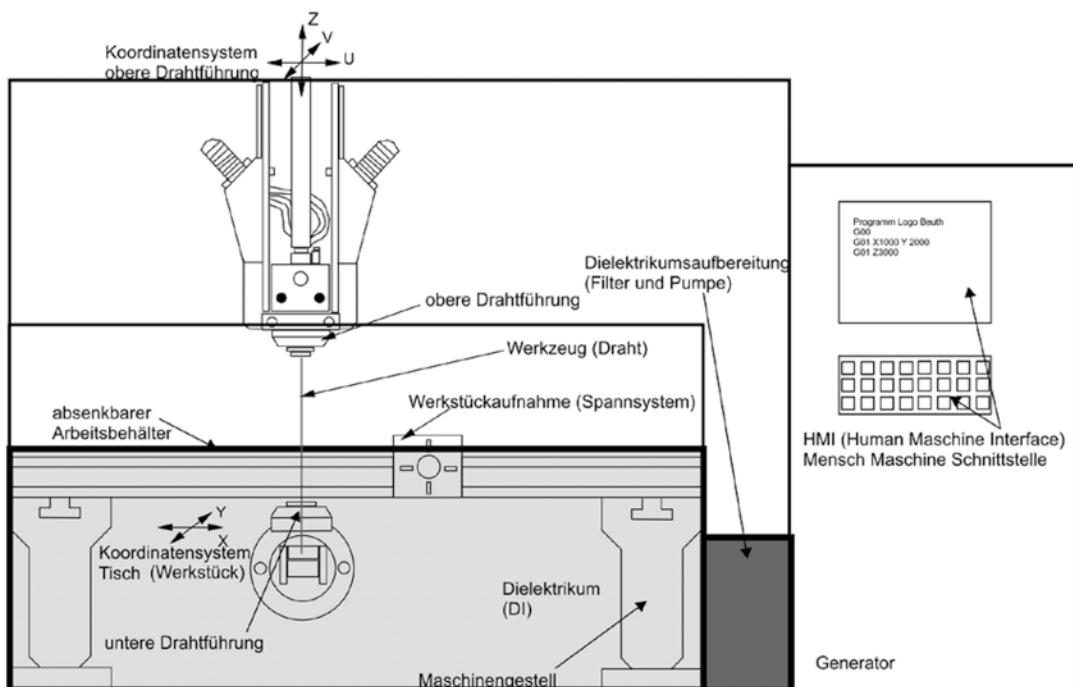


Abb. 4.161 Aufbau einer Draht-Erodiermaschine

zu minimieren und die Oberflächengüte zu verbessern.

Zur Prozessbeschreibung des funkenerosiven Schneidens wird die Schnittrate V_w verwendet:

$$V_w = v_f \cdot h \quad (4.76)$$

Dabei ist die Vorschubgeschwindigkeit v_f des Drahts senkrecht zur Ablaufrichtung mit der Werkstückhöhe h verknüpft. Daher hat hier die Abtragrate die Dimension Fläche/Zeiteinheit. Bei vorgegebenem Drahtwerkstoff und -durchmesser wird die Schnittrate vorwiegend von der Entladeenergie und der Impulsfrequenz bestimmt. Bei konstanter Entladeenergie nimmt die Schnittrate mit der Anzahl der Entladungen bis zur Grenze der thermischen Belastbarkeit des Drahts zu. Die erreichbaren Genauigkeiten bei den Verfahren der funkenerosiven Bearbeitung sind in Tab. 4.5 dargestellt.

Funkenerosives Bahnerodieren Da die Herstellung einer Werkzeugelektrode (die das Negativ der zu fertigen Form darstellt), sehr aufwendig ist, wurde das funkenerosive Bahnerodieren entwickelt. Hierbei wird eine einfache Werkzeugelektrode entlang einer programmierten Bahn bewegt (vergleichbar einem CNC-gesteuertem Fräsprozess), wobei dieser Bewegung ebenfalls eine Drehbewegung der Werkzeugelektrode überlagert werden kann, Abb. 4.159. Diese Variante der ED-Bearbeitung kann auf einer Senkerodiermaschine mit entsprechender Steuerung, die den Verschleiß des Werkzeugs

kompensiert, durchgeführt werden. Als Werkzeug-Elektrodenwerkstoffe finden hauptsächlich Kupfer und Wolfram-Kupfer Anwendung. Das Dielektrikum ist meistens ein Kohlenwasserstoff. Neben metallischen Werkstoffen können auch keramische Werkstoffe mit EDM-Verfahren bearbeitet werden. Ein Beispiel für die Bearbeitung eines keramischen Werkstoffes durch funkenerosives Bahnerodieren zeigt Abb. 4.162.

4.8.2 Chemisches Abtragen

Beim chemischen Abtragen muss eine chemische Reaktion zwischen Wirkmedium und Werkstückstoff ablaufen. Die Werkstoffteilchen werden dadurch abgetrennt, dass sich die entstehende Verbindung leicht entfernen lässt oder aber flüchtig ist. Mindestens eine der Komponenten (Werkstück oder Wirkmedium) ist elektrisch nichtleitend.

4.8.2.1 Abtragen durch Ätzen

Ein Beispiel für chemisches Abtragen ist das Ätzen von Glas, um Ornamente und Beschriftungen aufzubringen oder eine mattierte Oberfläche zu erzeugen. Als Ätzmittel wird Fluorwasserstoff HF verwendet. Es entstehen das flüchtige Siliciumtetrafluorid und Wasser:

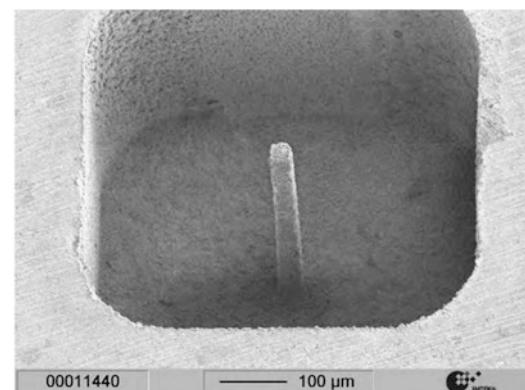


Abb. 4.162 Keramische Mikrostruktur aus Zirkonoxid hergestellt durch Bahn-EDM. (Quelle: Hösel, IMTEK)

Tab. 4.5 Geometrische Grenzen der Funkenerosion

	Drahterosion	Senkerosion
Kleinster Arbeits- spalt (GAP)	12 µm	10 µm
Kleinster Draht-Ø:	20 µm	
Kleinster Bohrungs- Ø:		25 µm
Aspektverhältnis:	1 : 1000	1 : 90
Rauheit (Ra):	< 1 µm	≤ 0,2 µm
White Layer:	< 1 µm	< 1 µm
Genauigkeit (Stahl):	±2 µm	±5 µm
Kleinste Radien:	25 µm	20 µm

Zuvor werden alle Partien, die nicht mit dem Ätzmedium in Berührung kommen sollen, mit Wachs, Paraffin oder Harzsichten abgedeckt. Die Schriften und Ornamente können in die Schutzschichten auch eingeritzt werden. Nach der Ätzung werden die Schutzschichten durch Lösungsmittel entfernt. Wenn die Ätzung mit wässriger Fluorwasserstofflösung erfolgt, bleiben die geätzten Glasflächen durchsichtig klar. Wird gasförmiger Fluorwasserstoff verwendet, ergibt sich eine mattierte, nur durchscheinende Glasoberfläche.

4.8.3 Elektrochemisches Abtragen

Der Prozess des elektrochemischen Abtragens (engl. electro chemical machining ECM) beruht auf der Auflösung eines als Anode gepolten metallischen Werkstoffs in einem elektrisch leitenden Medium (Elektrolyt). Der dazu nötige Stromfluss wird meist durch eine äußere Spannungsquelle bewirkt. Nach DIN 8590 wird unterschieden zwischen dem

- elektrochemischem Profilabtragen, dem
- Oberflächenabtragen und dem
- elektrochemischen Ätzen.

Das EC-Profilabtragen erfolgt mit hohen Stromdichten (im Bereich um 10 A/cm^2). Der Elektrolyt strömt hierbei mit hoher Geschwindigkeit und ggfs. hohem Druck durch den Arbeitsspalt (ca. 0,1 mm) zwischen Werkstück- und Werkzeugelektrode hindurch. Beim EC-Oberflächenabtragen werden Oberflächenschichten beliebiger Ausdehnung mit niedriger Wirkstromdichte von etwa 0,4 bis 3 A/cm^2 elektrolytisch bearbeitet (z. B. EC-Polieren oder EC-Entmetallisieren).

Industriell relevant ist neben den elektrochemischen Entgrat- und Bohrtechnologien vor allem das EC-Senken, das insbesondere im Turbinen- und dem Werkzeug- und Formenbau angewendet wird. Aufgrund des nichtthermischen Abtragprozesses treten keine thermischen

Gefügebeeinflusungen auf. Bei kontrollierten Prozessbedingungen nutzen sich die Werkzeugelektroden nicht ab, allerdings können bei filigranen Strukturen und hohen Elektrolytdrücken die Werkzeugelektroden beschädigt werden. Die Bauteile sind grätfrei und besitzen meist sehr glatte Oberflächen. Es können hochkomplexe geometrische Profile in schwer zerspanbare Werkstoffe eingearbeitet werden, wie sie häufig im Turbinenbau verwendet werden.

Klassische EC-Senkanlagen bestehen grundsätzlich aus der Elektrolytversorgung, der Bearbeitungsmaschine und dem Gleichstromgenerator, der die geregelte Arbeitsspannung zwischen 20 und 30 V liefert. Durch eine Vorschubeinheit wird die Relativbewegung zwischen Werkstück- und Werkzeugelektrode ermöglicht. Die Vorschubgeschwindigkeiten können zwischen 0,1 und 20 mm/min liegen. Die Abtragprodukte in Form von Metallhydroxiden müssen ständig aus dem Elektrolytkreislauf entfernt werden. Aufgrund umwelttechnischer Belastungen, die bei der Bearbeitung bestimmter Werkstoffe auftreten (u. a. Chrom-VI), sind hierzu hochkomplexe Anlagen erforderlich. Gebräuchliche Elektrolyte sind sowohl NaCl - als auch NaNO_3 -Lösungen, deren Leitfähigkeit zwischen 50 und 300 mS/cm liegt.

Gepulste EC-Bearbeitung

In den letzten Jahren wurde die klassische EC-Senkbearbeitung sowohl durch eine überlagerte mechanische Schwingung der Werkzeugelektrode als auch eine gepulste Arbeitsspannung weiterentwickelt. Häufig werden diese Verfahren als PEM (precise electro chemical machining) bezeichnet. Diese Varianten ermöglichen eine deutliche Verkleinerung des Arbeitspaltes (im Bereich von $10\text{ }\mu\text{m}$) und damit eine Erhöhung der Abbildegrenauigkeit. Allerdings reduzieren sich bei diesen Verfahrensvarianten die Vorschubgeschwindigkeiten deutlich (von 20 mm/min bei der klassischen EC-Bearbeitung auf etwa 1 mm/min beim PEM-Verfahren). Mit diesen Verfahrensvarianten sind auch zahlreiche Bearbeitungen im Bereich der Mikrosystemtechnik möglich. In Abb. 4.163 ist eine



Abb. 4.163 PEM-Anlage (Precise Electro Chemical Machining) für gepulste EC-Bearbeitung. (Quelle: Fa. PemTEC)



Abb. 4.164 Stanz-Stempel, hergestellt durch EC-Senken (Fa. PemTEC)

PEM-Anlage mit Generator, Elektrolyt-Aufbereitungsanlage, Steuerung und Bearbeitungseinheit dargestellt. Abb. 4.163 zeigt einen auf dieser Anlage hergestellten Stanzstempel.

Elektrochemisches Bohren

Im Bereich der Fertigung von Kühlluftbohrungen (Turbinenschaufeln), der Herstellung von Düsen (Diesel-Einspritzdüsen und Spindüsen) werden die folgenden elektrochemischen Bohrverfahren (Abb. 4.164) sehr häufig verwendet (Abb. 4.165):

- Elektrochemisches Feinbohren (ESD),
- Electro Stream Drilling (ECF).
- Shaped Tube Electrolytic Machining (STEM),

Elektrochemisches Entgraten Das EC-Entgraten erfolgt ähnlich wie das EC-Senken, allerdings ohne Vorschubbewegung der Werkzeugelektrode. Durch Annäherung der ggfs. an den erforderlichen Stellen isolierten Werkzeugelektrode an die zu bearbeitende Stelle und das Einschalten des Elektrolytflusses und des Arbeitsstromes werden die überstehenden Grate zuerst abgetragen und die Kanten des Bauteiles verrundet.

Elektrochemisches Ätzen Das Ätzen ist in der Metallographie das wichtigste Verfahren zur Vorbereitung von Metallschliffen für die mikroskopische Beurteilung von Gefügezuständen. Es existieren hier umfangreiche (z. T. historische) Rezepturen, die die besonders interessierenden Kristallitstrukturen durch Tiefen- oder Korn-

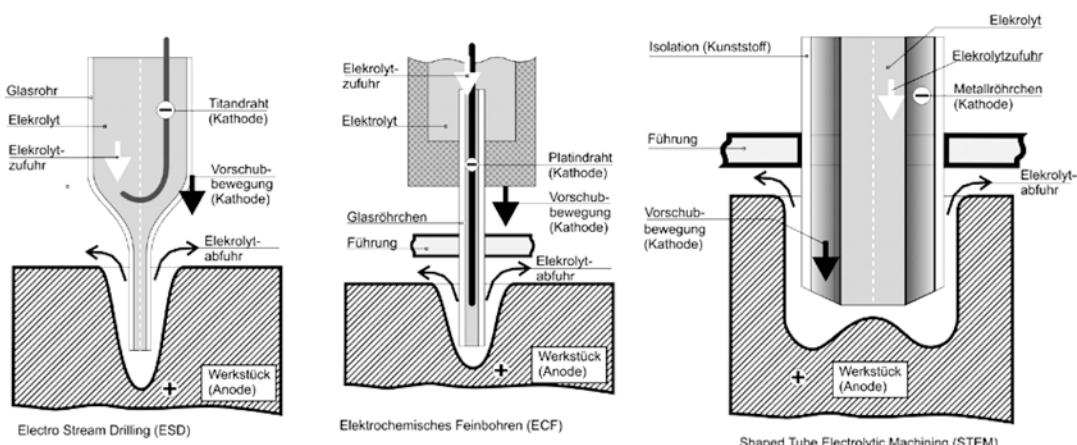


Abb. 4.165 Prinzipdarstellung für das ECM-Bohren. (Quelle: nach Maschinen Turbinen Union)

grenzenätzung unter dem Metall- oder Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) sichtbar machen.

Eine sehr große Bedeutung besitzt das elektrochemische Ätzen bei der Herstellung von gewichtsreduzierten Aluminium-Außenhäuten für Passagierflugzeuge in der Luftfahrtindustrie. Hier werden mehrere qm große Bleche maskiert und zum Abtragen in Natriumhydroxid-Bäder verbracht. Während des Abtragprozesses lagert sich das abgetragene Material in den Bädern ab und kann daraus entsorgt werden.

Durch elektrochemisches Feinätzen werden eine Reihe von sehr dünnen Folien aus Metallen wie Gold, Silber, Tantal, Beryllium, Hastelloy und auch Titan strukturiert.

4.9 Thermisches Schneiden

Die Bearbeitung und Herstellung von metallischen und nichtmetallischen Werkstücken mit thermischen Schneidverfahren gewinnt aus wirtschaftlichen und technischen Gründen ständig an Bedeutung. Die Qualität der Schnittflächen, die große Maßhaltigkeit der Bauteile verbunden mit der Möglichkeit, auch an gekrümmten Bauteilen nahezu beliebige Schnittkurvenverläufe zu erzeugen, wird im Gegensatz zu den mechanischen Bearbeitungsverfahren ohne die Anwendung großer mechanischer Kräfte erreicht.

Die „Werkzeuge“ z. B. *Flamme*, *Plasma* oder *Ionenstrahl* erlauben die Herstellung oberflächen- und formgenauer Bauteile. Voraussetzung ist allerdings, dass die verfahrenstechnischen Besonderheiten und die Probleme der Einstellparameter erkannt und berücksichtigt werden.

Das Prinzip aller Schneidverfahren beruht auf einer örtlichen Erwärmung der Werkstückoberfläche mit einer geeigneten *konzentrierten* Wärmequelle. Die hohe Temperatur (abhängig von der Art der Wärmequelle und des Werkstoffes) führt zum

- Verbrennen,
- Schmelzen oder (und)
- Verdampfen

des Werkstoffes. Die dadurch entstehende Trennfuge bewegt sich mit der Schneidgeschwindigkeit in Schneidrichtung.

4.9.1 Autogenes Brennschneiden

4.9.1.1 Verfahrensgrundlagen

Nach DIN 2310-6 ist Brennschneiden ein thermisches Schneidverfahren, das mit einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme und Sauerstoff ausgeführt wird. Die von der Heizflamme abgegebene und die bei der Verbrennung des Werkstoffes entstehende Wärme³ ermöglicht eine fortlaufende Verbrennung durch den Schneidsauerstoffstrahl. Der Reaktionsprozess setzt sich in die Tiefe *und* in die Schneidrichtung des Schneidbrenners fort. Die entstehenden Oxide, vermischt mit Schmelze – das ist die Schneidschlacke – werden vom Sauerstoffstrahl aus der Fuge ausgetrieben.

Das Brennschneiden erfordert ähnliche Einrichtungen und Betriebsstoffe wie das Gas-schweißen (Abschn. 5.3.1). Der wesentliche Unterschied besteht in der Konstruktion des Düsensystems. Die Brennschneiddüse hat die Aufgaben:

- den Werkstoff durch die Heizflamme (Heizdüse) auf Entzündungstemperatur zu bringen,
- den Werkstoff zu verbrennen und aus der Schnittfuge zu blasen. Dies geschieht durch den Schneidsauerstoffstrahl, der durch den meist zentralisch angeordneten Kanal auf die erhitzte Werkstückoberfläche geleitet wird.

Abb. 4.166 zeigt schematisch die prinzipiellen Vorgänge beim Brennschneiden. Für den Ablauf des Brennschneidvorganges ist das Vorwärmen der Werkstückoberfläche auf die Entzündungstemperatur T_z von größter Bedeutung. Das ist diejenige Temperatur, oberhalb der der Werk-

³Die Verbrennungswärme von Eisen beträgt etwa 54 kJ/cm³.

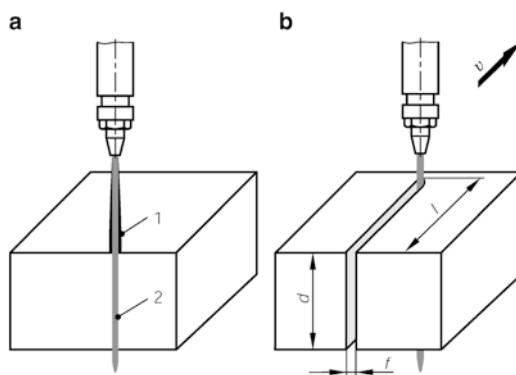


Abb. 4.166 Vorgänge beim Brennschneiden **a** Die Heizflamme (1) erwärmt den Werkstoff örtlich auf Entzündungstemperatur $T > T_z$. Der Schneidsauerstoff beginnt, den Werkstoff örtlich zu verbrennen (2). **b** Der Brenner bewegt sich mit der Schneidgeschwindigkeit v , dabei wird Werkstoff geschmolzen und verbrannt. Es entsteht die Schnittfuge mit der Breite f und der Schnittlänge l

stoff spontan mit Sauerstoff reagiert. Werkstoffe werden im klassischen Sinn als brennschneidbar bezeichnet, wenn sie folgende Bedingungen erfüllen:

- T_z muss unterhalb der Schmelztemperatur T_s liegen. Andernfalls schmilzt der Werkstoff, verliert also seine feste Form und verbrennt erst dann.
- T_z ist abhängig von der Art des Werkstoffes und seiner Zusammensetzung. Sie liegt bei unlegierten und niedriglegierten Stählen bei ca. 1150 °C und nimmt mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt zu. Bei ca. 2 % Kohlenstoff ist sie gleich der Schmelztemperatur.
- Die bei der Verbrennung entstehenden Oxide müssen einen niedrigeren Schmelzpunkt besitzen als der Werkstoff⁴. Sie sollten so dünnflüssig sein, dass sie vom Schneidsauerstoffstrahl leicht ausgetrieben werden.
- Die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes sollte möglichst klein, seine Verbrennungswärme möglichst groß sein.

⁴Der Schmelzpunkt der Titanoxide ist um etwa 300 °C höher als der des Titans (etwa 1670 °C).

4.9.1.2 Thermische Beeinflussung der Werkstoffe

Ähnlich wie bei jedem Schmelzschweißverfahren entstehen auch beim Brennschneiden z. T. sehr hohe Aufheiz- und vor allem Abkühlgeschwindigkeiten, die eine Reihe von unerwünschten Änderungen der Schweißverbindung und ihrer Eigenschaften hervorrufen können, z. B.

- *Aufhärtung* (bei umwandlungsfähigen Stählen) in der wärmebeeinflussten Zone im Bereich der Brennschnittfläche,
- *Eigenspannungen*, die Verzug und Maßänderungen des Bauteil bewirken können,
- *Rissbildung* infolge Werkstoffversprödung und der Wirkung hoher Eigenspannungen und extremer Härte aufgrund von Martensitbildung in der Wärmeeinflusszone.

4.9.1.3 Geräte und Einrichtungen

Im **Schneidbrenner** wird die für den Schneidprozess erforderliche *Heizflamme* erzeugt und der Schneidsauerstoffstrahl geführt. Der **Saugbrenner (Injektorbrenner)** ist zumindest bei den Handschneidbrennern die vorherrschende Bauart, Abb. 4.167. Kennzeichnendes Merkmal ist die im Brenner erfolgende Mischung Brenngas/Sauerstoff durch das Injektorprinzip.

Die Art und Bauweise der **Brennschneiddüsen** bestimmen entscheidend die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens, die maximale Schneidgeschwindigkeit und die Schnittflächengüte.

Die Bauart kann *einteilig* (z. B. Blockdüsen) oder *zweiteilig* sein, d. h., sie bestehen aus einer Schneiddüse und der sie konzentrisch umgebenden Heizdüse. Bei den zweiteiligen Düsen ist die *Schlitzdüse* die modernste Bauart: in die Schneiddüse sind schlitzartige Nuten eingearbeitet, durch die das Heizgasgemisch strömt. Der zentrische Sitz der Schneiddüse ist durch die Bohrung in der Heizdüse gewährleistet. Abb. 4.168 zeigt einige typische Düsenbauarten.

Die Wirksamkeit und Qualität der Brennschneiddüsen werden von zahlreichen Faktoren bestimmt, von denen einige zzt. nur un-

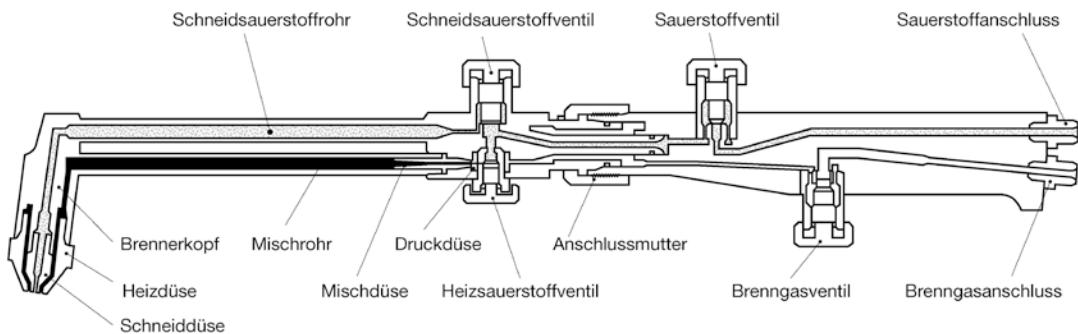


Abb. 4.167 Querschnitt eines Handschneidbrenners (Saugbrenner)

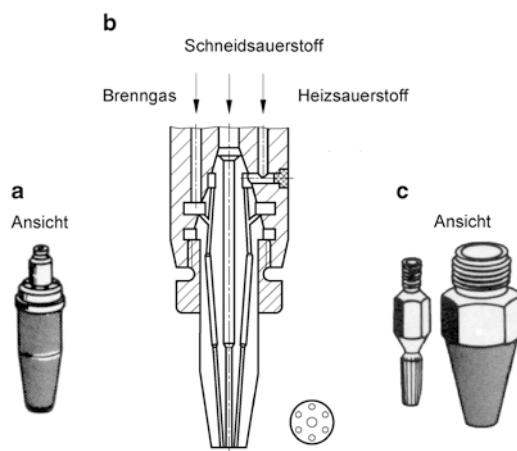


Abb. 4.168 Schematische Darstellung verschiedener Düsenbauarten: **a** einteilige Düse (Blockdüse) **b** Maschinenschneidbrenner mit einteiliger gasmischender Düse **c** mehrteilige Düse (Schlitzdüse)

zureichend quantitativ beschreibbar sind. Die Aufgabe der Brennschneiddüsen besteht darin, den Schneidsauerstoffstrahl möglichst zylindrisch und wirbelfrei austreten zu lassen. Der statische Druck in der Schneiddüse muss dazu vollständig in Geschwindigkeit umgesetzt werden. Ein mit Überdruck ausströmender Strahl baucht durch die plötzliche Expansion aus und verliert seine zylindrische Form.

Die Querschnittsform der Schneiddüse (zylindrisch, zylindrisch abgesetzt, lavalähnlich) ist im Vergleich zu ihrer Oberflächengüte von geringerer Bedeutung. Daher ist für ihre einwandfreie Funktion Sauberkeit und Unversehrtheit der Schneiddüse (z. B. mechanische Be-

schädigungen, deformierter Querschnitt, festhaftende Spritzer usw.) eine wesentliche Voraussetzung.

Das wichtigste Bauprinzip von Brennschneidmaschinen ist das **Kreuzwagensystem** mit Längs- und Querantrieb (praktisch immer als Koordinatenantrieb), das in drei grundsätzlichen Bauweisen realisiert wird, Abb. 4.169:

- Ausleger,
- Portal,
- Kombination aus Ausleger- und Portalbauweise.

Der oder die (maximal etwa 20) Brennschneidbrenner müssen führungsgenau im konstanten Abstand von der Blechoberfläche erschütterungsfrei, ruckfrei und mit konstanter Schneidgeschwindigkeit entlang einer vorgegebenen Kontur bewegt werden. Mit dem **Koordinatenantrieb** lassen sich viele dieser Forderungen erfüllen.

Mit dieser Antriebsart können Schneidgeschwindigkeiten bis 6000 mm/min erreicht und kleinste Radien von etwa 20 mm nachgefahren werden.

Beim Schneiden kleiner Radien wird der die Schnittqualität bestimmende Rillennachlauf so groß, dass Nacharbeit des Schneidgutes erforderlich ist. Dieser Nachteil kann durch eine automatische **Eckenverzögerung** beseitigt werden.

Ein weiterer die Schnittqualität bestimmender Faktor ist der richtige und gleich-

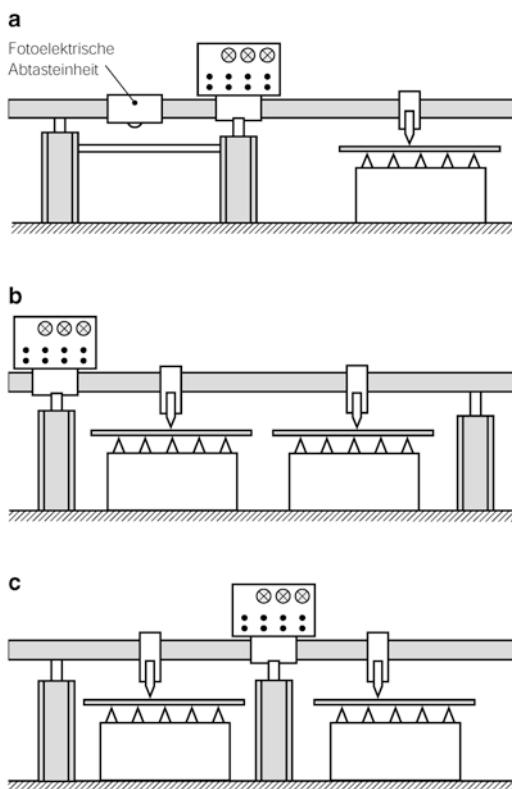


Abb. 4.169 Unterschiedliche Bauweisen der Kreuzwagen-Brennschneidmaschinen, nach Hermann: **a** Ausleger **b** Portal **c** Kombination aus Ausleger und Portal

bleibende Abstand der Schneiddüse von der Werkstückoberfläche. Bei der unvermeidbaren Welligkeit der Bleche und der beim Schneiden dünnwandiger Bauteile entstehenden Verwerfungen wird eine automatische **Brennerhöhenverstellung** verwendet. Für senkrechte Formabschnitte wird eine *kapazitive Brennerhöhenverstellung* benutzt. Dabei wird der Abstand des Brenners über die Änderung der Kapazität eines Kondensators geregelt. Die Genauigkeit beträgt bis zu $\pm 0,5$ mm.

Durch Zusammenfassen der Verfahren **Brennschneiden**, **Anreißen**, und **Ansenken** bzw. **Bohren** kann die Blechbearbeitung rationalisiert werden.

Brennschneidmaschinen mit computergestützten numerischen Steuerungen besitzen folgende Vorteile:

- Bearbeitungsvorgänge laufen automatisch ab. Manuelle Eingriffe des Bedienungspersonals sind nicht erforderlich.
- Maßfehler durch Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse der Vorlage (wie bei fotoelektrischer Abtastung) entfallen. Die Genauigkeit der Bauteile wird daher deutlich größer.
- Der Tafelnutzungsgrad wird mit Hilfe optimierter „Schachtelpläne“ erheblich verbessert. Diese werden mit entsprechender Software relativ einfach ausgeführt.
- Es gibt nur einen einheitlichen Datensatz.
- Maschinenwartung und Systemdiagnose und Fernwartung sind effektiver, schneller und einfacher durch eine Verbindung mit der Service-Zentrale möglich.

Das Anschneiden innerhalb der Blechtafel ist dem Anschnitt von der Kante vorzuziehen. Für diese Aufgabe wird bei stationären Brennschneidmaschinen die **Lochstechautomatik** verwendet. Auf die auf Entzündungstemperatur erwärmte Werkstückoberfläche strömt zunächst mit geringerem Druck der Schneidsauerstoff, der den Verbrennungsvorgang einleitet und den Maschinenvorschub einschaltet. Danach wird der Schneidsauerstoffdruck auf den für die Schneiddicke erforderlichen Wert erhöht.

Das Brennschneiden von Werkstücken mit geringer Wanddicke (1 bis 6 mm) führt meist zu Schwierigkeiten, die Nacharbeit und zusätzliche Kosten verursachen:

- Verzug in der Blechebene, d. h., aufwendige Richtarbeiten sind erforderlich
- Entstehen festhaftender Schlacke an der Schnittunterseite („Bartbildung“).

4.9.1.4 Technik des Brennschneidens

Vor dem Einstellen der Heizflamme wird zunächst bei geöffnetem Schneidsauerstoffventil der korrekte Schneidsauerstoffdruck, danach die Heizflamme neutral eingestellt. Die korrekte Heizflamme und der zylindrische Schneidsauerstoffstrahl sind die Voraussetzungen für hochwertige Schnitte, Abb. 4.170.

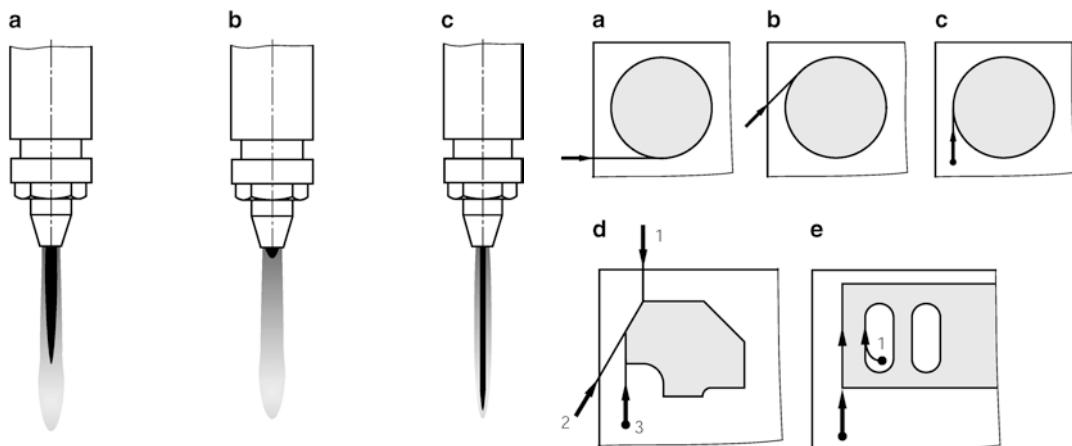


Abb. 4.170 Flammeneinstellung: **a** Bei geöffnetem Heizsauerstoffventil mit Brenngasventil zunächst Acetylenüberschuss einstellen **b** Brenngasventil solange schließen, bis neutrale Flamme eingestellt ist **c** Schneidsauerstoffventil öffnen und Flamme erneut neutral nachstellen. Zu beachten ist der zylindrische, scharf begrenzte Schneidsauerstoffstrahl

Der Brennschneidprozess kann an der Kante oder im Werkstückinneren mit der Technik des Lochstechens beginnen. Die Güte der Brennschnittoberflächen und die Maßtoleranzen (Formteilgenauigkeit) werden von der Art des Anschneidens beeinflusst. Als grundsätzliche Empfehlung gilt, dass das Bauteil möglichst lange mit der Blechtafel verbunden bleiben muss, damit sich die Rand- bzw. Abfallbereiche frei bewegen können und die Lage des Bauteils innerhalb des Maschinenkoordinatensystems weitgehend unverändert bleibt Abb. 4.171.

4.9.1.5 Qualität brenngeschnittener Erzeugnisse

Die Güte brenngeschnittener Teile hängt von folgenden Faktoren ab:

- geforderte Form- und Lagetoleranzen,
- Schnittflächenqualität und
- Maßtoleranzen.

Form- und Lagetoleranzen

Nach DIN ISO 1101 definiert eine Form- oder Lagetoleranz eines Elements (z. B. Fläche, Achse, Mittelebene) die Zone, innerhalb der

Abb. 4.171 Technik des Anschneidens: **a Falsch:** das angeschnittene Bauteil bewegt sich sofort nach dem Anschneiden, weil es mit der Blechtafel nicht verbunden blieb. Die Formteilgenauigkeit ist daher nicht optimal **b** Im Wesentlichen bewegt sich der Abfall, das Werkstück bleibt lange fest mit der Tafel verbunden **c** Anschmitt im Tafelinneren verringert die Möglichkeit der Bau teilbewegung noch weiter, daher zu bevorzugende Anschmitttechnik, i. Allg. ist aber eine Lochstechautomatik erforderlich bzw. Zweckmäßig **d** Möglichst rechtwinklig zur Blechkante anschneiden: (1) besser als (2), optimal ist (3) **e** Innenausschnitte in Formteilen zuerst schneiden (1). Auf tangentialem Einlauf achten, um Bildung von Kerben zu vermeiden.

jeder Punkt dieses Elementes liegen muss. Je nach der zu tolerierenden Eigenschaft und der Art ihrer Bemaßung ist die Toleranzzone sehr unterschiedlich. Sie kann z. B. die Fläche zwischen zwei parallelen Geraden (z. B. die Rechtwinkligkeitstoleranz) oder der Raum zwischen zwei parallelen Ebenen (z. B. die Neigungstoleranz) sein.

Bei Lagetoleranzen muss die genaue Lage der Toleranzzone angegeben werden. Dieser Bezug ist ein theoretisch genaues, geometrisches Element, beispielsweise eine gerade Linie oder eine Ebene, z. B. eine Brennschnittfläche. In den Maßtoleranzen sind die Form- und Lagetoleranzen *nicht* enthalten.

Schnittflächenqualität

Die Qualität der Brennschnittflächen kann durchaus mit der beim Bohren erreichbaren konkurrieren. Abb. 4.172 zeigt die möglichen Rau-

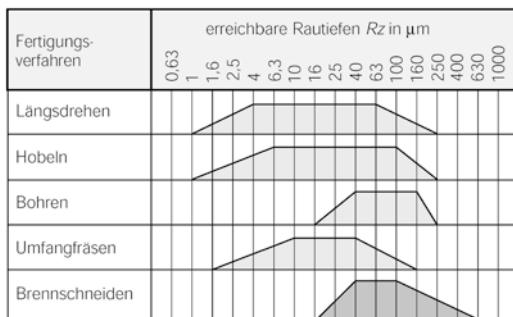


Abb. 4.172 Erreichbare gemittelte Rautiefe R_z bei verschiedenen Fertigungsverfahren. (nach DIN 4766-1)

tiefen R_z einiger mechanischer Bearbeitungsverfahren im Vergleich zum Brennschneiden.

Die Schnittflächengüte wird nach DIN EN ISO 9013 bestimmt. Die folgenden Kennzeichen sind hierfür maßgebend:

- Die *Rechtwinkligkeits-* und *Neigungstoleranz u*. Das ist der Abstand zweier paralleler Geraden, die unter dem theoretisch richtigen Winkel (90° bei Rechtwinkligkeitstoleranz bzw. von 90° verschieden bei der Neigungstoleranz) das Schnittflächenprofil im höchsten und tiefsten Punkt berühren muss.
- Die *gemittelte Rautiefe R_z5* . Sie wird nach DIN EN ISO 4288 aus den Einzelrautiefen (Z_1 bis Z_5) von fünf aneinandergrenzender Einzelmessstrecken ermittelt.

Lage und Anzahl der Messstellen hängen von der Größe, Form und u. U. dem Verwendungszweck ab, z. B. bei thermisch geschnittenen Werkstücken, bei denen eine hohe Schnittqualität gefordert wird oder die nach dem Schneiden nicht weiter bearbeitet werden. DIN EN 12.584 beschreibt die Terminologie der Unregelmäßigkeiten an Brenn-, Plasma- und Laserschnitten.

Die Anzahl der Messstellen beträgt bei der Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz u 2 mal 3 Messungen mit je 20 mm Abstand voneinander je Meter Schnitt, bei R_z5 eine je Meter Schnitt.

Abb. 4.173 zeigt die *Rechtwinkligkeits-* und *Neigungstoleranz u*. Das sind bezogene Richtungstoleranzen, d. h., sie erfordern für ihre korrekte Beschreibung einen Bezug. Sie werden bei brenngeschnittenen Teilen nicht einzeln angegeben, weil sich ihre Größe meist nicht mit einem vertretbaren Aufwand bestimmen lässt.

Die weniger wichtigen Kenngrößen *Rillennachlauf n* und *Anschmelzung r* können zur visuellen Beurteilung mit herangezogen werden, Abb. 4.174. Die Anschmelzung ist das bestimmende Kennzeichen für die Form der Schnittoberkante, die eine scharfe Kante, eine Schmelzkante mit Überhang oder eine Schmelzperlenkette sein kann. Der Rillennachlauf ist typisch für jede Brennschnittfläche. Er entsteht durch dynamische Vorgänge im Schneidsauerstoffstrahl und ist unvermeidbar. Seine leichte Erkennbarkeit ist häufig der Grund, ihn als Bewertungsmaßstab für die Schnittflächengüte zu überbewerten. Tatsächlich ist die Bedeutung eher gering, wenn die Rillentiefe klein und die Schnittfläche hinreichend eben ist.

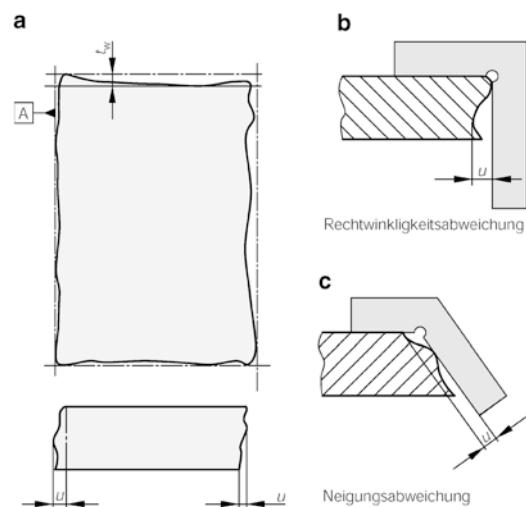


Abb. 4.173 Für die Beschreibung der Schnittflächenqualität erforderliche Form- und Lagetoleranzen. **a** t_w die auf **A** bezogene Rechtwinkligkeitstoleranz, u Rechtwinkligkeitstoleranz in Schneidstrahlrichtung **b** Messbeispiel für die Ermittlung der Rechtwinkligkeits- und **c** der Neigungstoleranz u . (nach DIN EN ISO 9013)

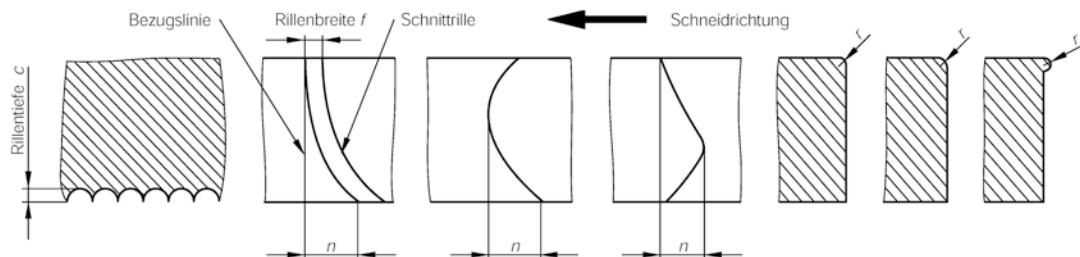


Abb. 4.174 Erklärung einiger Qualitätsmerkmale von Brennschnittflächen: Rillentiefe c , Rillenbreite f , Rillennachlauf n , Anschmelzung r (nach DIN EN ISO 9013)

Die Qualität der Schnittflächen thermisch geschnittener Werkstoffe wird eindeutig durch die *Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz* und die *gemittelte Rautiefe $Rz5$* beschrieben. Die qualitative Einteilung ist demnach abhängig von der Größe der Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz, der gemittelten Rautiefe und der geforderten Toleranz, dargestellt durch die Lage der Toleranzfelder in DIN EN ISO 9013.

Die Genauigkeit der Bauteilabmessungen wird von den Maßtoleranzen der Nennmaße bestimmt. Die für die Funktion vieler Werkstücke wichtigeren Form- und Lagetoleranzen, müssen getrennt von den Maßtoleranzen angegeben werden. Je nach Toleranzklasse sind bestimmte Grenzabmaße zulässig.

Die geforderte Schnittqualität und die Toleranzklasse müssen auf einem Symbol nach DIN EN ISO 1302 wie folgt angegeben werden:

- ① Angabe der Hauptnummer dieser Norm (DIN EN ISO 9013),
- ② Angabe der Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz u ,
- ③ Angabe der gemittelten Rautiefe $Rz5$,
- ④ Angabe der Toleranzklasse, DIN EN ISO 9013.

4.9.1.6 Anwendung des Brennschneidens

Das Brennschneiden ist das universellste thermische Schneidverfahren für un- und niedriglegierte Stähle. Die übliche Werkstückdicke liegt zwischen 10 und 300 mm. Bei geringen Werkstückdicken (1 bis 5 mm) sind andere thermische Schneidverfahren wirtschaftlicher (höhere Schneidgeschwindigkeit) und oft auch technisch

besser (deutlich höhere Schnittflächengüte und nur in begrenztem Umfang Bartbildung).

Senkrechte Schnitte und Gehrungsschnitte sind an beliebig geformten Teilen durchführbar. Insbesondere die vielfältigen Fugenformen der Schweißnähte können mit dem Brennschneidverfahren wirtschaftlich hergestellt werden. Nach Schätzungen werden etwa 75 % aller Schweißfugen mit diesem Verfahren erzeugt.

4.9.2 Plasmuschneiden

Die Verfahrensgrundlagen sind in Abschn. 5.3.3.3.2 beschrieben. Das für diese Verfahrensgruppe entscheidende und charakteristische Merkmal ist die starke Konzentration des Lichtbogens durch die einschnürende Wirkung einer wassergekühlten Kupferdüse und (oder) den Plasmastrahl fokussierender Gase. Die erreichbaren Temperaturen liegen je nach Verfahrensvariante zwischen 20.000 K und 30.000 K. Der Unterschied zum Brennschneiden besteht im Ursprung der erforderlichen Energie. Beim Plasmuschneiden wird die Schnittfuge ausschließlich durch die von außen zugeführte Energie erzeugt, die vom Plasma auf die Schnittfläche übertragen wird. Durch die thermische und auch kinetische Energie des Plasmastrahls wird der Werkstoff geschmolzen (oder verdampft) und herausgeschleudert. Anders als beim Brennschneiden entsteht *keine* zusätzliche Verbrennungswärme. Daraus ergeben sich zwei wichtige Verfahrenskennzeichen der Plasmuschneidverfahren:

- Der Schneidprozess ist im Wesentlichen nur an die Bedingung geknüpft, dass schmelzbare metallische Werkstoffe vorliegen. Mit dem übertragenen Lichtbogen lassen sich allerdings nur leitende Werkstoffe (Metalle) trennen, weil sie im Schneidstromkreis liegen. Plamaschneiden lässt sich daher für alle nicht brennschneidbaren Werkstoffe erfolgreich einsetzen.
- Als Folge der fehlenden Verbrennungswärme, die insbesondere die Fortsetzung des Schnittvorganges in Wanddickenrichtung ermöglicht, ist die maximale Schnittdicke auf etwa 150 mm begrenzt.

Das Plamaschneiden wird bevorzugt zum Trennen aller *nicht* brennschneidbaren Werkstoffe eingesetzt. In erster Linie sind das die NE-Metalle und hochlegierten Stähle.

Allerdings ergeben sich auch eine Reihe von Nachteilen, deren Auswirkungen aber von der Verfahrensvariante abhängen:

- Laute Arbeitsgeräusche, bis ca. 105 dB(A),
- verfahrenstypische leicht V-förmige Schnittfugen sind unvermeidbar,
- starke UV-Strahlung,
- erhebliche Rauch- und Gasentwicklung (Ozon, Stickoxide, Metallstäube).

Daher sind in den meisten Fällen aufwendige Schutz- bzw. Entsorgungsmaßnahmen erforderlich.

Die maximal trennbare Werkstückdicke und die erreichbare Schnittflächengüte hängen praktisch von der begrenzten Möglichkeit ab, den Plasmastrahl *stabilisieren* und *formen* zu können.

Als Schneidgase werden Argon, Wasserstoff und in begrenztem Umfang Stickstoff verwendet. Die wichtigsten Anforderungen an ein als Schneidgas geeignetes Gas sind

- möglichst große Wärmeleitfähigkeit und
- hohes Atom- bzw. Molekulargewicht.

Die *Wärmeleitfähigkeit* ist für die Energieübertragung auf das Werkstück eine entscheidende

Kenngröße. Das Atomgewicht erhöht den Impuls bzw. die kinetische Energie des Plasmastrahles, um den flüssigen Werkstoff aus der Schnittfuge zu treiben. Hinsichtlich der Schnittflächenqualität und der erreichbaren Schnittgeschwindigkeit ist ein Ar - H₂-Gemisch mit 60 %Ar und 40 % H₂ optimal.

4.9.2.1 Verfahrensvarianten

Die konventionelle Ar - H₂-Plasmatechnik, auch Feinstrahl-Elektrodentechnik genannt, wird hauptsächlich zum Trennen hochlegierter Stähle und Aluminium verwendet. Infolge der angespitzten Wolframelektrode entsteht bei einem geringen Schneidstrom ein sehr konzentriertes Plasma, mit dem schmale Schnittfugen und eine hervorragende Schnittflächenqualität erzeugbar sind. Ein erheblicher Nachteil beim Schneiden unlegierter und hochlegierter Stähle mit dieser Verfahrensvariante ist die deutliche *Bartbildung* an der Schnittkantenunterseite im Schnittdickenbereich < 4 mm.

Plasmapressluftschneiden

Bartbildung kann durch die Verwendung von trockener, ölfreier Druckluft als Plasmagas beseitigt werden. Die Wirkung wird auf die Anwesenheit von Sauerstoffionen im Plasma zurückgeführt, die die Schmelzenviskosität verringern. Das Austreiben der jetzt dünnflüssigen, feintropfigen Schmelze an der Materialunterseite wird erleichtert und dadurch die Bartbildung erschwert. Die Schnittflächen an Werkstoffen aus unlegiertem Stahl sind qualitativ hochwertig und die Schnittgeschwindigkeiten sehr hoch⁵.

Die oxidierende Wirkung des im Plasmagas vorhandenen Sauerstoffs erfordert den Einsatz oxidationsbeständiger, hochschmelzender Elektrodenwerkstoffe (Wolfram scheidet völlig aus). Zirkonium- und Hafniumlegierungen haben sich bewährt. Ihre im Vergleich zu Wolfram deutlich geringere Schmelztemperatur zwingt zu einer intensiven Kühlung der flä-

⁵Unlegierter Baustahl, Schnittdicke 5 mm, kann z. B. mit einer 30-kW-Schneidanlage mit ca. 5m/min geschnitten werden.

chig ausgebildeten Elektrode (geringere Stromdichte als bei einer „Spitzenelektrode“) und der Kupferdüse. Durch die hohe thermische Beanspruchung wird die Brennerleistung auf etwa 30 kW begrenzt.

Ein entscheidender Nachteil dieser Verfahrensvariante ist die absolute Notwendigkeit, die in großem Umfang entstehenden **giftigen Gase** Ozon und Stickoxide, durch eine aufwendige Absauganlage mit nachgeschalteter Nassfiltration zu entsorgen.

Plasmawasserinjektionsschneiden

Anstelle des die Umwelt erheblich belastenden Plasmapressluftschneidens hat sich für das Trennen unlegierter und hochlegierter Stähle weitgehend das Plasmawasserinjektionsschneiden durchgesetzt. Durch besondere konstruktive und verfahrenstechnische Maßnahmen ist der Aufwand für die Dampf- und Rauchentsorgung und den Lärm- und Strahlenschutz außerordentlich gering. Die Investitionskosten sind allerdings hoch.

Die Düsenkonstruktion besteht aus einem kupfernen Düsenkörper (D), der als Anode für den Pilotlichtbogen dient, und einem davor angeordneten Keramikteil (K), Abb. 4.175. Der als Plasmagas verwendete Stickstoff (N_2) wird tangential in den Raum zwischen Elektrode (E) und Kupferdüse geblasen. Dadurch schnürt sich der

Plasmastrahl ein und wird in Rotation versetzt. Durch den zwischen der Kupferdüse und der Keramikscheibe vorhandenen Ringspalt wird außerdem Wasser radial in den Plasmastrahl injiziert, der eine weitere Strahlkonzentration hervorruft. Nur etwa 10 % des Wassers verdampft, der Rest verlässt den Brenner und kühlte ihn sehr intensiv. Der Brenneraufbau ist relativ unkompliziert, die erreichbaren Standzeiten sind mit keiner anderen Verfahrensvariante erreichbar. Der austretende Wasserstrahl kühlte gleichzeitig das Werkstück, verhindert die Oxidbildung, reduziert entscheidend den Verzug der Bauteile und die Breite der thermisch beeinflussten Zone im Bereich der Schnittfläche.

Ein Teil des in das Plasma eingespritzten Wassers dissoziiert. Die entstehenden Sauerstoffionen sind die Ursache für bartfreie hochwertige Schnittflächen auch an unlegierten Baustählen. Der Elektrodenwerkstoff E (Zirkonium, Hafnium) muss der angreifenden Wirkung des Sauerstoffs widerstehen können.

Eine Folge des rotierenden Plasmastrahls ist die unterschiedliche Abweichung der beiden Schnittflächen von der Senkrechten. Normalerweise dreht sich der Strahl in Uhrzeigerrichtung. Auf der rechten Seite ist wegen der größeren Anzahl der rekombinierten Teilchen die wirksame Energiemenge größer (Rekombinationswärme) als auf der linken. Diese Erscheinung ist zu beachten, da bei der „schlechten“ rechten Seite Winkelabweichungen von 5 bis 8° entstehen, auf der „guten“ linken nur etwa 2°. Durch richtige Wahl der Schneidrichtung bzw. des Umfahrungssinnes muss dafür gesorgt werden, dass die rechte Seite immer im Abfall liegt.

Das Verfahren ist sehr umweltfreundlich und mit einem geringen Belästigungsgrad für die beteiligten Personen verbunden. Es wird entweder betrieben

- innerhalb einer geschlossenen Wasserglocke ($M = \text{Water-Muffler}$) oder
- in einem Wasserbehälter unterhalb der Wasseroberfläche (Abb. 4.175). Das Wasserbecken muss dann das größte zu schneidende Werkstück aufnehmen können.

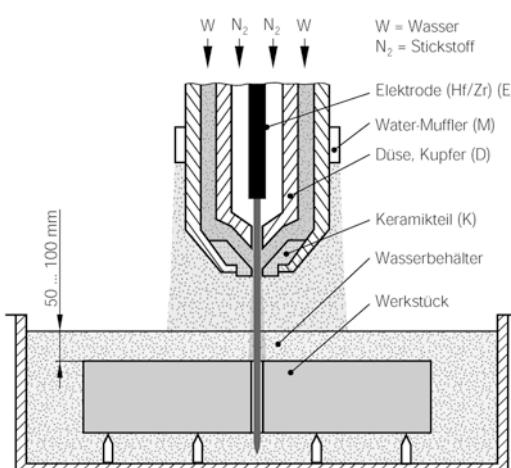


Abb. 4.175 Verfahrensprinzip des Plasmawasserinjektionsschneidens, schematisch

Die Vorteile beider Verfahrensvarianten sind:

- Die entstehenden Schadstoffe (Rauche, Gase) werden vom Wasser aufgenommen, die Schadgase (Ozon, Stickoxide) zum größeren Teil im Wasser gebunden.
- Die UV-Strahlung wird durch das Wasser soweit absorbiert, dass keine besonderen Schutzmaßnahmen erforderlich sind.
- Der Lärmpegel wird beim Trennen im Wasserbecken auf ungefährliche 75 bis 80 dB(A) reduziert.
- Durch das völlige bzw. teilweise Eintauchen der zu schneidenden Bleche in Wasser ist die thermische Beeinflussung der Werkstücke (Verzug, Maßhaltigkeit, Breite der Wärmeinflusszone) sehr gering.

4.9.3 Laserschneiden

Je nach Zustandsänderung des die Schnittfuge bildenden Werkstoffs unterscheidet man das Laser-Brennschneiden, Laser-Schmelzschnieden und das Laser-Sublimierschneiden. Die Art des verwendeten Schneidgases und die Leistung der Schneidanlage bestimmen die Form dieser Zustandsänderung.

Die prinzipiellen Verfahrensnachteile sind die sehr hohen Investitionskosten und der geringe Wirkungsgrad des Laserstrahlers, der beim CO₂-Laser maximal 20 % beträgt⁶.

4.9.3.1 Verfahrensprinzip

Für schweißtechnische Anwendungen ist vor allem der CO₂-Gaslaser wegen der großen erreichbaren Ausgangsleistungen (größer 1000 W) und des sehr guten Wirkungsgrades (15 bis 20 %) von Bedeutung⁷. Der Mechanismus des Lasereffekts ist relativ kompliziert.

⁶Der Wirkungsgrad von Festkörperlasern ist noch erheblich geringer. Er beträgt z. B. beim Rubinlaser nur etwa 1 %.

⁷Außer den Gaslasern werden noch Festkörperlaser verwendet. Die wichtigsten sind der Rubinlaser und der Neodym-Yttrium-Aluminium-Granatlaser (YAG).

Das Laserprinzip⁸ erfordert eine erzwungene und geordnete Emission. Sie wird durch „Anheben“ der Elektronen auf die oberste Schale ermöglicht und eingeleitet („Pumpen“). Die technische Realisierung dieser Vorgänge geschieht in einem *optischen Resonator*, Abb. 4.176. Die Anregung des im Resonator strömenden CO₂ - N₂ - He - Gemisches erfolgt mit der Energie einer elektrischen Gasentladung. Die emittierte Laserstrahlung mit der Wellenlänge von 10,6 μm liegt im infraroten Bereich, d. h., sie ist nicht sichtbar⁹. Von der in jede Richtung emittierten Strahlung wird der in Achsrichtung des Resonators verlaufende Teil an dessen Endspiegeln reflektiert. Dieser Anteil trifft auf weitere angeregte CO₂-Moleküle und erzwingt so eine weitere lawinenartig anwachsende Emission (Laserstrahlung).

Die gesamte emittierte Strahlung ist phasen- und amplitudengleich, also monochromatisch und kohärent. Sie wird solange verstärkt, bis ihre Intensität den „Durchbruchswert“ des einen halbdurchlässigen Endspiegels erreicht hat. Der Laserstrahl verlässt jetzt den Resonator und wird über einen Umlenkspiegel und eine Infrarootoptik (Gallium-Arsenid-Halbleiter) auf das Werkstück fokussiert. Er erzeugt hier einen Brennfleck von 0,1 bis 0,5 mm mit einer Leistungsdichte von bis zu 5 MW/cm². Den fokussierten Laserstrahl umgibt zentrisch ein von der Art des zu trennenden Werkstoffs abhängiges Schutzgas. Dessen Aufgabe besteht hauptsächlich darin, die Schmelze aus der Schnittfuge zu blasen. Zum Trennen nichtmetallischer Werkstoffe wird Stickstoff verwendet, der ein Verbrennen verhindert. Bei Stählen und Metallen beschleunigt Sauerstoff durch die freiwerdende Verbrennungswärme den Schneidvorgang.

⁸Das Kunstwort „Laser“ wurde aus den Anfangsbuchstaben von „Light Amplification by stimulated Emission of Radiation“ gebildet. Frei übersetzt bedeutet dies etwa: Lichtverstärkung durch erzwungene Emission von Strahlung.

⁹Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegt im Bereich zwischen 0,4 μm und 0,8 μm.

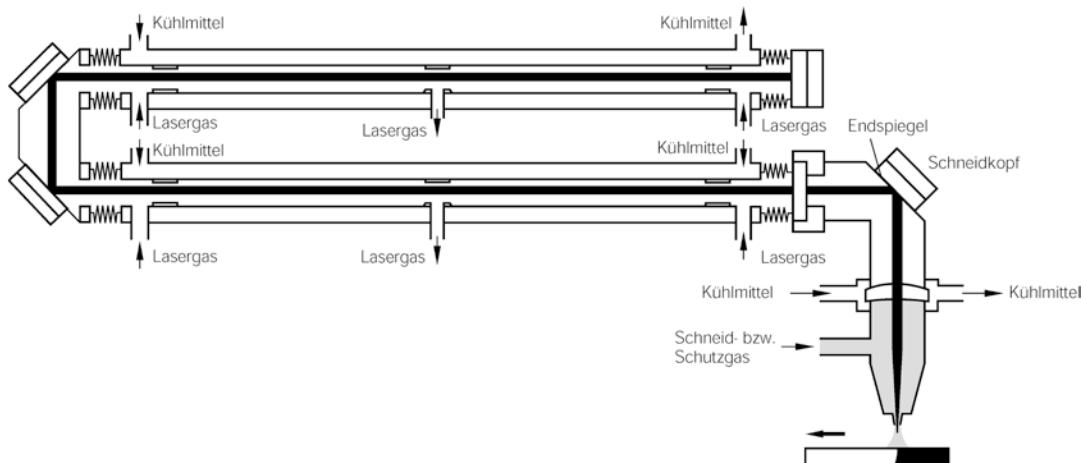


Abb. 4.176 Schematischer Aufbau eines CO₂-Gaslasers mit gefaltetem Resonator und Bearbeitungskopf zum Schneiden bzw. Schweißen. (nach Messer Griesheim)

Der auf die Werkstoffoberfläche auftreffende Laserstrahl kann reflektiert, absorbiert oder hindurchgelassen werden. Nur durch Absorption kann der Werkstoff erwärmt werden. Das Absorptionsverhalten wird u. a. durch die Art der Legierungselemente und die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Die meisten Metalle absorbieren im sichtbaren und nahen Infrarotbereich (Wellenlänge < 1 μm) bis zu 40 % der Strahlung. Metalle mit hohem Reflexions- oder niedrigen Absorptionsvermögen (z. B. Au, Ag, Al, Mg, Cu) sind daher nur bedingt laserschneidbar. Nichtmetallische Werkstoffe (Glas, Quarz, Kunststoffe, Holz, Leder, Pappe, Plexiglas, keramische Werkstoffe!) verhalten sich umgekehrt. Sie sind im sichtbaren Bereich praktisch transparent, im Infrarotbereich können sie bis zu 96 % der Strahlung absorbieren. Die Anzahl und die Unterschiedlichkeit der mit dem Laser schneidbaren Werkstoffe werden damit von keinem anderen Trennverfahren erreicht. Für die Wirksamkeit des Schneidprozesses ist außerdem die Art der Leistungsdichteverteilung über den Strahlquerschnitt wichtig. Die erwünschte *Gauß'sche Amplitudenverteilung* ist z. B. Voraussetzung für eine gleiche Schneidgeschwindigkeit in jeder Richtung.

Eine weitere neuere Form des Festkörperlasers ist der Faserlaser, der aus einer dünnen mit Erbium, Ytterbium oder Neodym dotierten Glasfaser besteht. Faserlaser erreichen Wirkungsgrade bis 35 %, sehr hohe Lebensdauern von über 25.000 h und verfügen über einen kompakten, wartungsfreien und unempfindlichen Aufbau. Im Pulsbetrieb können sehr kurze Pulszeiten (Femtosekunden-Bereich) erzielt werden. Nach dem Austritt aus dem aktiven Laserbereich tritt der Laserstrahl in eine Glasfaser ein und wird von dieser bis zur Optik weiter geleitet.

4.9.3.2 Verfahrensmöglichkeiten und Grenzen

Die große Leistungsdichte des Laserstrahles bis $10 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ macht das Laserschneiden besonders geeignet zum Trennen von Blechen mit geringen Wanddicken (< 1 bis 4 mm). In diesem Wanddickenbereich ist eine konzentrierte, punktförmige Wärmequelle ein entscheidender Verfahrensvorteil. Die Schnittfugenbreite beträgt nur etwa 0,1 bis 0,5 mm, die Schnittflächengüte ist hervorragend und der Verzug der geschnittenen Bauteile sehr gering. Das Verfahren füllt damit bei metallischen Werkstoffen

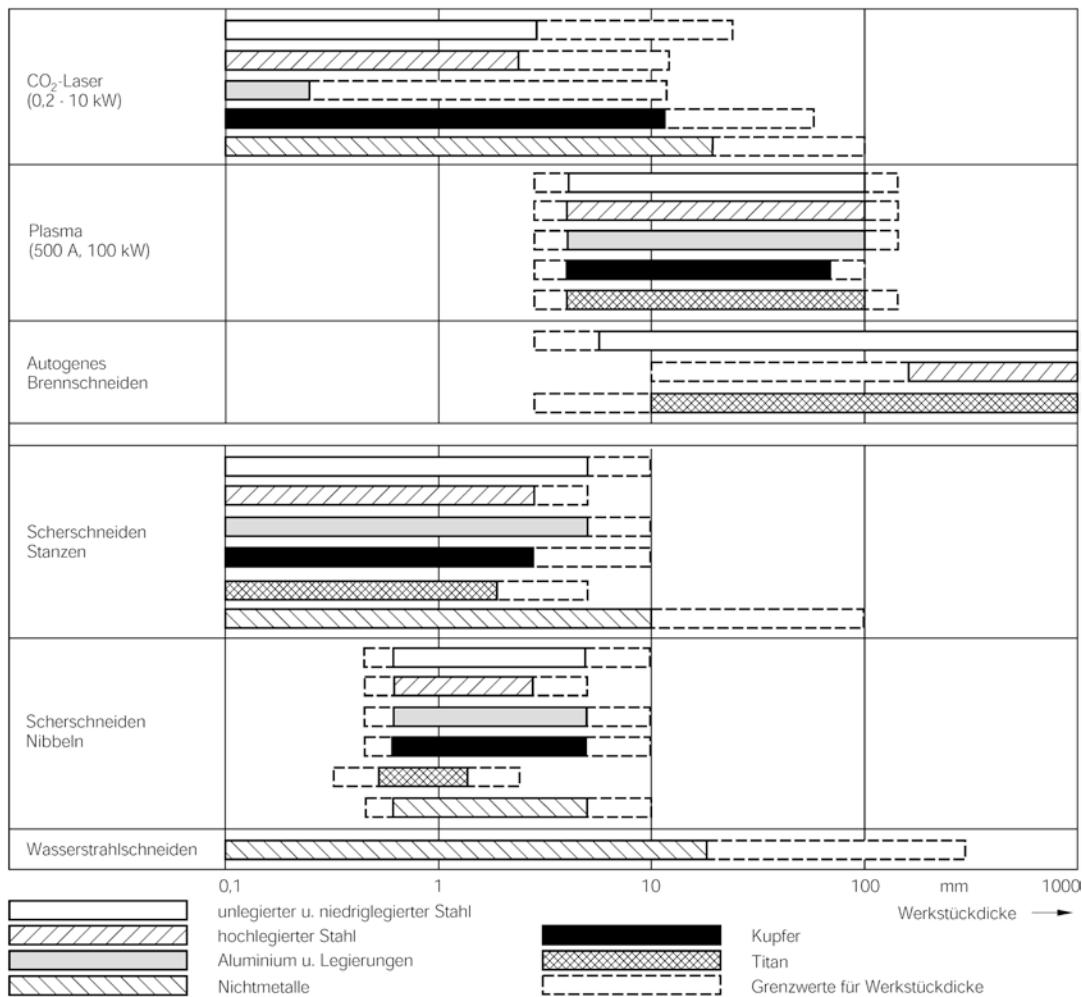


Abb. 4.177 Anwendungsgrenzen thermischer und mechanischer Trennverfahren zum Formschneiden metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe. (nach Messer Griesheim)

im Wanddickenbereich der Fein- und Dünnbleche (≤ 4 mm) eine Anwendungslücke. Mit anderen Verfahren lassen sich Halbzeuge dieser Dicke nicht oder nur unwirtschaftlich trennen. Abb. 4.177 zeigt die Anwendungsgrenzen verschiedener thermischer und mechanischer Trennverfahren. Im Dünnblechbereich – als typischer Anwendungsbereich kann stellvertretend die Automobilindustrie genannt werden – konkurriert das Laserschneiden sehr erfolg-

reich mit dem Nibbeln (und dem Wasserstrahlschneiden). Je komplizierter die zu schneidenden Konturen sind, desto wirtschaftlicher ist das Verfahren¹⁰. Es bietet eine Reihe wesentlicher Vorteile gegenüber herkömmlichen Methoden (Abb. 4.178):

¹⁰Laserstrahlschweißen und -schneiden mit Industrierobotern. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=JyfzvXwvIYU).

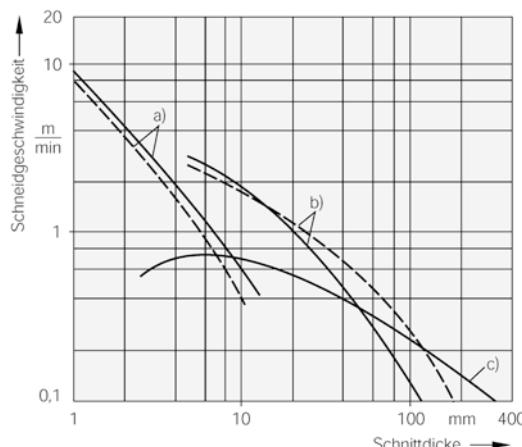


Abb. 4.178 Erreichbare Schneidgeschwindigkeiten verschiedener thermischer Schneidverfahren. — Stahl, - - - austenitischer Cr-Ni-Stahl. **a** CO₂-Laserschneiden (1 kW) **b** Plasmuschneiden (50 A bis 500 A) **c** autogenes Brennschneiden

- Es sind keine teuren Werkzeuge erforderlich.
- Nacharbeit der Schnittflächen kann in den meisten Fällen entfallen.
- Die Schneidgeschwindigkeiten sind sehr hoch, Abb. 4.179. Mit einem 500 W - CO₂-Laser beträgt die Schneidgeschwindigkeit an einem 2 mm dicken Stahlblech etwa 2500 mm/min.
- Die Arbeitsgeräusche sind verglichen mit mechanischen Trennverfahren sehr gering, d. h. gesundheitlich unbedenklich.

4.10 Wasserstrahlschneiden

4.10.1 Einleitung

Neben den bekannten Trenntechnologien wie Sägen, Scheren, Stanzen, thermische Trennverfahren (autogenes Brennschneiden, Plasma-, Laserschneiden) wird seit einigen Jahren das *Wasserstrahlschneiden* aufgrund seiner Vorteile verstärkt verwendet.

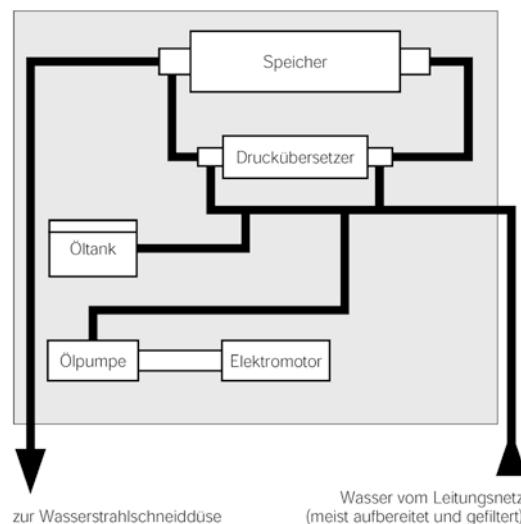


Abb. 4.179 Schematische Darstellung des Hochdruckpumpensystems zum Wasserstrahlschneiden

Flüssigkeitsstrahlen als Schneidwerkstoff wurden bereits seit mehr als hundert Jahren zum Abtragen von Werkstoffen, z. B. zum Abbau von Kies- und Tonablagerungen eingesetzt. Auch in den kalifornischen Goldminen wurden sie verwendet, um Goldadern von Gestein und Erdreich zu trennen. Etwa ab 1930 verwendeten amerikanische und russische Ingenieure diese Technologie im Bergbau und zum Putzen von Gussstücken, wobei mit Wasserdräcken von etwa 100 bar gearbeitet wurde. Das erste Patent erhielt *Norman Franz* für ein Hochdruck-Wasserstrahl-Schneidsystem, das noch mit bescheidenen 700 bar Arbeitsdruck betrieben wurde. In den Jahren 1968/1970 trennte ein amerikanischer Flugzeughersteller die besonders auf hohe Temperaturen, Drücke und spanende Bearbeitung kritisch reagierenden Faserverbund-, Waben- und Schichtwerkstoffe mit dem Wasserstrahlschneiden. Der entscheidende Durchbruch gelang um 1980 mit der Beimischung von Feststoffpartikeln (Wasserstrahl-Abrasiv-Schneiden) zum Druckwasserstrahl.

Mit dieser Verfahrensvariante lassen sich zahlreiche Werkstoffe wie Metalle, Glas, Keramik, Gestein, Faserverbundwerkstoffe, Holz, Kunst und Schaumstoffe trennen.

4.10.2 Verfahrensgrundlagen

4.10.2.1 Physikalische Grundlagen

Die im Schneidstrahl enthaltene kinetische Energie wird beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche in potenzielle umgewandelt, die sie stoßartig beansprucht. Die dadurch hervorgerufenen Spannungen haben elastische bzw. plastische Verformungen zur Folge, die zur örtlich begrenzten Zerstörung der Werkstoffoberfläche führen. Der Strahl reißt anschließend mikroskopisch kleine Werkstoffteilchen aus dem Material und arbeitet sich dabei immer tiefer in das Werkstück hinein. Der abrasiv wirkende Strahl schiebt auf seinem Weg im Werkstück Abraumpolster vor sich her und verliert aufgrund der großen Reibungsverluste an den Schnittflächen mit wachsender Schnitttiefe ständig an Energie, wodurch die Schnittgüte (Rauigkeit) mit der Schnittdicke kontinuierlich abnimmt. Ähnlich wie beim Brennschneiden kommt es auch hier zu einer ausgeprägten Riefenstruktur und einem mit zunehmender Werkstückdicke größer werdenden „Rillennachlauf“. Für die folgenden Formeln soll die Flüssigkeitsströmung als inkompressibel und innerhalb der Düse als reibungsfrei angesehen werden. Unter der Voraussetzung einer rotationssymmetrischen Strömung und einer über den Querschnitt konstant verteilten Geschwindigkeit ist die Strahlleistung am Düsenaustritt

$$P = \rho \cdot A \cdot \frac{v^3}{2} \quad (4.78)$$

Hierin bedeuten:

P Strahlleistung in W,

ρ Dichte der Flüssigkeit in kg/m^3 ,

A Querschnittsfläche des Strahls in m^2 ,

v Strahlgeschwindigkeit in m/s .

Der extrem große Einfluss der Strahlgeschwindigkeit (v^3 !) auf die Strahlleistung und damit auf die Schneidleistung ist leicht erkennbar.

Wird für die Querschnittsfläche des Strahls der Düsenquerschnitt eingesetzt und die Strahlgeschwindigkeit nach der *Bernoulli-Beziehung* angenähert, dann ergibt sich die Strahlleistung P

$$P = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot d_0^2 \cdot p^{1.5} . \quad (4.79)$$

Es bedeuten:

d_0 Düsendurchmesser in m,

p Flüssigkeitsdruck vor der Düse in N/m^2

Die bei gegebener Flüssigkeit (ρ) nur von d_0 und p abhängige Leistung P einschließlich der Verlustleistung muss durch den Druckerzeuger (Kompressor) aufgebraucht werden.

Prinzipiell lassen sich alle pumpbaren Flüssigkeiten verwenden. Aufgrund der hohen Verfügbarkeit, der geringen Kosten und der physiologischen Unbedenklichkeit wird überwiegend Wasser verwendet. Lediglich in der Lebensmittelindustrie werden teilweise spezielle Öle eingesetzt.

4.10.2.2 Technologische Grundlagen

Der Druckerzeuger muss einen regelbaren Flüssigkeitsstrom mit einem konstanten anpassbaren Druck liefern, der im Fall des Wasserstrahlschneidens zwischen 1000 bar und 8000 bar liegt.

Schneidsystem

Für große Fördermengen und Drücke bis etwa 2000 bar werden mechanisch angetriebene Plungerpumpen verwendet, die einen hohen Wirkungsgrad (70 bis 80 %) besitzen, aber wegen der ungleichförmigen Kolbenbewegung einen nicht konstanten Förderstrom erzeugen. Höchste Schneidwasserdrücke (im Bereich 3000 bis 6000 bar) werden mit hydraulisch angetriebenen

Kolbenpumpen realisiert. Abb. 4.179 zeigt schematisch ein Wasserstrahlschneidsystem. Das aus dem Leitungsnetz zugeführte Wasser wird zunächst mit Hilfe eines umgekehrten osmotischen Prozesses deionisiert, wodurch gelöste Feststoffe wie Eisen und Calcium entfernt werden. Danach durchläuft das Wasser einen Mikrofilter, der Partikel über einer Größe von etwa $45\ \mu\text{m}$ zurückhält. Dieser große Aufwand ist erforderlich, weil die genannten Fremdstoffe die Lebensdauer der teuren Hochdruckkomponenten und der Schneiddüse sehr stark herabsetzen.

In der Hochdruckpumpe treibt ein Elektromotor eine selbstregelnde Ölpumpe an und erzeugt im Hydrauliköl etwa 200 bar, mit dem die Primärseite des Druckübersetzers beaufschlagt wird. Entsprechend dem Flächenverhältnis (etwa 20:1) wird das Schneidwasser auf der kleineren Sekundärseite auf etwa 6000 bar verdichtet. Der Druckübersetzer ist doppelt wirkend, d. h., jeweils eine Seite fördert Druckwasser, während die andere Wasser ansaugt. Wegen des hierdurch entstehenden diskontinuierlichen Förderstroms wird nach dem Druckbehälter ein Puffer (Speicher) angeordnet. Das verdichtete Schneidwasser gelangt über eine flexible Hochdruckleitung zur Schneiddüse.

Schneidkopf

Das Hochdruckwasser wird der Schneiddüse zugeführt. Aus der Düsenbohrung mit einem zwischen 0,1 und 0,35 mm liegenden Durchmesser tritt der Wasserstrahl mit einer Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 900 m/s (entspricht etwa der 2,5 fachen Schallgeschwindigkeit) aus und trifft auf den unter der Düse liegenden Werkstoff. Als Folge des sehr geringen Düsendurchmessers treten in der Düse erhebliche Reibkräfte auf, die zusammen mit der hier erfolgenden starken Druckabsenkung (Gefahr der Kavitation) für einen erheblichen Verschleiß des Düsenwerkstoffs sorgen. Diese extreme Beanspruchung macht die Wahl sehr verschleißfester Düsenwerkstoffe wie z. B. Saphir, Rubin oder Diamant erforderlich.

Wasserstrahlschneiden mit Reinwasser

Mit Reinwasser werden weiche Werkstoffe getrennt (Kunststofffolien, Textilien, Elastomere, Thermoplaste, Papier, Faserstoffe, Schaum- und Dämmstoffe, Lebensmittel). Die Vorschubgeschwindigkeiten betragen bis zu 200 m/min (Abb. 4.180). Die sehr geringe Schnittwärme und die trotz extremer Energiedichte sehr kleinen Schnitt- und Reaktionskräfte sind die wichtigsten Gründe, die eine Bearbeitung weicher und nachgiebiger Werkstoffe erlauben, ohne ihre empfindliche Struktur zu zerstören.

Das Werkstück liegt dabei auf dem Schneidrost, der sich in einem Wasserbecken befindet. Die gewünschte Kontur wird mit dem Schneidkopf abgefahren, der in einer Führungsmaschine, einem Roboter oder einem 2D- (bzw. seltener einem 3D-Mehrachsen-) CNC-Portal integriert ist.

Aufgrund der kleinen Schnitt- und Reaktionskräfte sind zeit- und gerätetechnisch nur wenig aufwendige Spann- und Fixiermaßnahmen für den zu trennenden Werkstoff bzw. die auszuschneidenden Teile erforderlich. Im Wesentlichen müssen die Tafeln/Schnittteile gegen

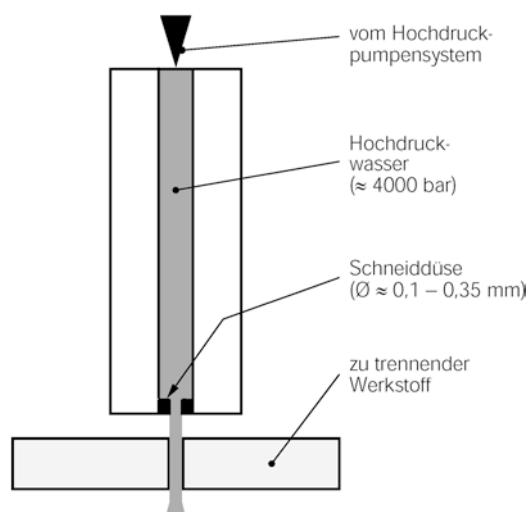


Abb. 4.180 Prinzip des reinen Wasserstrahlschneidens

die dissipativen Kräfte des expandierenden Wasserstrahls gesichert werden. Die bei anderen (thermischen) Trennverfahren als Folge von Temperaturdifferenzen entstehenden Kräfte treten hier kaum auf. Weiterhin erzeugt der Wasserstrahl keinen direkten Anpressdruck auf den Werkstoff, weil die mechanischen Reaktionen im Mikrobereich stattfinden, d. h., der Werkstoff wird nicht deformiert, also auch nicht „verschoben“.

Das weitgehend spannungsfreie Trennen, verbunden mit sehr geringen Schnittbreiten (in der Größenordnung des Düsendurchmessers!), ermöglicht ein bei den thermischen Trennverfahren nicht mögliches Maß der Bauteilverschachtelung im Trennplan und Verzugsfreiheit der Schnittteile. Die bessere Ausnutzung des Werkstoffs verringert den Verschnitt und die Stückkosten.

Das Wasserstrahlschneiden eignet sich besonders gut zum Erzeugen komplexer Konturen der Schnittteile, die sich in nahezu beliebigen Formen herstellen lassen. Scharfe Kanten, Hinterschnitte, schräge Schnittkanten, spitze Winkel, Einstechen von Löchern, beliebiges Starten des Schneidvorgangs (Einstechen, fliegender Start von der Werkstückkante) sind leicht realisierbar.

Das Verfahren ist sehr umweltschonend, sauber, nicht sonderlich lärmintensiv, erzeugt keinerlei Späne, Schleifstäube, giftige Gase oder Luftverschmutzungen. Es sind keine *Schneidemulsionen* erforderlich. Das zum Schneidtisch ausgebildete Wasserbecken („*Catcher*“) dient gleichzeitig zum Absorbieren der Restenergie des Strahls und mindert den Geräuschpegel auf ein erträgliches Maß.

Wasserstrahl-Abrasiv-Schneiden

Zum Schneiden harter, fester und dickwandiger Werkstoffe wird dem Druckwasser feinkörniger (0,2–0,5 mm Durchmesser, etwa 150–250 g/min) Granat- oder Olivinsand (für weichere Werkstoffe auch Korund) in der Mischkammer

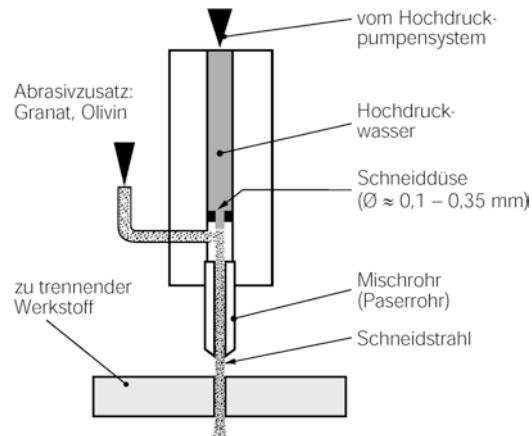


Abb. 4.181 Prinzip des Wasserstrahl-Abrasiv-Schneidens

zugesetzt, wodurch eine Mikrozerspanung erfolgt (Abb. 4.181). Die hohe Strömungsgeschwindigkeit des Druckwassers erzeugt in der Mischkammer einen Unterdruck, der das Abrasivmittel ansaugt. Im mechanisch sehr hoch beanspruchten Mischrohr (Fokussierdüse, Paserrohr, Paser = PArticle Stream ERosion) wird der mit dem Abrasivmittel vermischte Wasserstrahl erneut gebündelt und auf das Werkstück gelenkt. Die Abtragleistung nimmt mit der Härte und Scharfkantigkeit des Abrasivmittels zu, ebenso wirkt eine möglichst konstante Korngrößenverteilung.

Mit dieser Verfahrensvariante lassen sich härtere Materialien wie Stein, (Panzer-)Glas, Keramiken, Grafit, Holz, Marmor und alle Metalle, z. B. gehärteter Werkzeugstahl, Titan, Aluminium, Inconel, Cr-Ni-Stahl, Kupfer und Verbundwerkstoffe trennen. Die aus Werkstoffen mit unterschiedlichen Schmelzpunkten bestehenden Lamine lassen sich nur mit dem Wasserstrahlschneiden sauber schneiden!

Auf diese Weise können gehärtete Stähle bis 50 mm, Nichteisenmetalle (Cu, Ni, Ti, Al) bis 120 mm Dicke geschnitten werden.

Beim Trennen der verschiedenartigsten Metalle – sie können bei entsprechender

Temperatureinwirkung härtbar, versprödbar, rissempfindlich, schmelzbar und (oder) verbrennbar sein – wird einer der größten Vorteile dieser Schneidtechnologie deutlich, der „*kalte Schnitt*“. Die Temperatur im Schnittflächenbereich wird dabei nur wenig höher als die Umgebungstemperatur. Damit können „Wärmeeinflusszonen“ d. h. Aufhärtungen bei Stählen, rissbegünstigende Eigenspannungen, Versprödung durch Gasaufnahme, die Bildung intermediärer Phasen oder die Maßhaltigkeit der Schneidteile beeinträchtigende Verzüge ebenso wenig entstehen wie oxidierte Schnittflächen und „wärmbehandelte“ Gefüge, d. h. Eigenschaftsänderungen jeder Art.

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden wichtigen Vorteile des Wasserstrahlschneidens:

- Durch den feinen Strahl ergibt sich eine hohe Schnittqualität. Es können filigrane und komplizierte Konturen geschnitten werden.
- Es lassen sich beliebige Konturen schneiden und der Schnitt kann an jeder beliebigen Stelle der Werkstückoberfläche beginnen und enden.
- Wegen der geringen Schnitt- und Reaktionskräfte sind (auch bei dünnwandigen Werkstoffen!) nahezu gratfreie Schnittflächen möglich.
- Es wird ohne Anpressdruck auf den Werkstoff gearbeitet. So wird trotz hoher kinetischer Energie eine Deformation des Materials vermieden und eine hohe Schnittpräzision ohne Ausfransung oder Grat erzielt. Die Materialoberfläche wird nicht verletzt.
- Kohle- oder glasfaserverstärkte Kunststoffe, reflektierende Werkstoffe (problematisch z. B. bei der Lasertechnologie) lassen sich ebenso einfach trennen, wie aus mehreren Lagen unterschiedlicher Werkstoffe aufgebaute Materialien (Lamine).
- Ein Verklemmen im Schnittspalt ist nicht möglich.

- Aufgrund der geringen Temperaturen im Bereich der Schnittflächen entstehen beim Kunststoffschneiden keine toxischen Bestandteile.
- Mit dem Wasserstrahl-Abrasiv-Schneidverfahren lassen sich Werkstoffe trennen, die mit keinem anderen Verfahren geschnitten werden können.
- Die Umweltverträglichkeit wird in besonderem Maße gesichert, da der Schneidprozess sauber ist, kein Schneid- oder Schleifstaub, keine Späne und keine Luftverschmutzungen erzeugt werden.

Rillennachlauf („Schleppfehler“)

Er nimmt mit der Schneidgeschwindigkeit zu. Bei geraden Schnitten ist der Einfluss des Schleppfehlers meist vernachlässigbar. Mit stärkerer Krümmung des Schnittpfads nimmt sein Einfluss im Bereich der Ecke kontinuierlich zu. Dann muss die Schneidgeschwindigkeit soweit verringert werden, bis der Rillennachlauf zulässige Werte annimmt. Nach Passieren der Krümmung wird die Schneidgeschwindigkeit erneut auf die Geometrie des nun vorhandenen Schnittpfads eingestellt.

V-förmige Schnittflächen

Ähnlich wie beim Plasmuschneiden entstehen auch beim Wasserstrahlschneiden V-förmige Geometriefehler der Schnittflächen. Bei sehr großen *Schneidgeschwindigkeiten* ist die Schnittspaltbreite auf der Werkstückoberseite größer als die auf der Unterseite, bei kleinen Schnittgeschwindigkeiten verhält es sich umgekehrt.

Das Wasserstrahlschneiden eignet sich zum Schneiden komplexer Konturen (sehr geringe Schnitt- und Reaktionskräfte treten auf!) in dickwandigen Werkstoffen, vor allem dort, wo bisher mechanisch bearbeitet werden musste. Für alle Trennarbeiten an Steinarten, Gläsern, Kunststoffen und Verbundmaterialien ist das Verfahren nahezu konkurrenzlos. Es lässt sich be-

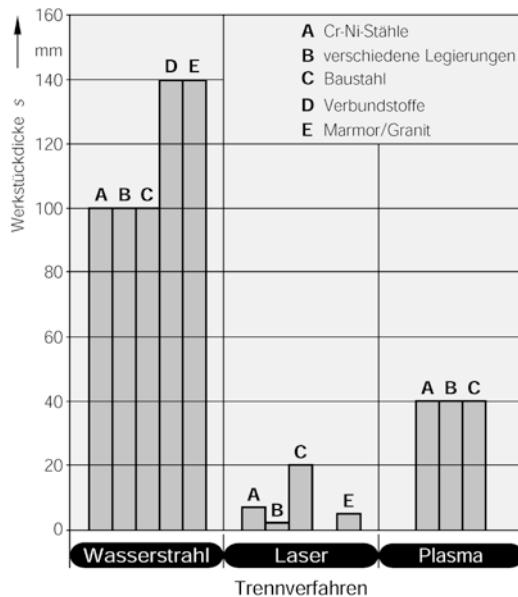


Abb. 4.182 Schneidbare Werkstückdicken verschiedener Werkstoffe bei einigen bekannten Trennverfahren

sonders vorteilhaft zum Schneiden aller reflektierender und gut wärmeleitenden Materialien (wie z. B. Kupfer, Aluminium, Silber) einsetzen. Der Schneidprozess erfolgt oberhalb be-

stimmter Werkstückdicken schneller als mit jedem anderen Verfahren. Stillstandszeiten für einen „Werkzeugwechsel“ entfallen, weil keine Schneiden vorhanden sind, die zu schärfen oder auszuwechseln sind. Ebenso wenig müssen Vorrichtungen und Anlagen zum Beseitigen von Staub oder toxischen Rückständen, die besonders bei der Bearbeitung umweltbelastender Werkstoffe entstehen, vorgesehen werden.

Abb. 4.182 zeigt die schneidbaren Werkstückdicken verschiedener mit dem Wasserstrahlschneiden konkurrierender Trennverfahren. Die wesentlich größere trennbare Werkstückdicke des Wasserstrahlschneidens ist ebenso bemerkenswert wie die viel größere Anzahl der mit diesem Verfahren trennbaren Werkstoffe.

Die Schneidgeschwindigkeiten beim Wasserstrahlschneiden sind im Bereich *kleiner* Werkstückdicken (≤ 5 bis 10 mm) geringer als bei den konkurrierenden Trennverfahren Plasma- und Laserstrahlschneiden. Für größere Werkstückdicken ist das Wasserstrahlschneiden oft das einzige wirtschaftliche Trennverfahren. Abb. 4.183 zeigt die wichtigsten Kenngrößen an den Schnittflächen.

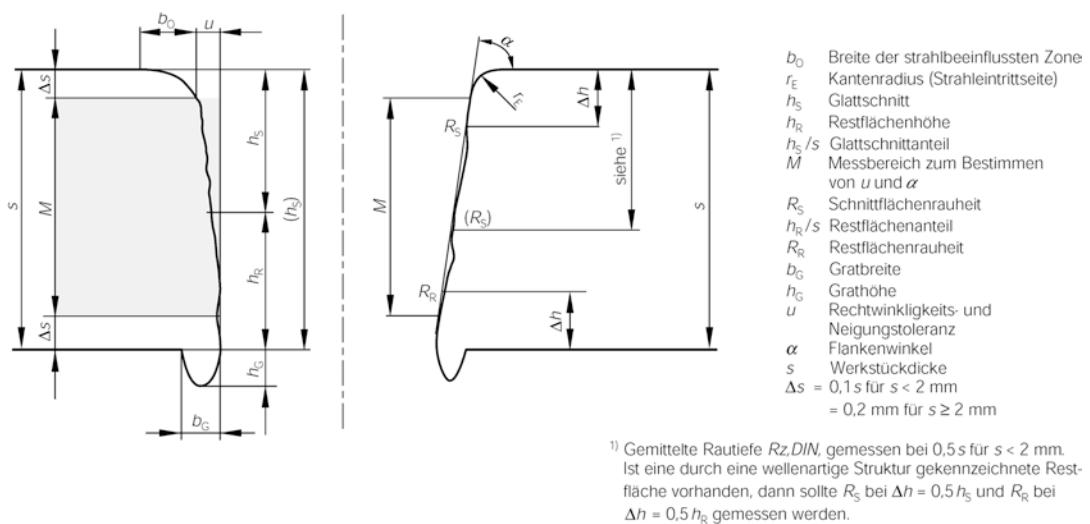


Abb. 4.183 Kenngrößen an Schnittflächen von abrasiv-wasserstrahlgeschnittenen Werkstücken in Anlehnung an DIN EN ISO 9013, nach VDI 2906 Blatt 10

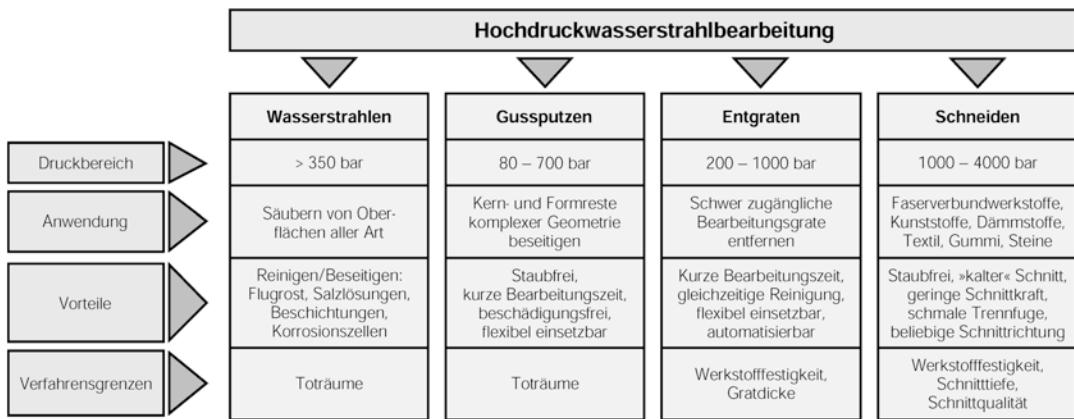


Abb. 4.184 Anwendungsgebiete des Hochdruckwasserstrahls (erweitert nach König)

Die Maßtoleranzen und die Beschaffenheit der Schnittflächen sind im Wesentlichen von der Höhe des Wasserdrukks, dem Abrasivmittel und in erheblichem Umfang von der Schneidgeschwindigkeit abhängig. Nach VDI 2906 Blatt 10 werden die Merkmale der Schnittflächenqualität wasserstrahlgeschnittener Bauteile wie in Abb. 4.184 bestimmt.

Üblicherweise werden in der Praxis drei Schnittqualitäten unterschieden:

- Q1: Grob- oder Trennschnitt**
Angaben über Toleranzen entfallen
- Q2: Normal- oder Mittelschnitt**
 - *Maßtoleranz*
 $\pm 0,1$ mm an der Teileoberkante,
 - *Oberflächenrauigkeit* $R_z = 20$ bis $50 \mu\text{m}$,
 - *Winkelabweichung*: 1 bis 3°

Q3:

Qualitätsschnitt

- *Maßtoleranz*
 $\pm 0,05$ mm an der Teileoberkante,
- *Oberflächenrauigkeit* $R_z = 10 \mu\text{m}$,
- *Winkelabweichung*: 0,5 bis 1°

Die Schnittflächenbreite ist abhängig vom Düsendurchmesser, dem Wasserdruk, der Abrasivart und -körnung und dem Abstand Düsenunterkante zu Werkstückoberfläche.

Der Hochdruckwasserstrahl lässt sich nicht nur zum Trennen, sondern auch sehr wirtschaftlich zum Säubern von Oberflächen (Flugrost, Salzlösungen, Beschichtungen) aller Art, Gussputzen und Entgraten verwenden. Abb. 4.184 zeigt in einer zusammenfassenden Darstellung die wichtigsten Anwendungsgebiete des Hochdruckwasserstrahls.

4.11 Gestaltung von Schnittteilen

In den folgenden Beispielen ist immer links die ungünstige und rechts die zweckmäßige Gestaltung dargestellt.

(Siehe Abb. 4.185, 4.186, 4.187, 4.188, 4.189 und 4.190)

Abb. 4.191, 4.192, 4.193, 4.194, und 4.195

Abb. 4.196, 4.197, 4.198, 4.199, und 4.200

Abb. 4.201, 4.202, 4.203, und 4.204

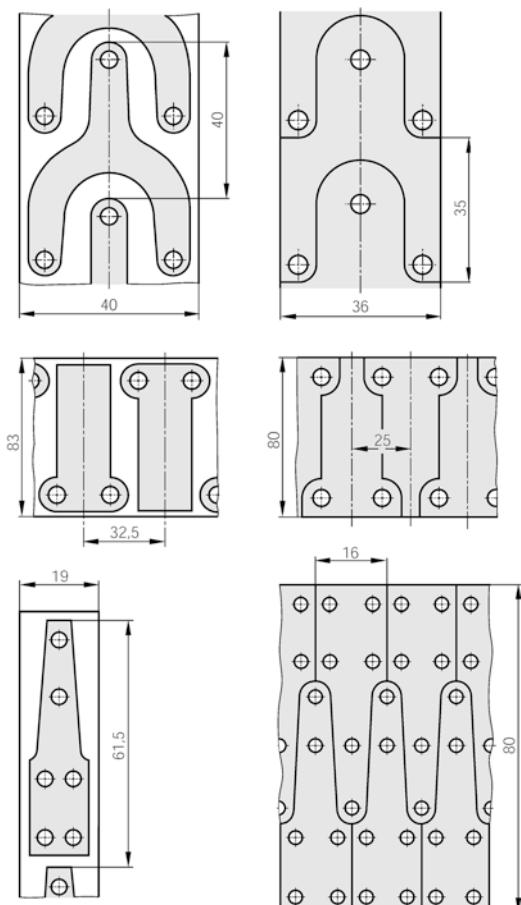


Abb. 4.185 Durch abschnittsgerechtes Gestalten können Ausschnitte durch Abschnitte ersetzt werden, die ein lückenloses Aneinanderreihen gestatten

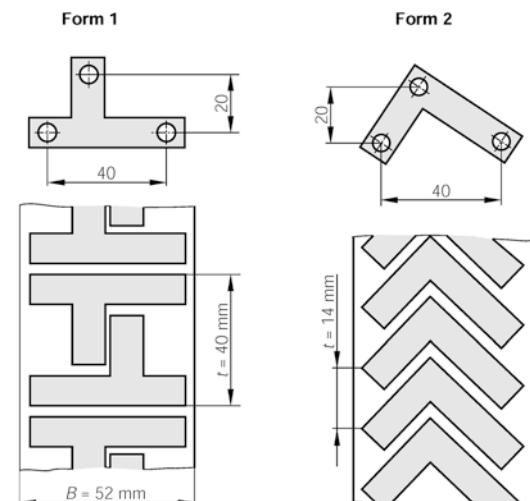


Abb. 4.186 Wirtschaftlichere Ausschnittsformen lassen sich auch durch Ändern der Schnittteileform erreichen. Dieser Hebel hat die Aufgabe, drei Punkte starr miteinander zu verbinden. Durch Ändern der Form „1“ in die Form „2“ können 30 % des Werkstoffs eingespart werden. Eine weitere Ersparnis wäre durch Flächenchluss möglich

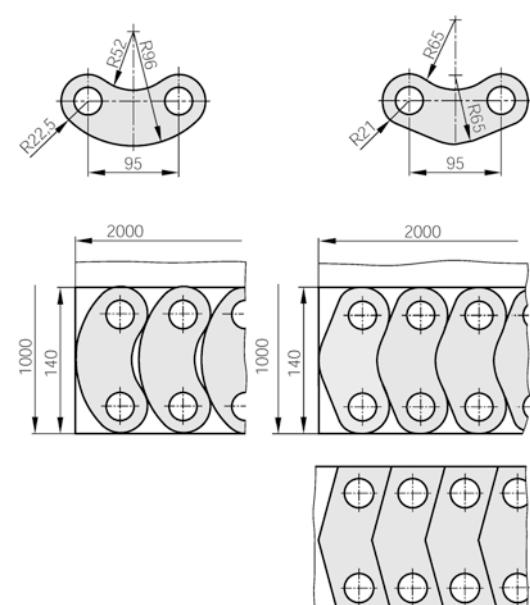


Abb. 4.187 Dieses Beispiel zeigt, wie durch eine geringe Maßänderung Flächenschluss und damit eine bessere Werkstoffausnutzung erreicht wird. Runde Schnittkanten sind – wenn sie nicht funktionswichtig sind – zu vermeiden und durch gerade zu ersetzen (Abschneiden ohne Abfall)

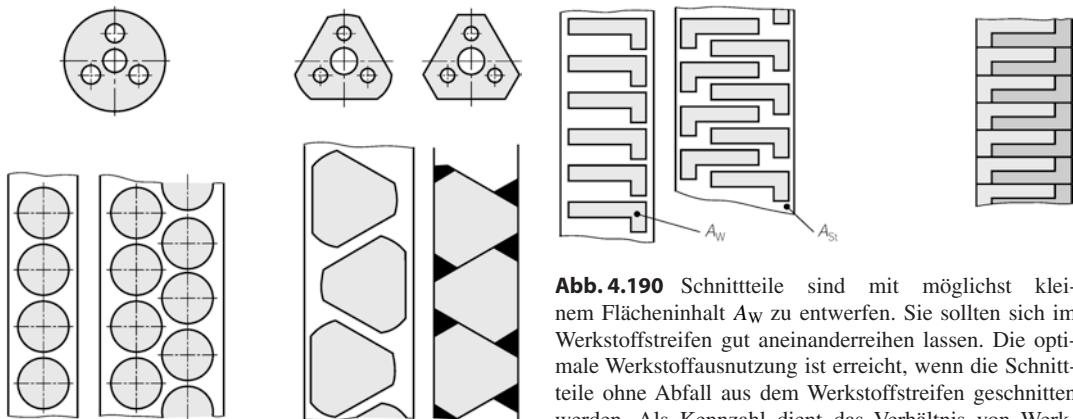


Abb. 4.188 Die runde Form der Scheibe erfordert einen großen Werkstoffbedarf, der durch Mehrfachschnitte herabgesetzt werden kann. Eine größere Einsparung wird durch das Ändern der runden in eine dreieckige Form erzielt. Die geringsten Werkstoffverluste werden durch Abschneiden nach dem Ausklinken der dunkler dargestellten Flächen erreicht

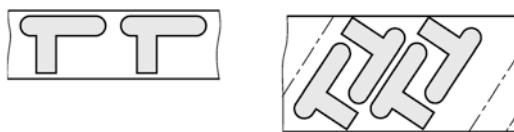


Abb. 4.189 In manchen Fällen kann eine schräge Anordnung der Schnittteile wirtschaftlicher sein als die gerade Anordnung. Um einen möglichst hohen Werkstoffausnutzungsgrad y zu erreichen, sollten folgende Hinweise beachtet werden:

- Einfaches Aneinanderreihen ergibt den einreihigen Streifen. Der Werkstoffverbrauch kann durch Anordnen der Teile in mehreren Reihen gesenkt werden.
- Eine schräge Anordnung der Schnittteile im Streifen ist oft vorteilhafter als eine gerade.
- Die durch die Stegbreite bedingten Verlustflächen beim Ausschneiden lassen sich durch den Übergang zum Abschneiden vermeiden.
- Runde Schnittkanten sind zu vermeiden und durch gerade Kanten zu ersetzen.

Abb. 4.190 Schnittteile sind mit möglichst kleinem Flächeninhalt A_w zu entwerfen. Sie sollten sich im Werkstoffstreifen gut aneinanderreihen lassen. Die optimale Werkstoffausnutzung ist erreicht, wenn die Schnittteile ohne Abfall aus dem Werkstoffstreifen geschnitten werden. Als Kennzahl dient das Verhältnis von Werkstückfläche A_w zu Streifenfläche A_{St} , der Werkstoffausnutzungsgrad $y = A_w/A_{St}$

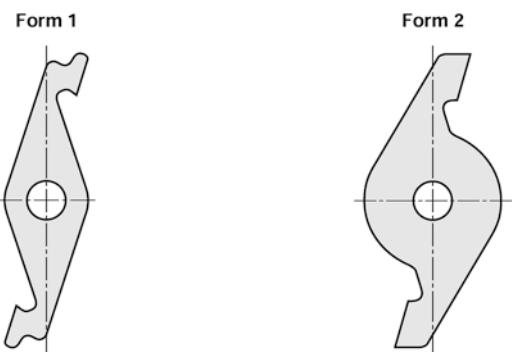


Abb. 4.191 Je einfacher die Form eines Ausschnittes ist, desto geringer sind die Werkzeugkosten. Unregelmäßig gekrümmte Umrisse vergrößern die Werkzeugkosten erheblich. So verhalten sich z. B. die relativen Werkzeugkosten für diesen Drehwählerarm im Vergleich von Form 1 zu Form 2 wie 3:2

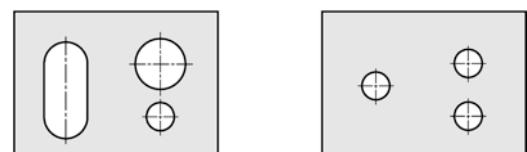


Abb. 4.192 Lochungen sollten möglichst rund und mit gleichen Durchmessern ausgeführt werden. Dadurch ergeben sich preisgünstige Schnitte, einheitliche Stempel und eine vereinfachte Nacharbeit (z. B. vereinfachtes Entgraten)

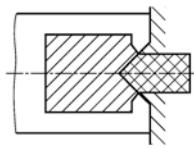
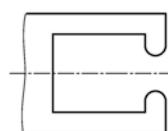
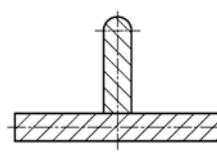
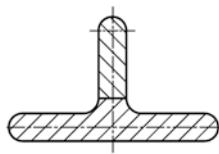


Abb. 4.193 Aufteilen der Schneidstempel in einfache, gut schleifbare Querschnitte mit scharfkantigen Über-gängen ermöglicht ein einfaches Fertigen

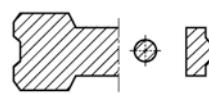
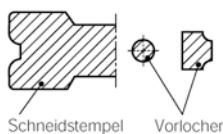
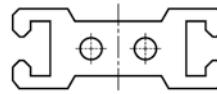
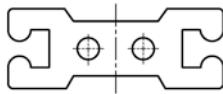
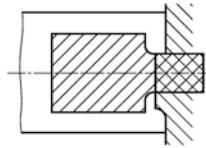


Abb. 4.194 Stempelecken sollten abgeschrägt und nicht abgerundet werden, um ein einwandfreies Zu-sammentreffen der Schnittlinien zu gewährleisten

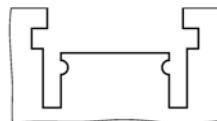
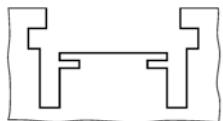


Abb. 4.195 Kräftig ausgebildete Stempelecken be-wirken einen geringeren Werkzeugverschleiß und eine größere Sicherheit gegen Werkzeugbruch



← Vorschubrichtung

Abb. 4.196 Bei nacheinander abgeschnittenen Kanten ist ein tangentiales Einmünden zu vermeiden und durch Ecken zu ersetzen ($R > B/2$)

Abb. 4.197 Bei Umgrenzungen, die im Folgeschnitt gefertigt sind, kann Versatz entstehen, der durch Streifen-toleranzen, Führungsfehler oder den Stempelversatz be-dingt ist. Bei geraden Kanten im Schnittwerkzeug kön-nen solche Fehler vermieden werden

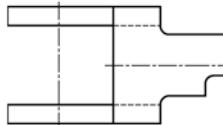
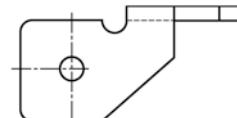
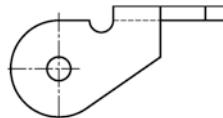


Abb. 4.198 Ein Lochversatz fällt optisch bei gerad-linigen Begrenzungskanten weniger auf als bei runden Kanten

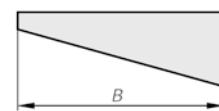
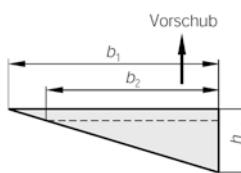


Abb. 4.199 Beim schrägen Abschneiden eines Werk-stücks ist die Breite b_1 durch den spitzen Auslauf in hohem Maße von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig (b_1 verkürzt sich zu b_2). Außerdem wird die Fertigung des Werkzeugs erschwert

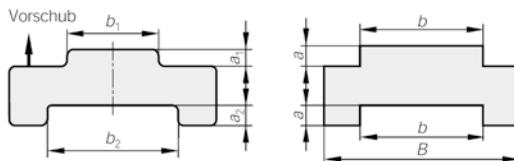


Abb. 4.200 Man sollte keine unterschiedlichen Ecken und Rundungen am gleichen Teil vorsehen (*links*). Mit $a = a_1 = a_2$ und $b = b_1 = b_2$ erspart man das Vorlochen und nutzt den Werkstoff vollständig aus



Abb. 4.201 Bei Blehdicken $s \geq 3$ mm verhindern abgeschrägte Stempelformen eine Eckendeformation des Werkstücks

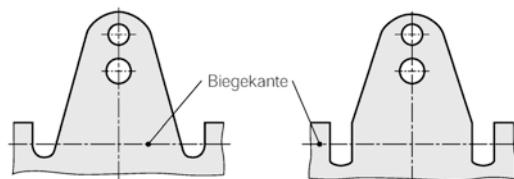


Abb. 4.202 Bei Schnittteilen, die anschließend gebogen werden, ist die Biegekante rechtwinklig zur Außenkante zu legen, da sonst die Gefahr des Einreibens beim Biegen besteht



Abb. 4.203 Ausreichende Steg- und Randbreiten vermindern die Rissgefahr beim Ausschneiden bzw. Löchen (siehe VDI 3367)

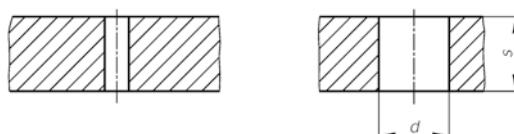


Abb. 4.204 Ein minimaler Lochdurchmesser $d_{\min} = s$ sollte nicht unterschritten werden, da sonst eine erhöhte Bruchgefahr für das Werkzeug besteht. Bei günstigen Bedingungen kann $d_{\min} = s$ erreicht werden (Beratung mit dem Werkzeugkonstrukteur erforderlich)

4.12 Gestaltung spanend herzustellender Werkstücke

4.12.1 Gestaltung für das Drehen

Form- und Lageabweichungen

Die absolut genaue Fertigung eines Werkstücks ist in der Praxis nicht möglich. Außer Abweichungen von den Nennmaßen treten auch Form- und Lageabweichungen auf, die entstehen können durch:

- Eigenspannungen,
- Einspannung,
- Werkzeughalterung,
- Zerspankraft,
- Schnittgeschwindigkeit,
- Maschinenschwingungen.

Nachfolgend sind drei Beispiele für Ursachen von Formabweichungen und ihre jeweiligen Auswirkungen dargestellt (Abb. 4.205, 4.206, und 4.207):



Abb. 4.205 Wird ein Drehteil zwischen Spitzen aufgenommen, so tritt durch die Kraft F des Drehmeißels auf das Drehteil eine Durchbiegung auf. Die auftretende Formabweichung ist im *rechten Bild* dargestellt

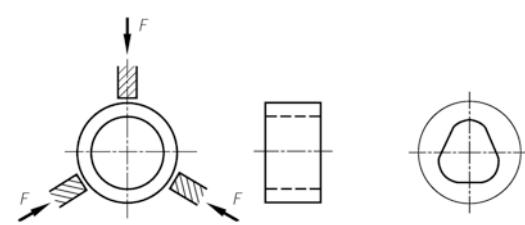


Abb. 4.206 Wird ein Rundmaterial in ein Futter eingespannt, um eine Bohrung auszudrehen, so ergibt sich in dieser eine Rundheitsabweichung infolge der Spannkräfte

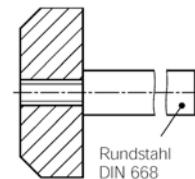
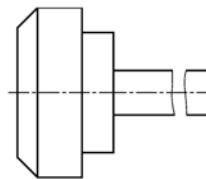
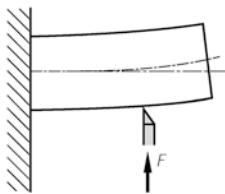


Abb. 4.207 Wird ein Drehteil einseitig eingespannt, so tritt als Folge der Kraft F des Drehmeißels ebenfalls ein Biegemoment auf, welches zur dargestellten Formabweichung führt

Gestaltungsbeispiele Drehen

In den folgenden Beispielen ist immer links die ungünstige und **rechts die zweckmäßige** Gestaltung dargestellt.

Weitere Beispiele für das Drehen:

Abb. 4.208, 4.209, 4.210, 4.211, 4.212, 4.213, 4.214, 4.215 und 4.216

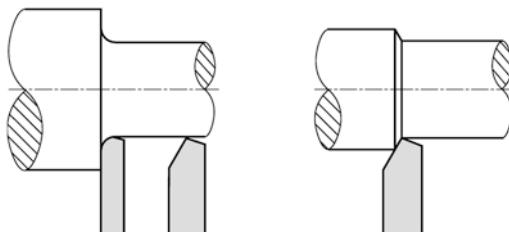


Abb. 4.208 Wellenabsätze, die keine Funktion erfüllen, sind nicht als Planflächen auszuführen. Bei einer Kegelfläche kann ohne Werkzeugwechsel fertigbearbeitet werden; auch das Drehen auf Nachform-Drehmaschinen wird erleichtert

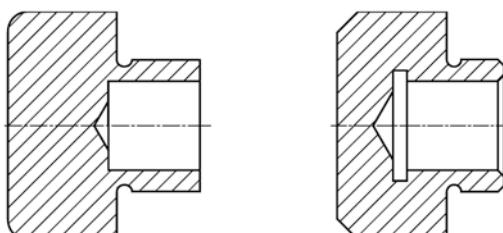


Abb. 4.209 Um die Fertigung zu vereinfachen, sind bei Drehteilen die Außenkanten mit 45°-Fasen statt mit Rundungen zu versehen. Innenkanten an Flächen, die nachfolgend bearbeitet werden sollen, sind mit Freistichen zu versehen

Abb. 4.210 Abgesetzte lange und dünne Drechteile sind zu vermeiden. Wirtschaftlicher ist das Herstellen aus zwei Teilen unter Verwendung von Halbzeugen

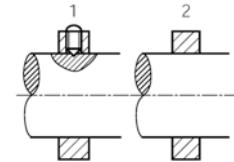
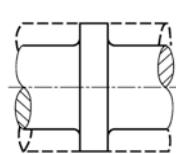


Abb. 4.211 Wellen mit einem Bund erfordern einen großen Zerspanungsaufwand. Ein Stellring 1 oder ein aufgeschrumpfter Ring 2 können u. U. den Bund ersetzen

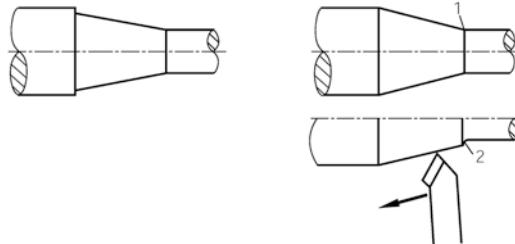


Abb. 4.212 Beim Kegeldrehen soll der Drehmeißel auslaufen können. Der Anschnitt sollte daher nicht wie bei 1 angeordnet sein, sondern wie bei 2 freiliegen



Abb. 4.213 Das Abdrehen langer Bolzen von der Stange ist unwirtschaftlich. Beim Einsatz von gezogenem Halbzeug brauchen nur die Enden dicht an der Einspannung bearbeitet zu werden

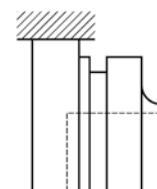
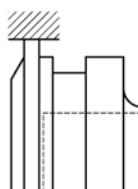


Abb. 4.214 Ausreichend breite Spannflächen sind besonders bei Teilen vorzusehen, die im Dreibackenfutter gespannt werden, um ein sicheres Spannen und eine große Spanabnahme zu ermöglichen

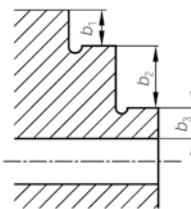


Abb. 4.215 Bei gleichzeitigem Plandrehen mehrerer Wellenabsätze auf Drehautomaten hängt die Bearbeitungszeit von der größten Durchmesserdifferenz ab. Daher sollte $b_1 = b_2 = b_3$ sein

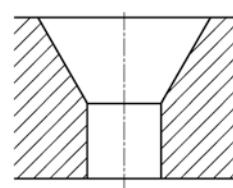
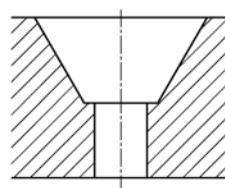
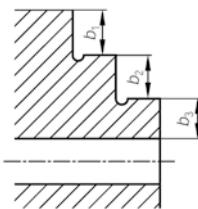


Abb. 4.219 Wie beim Kegeldrehen (Abb. 4.212) ist auch bei Kegelsenkungen, insbesondere für nachfolgende Feinbearbeitungen, der Werkzeugauslauf zu ermöglichen. Für das linke Bild sind Sonderwerkzeuge erforderlich. Sie sind sowohl in der Beschaffung wie in der Instandhaltung teuer

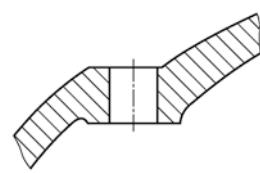
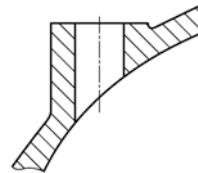
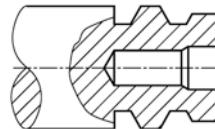
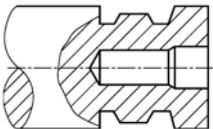


Abb. 4.216 In Richtung zur Einspannung ansteigende Durchmesser ermöglichen auf Drehautomaten gleichzeitiges Drehen und Bohren

4.12.2 Gestaltung für das Bohren, Senken, Reiben

Abb. 4.217, 4.218, 4.219, 4.220, 4.221, 4.222, 4.223, 4.224 und 4.225

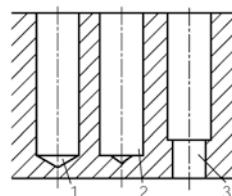
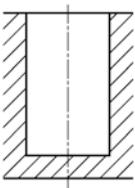


Abb. 4.217 Grundlöcher mit ebenem Bohrungsgrund sind zu vermeiden. Bei geforderter ebener Auflagefläche ist vorzubohren und nachfolgend zu senken (2, 3)

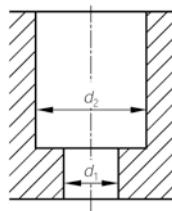
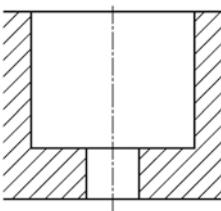


Abb. 4.218 Bei abgesenkten Bohrungen ist der Einsatz genormter Zapfensenker zu ermöglichen (d_1, d_2 ; s. hierzu DIN 373, DIN 375)

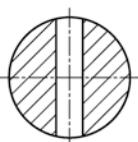
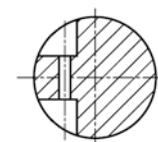
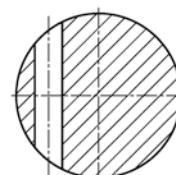


Abb. 4.221 Bohrungen in Wellen sind sowohl für den Anschnitt als auch für den Auslauf mit Flächen senkrecht zur Bohrungssachse vorzubereiten oder sie sind mittig zu führen. Die Vorbereitung kann durch Senken, besser durch Fräsen erfolgen, aber sie verteuert die Fertigung

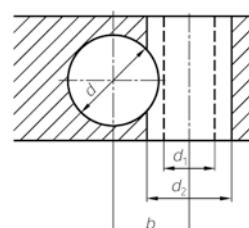
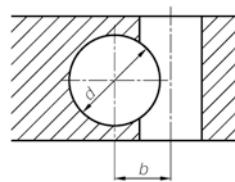


Abb. 4.222 Lässt sich die Durchdringung zweier Bohrungen nicht vermeiden, so ist der Abstand b so groß zu wählen, dass zunächst die Bohrungen mit den Durchmessern d und d_1 gebohrt und dann der Durchmesser d_2 mit dem Zapfensenker aufgebohrt werden kann

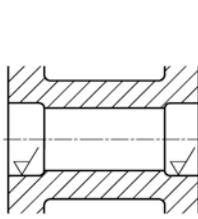


Abb. 4.223 Bohrungen, die gerieben werden müssen, sind so zu gestalten, dass die Reibahle durchgehend reiben kann 1. An Stelle eines Absatzes zum Einhalten des Abstandes können Buchsen (2) oder Sicherungsringe (3) vorgesehen werden



Abb. 4.224 Beim gleichzeitigen Bohren unterschiedlich harter Werkstoffe, wie z. B. für das Verstiften, besteht die Gefahr des Verlaufens und Abbrechens des Bohrs

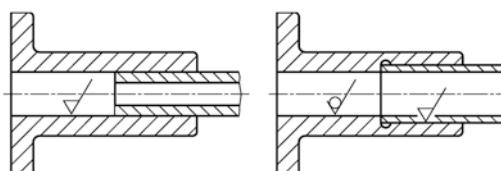


Abb. 4.225 Die Bearbeitung ist auf die Funktionsflächen zu begrenzen. Man achte dabei auf den Werkzeugauslauf

Gestaltung von Gewinden

Abb. 4.226, 4.227, 4.228, 4.229, und 4.230

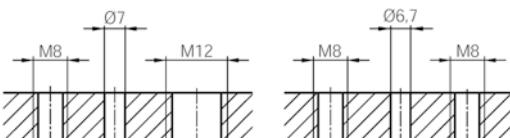


Abb. 4.226 Bohrungen und Gewinde an einem Werkstück sollen möglichst den gleichen Durchmesser haben. Erforderliche Anschraubteile können mit entsprechend erhöhter Anzahl von Schrauben kleineren Durchmessers befestigt werden

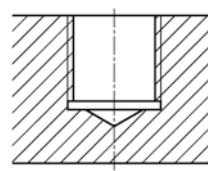


Abb. 4.227 Freistiche für Innengewinde sind nach DIN 76-1 bis 3 ausreichend lang vorzusehen, um den Werkzeugauslauf zu sichern

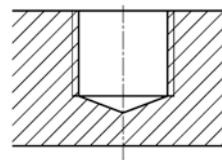


Abb. 4.228 Bei Gewindegrundlöchern kann das Gewinde nicht bis zum Ende der Bohrung geschnitten werden, da Gewindebohrer einen Anschnitt haben. Der Grundlochüberhang e ist nach DIN 76-1 bis 3 zu wählen

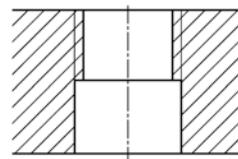


Abb. 4.229 Bohrungen, die sich an ein Gewinde anschließen, sollten immer gleich oder kleiner als der Kerndurchmesser des Gewindes ausgeführt werden, da sonst die Bearbeitung von beiden Seiten des Werkstücks erfolgen muss

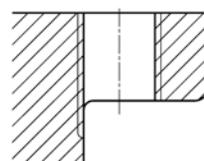


Abb. 4.230 Gewindedurchgangsbohrungen für Stiftschrauben müssen in ausreichendem Abstand von Wänden angeordnet werden, da sonst der Gewindebohrer einseitig beansprucht wird und verläuft (Bruchgefahr)

4.12.3 Gestaltung für das Fräsen

Abb. 4.231, 4.232, 4.233, 4.234, 4.235, 4.236, und 4.237

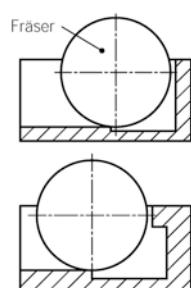
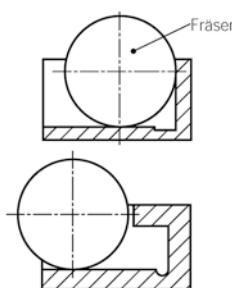
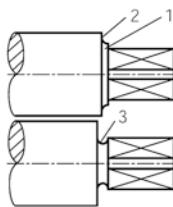
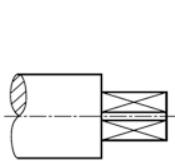


Abb. 4.231 Für das Fräsen eines Vierkants ist ein Absatz 1 oder 3 vorzusehen, damit die Stirnfläche 2 vor dem Fräsen fertiggedreht werden kann

Abb. 4.235 Das Fräsen mit großen Walzen- oder Messerkopffräsern ist wirtschaftlicher als das Fräsen mit kleinen Stirnfräsern. Bei der Lage der zu bearbeitenden Flächen sind die Abmessungen der Fräser zu berücksichtigen

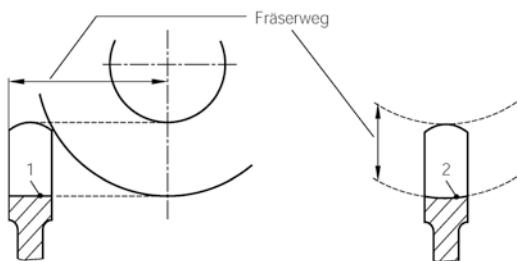


Abb. 4.232 Die eben verlaufende Grundfläche 1 der Gabel erfordert einen langen Fräsweg. Für die gewölbte Grundfläche 2 genügt das kürzere Eintauchen des Fräzers

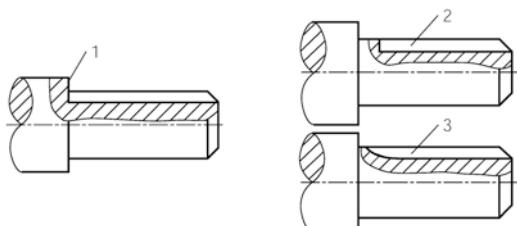


Abb. 4.236 Nuten, die bis an den Bund 1 geführt werden, sind zu vermeiden. Wirtschaftlicher als mit einem Schaftfräser, Nut 2, sind Nuten mit einem Scheibenfräser, Nut 3

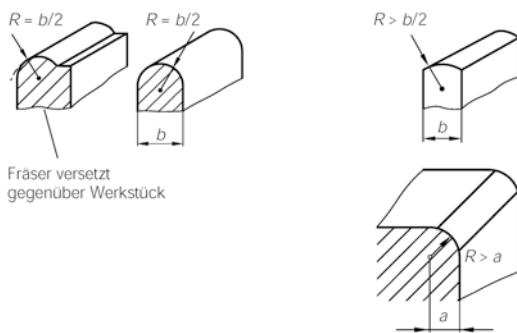


Abb. 4.233 Um saubere Werkstückkanten zu erhalten, ist der Radius genormter Werkzeuge $R > b/2$ zu wählen, so dass die Rundung nicht tangential in die vorhandenen Flächen übergehen muss. Rechts unten: Viertelkreis-Ver rundung

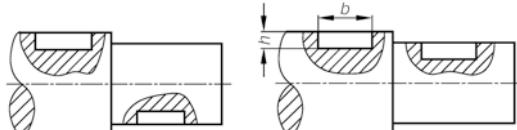


Abb. 4.237 Passfedernuten sind bei geringen Durchmesserunterschieden abgesetzter Wellen mit gleichen Abmessungen ($b \times h$) auszuführen. Sie sollten aus fertigungstechnischen Gründen in einer Flucht liegen



Abb. 4.234 Um alle Flächen in nur einer Einstellung fräsen zu können, müssen sie in einer Ebene liegen. Damit wird oft auch das Spannen des Werkstücks erleichtert

4.12.4 Gestaltung für das Hobeln und Stoßen

Abb. 4.238, 4.239, 4.240, und 4.241

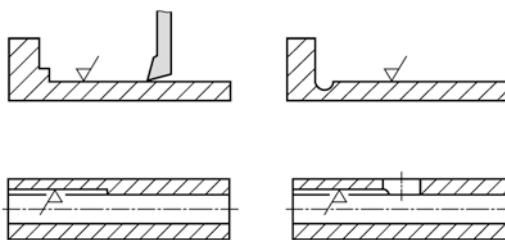
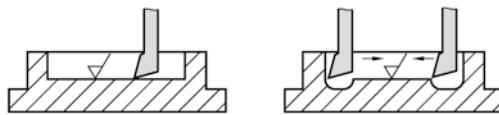


Abb. 4.238 Hobeln und Stoßen gegen eine Kante ist nicht möglich. Der Meiβel muss über die Bearbeitungsfläche hinauslaufen, um den Span vom Werkstück abzutrennen. Er muss schon vor Beginn des Spanens aus der abgehobenen Stellung, die er beim Rücklauf hatte, auf die Arbeitsposition zurückgefallen sein

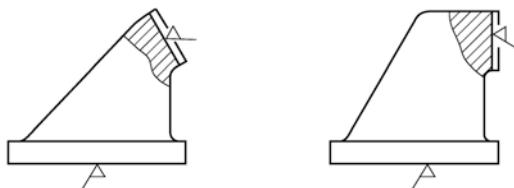


Abb. 4.239 Nicht senkrecht zueinander liegende Bearbeitungsflächen erschweren die Bearbeitung und erfordern u. U. Spannvorrichtungen



Abb. 4.240 Unterbrochene Flächen, die durch Hobeln oder Stoßen zu bearbeiten sind, sollen möglichst in einer Ebene liegen

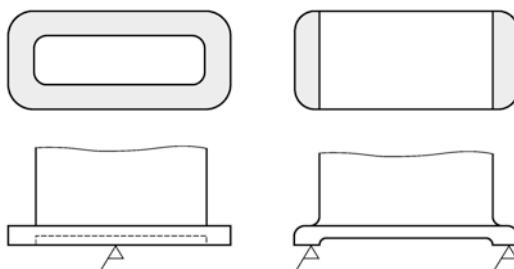


Abb. 4.241 Auflageflächen an Gehäusen und dgl. sind so zu gestalten, dass der Meiβel nicht die gesamte Grundfläche mit der Vorschubgeschwindigkeit überstreichen muss

4.12.5 Gestaltung für das Räumen

Abb. 4.242, 4.243, 4.244, 4.245, 4.246, und 4.247

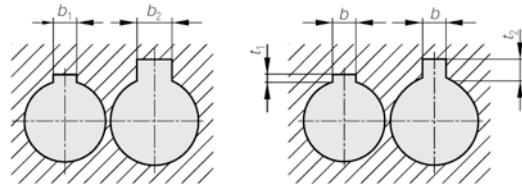


Abb. 4.242 Bei Serien- und Kleinserienfertigungen ist anzustreben, dass für alle Konstruktionen eine einheitliche Nutenbreite ($b_1 = b_2 = b$) für die Räumnuten vorgesehen wird. Dann können alle Nuten mit derselben Räumnadel geräumt werden

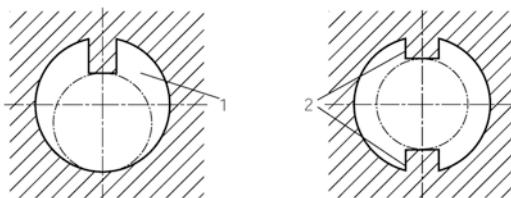


Abb. 4.243 Räumnadel und Werkstück werden bei 1 einseitig belastet. Das bedeutet Gefahr des Verlaufens oder des Werkzeugbruchs. Mehrfachsymmetrische Profile wie in 2 sind vorzuziehen



Abb. 4.244 Das zu räumende Werkstück muss an einer senkrecht zur Bearbeitungsrichtung liegenden Fläche 1 abgestützt werden, um Sondervorrichtungen zu vermeiden. Die schrägen Flächen 2 sind unvorteilhaft, da die Räumnadel dort einseitig schneidet und verläuft kann

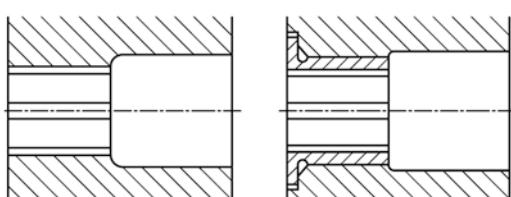


Abb. 4.245 Das Räumen in großen Werkstücken, z. B. in Gehäusen oder in Hohlwellen, kann übergroße Räumnadellängen erfordern. Günstiger ist das Einsetzen einer geräumten Buchse

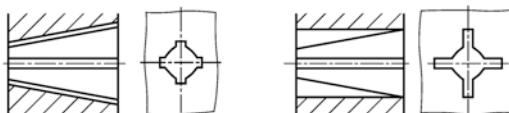


Abb. 4.246 Zwei oder mehrere Nuten in einer kegeligen Bohrung können nur dann in einem Zug geräumt werden, wenn sie parallel zur Achse verlaufen. Nuten, die parallel zum Kegelmantel angeordnet sind, erfordern für jede Nut einen Zug

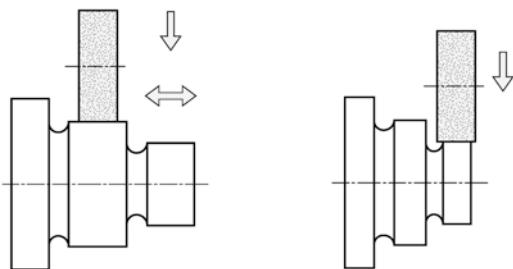


Abb. 4.251 Wenn es die Genauigkeitsforderungen erlauben, sollte Einstechschleifen ermöglicht werden. Dafür müssen die zu schleifenden Profillängen kleiner als die zu verwendende Schleifscheibenbreite sein



Abb. 4.247 Polygone mit geringer Seitenanzahl erfordern längere Räumwerkzeuge mit mehr Schneiden als solche mit größerer Seitenanzahl. Vier- und Sechsecke sind deshalb der Dreiecksform vorzuziehen

4.12.6 Gestaltung für das Schleifen

Abb. 4.248, 4.249, 4.250, 4.251, 4.252, 4.253, 4.254, 4.255, 4.256, und 4.257

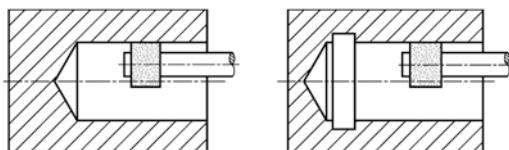


Abb. 4.248 Auch beim Innenschleifen muss Raum für den Schleifscheibenauslauf vorhanden sein

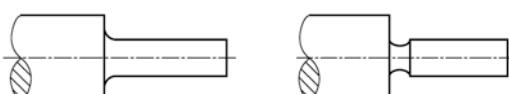


Abb. 4.249 Übergangsrandungen an Absätzen von zylindrisch zu schleifenden Teilen sind nur erlaubt, wenn im Quer- oder Schräg-Einstechverfahren mit Profilschleifscheiben rundgeschliffen wird. Für das genauere Längs-Rundschleifen muss vorher ein Einstich für den Schleifscheibenauslauf vorgedreht werden

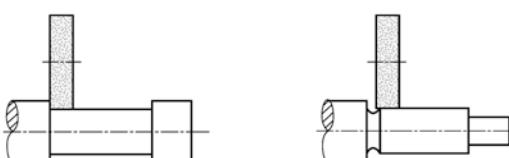


Abb. 4.250 Das Längs-Rundschleifen von Teilen, die beidseitig durch einen Bund begrenzt sind, ist teurer als das Schleifen mit axial ungehindertem Anstellen der Schleifscheibe

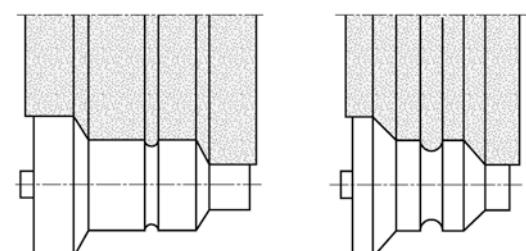


Abb. 4.252 Für das Einstech-Profil-Rundschleifen sollen möglichst kurze Profillängen angestrebt werden. Die maximalen Schleifbreiten sind durch die verwendbaren Scheibenbreiten und die Nachgiebigkeit des Werkstücks begrenzt

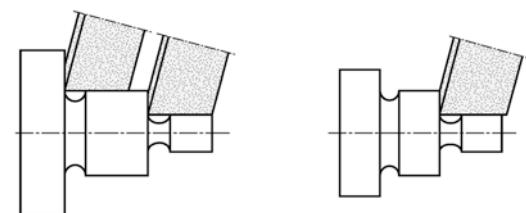


Abb. 4.253 Mehrere (möglichst alle) Formelemente sollten mit dem gleichen Schleifscheibenprofil schleifbar sein

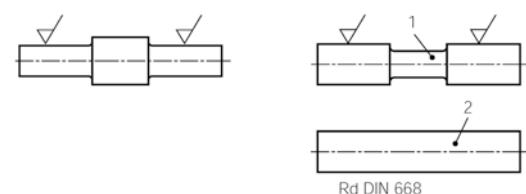


Abb. 4.254 Zylindrische Teile sind so zu gestalten, dass spitzenloses Schleifen möglich ist 1. Die wirtschaftlichste Lösung ist Ausführung 2, bei der blankgezogenes oder spitzenlos geschliffenes Halbzeug verwendet wird
Rd DIN 668

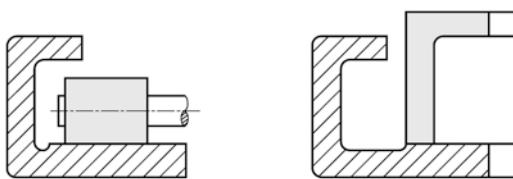


Abb. 4.255 Verdeckt liegende Flächen können nicht mit geraden Schleifscheiben oder Topfschleifscheiben erreicht werden. Die Anwendung möglichst großer Schleifkörper erlaubt ein wirtschaftliches Schleifen

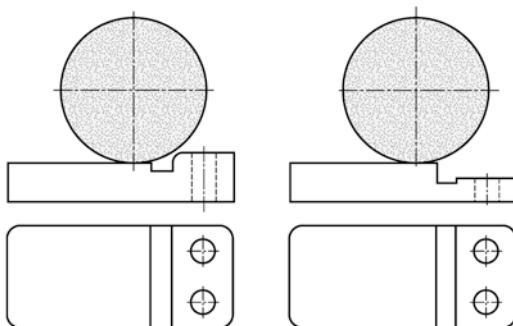


Abb. 4.256 Konturen, die über die Bearbeitungsfläche hinausragen, behindern in der Regel das Flachschleifen. Auch bei ausreichendem Werkzeugauslauf sollten Überstände vermieden werden

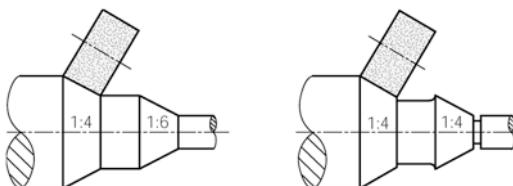


Abb. 4.257 Es sind möglichst gleiche Kegel an einem Werkstück vorzusehen (Schleifscheibenauslauf)

Ergänzendes und weiterführendes Schrifttum

- *Ardelt, T.:* Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik. Berlin: IPK, 2001.
- *Awiszus, B., Bast,J., Dürr,H., Matthes, J. (Hrsg.):* Grundlagen der Fertigungstechnik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. München, Wien 2003
- *Bargel, H.-J.:* Werkstoffkunde. 13. Aufl. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg 2022

- *Blickwedel, H.:* Erzeugung und Wirkung von Hochdruck-Abrasivstrahlen. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Fertigungstechnik Nr. 206. VDI-Verlag, Düsseldorf 1990.
- *Böge, A.:* Lexikon Technik. Vieweg-Verlag, Braunschweig, Wiesbaden 2020.
- *Cinar, M.:* Einsatzvorbereitung und Verschleißentwicklung Keramisch Gebundener CBN-Schleifscheiben, Dissertation, Universität Bremen, 1995
- DIN 1416: Räumwerkzeuge; Gestaltung von Schnidzahn und Spankammer, 1971-11.
- DIN 2310: Thermisches Schneiden. Teil 6: Einteilung, Prozesse, 2003-06.
- DIN 4760: Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem, 1982-06.
- DIN 6580: Begriffe der Zerspantechnik; Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges, 1985-10.
- DIN ISO 525: Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel; Allgemeine Anforderungen, 2000-08.
- DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung, 2003-09.
- DIN 8589: Fertigungsverfahren Spanen. Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09. Teil 1: Drehen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. 2003-09. Teil 2: Bohren, Senken, Reiben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09. Teil 3: Fräsen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09. Teil 4: Hobeln, Stoßen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09. Teil 5: Räumen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09.
- DIN EN 12584: Unregelmäßigkeiten an Brennschnitten, Laserstrahlschnitten und Plasmaschnitten – Terminologie, 1999-06.
- DIN EN ISO 1101: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf, 2014-10.
- DIN EN ISO 13565: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften, 1998-04

- DIN EN ISO 9013: Thermisches Schneiden – Einteilung thermischer Schnitte – Geometrische Produktspezifikation und Qualität, 2003-07.
- DIN ISO 1832: Wendeschneidplatten für Zerspanwerkzeuge – Bezeichnung, 2014-10.
- DIN ISO 513: Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden – Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen, 2014-05.
- DIN ISO 525: Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel – Allgemeine Anforderungen, 2015-02.
- DIN ISO 6104: Schleifwerkzeuge mit Diamant oder Bornitrid – Rotierende Schleifwerkzeuge mit Diamant oder kubischem Bornitrid – Allgemeine Übersicht, Bezeichnung und Benennungen, 2005-08.
- DIN 51385: Schmierstoffe; Bearbeitungsmedien für die Umformung und Zerspanung; Begriffe, 2013-09.
- DIN 8590: Fertigungsverfahren Abtragen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003-09.
- DIN 9812: Säulengestelle mit mittig stehenden Führungssäulen, 1981-12.
- *Degner, W., H. Lutze, u. E. Smejkal:* Spannende Formung, Hanser-Verlag, München, Wien, 18. Aufl. 2019.
- *Denkna, B., Tönshoff, H.K.:* Spanen-Grundlagen. Springer, 3. Aufl. 2011
- *Dietrich, J.:* Praxis der Zerspanetechnik. Springer Vieweg 2018
- *Klocke, F., u. W. König:* Fertigungsverfahren. Bd. 1: Drehen, Fräsen, Bohren. 8. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2008.
- *Flores, G.:* Grundlagen und Anwendungen des Honens. Vulkan-Verlag, Essen 1992
- *Fritz, A. H. und J. Sternberg:* Geräuschminderung beim Schweißen und Brennschneiden. EG-Forschungsbericht Nr. 7257-73-78/376/01. Berlin: TFH/ILFA-Institut 1988.
- *Fritz, A.H, A. Risse u. B. Wieneke-Toutaoui:* Formgebende Technologien, Mechatronik Dual, Fernstudieninstitut BHT, Berlin, 2. Aufl. 2022.
- *Guo, N.-S.:* Schneidprozeß und Schnittqualität beim Wasserabrasivstrahlschneiden. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Fertigungstechnik Nr. 328. VDI-Verlag, Düsseldorf 1994.
- *Haasis, G.:* Möglichkeiten der Optimierung beim Honen. Werkstatt und Betrieb 108 (1975), H. 2, S. 95/107.
- *Hinz, H. E.:* Gleitschleifen – Grundlagen, Maschinen, Chips, Compound, Analysen, Abwasser, Kostenrechnung. Reihe Kontakt und Studium, Fertigungstechnik, Bd. 65. Expert-Verlag 1980.
- *Hirschberg, H.:* Thermisches Schneiden von Stahl. Merkblatt STAHL 252. Düsseldorf 1985.
- *Hlavac, M.:* Mikroprofilschleifen von Hochfesten Stählen, Schriftenreihe des IWF TU Braunschweig, Dissertation, Vulkan Verlag, 2009
- ISO 3002: Grundbegriffe für das Zerspanen und Schleifen; Teil 1: Geometrie am Schneide teil spanender Werkzeuge; Allgemeine Begriffe, Bezugssysteme, Werkzeug, Spanbrecher und Wirkwinkel, 1992-12.
- *Klink, U.:* Honen. Jahresübersichten in der VDI-Z.
- *König, W., u. F. Klocke:* Fertigungsverfahren. Bd. 2. Schleifen, Honen, Läppen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2005.
- *König, W., u. F. Klocke:* Fertigungsverfahren. Bd. 3: Abtragen und Generieren. 3. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1997.
- *Leiseder, L. M.:* Kühlsmierstoffe für die Metallzerspanung. verlag moderne industrie, Landsberg/Lech 1999.
- *Linke, B.:* Wirkmechanismen beim Abrichten keramisch gebundener Schleifscheiben, Dissertation, RWTH Aachen, 2007
- *Malkin, S. u. C. Guo.:* Grinding Technology – Theory and Applications of machining with Abrasives. second ed. Industrial Press, New York, 2008
- *Maskus P.:* Prozeßintegrierte Qualitätsprüfung und Prozeßregelung beim Honen. Essen. Vulkan Verlag. 1992
- *Meyer, H.-R.:* Über das Abrichten von Diamant- und CBN-Schleifwerkzeugen. Jahr-

- buch: Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 50. Ausgabe. Vulkan-Verlag, Essen 1981.
- *Milberg, J.:* Werkzeugmaschinen – Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1992.
 - *Minke, E.:* Das Handbuch der Abricht-Technik. Verlag Rieger Diamantwerkzeuge GmbH, 1999
 - *Mushardt H.:* Modellbetrachtungen und Grundlagen zum Innenrundhonen. Reihe 2 Fertigungstechniken Nr 117. VDI Verlag. 1986
 - *Klyk, M.:* Hochgeschwindigkeitsschleifen mit CBN-Voraussetzungen für die wirtschaftl. Anwendung einer neuen Technologie. Inst. Für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik. TU Braunschweig. Vulkan Verlag, Essen 1993
 - *Perović, B.:* Arbeitsmappe für den Konstrukteur: Fertigungsverfahren, Werkzeuge, Spannvorrichtungen, Werkzeugmaschinen. VDI-Verlag, Düsseldorf 1993.
 - *Pintat, T., K. Wellinger, u. P. Gimmel:* Werkstofftabellen der Metalle. Kröner-Verlag, Stuttgart 2000.
 - REFA: Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Teil 2, Datenermittlung. Carl Hanser Verlag, München, Wien 1996.
 - *Salje, E.:* Begriffe der Schleif- und Konditioniertechnik. Vulkan-Verlag, Essen 1991
 - *Hoffmeister, H.-W.:* Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Vulkan-Verlag, Essen 2020.
 - *Schulze, G.:* Die Metallurgie des Schweißens. (VDI-Buch), 4. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2010.
 - *Spur, G. (Hrsg.):* Handbuch Spanende Fertigung. 2. Aufl. Carl Hanser-Verlag, München, 2014.
 - *Tamaschke, W.:* Schneiden von Stahlblech mit CO₂-Laser. Zeitschrift für industrielle Fertigung 72 (1982), S. 323/26.
 - *Tönshoff, H. K. u. B. Denkena:* Spanen – Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2011.
 - *Tönshoff, H. K., B. Karpuschewski, u. Ch. Blawitt:* Hochgeschwindigkeitszerspanung – Stand der Technik und Entwicklungstendenzen. VDI-Z. 139 (1997) Nr. 9, S. 26/33.
 - *Weck, M. u. Ch. Brecher:* Werkzeugmaschinen, Bd. 4. Automatisierung. 6. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2004.
 - *Wiens, A.:* Formhonen von Zylinderlaufbahnen. Vulkan-Verlag. 2011
 - [youtube wissensfloater](#) – Visuelle Kurzeinführung zum Drehen (BZI Remscheid)

Fügen

5

Alfred Herbert Fritz, Kai Hilgenberg und Carsten Bye

Zusammenfassung

Beim Fügen wird der Stoffzusammenhalt vermehrt (ebenso beim Beschichten). Die Werkstücke werden also miteinander verbunden (oder erhalten eine fest anhaftende Oberflächenschicht). In der Hauptgruppe 4 Fügen nach DIN 8580 sind die wichtigsten Fügeverfahren das Schweißen, Löten und Kleben. Beim Schmelzschweißen werden die Fügeflächen angeschmolzen. Meist wird mit einem Schweißzusatz gearbeitet, eine äußere Kraft wird nicht angewendet. Beim Pressschweißen dagegen wirkt eine äußere Kraft und es findet eine plastische Verformung statt. Dabei wird ohne Schweißzusatz gearbeitet. Das Löten ist ein Fügeprozess, bei dem die zu verbindenden Teile nicht aufgeschmolzen werden. Es entsteht (wie beim Schweißen) eine nicht lösbare Verbindung durch das Aufschmelzen des Lotes als Zusatzwerkstoff. Beim Kleben wird die Verbindung von Fügeteilen durch eine dünne Klebstoffschicht erreicht. Die Festigkeit hängt von der Eigenfestigkeit der Klebstoffe ab (Kohäsion) sowie von den Bindekräften zwischen Klebstoffschicht und Fügeteiloberfläche (Adhäsion).

A. H. Fritz (✉) · K. Hilgenberg
Berlin, Deutschland
E-Mail: fritz.herbert@t-online.de

C. Bye
Rieste, Deutschland
E-Mail: bye@phwt.de

Die Schweißverfahren wurden gestrafft und aktualisiert. Neu hinzugekommen ist das Fügen durch Umformen (Nieten, Bördeln, Clinchen). Diese Verfahren spielen eine wichtige Rolle für die Kfz-Fertigung.

5.1 Schweißen als Fügeverfahren

Die Fertigungsverfahren sind nach DIN 8580 in 6 Hauptgruppen eingeteilt, Tab. 1.1. Die vierte Hauptgruppe betrifft das *Fügen*, oft auch *Verbinden* genannt. Hier werden nur die Schweiß-, Lötz- und Klebverfahren beschrieben, die für den Maschinen-, Fahrzeug- und Apparatebau von Bedeutung sind.

Fügen ist das Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch fester Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt (DIN 1910-100).

5.1.1 Bedeutung der Schweißtechnik

Seit der Einführung des Gas- und Lichtbogenschweißens in der Industrie um 1900 hat die Bedeutung des Fügeverfahrens Schweißen erheblich zugenommen.

Technisch zuverlässige und wirtschaftliche Bauteile lassen sich häufig nur als

Schweißkonstruktion herstellen. Der Anteil der durch Schweißen und Löten hergestellten Metallverbindungen beläuft sich auf etwa 60 %. Mechanische Verbindungen (Nieten, Schrauben) werden immer seltener verwendet.

Die Fortschritte im Gasturbinenbau, in der Reaktortechnik, im chemischen Apparatebau, bei Hochgeschwindigkeitsflugkörpern, aber auch in der Mikroelektronik wären ohne die moderne Schweißtechnik nicht möglich. Neu hinzukommende Werkstoffe mit besonderen Eigenschaften (Korrosions-, Hochtemperatur-, Festigkeitseigenschaften) stellen erhöhte Anforderungen an die Schweißverfahren und die Fertigungstechnologie. Dabei gewinnen die leicht mechanisierbaren Verfahren mit hoher Reproduzierbarkeit an Bedeutung (MSG-, UP-, Elektronenstrahl-, Laserstrahlschweißen).

Die künftige Entwicklung in der Schweißtechnik wird gekennzeichnet durch:

- *Zwang zur Kostensenkung* (Rationalisierung, z. B. Mechanisierung oder Automatisierung),
- *erweiterte Anwendung* (z. B. neue Werkstoffe, neue Füge- und Trennmethoden) und
- *Verfahrenssubstitution* (z. B. durch einfacher mechanisierbare Verfahren).

Der Zwang zur Mechanisierung der Schweißverfahren ist aus wirtschaftlichen Gründen dringend erforderlich. Der *Mechanisierungsgrad*¹ liegt bei etwa 35 % (im Schienenfahrzeugbau bei 70 %, im Schiffbau bei 12 %), für die nächsten Jahre wird mit bis zu 65 % gerechnet.

5.1.2 Abgrenzung beim Fertigungsverfahren Schweißen

Schweißverbindungen sind *stoffschlüssige* Verbindungen, die durch die Wirkung von Adhäsions- oder Kohäsionskräften zwischen den Fügeteilen entstehen. Die Verbindung ist unlös-

bar, die Fügeteile werden im Gegensatz zu den Niet- und Schraubenverbindungen beim Lösen zerstört.

Die schweißgerechte Konstruktion ist nicht nur eine einfach nachgeahmte Guss- oder Nietkonstruktion, bei der die Nieten weggelassen werden und dafür an „geeigneten“ Stellen geschweißt wird. Wirtschaftlich und technisch optimale Schweißkonstruktionen können nur unter Beachtung der schweißspezifischen Konstruktionsprinzipien hergestellt werden. Häufig wird übersehen, dass ausreichende Zähigkeitseigenschaften der zu fügenden Werkstoffe ausschlaggebend für die Sicherheit geschweißter Bauteile sind. Bei Nietverbindungen spielt die Zähigkeit dagegen nur eine geringere Rolle.

Verglichen mit Gusskonstruktionen sind geschweißte Bauteile gegenüber einer *Schlagbeanspruchung* weniger empfindlich. Dagegen sind kleinere Bauteile in größeren Stückzahlen nach dem Gießverfahren im Allgemeinen sehr viel wirtschaftlicher herzustellen. Bei größeren Konstruktionen wird durch das Schweißen häufig

- Material eingespart,
- die konstruktive Freizügigkeit größer,
- die Gefahr des Ausschlusses geringer und
- das Ausbessern erleichtert.

Maschinenrahmen, Pressenständer, große Zahnräder, Rippenwellen, große Getriebegehäuse sind Beispiele für Konstruktionen, die erfolgreich geschweißt werden.

5.1.3 Einteilung der Schweißverfahren

Schweißen ist das Vereinigen von Werkstoffen unter Anwendung von Wärme und (oder) Kraft ohne oder mit Schweißzusatzwerkstoffen. Es kann durch Schweiß-Hilfsstoffe, z. B. Pasten, Pulver oder Gase, erleichtert werden. Das Vereinigen erfolgt wie in Abb. 5.1 im flüssigen oder im plastischen Zustand der Schweißzone (DIN 1910-100). Die Verbindung ist *stoffschlüssig*; sie

¹ Dies ist das Verhältnis des durch mechanische Schweißverfahren abgeschmolzenen Schweißguts zur gesamten Schweißgutmenge.

Schmelzschweißverfahren	Pressschweißverfahren	Kaltpressschweißen
z. B. Gasschweißen Lichtbogenschweißen Schutzgasschweißen	z. B. Widerstandspunktschweißen	z. B. Sprengschweißen (Reibschiessen, dynamische Verfahren)
Die Schweißverbindung kommt zustande durch die Wirkung von:		
Wärme Q z. B. Gasflamme Lichtbogen Elektronenstrahl Lichtstrahl, z. B. Laser	Wärme Q und Kraft F z. B. Stromwärme Reibung	Kraft F z. B. Statischer oder dynamischer Druck, Reibung (oszillierende oder rotierende Relativbewegung und statischer Druck)
<p>Die Schweißzone S ist der örtlich begrenzte Bereich, in dem der Werkstoff während des Schweißens in einen plastisch leicht verformbaren (↔↔↔) und (oder) flüssigen Zustand (●●●) gebracht wird.</p>		

Abb. 5.1 Wichtige Vorgänge beim Verbindungs-Schweißen

beruht auf der Wirkung zwischenatomarer und zwischenmolekularer Kräfte.

Nach Abb. 5.1 unterscheidet man die Verfahren:

- **Schmelzschweißen** Dies ist ein Schweißen bei örtlich begrenztem Schmelzfluss ohne Anwendung von Kraft mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoff.
- **Pressschweißen** Es handelt sich um ein Schweißen unter Anwendung von Kraft ohne oder mit Schweißzusatzwerkstoff. Örtlich begrenztes Erwärmen, u. U. bis zum Schmelzen, ermöglicht oder erleichtert das Schweißen.
- **Kaltpressschweißen** Hierbei wird nur Kraft (Verformungsarbeit) aufgewendet; die Verbindung entsteht im festen (plastischen) Zustand (Sprengschweißen).

Die in der Schweißtechnik verwendeten Wärmequellen und ihre Zuordnung zu den Schweißverfahren zeigt Tab. 5.1. Nach dem Zweck des Schweißens unterscheidet man:

- Verbindungsschweißen** (Abb. 5.2) und
- **Auftragschweißen.** In diesem Fall erfolgt das Beschichten eines Werkstücks durch Schweißen. Das Werkstück vergrößert

sich hierbei. Abgenutzte Werkstücke werden ergänzt, bei neuen die Verschleiß- und Korrosionseigenschaften verbessert. Die Auftragschicht kann artgleich sein (Werkstoff wird ergänzt) oder artfremd (Werkstoff mit besonderen Eigenschaften wird aufgetragen). In diesem Fall unterscheidet man das

- **Auftragschweißen von Panzerungen (Schweißpanzern):** Die Auftragung ist gegenüber dem Grundwerkstoff vorzugsweise verschleißfest;
- **Auftragschweißen von Plattierungen (Schweißplattieren):** Die Auftragung ist gegenüber dem Grundwerkstoff vorzugsweise chemisch beständig;
- **Auftragschweißen von Pufferschichten (Puffern):** Mit der Pufferschicht kann zwischen nicht artgleichen Werkstoffen eine beanspruchungsgerechte Bindung erzielt werden. Von besonderer Bedeutung für die Sicherheit ist eine ausreichende Verformbarkeit (Zähigkeit) der Pufferschicht.

Der **Aufschmelzgrad A_s** (Abb. 5.2) sollte in diesen Fällen möglichst klein sein, aber noch so groß, dass er fertigungstechnisch einfach realisierbar ist. Er ist das in Prozent ausgedrückte Verhältnis der Flächen- oder Mengenanteile a_G

Tab. 5.1 Die Energiequellen einiger wichtiger Schweißverfahren. In Klammern sind die „Ordnungsnummern“ (kennzeichnende Nummern der Schweißverfahren) nach DIN EN ISO 4063 angegeben

Energiequelle bzw. Energieträger (Energieform)	Schmelzschweißverfahren	Pressschweißverfahren
Reibung, Schockwellen, Ultraschall (mechanische Energie)	Rührreibschweißen (43)	Kaltpressschweißen (48) Ultraschallschweißen (41) Reibschweißen (42)
Brenngas-Sauerstoff-Flamme (Reaktionswärme)	Gasschweißen (311) Aluminothermisches Schweißen (71)	Gießpressschweißen (–) Gaspressschweißen (47)
Elektrischer Widerstand (elektrische Energie $Q = I^2 \cdot R \cdot t$)	Widerstandsschmelzschweißen, z. B. Elektroschlackeschweißen (72)	Widerstandspressschweißen, z. B. Widerstandspunktschweißen (21)
Lichtbogen (elektrische und elektromechanische Energie)	Lichtbogenhandschweißen (111) Schutzgasschweißen, z. B. WIG-Schweißen (141) Unterpulverschweißen (12)	Lichtbogenpressschweißen, z. B. Entladungsschweißen (77)
Strahlen (kinetische Energie leistungsflussdichter Strahlung, z. B. Elektronenstrahlen, Laserstrahlen)	Elektronenstrahlschweißen (51) Laserstrahlschweißen (52)	–

Zweck des Schweißens	Metallurgische und fertigungstechnische Hinweise
Verbindungsschweißen Zusatz = A	<p>Die Verbindbarkeit ist normalerweise vorhanden, wenn sich in der Mischzone »M« <i>keine</i> intermediären Verbindungen $A_m B_n$ bilden, bzw. wenn deren Menge hinreichend gering ist. Metallurgische Mängel, spröde, rissanfällige Bereiche und eine verringerte Korrosionsbeständigkeit wären sonst die Folge.</p> <p>Schweißtechnisch ist es hierfür vorteilhaft, den Grundwerkstoff (»A« oder »B«) möglichst wenig aufzuschmelzen, d. h. den Aufschmelzgrad A_s klein zu halten. Dies ist erreichbar mit Hilfe geeigneter Schweißverfahren (z. B. Gasschweißen, UP-Bandplattieren) oder durch Auftragen von <i>Pufferlagen</i>. Diese Arbeitstechnik ist aber wegen der sehr geringen Abschmelzleistung (Aufschmelzgrad A_s muss ausreichend klein sein) sehr teuer.</p> $A_s = \frac{a_G}{a_G + a_S} \cdot 100 \text{ in \%}.$
Auftragschweißen (Zusatz A »artgleich«)	<p>Die Eigenschaften der Auftragung weichen nicht wesentlich von denen des Grundwerkstoffes »A« ab: Es entsteht das <i>artgleiche Schweißgut</i>. Die Größe des Aufschmelzgrades ist daher von geringerer Bedeutung. Die Eigenschaften des Gefüges der Mischzone »M« entsprechen etwa denen von »A«. Mit dieser Auftragstechnik werden vorwiegend verschlossene (abgetragene) Werkstoffbereiche ergänzt.</p>
Auftragschweißen von Panzerungen, Plattierungen; der Zusatz B ist nicht »artgleich«	<p>»B« ist in der Regel hochlegiert (verschleißfest bzw. chemisch beständig), »A« meist un- oder niedriglegiert. »M« besteht daher häufig aus sprödem, rissanfälliglem Martensit und (oder) teilweise aus intermediären Verbindungen. Der Aufschmelzgrad, d. h., die Menge von »M« muss gering gehalten werden. Dies ist möglich z. B. durch UP-Bandplattieren. Bei kleineren aufzutragenden Mengen ist auch das Gasschweißen sehr geeignet.</p>
Auftragschweißen von Pufferschichten (P), der Zusatz ist nicht »artgleich«	<p>Der Pufferwerkstoff muss zwischen nicht artgleichen Werkstoffen »A« und »B« eine beanspruchungsgerechte Bindung erzeugen. Häufig wird mit Nickel oder nickelhaltigem Zusatz gearbeitet. Wichtigste Eigenschaft ist eine möglichst große Zähigkeit. Die verformbare Zwischenschicht kann Schweißspannungen abbauen und somit eine Rissbildung weitgehend verhindern. Diese Forderung wird durch die Tatsache unterstützt, dass Nickel mit sehr vielen Metallen eine <i>lückenlose Mischkristallreihe</i> bzw. ausgedehnte <i>Mischkristallbereiche</i> bildet.</p>

Abb. 5.2 Metallurgische Vorgänge beim Schmelzschweißen unterschiedlicher Werkstoffe

von aufgeschmolzenem Grundwerkstoff zum gesamten Schweißgut $a_G + a_S$, d. h. zum aufgeschmolzenen Grund- und Zusatzwerkstoff.

Nach Art der Fertigung bzw. nach dem Grad der Mechanisierbarkeit unterscheidet man entsprechend Abb. 5.3:

- Das *Handschweißen* (manuelles Schweißen). Sämtliche den Verlauf des Schweißprozesses kennzeichnenden Vorgänge werden von Hand ausgeführt.

- Das *teilmechanische Schweißen*. Einige den Ablauf des Schweißens kennzeichnenden Vorgänge laufen mechanisch ab.
- Das *vollmechanische Schweißen*. Sämtliche den Ablauf des Schweißens kennzeichnenden Vorgänge laufen mechanisch ab.
- Das *automatische Schweißen*. Sämtliche den Ablauf des Schweißens kennzeichnenden Vorgänge einschließlich aller Nebentätigkeiten (Werkstückwechsel, Werkstückzufuhr und Werkstückablauf) laufen selbsttätig ab.

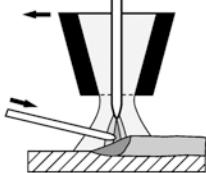
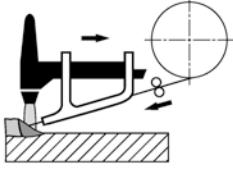
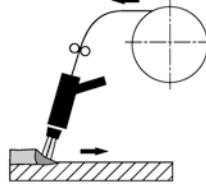
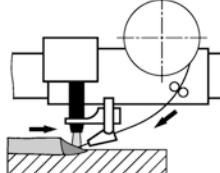
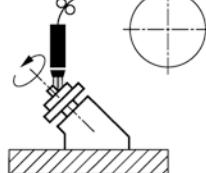
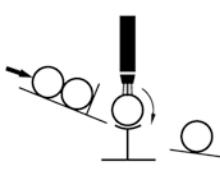
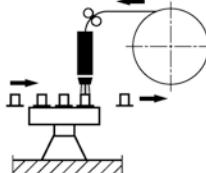
Benennung	Beispiele Schutzgasschweißen		Bewegungs-/Arbeitsabläufe		
	WIG (141)	MSG (13)	Brenner-/ Werkstück- führung	Zusatz- vorschub	Werkstück- handhabung
Handschweißen (manuelles Schweißen)		—	manuell	manuell	manuell
Teilmechanisches Schweißen			manuell	mechanisch	manuell
Vollmechanisches Schweißen			mechanisch	mechanisch	manuell
Automatisches Schweißen			mechanisch	mechanisch	mechanisch

Abb. 5.3 Einteilung der Schweißverfahren nach der Art der Fertigung, Beispiele aus DIN 1910-100 (DIN ISO 857-1)

Bei allen Schweißverfahren ist für die einwandfreie Bindung eine möglichst große *Sauberkeit* erforderlich (Freiheit von Rost, Fett, Öl, Farben, Feuchtigkeit, Belägen aller Art, Bewüchsen). Durch die sehr großen Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit bleibt das Schmelzbad nur einige Sekunden flüssig. Die aus den Verunreinigungen (und der umgebenden Atmosphäre) entstehenden Gase können nicht vollständig entweichen. Die Folgen sind Poren und metallurgische Mängel (z. B. Abbrand der Legierungselemente, Zähigkeitsverlust durch gelöste Gase).

Der extrem schädigende Einfluss der atmosphärischen Gase (Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff) erfordert besonders bei den Schmelzschweißverfahren einen wirksamen und zuverlässigen Schutz des Schmelzbades vor einem Luftzutritt. Je besser dieser Schutz ist, desto höher ist die metallurgische Qualität des Schweißguts, d. h., die Sicherheit des Bauteils gegen Versagen ist größer. Dieser Gesichtspunkt muss bei der Wahl des Schweißverfahrens für das Fügen metallurgisch empfindlicher Werkstoffe besonders beachtet werden, die z. B. eine große Affinität zu Sauerstoff haben (Chrom, Aluminium, Titan) oder bei einer Gasaufnahme leicht verspröden (Titan, Tantal, Molybdän und Zirkonium).

5.1.4 Hinweise zur Wahl des Schweißverfahrens

Die Wahl des „optimalen“ Schweißverfahrens hängt von einer Vielzahl oft schwer beeinflussbarer Faktoren ab:

- Art der Bauteile,
- Stückzahl,
- Werkstoff,
- Werkstückdicke sowie
- betriebliche Gegebenheiten.

Das für die Anwendung „optimale“ Schweißverfahren ist meist erst nach sorgfältiger

Analyse *aller* genannten Einflussgrößen zu ermitteln.

Art der Bauteile

Wesentlich für die Verfahrensauswahl ist die Größe der Konstruktion sowie die Zugänglichkeit der zu fügenden Teile. Die Zugänglichkeit bestimmt die Schweißzeit und damit in hohem Maße die Kosten. Der Konstrukteur sollte darauf achten, dass Schweißarbeiten möglichst nur in einer der beiden Normallagen wie in Abb. 5.4 ausgeführt werden. Mithilfe einfacher Dreh- und Wendevorrichtungen lassen sich Zwangslagen oft in Normallagen „umwandeln“. Außerdem muss bedacht werden, dass Zwangslagen in den meisten Fällen nur mit teureren Handschweißverfahren (z. B. Gassschweißen, Lichtbogenhandschweißen) hergestellt werden können und überwiegend nicht mit den wirtschaftlichen teil- oder vollmechanischen Verfahren (WSG-, MSG-, UP-, EB-Schweißverfahren, Plasmaschweißen).

Die Schweißzeit für ein Bauteil, das in der Zwangslagentechnik hergestellt wird, ist etwa um den Faktor 2 bis 3 größer als bei Normallagen. Die Wirtschaftlichkeit ist damit deutlich geringer. Wegen der erheblichen manuellen Anforderungen kommen für Zwangslagenschweißungen nur hochqualifizierte und erfahrene Schweißer in Frage. Die größere Fehlerwahrscheinlichkeit dieser Schweißverbindungen führt außerdem zu einem bemerkenswert großen Prüfaufwand.

Stückzahl

Bei kleinen Stückzahlen sind viele Schweißverfahren geeignet. Häufig wird die Wahl von den betrieblichen Gegebenheiten bestimmt. Große Stückzahlen erfordern schon aus wirtschaftlichen Gründen mechanisierte Schweißverfahren. Der Einsatz von Vorrichtungen ist unerlässlich.

Werkstoff

Unabhängig von allen anderen Einflussgrößen bestimmt der Werkstoff in den meisten Fällen die Wahl des Verfahrens. In erster Linie sind folgende werkstoffliche Besonderheiten zu beachten:

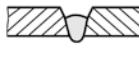
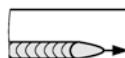
Normallagen		Zwangslagen				
PA (w)	PB (h)	PC (q)	PD (hü)	PE (ü)	PF (s)	PG (f)
						
Alte Bezeichnung der Schweißpositionen nach DIN 1912-2 (neu: DIN EN ISO 6947)						
w waagerecht (Wannenlage) h horizontal	s senkrecht f fallend	q waagerecht an senkrechter Wand (»Querposition«)	hü horizontal überkopf ü überkopf			
Neue Bezeichnung der Schweißpositionen nach DIN EN 287-1						
PA Wannenposition PB Horizontal-Vertikalposition	PC Querposition PD Horizontal-Überkopfposition	PE Überkopfposition PF Steigposition	PG Fallposition			
Ausführungszeiten in Prozent (bezogen auf die PA-Position)						
100	130	180	220 bis 250	220	70	

Abb. 5.4 Schweißpositionen nach der Bezeichnungsweise der DIN 1912-2 (neu: DIN EN ISO 6947) und der DIN EN 287-1. Die zum Schweißen in den verschiedenen Positionen erforderlichen Ausführungszeiten sind bezogen auf die PA-Position

- Die *Gaslöslichkeit* (Porenbildung, Gefahr der Versprödung), z. B. bei Ti, Al, Mo, Stahl;
- der *Abbrand von Legierungselementen* (Zähigkeitsverlust, Einschlüsse), z. B. bei höherlegierten Stählen und NE-Metallen;
- die *festhaftende Oxidhaut*, z. B. bei Al, Mg, Ti und deren Legierungen. Die Beseitigung der Oxide ist nur mit sehr aggressiven Flussmitteln möglich (besser „flussmittelfreie“ Verfahren wie WIG oder MIG).

Das Gasschweißen wird für metallurgisch empfindliche Stähle und NE-Metalle praktisch nicht angewendet, da bei Sauerstoffüberschuss leicht Abbrand, bei Acetylenüberschuss Aufkohlung (Versprödung, Carbidbildung) auftreten kann.

Werkstückdicke

Verbindungsschweißungen an Fügeteilen mit einer Werkstückdicke unter 1 mm erfordern mechanisierbare Verfahren und einen Badschutz, der das Durchfallen des flüssigen Schweißguts verhindert und die Schweißwärme abführt. Das Schweißen von Hand kann nur von hochqualifizierten Schweißern ausgeführt werden. Es birgt die Gefahr, dass bei ungleichmäßiger

Schweißgeschwindigkeit das Schmelzbad durch den Luftspalt fällt oder die Kanten der Nahtflanken nicht erfasst werden. Mit zunehmender Werkstückdicke werden schon aus wirtschaftlichen Gründen Verfahren mit großer Wärmezufuhr, d. h. größerer *Abschmelzleistung*, bevorzugt. Aus metallurgischen Gründen darf aber die Energiezufuhr nie bestimmte, von der Werkstückdicke, der Vorwärmtemperatur und von der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes abhängige Grenzwerte überschreiten. Großvolumiges, überhitztes (Abbrand) und heißrissanfälliges Schweißgut mit unerwünschtem *Stängelgefuge* wäre die Folge.

Zum Schweißen dickwandiger Bauteile eignet sich nur eine geringe Anzahl von Hochleistungs-Verfahren, nämlich das UP-, Elektroschlacke-, Elektronen- und Laserstrahlschweißen.

Betriebliche Gegebenheiten

In vielen Fällen müssen wohlgrundete Überlegungen zur Wahl des Schweißverfahrens wegen betrieblicher Gegebenheiten geändert werden. Aus wirtschaftlichen Gründen – das konkurrierende Fabrikat ist z. B. billiger oder technisch hochwertiger – muss ein nicht

optimales, aber ausreichendes und preiswerteres Schweißverfahren eingesetzt werden. Sind auch notwendige Einrichtungen (z. B. Glühöfen) nicht verfügbar, muss man fachgerecht improvisieren.

5.2 Werkstoffliche Grundlagen für das Schweißen

Beim Herstellen von Schweißverbindungen, die alle notwendigen technischen und wirtschaftlichen Anforderungen erfüllen sollen, sind eingehende Kenntnisse der beim Schweißen ablaufenden Gefüge- und Eigenschaftsänderungen nötig.

5.2.1 Wirkung der Wärmequelle auf die Werkstoffeigenschaften

Die Wärmequellen für Schweißverfahren müssen folgende Aufgaben erfüllen:

- *Schmelzen des Grund- und Zusatzwerkstoffes.* Wegen der i. Allg. großen Werkstückmasse und der großen thermischen Leitfähigkeit der Metalle sind meistens Verfahren mit hoher Leistungsdichte erforderlich: *Schmelzschiessverfahren*.
- *Erhöhen der Verformbarkeit der Fügeteile.* Sie ist für Verfahren bedeutsam, bei denen *kein* Fügeteil aufgeschmolzen wird: Reib-, Kaltpressschweißen. Die größere Verformbarkeit und geringere Festigkeit erleichtern den Bindevorgang.
- *Verbessern der Reaktionsfähigkeit der Teile.* Eine erhöhte Temperatur der Fügeteile erleichtert den Bindevorgang, weil Diffusionsvorgänge, metallurgische oder chemische Reaktionen und die Rekristallisation beschleunigt ablaufen können: Z. B. tieferer Einbrand bei „heißen“ Schweißverfahren (MIG/MAG, UP-Verfahren). In manchen Fällen müssen störende Oberflächenschichten (Oxidfilme) mithilfe chemisch aktiver Substanzen (Flussmittel) metallurgisch unwirksam gemacht werden. Dazu sind ausreichend hohe Temperaturen notwendig.

Wenn Verfahren mit großer Leistungsdichte² verwendet werden, ist der *thermisch beeinflusste Bereich* der Verbindung klein. Mit der Wahl von auf den Werkstoff angepassten Verfahren können die metallurgischen Schwierigkeiten beseitigt oder verringert werden.

Daraus folgt:

Der Werkstoff diktirt die Schweißbedingungen

Die Schweißverfahren, die Einstellwerte (z. B. Strom, Spannung und Vorschubgeschwindigkeit) und die davon beeinflussten Temperaturfelder sind in Abhängigkeit vom Werkstoff zu wählen. Besonders die Intensität der Wärmequelle muss kontrolliert werden, um unzulässige Werkstoffänderungen durch den Schweißprozess auszuschließen.

5.2.2 Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe

Die physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe beeinflussen maßgebend

- das Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen (Schweißeignung) und demzufolge die mechanischen Gütekriterien und die Sicherheit der Schweißverbindungen sowie
- die Eignung und Wirksamkeit des Schweißverfahrens.

Der **elektrische Widerstand R** der Werkstoffe (spezifischer Widerstand ρ bzw. Leitfähigkeit λ) ist für die einwandfreie Funktion verschiedener Schweißverfahren von großer Bedeutung. Beim Widerstandsschweißen (Abschn. 5.4) beträgt die

²Der Begriff „Leistungsdichte“ in W/cm^2 , kennzeichnet die Fähigkeit der Wärmequelle, wieviel Energie sie jedem cm^2 der Oberfläche zuführen kann. Davon zu unterscheiden ist die Kenngröße Streckenenergie. Sie gibt die Wärmemenge an, die jedem Zentimeter der Schweißnahtlänge von der Wärmequelle zur Verfügung gestellt wird.

Tab. 5.2 Physikalische Eigenschaften wichtiger metallischer Werkstoffe

Werkstoff	Schmelzpunkt ϑ_s bzw. Schmelzbereich °C	spezifischer Widerstand ρ Ωm	Wärmeleit- fähigkeit λ W/(mK)	Wärme- ausdehnungs- koeffizient α $10^{-6}/\text{K}$
Aluminium	660	$2,6 \cdot 10^{-8}$	238,6	23,9
Kupfer	1080	$1,7 \cdot 10^{-8}$	389	17,7
CuZn10	1050	$13,5 \cdot 10^{-8}$	75,4	16,4
Eisen	1530	$10 \cdot 10^{-8}$	81	12
(niedrig-)legierter Stahl	1430 bis 1500	$10 \cdot 10^{-8}$ bis $20 \cdot 10^{-8}$	33,5 bis 50,5	11,4
austenitischer Stahl	1390 bis 1470	$75 \cdot 10^{-8}$	15	18,3
Magnesium	650	$4,5 \cdot 10^{-8}$	155	26,1
Molybdän	2610	$5,2 \cdot 10^{-8}$	142,4	5,0
Nickel	1450	$7 \cdot 10^{-8}$	92	13,3
NiCu	1350	$48 \cdot 10^{-8}$	25	14
Tantal	2996	$12,5 \cdot 10^{-8}$	50	6,5
Titanlegierungen	1550 bis 1600	$50 \cdot 10^{-8}$ bis $160 \cdot 10^{-8}$	79,5 bis 180	5,0 bis 7,0
Wolfram	3410	$5,6 \cdot 10^{-8}$	150	4,6

zwischen den zu schweißenden Werkstücken entwickelte Wärmemenge

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t.$$

Sie ist z. B. beim Kupfer wegen des geringen spezifischen Widerstandes sehr gering. Dieser Werkstoff ist daher sehr schlecht widerstandsschweißgeeignet.

Mit zunehmender **Wärmeleitfähigkeit** λ der Werkstoffe sind in der Regel Schweißverfahren mit großer Leistungsdichte erforderlich, um den beim Schweißen entstehenden Wärmeverlust auszugleichen. In der Praxis werden die Fügeteile aus gut wärmeleitenden Werkstoffen (z. B. Cu, Al) meistens zusätzlich vorgewärmt. Die sehr hohe Abkühlgeschwindigkeit bei Verfahren mit großer Leistungsdichte führt sonst zu rissbegünstigenden thermischen Spannungen. Reine Metalle besitzen die größte Wärmeleitfähigkeit; Legierungselemente setzen sie z. T. stark herab.

Der **Wärmeausdehnungskoeffizient** α bestimmt den Umfang der beim Schweißen entstehenden Änderungen der Bauteilabmessungen (Verzug, Schrumpfen, Verwerfen) und die Höhe der entstehenden Eigenspannungen. Bei unzureichender Verformbarkeit des Werkstoffes besteht die Gefahr der Rissbildung. Ge-schweißte Bauteile aus Werkstoffen mit großem Wärmeausdehnungskoeffizienten (Kupfer, Alu-

minium, Magnesium) erfordern daher auch oft aufwendige Richtarbeiten (bzw. eigenspannungsvermindernde Vorrichtungen), wenn Abmessungen mit kleinen Toleranzen vorgeschrieben sind.

In Tab. 5.2 sind einige physikalische Eigenschaften ausgewählter Metalle angegeben. Abb. 5.5 zeigt vereinfacht den Einfluss einiger wichtiger physikalischer Eigenschaften der Werkstoffe auf das zu erwartende Schweißverhalten bzw. auf die Wahl der Schweißverfahren.

Die **Gaslöslichkeit** der Metalle verursacht beim Schweißen folgende Schwierigkeiten:

- falls das Gas im Metall unlöslich ist: *Porenbildung, Gaseinschlüsse*.
- falls das Gas im Metall löslich ist: Die Bildung von *Einlagerungsmischkristallen* (das Gas wirkt wie ein „Legierungselement“!), was häufig mit einer großen Abnahme der Zähigkeit verbunden ist. In vielen Fällen muss mit Rissbildung gerechnet werden. Ein typisches Beispiel für die schädigende Wirkung von Gasen ist die durch Wasserstoff hervorgerufene extrem gefährliche Kaltrissbildung bei den hochfesten vergüteten Feinkornbaustählen.
- falls das Gas Verbindungen bildet (z. B. Fe_2N): Abhängig von der Temperatur und

Betrachtete Eigenschaft	Einfluss auf die Schweißverbindung bzw. auf die Schweißverfahren
<p>thermische Leitfähigkeit λ</p>	<p>λ groß: Starker Wärmeabfluss in den Grundwerkstoff, daher sind i. Allg. Schweißverfahren mit hoher Leistungsdichte und (oder) Vorwärmern erforderlich. Temperaturgefälle ist gering, d. h., der durch die Schweißwärme beeinflusste Bereich des Werkstoffs (Wärmeeinflusszone WEZ, Abschn. 3.2.3) ist groß, die Schweißeigenspannungen sind geringer, der Verzug ist oft größer. <i>Beispiele:</i> Cu, Al, Mg.</p> <p>λ klein: Geringer Wärmeabfluss, großes Temperaturgefälle, Breite der WEZ gering, schärferer Eigenspannungszustand. <i>Beispiel:</i> austenitischer CrNi-Stahl.</p>
<p>elektrischer spez. Widerstand ρ</p>	<p>ρ groß: Wichtige Eigenschaft beim Widerstandsschweißen. Erzeugen ausreichender Energie zwischen den Blechen ist leichter. <i>Beispiele:</i> Stahl, Ti, NiCu30.</p> <p>ρ klein: Zum Herstellen der Punktschweißverbindung benötigte Energie ist schwer erzeugbar, besondere Maßnahmen sind erforderlich. <i>Beispiel:</i> Cu, durch große Wärmeleitfähigkeit ist das Widerstandsschweißen zusätzlich erschwert.</p>
<p>Wärmeausdehnungskoeffizient α</p>	<p>Bleche sind zwischen unbeweglichen Auflagern A und B eingeschweißt.</p> <p>α groß: Starke Ausdehnung der Bleche beim Erwärmen, die bei kleinen Werkstückdicken zum Ausknicken (elastische und plastische Verformung), bei großen zum Stauchen der Fügeteile führt (Verformung ist überwiegend plastisch). Beim Abkühlen Schrumpfen um den gleichen Betrag ($2 \cdot \Delta l$), wodurch sehr hohe Schrumpfspannungen bzw. Risse entstehen.</p> <p>α klein: Schweißeigenspannungen und Verzug sind gering, günstig vor allem bei starrer Einspannung und großer Wanddicke der Fügeteile, geringe Rissneigung der Schweißverbindung. Bei geringen Wanddicken ist der Verzug (Schrumpfung) der geschweißten (vor allem der großflächigen) Konstruktion gering.</p>

Abb. 5.5 Einfluss wichtiger physikalischer Eigenschaften der Werkstoffe auf ihr Schweißverhalten

den Abkühlbedingungen ist die Verbindung im Grundwerkstoff gelöst oder nicht gelöst. Nach dem Abkühlen befindet sich das Gas entweder gelöst im Gitter, oder es liegt als *Verbindung* (Teilchen bzw. Partikel) vor. In diesem Fall werden die Gütekriterien der Schweißverbindung durch Einschlüsse nur mäßig verschlechtert.

Tab. 5.3 zeigt das Lösungsverhalten der wichtigen Gase Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff in Metallschmelzen beim Schmelzpunkt.

5.2.3 Einfluss des Temperaturfeldes

Die fachgerechte und wirtschaftliche Auswahl eines Schweißverfahrens ist ohne Kenntnis der

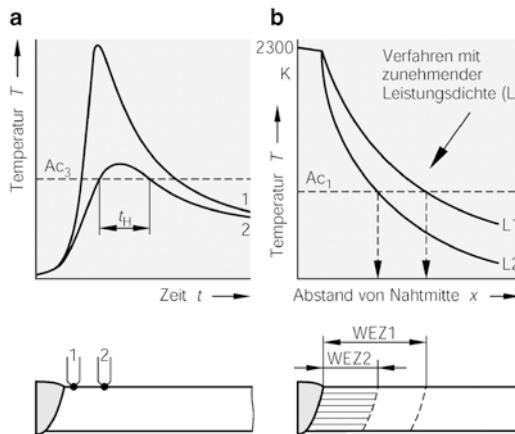
verfahrenstechnischen Besonderheiten nicht möglich. Dazu gehören die von der Schweißwärme erzeugten Eigenschaftsänderungen im Grundwerkstoff und in der Wärmeeinflusszone.

Der Werkstoff wird an der Schweißstelle durch meist punktförmig wirkende Wärmequellen aufgeschmolzen. Die Folgen sind sehr große Aufheizgeschwindigkeiten (bis zu etwa 1000 K/s) und Abkühlgeschwindigkeiten (einige 100 K/s). Die Verweilzeit bei der Höchsttemperatur beträgt dabei nur einige Sekunden, wie Abb. 5.6a erkennen lässt.

Die „Wärmebehandlung“ beim Schweißprozess unterscheidet sich deutlich von technischen Wärmebehandlungen (z. B. Normalglühen oder Härteten). Sie ist die Ursache für eine ganze Reihe meist nachteiliger metallurgischer Änderungen

Tab. 5.3 Löslichkeit der Gase (Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff) in Metallschmelzen beim Schmelzpunkt

Zustandsform	Löslichkeit	Gas		
		Wasserstoff	Stickstoff	Sauerstoff
Gas bildet keine Verbindung	Gas löslich	Al, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, W, Zn	Fe	Fe, Ag
	Gas unlöslich	Au	Cu, Ag, Au, Platin-Metalle	Au, Platin-Metalle
Gas bildet Verbindung	Verbindung stark löslich	Ti, Zr, Th, V, Nb, Ta	Ti, Zr, Th, V, Nb, Ta	Ti, Zr, Th, V, Nb, Ta
	Verbindung mäßig löslich	Li, Na, K, Cs, Cu	Co, Cr, Fe, Mn, Mo, W	Cu, Co, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni
	Verbindung unlöslich	-	Li, Na, K	Al, Mg, Be, Zn

**Abb. 5.6** Temperaturverlauf in der Wärmeinflusszone (WEZ) einer geschweißten Verbindung aus Stahl (schematisch). **a** zeitlicher Verlauf an zwei „Punkten“ der WEZ (Thermoelemente 1 und 2), t_H = „Austenitisierungsdauer“ **b** Verlauf in Abhängigkeit vom Abstand von der Schweißnahtmitte für zwei Verfahren mit unterschiedlicher Leistungsdichte L ($L_1 < L_2$)

des Werkstoffes und unerwünschter Eigenschaften des geschweißten Bauteils:

- Die **Aufheizgeschwindigkeiten** sind sehr groß. Alle Gefügeumwandlungen (z. B. die für Stahl wichtige Umwandlung: α - Fe \rightarrow γ - Fe) erfolgen nicht vollständig, weil die Haltezeiten (z. B. „Austenitisierungszeit“ t_H in Abb. 5.6a) zu gering sind. Carbide, Nitride, Oxide, Gefüge-Inhomogenitäten (z. B. Kristallseigerungen) können daher nicht vollständig

beseitigt werden. Große Temperaturgradienten (Abb. 5.6b) führen zu größeren Spannungen.

- Die **Maximaltemperaturen** sind in der Nähe der Schmelzgrenze sehr hoch (Abb. 5.6a). Trotz der sehr kurzen zeitlichen Einwirkung ist die Wirkung erheblich: *Kornwachstum (Grobkorn)* und Lösung von Ausscheidungen (Carbiden, Nitriden) sind die Folge.
- Infolge der großen **Abkühlgeschwindigkeiten** in der Nähe der Schmelzgrenze wird bei der Werkstoffgruppe „wärmehandelbarer Stähle“ die Bildung aufgehärteter (d. h. martensitischer) rissanfälliger Bereiche begünstigt, Abb. 5.7. Daher ist es erforderlich, dass die nur werkstoffabhängige **obere kritische Abkühlgeschwindigkeit** v_{ok} überschritten wird. Je größer die Leistungsdichte des Verfahrens ist, desto größer ist die Abkühlgeschwindigkeit [Abb. 5.6a, Kurve 1 und 2]: Für aufhärtungsfreudige Stähle und andere empfindliche Werkstoffe sind daher derartige Verfahren nicht besonders gut geeignet. Eine möglichst langsame Abkühlung ist anzustreben. Auch diese Maßnahmen gehören zur fachgerechten Auswahl der Schweißverfahren.

Man bezeichnet den Bereich der Schweißverbindung, in dem die Schweißwärme Gefügeumwandlungen oder in weiterem Sinne Gefügeänderungen hervorruft, als **Wärmeinflusszone (WEZ)**, Abb. 5.6 und 5.7. Bei umwandlungsfähigen Stählen reicht sie z. B.

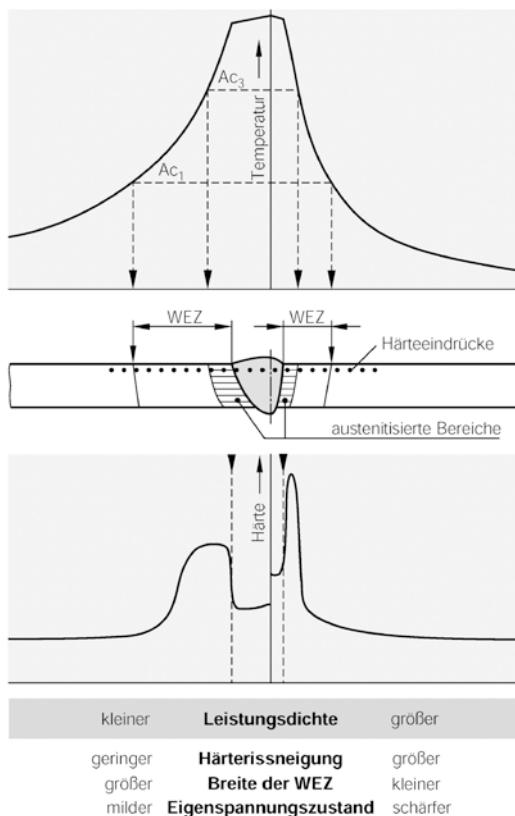


Abb. 5.7 Wirkung von Schweißverfahren unterschiedlicher Leistungsdichte auf die Temperatur- und Härteverteilung in einer Schweißverbindung aus einem aufhärtungsfähigen Stahl (schematisch)

von der Schmelzgrenze bis zu der von der Aufheizgeschwindigkeit und der chemischen Zusammensetzung abhängigen Ac_1 -Temperatur, bei NE-Metallen von der Schmelzgrenze bis zum Ort der ersten nachweisbaren Änderung des Gefüges (z. B. Kornwachstum, Gasaufnahme, physikalische bzw. chemische Änderungen). Die in der Wärmeeinflusszone auftretenden Änderungen der mechanischen Eigenschaften bestimmen zusammen mit den mechanischen Gütekriterien des Schweißguts die Bauteilsicherheit.

Abb. 5.7 zeigt, dass bei Stahlschweißungen eine geringe Leistungsdichte eine geringe Härte, aber eine breite WEZ erzeugt. Abhängig davon, welche Eigenschaft (große Härte, breite WEZ) für die Bauteilsicherheit nachteiliger ist, muss das Schweißverfahren auch nach der Leistungsdichte ausgewählt werden.

5.2.4 Werkstoffbedingte Besonderheiten beim Schweißen

5.2.4.1 Probleme während des Erwärmens

Umfang und Art der Schwierigkeiten hängen entscheidend von der **Aufheizgeschwindigkeit**, d. h. unter anderem von der Menge der zugeführten Energie ab. Sie sind also stark verfahrensabhängig.

Die zugeführte Energie wird bei den Lichtbogenschweißverfahren anschaulich durch das **Wärmeeinbringen** Q beschrieben. Das ist die jedem Zentimeter Schweißnaht in der Sekunde von der Wärmequelle des Schweißverfahrens zur Verfügung gestellte elektrische Leistung:

$$Q = k \cdot U \cdot I / v \quad \text{in J/cm}$$

k thermischer Wirkungsgrad,

$U \cdot I$ elektrische Leistung im Schweißstromkreis in J/s

v Schweißgeschwindigkeit in cm/s.

Das **Wärmeeinbringen** Q wird in der Praxis als Maßstab für die thermische Beeinflussung des Werkstoffes beim Schweißen angewendet.

Beim Aufheizen entstehen große **thermische Spannungen**. Sie können bei wenig verformbaren Werkstoffen und bei größeren Werkstückdicken zu Rissen führen. Je kleiner der Temperaturgradient im Werkstück ist, desto geringer ist die Rissgefahr. Mithilfe des Vorwärmens oder von Schweißverfahren mit geringer Leistungsdichte sind kleine Temperaturgradienten erreichbar.

Die sehr große **Gaslöslichkeit** des schmelzflüssigen Schweißguts ist eines der Hauptprobleme der Schweißtechnik. Die Gase – besonders Stickstoff, Wasserstoff und Sauerstoff – können sich beim folgenden raschen Erstarren nur unvollständig ausscheiden und verursachen **Porenbildung** und **Zähigkeitsverlust**. Die atmosphärischen Gase müssen daher von der Schweißschmelze ferngehalten werden. Das geschieht bei den einzelnen Verfahren mithilfe sehr unterschiedlicher Maßnahmen:

- *Umhüllung* bei der Stabelektrode (Lichtbogenhandschweißen);
- *geeignete Schutzgase* (WIG-, MIG-, MAG-Verfahren);
- *Pulverschicht* (UP-Verfahren), die die Schmelze und den Lichtbogen abdeckt;
- *völliges Ausschalten der Atmosphäre* (Elektronenstrahlschweißen arbeitet mit Vakuum, bzw. die „natürliche“ Atmosphäre wird vollständig durch ein Schutzgas ausgetauscht, z. B. Schweißen von hochreaktiven Werkstoffen unter einer Argon-Atmosphäre).

5.2.4.2 Probleme während des Erstarrens

Wegen der großen Abkühlgeschwindigkeiten und der erheblichen Turbulenzen im Schmelzbad sind Entmischungen der Legierungselemente weniger ausgeprägt. Dagegen ist die **Kristallseigerung**, also die Entmischung innerhalb der Körner, praktisch unvermeidlich. Diese Erscheinung ist bei unlegierten Stählen von untergeordneter Bedeutung, bei hochlegierten Stählen und NE-Metallen (z. B. Bronzen, CuNi-Legierungen) können jedoch große Nachteile entstehen, z. B. verminderte Korrosionsbeständigkeit oder Rissbildung.

Das größte Problem beim schnellen Abkühlen der Schweißverbindung ist das Entstehen von Rissen. Je nach ihrer Entstehungstemperatur unterscheidet man **Heißrisse** und **Kaltrisse**.

Ähnlich wie Gusswerkstoffe neigt auch das erstarrende Schweißgut unter bestimmten Bedingungen zur Bildung von Heißrissen. Sie entstehen im Temperaturbereich zwischen Liquidus- und Solidustemperatur kurz vor dem Ende der Erstarrung. Die die Primärkristalle filmartig umgebende Restschmelze wird durch die beim Abkühlen der Schweißnaht entstehenden Schrumpfkräfte getrennt. Die Rissbildung erfolgt *immer interkristallin*, also entlang den Korngrenzen.

Da die wesentlichste Ursache der Heißrissbildung die Temperaturdifferenz zwischen der Solidus- und der Liquidustemperatur ist, sind die bei konstanter Temperatur erstarrenden Metalle und eutektische Legierungen praktisch heißrissfrei.

Abb. 5.8 zeigt die Primärkristallisation der in einer Lage hergestellten Schweißverbindung. Das Schweißgut erstarrt – beginnend von den *Schmelzgrenzen* – in Form langer Kristallite (*Dendriten*). Die Kristallisationsfronten schieben die bei geringerer Temperatur erstarrende Restschmelze vor sich her, ehe sie sich in Nahtmitte treffen. Da der Gehalt an Verunreinigungen in der Restschmelze am größten ist (z. B. in Form niedrigschmelzender eutektischer Verbindungen, wie FeS, NiS), muss bei großvolumigen Schmelzbädern mit einer ausgeprägten *Heißrissneigung* und mit sehr geringen Festigkeitswerten, vor allem aber mit einer sehr niedrigen Zähigkeit gerechnet werden. Diese Probleme werden gravierender bei einer Zunahme von

- *Schmelzbadvolumen*,
- *Gehalt an Verunreinigungen* im Grundwerkstoff,
- *Wärmeerzeugen beim Schweißen* (Gasschweißen, u. U. UP-Schweißen) und
- *Erstarrungsintervall* der Legierung.

Daher ist die zunächst wirtschaftlich verlockend erscheinende Möglichkeit, dickwandige Bauteile in einer Lage oder in wenigen Lagen zu schweißen, technisch i. Allg. nicht sinnvoll. In den meisten Fällen wird daher die **Mehrlagen-technik** gewählt (in der Praxis oft auch *Pendellagentechnik* oder *Zugraupentechnik* genannt), siehe Abb. 5.8. Die Streckenenergie jeder Lage ist ausreichend, um die jeweils darunter liegende teilweise

- *aufzuschmelzen*: Die Verunreinigungen werden neu und gleichmäßiger verteilt, und
- *umzukörnen*: Bei der wichtigen Werkstoffgruppe „Stahl“ entsteht ein „Normalisierungseffekt“, der das nachteilige Gussgefüge der Schweißnaht zum Teil beseitigt.

Die *Zugraupentechnik* (oft auch *Strichraupentechnik* genannt) darf nicht mit der *Pendellagentechnik* verwechselt werden. Der Nahtaufbau

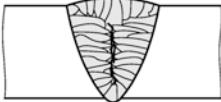
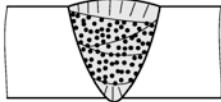
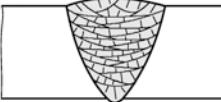
Art des Nahtaufbaus		
Einlagentechnik	Mehrlagentechnik	
	Pendellagentechnik	Zugraupentechnik
		
<p>Der gesamte Nahtquerschnitt wird mit einer Lage gefüllt. Das Schweißgutgefuge zeigt gussähnliche Eigenschaften. Es besteht aus langen Stängelkristallen. Das Gefüge ist anisotrop.</p> <p>Die im Schweißgut vorhandenen Verunreinigungen werden in Nahtmitte angehäuft und begünstigen stark die Heißrissbildung. Die mechanischen Gütekriterien sind mäßig.</p> <p>Für sehr saubere Werkstoffe mit Handschweißverfahren bis zu Wanddicken von etwa 10 mm, mit Hochleistungsverfahren (z. B. UP-Verfahren) bis etwa 30 mm anwendbar.</p>	<p>Die durch jede Lage zugeführte Energie erwärmt große Bereiche der darunter liegenden Lagen und der WEZ über Ac_3. Das extrem grobkörnige Gefüge wird daher umgekörnt (»Normalisierungseffekt«): Die anisotropen Stängelkristalle verschwinden und das Gefüge wird wesentlich feinkörniger.</p> <p>Die Gütekriterien (insbesondere die Zähigkeit!) sind merklich besser als bei einlagig geschweißten Verbindungen. Bei thermisch empfindlichen Werkstoffen (viele NE-Metalle) ist u. U. die Zugraupentechnik geeigneter (aber wesentlich teurer).</p>	<p>Die einzelnen Lagen führen den darunter liegenden Lagen nur so wenig Energie zu, dass kein Umkörnen erfolgen kann. Das Gussgefuge bleibt weitgehend erhalten.</p> <p>Das Schweißgut und die WEZ sind als Folge der großen Eigenspannungen der vielen schnell abkühlenden kleinlumigen Lagen bei harten Stählen härter und spröder (Martensit und Spannungsversprödung).</p> <p>Diese Technik wird bei Schweißarbeiten in Zwangslage angewendet. Die extrem langen Schweißzeiten machen das Verfahren unwirtschaftlich, wobei die erreichbaren Eigenschaften eine allgemeine Anwendung technisch nicht sinnvoll machen.</p>

Abb. 5.8 Erstarrungsvorgänge („Primärkristallisation“) bei Fe-C-Legierungen (Stahl) in Abhängigkeit von der Art des Nahtaufbaus in einlagig und mehrlagig hergestellten Schweißverbindungen

erfolgt bei ihr in Form dünner, schnell gezogener Raupen. Der Raupenquerschnitt und damit auch die mitgeführte Wärme ist so klein, dass keine merkliche Umkörnung der unteren Lagen stattfinden kann. Das dendritische Gussgefuge bleibt weitgehend erhalten, d. h., eine Gefügeverbesserung wie bei der Pendellagentechnik ist nicht möglich. Diese Methode des Lagenaufbaus muss aber bei allen Schweißarbeiten angewendet werden, bei denen nur geringe Schweißgutvolumina zulässig sind. Das gilt vor allem für Schweißarbeiten in Zwangslagen, bei Wurzelschweißungen und beim Schweißen dünnwandiger Bleche. In Abb. 5.8 ist die unterschiedliche Gefügeausbildung der beiden Mehrlagentechniken dargestellt.

Bei hohem Einschlussegehalt, z. B. bei den qualitativ hochwertigen, besonders beruhigten Stählen, können auch in der Wärmeeinflusszone Heißrisse entstehen („Spaltfreudigkeit“), wie Abb. 5.9a zeigt.

Die schmelzenden Einschlüsse treiben den Werkstoff an der Schmelzgrenze rissartig auseinander. Eine Werkstofftrennung kann allein durch die Wirkung hoher Schrumpfspannungen ausgelöst werden, wenn die Einschlüsse zeilenförmig angeordnet sind. Abb. 5.9b verdeutlicht diese Zusammenhänge.

Die Ursachen der meist transkristallin verlaufenden **Kaltrisse** sind komplexer und schwerer überschaubar. Kaltrisse entstehen bei *niedrigeren* Temperaturen meist durch das ineinandergreifen mehrerer untereinander wechselwirkender Ursachen:

- Aufhärtung in den schmelzgrenznahen Bereichen der Wärmeeinflusszone (Abb. 5.7),
- Belastungs- und (oder) Eigenspannungen,
- Versprödung z. B. durch Gasaufnahme (Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff) oder durch niedrige Betriebstemperaturen (Sprödbruch).

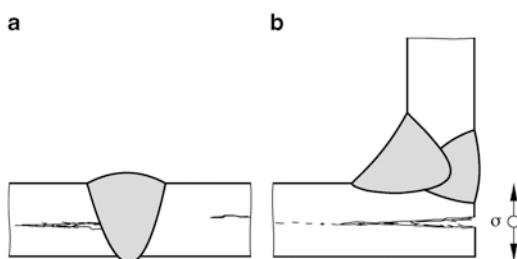


Abb. 5.9 Entstehung von Werkstofftrennungen in Stählen mit hohem Einschlussegehalt. **a** Schmelzende Einschlüsse „spalten“ das Blech **b** große Schrumpfspannungen σ führen bei Einschluszeilen zur Rissbildung (schematisch)

Risse infolge Aufhärtung lassen sich am sichersten durch die Wahl schlecht härtbarer, d. h. niedriggekohlter ($C \leq 0,2\%$) (niedrig-)legierter Stähle vermeiden. Je geringer die werkstofflichen und fertigungstechnischen Schwierigkeiten eines Werkstoffes beim Schweißen sind, desto besser ist seine Schweißeignung. Fertigungstechnisch lässt sich eine zu große Abkühlgeschwindigkeit sehr sicher mit **Vorwärmern** (100 bis 250 °C) der Fügeteile oder durch Schweißverfahren verringern, die mit großer Streckenenergie arbeiten können (z. B. das UP-Verfahren).

Die Wirkung der großen Abkühlgeschwindigkeit macht sich unangenehm bemerkbar bei Zündstellen (Lichtbogenansatzstellen): Eine Zündstelle ist ein kleinerer über Schmelztemperatur erwärmerter Werkstoffbereich, der durch einen auf der Werkstückoberfläche gezündeten und sofort rasch weiterbewegten Lichtbogen (z. B. beim WIG-Schweißen) erzeugt wird. Die folgende schnelle Abkühlung führt in vielen Fällen zu Schrumpfrissen. Bei höhergekohlten Stählen ($C > 0,2\%$) entstehen wegen der Bildung von hartem, sprödem Martensit fast immer Risse, Abb. 5.10. Der Lichtbogen darf daher nur unmittelbar im Bereich der Schweißnaht gezündet werden.

Bei martensitischen Gefügen entstehen durch Wasserstoff leicht die wasserstoffinduzierten Kaltrisse, die wegen ihrer Lage in der Schweißverbindung auch *Unternahtrisse* genannt werden, Abb. 5.11. Sie entstehen unmittelbar an der Schmelzgrenze in der aufgehärteten WEZ. Bei

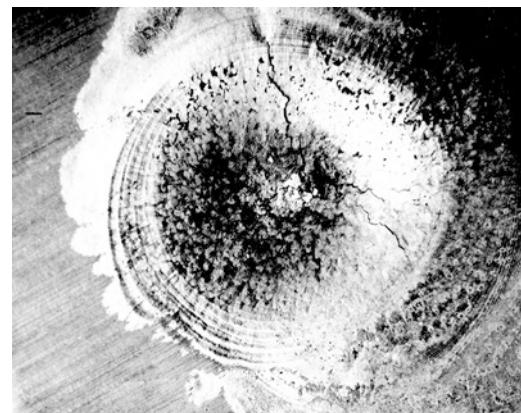


Abb. 5.10 Risse in einer Ansatzstelle beim Schweißen („Zündstelle“); Werkstoff AlMg4,5Zn1; $V \approx 5 : 1$



Abb. 5.11 Riss in der Wärmeeinflusszone einer Schweißverbindung aus dem Stahl C45 unmittelbar neben der Schmelzgrenze („Unternaht“ = wasserstoffinduzierter Kaltriss); $V = 400 : 1$

vergüteten Stählen können schon geringste Mengen (etwa 1 ml H₂/100 g Fe) den gefährlichen wasserstoffinduzierten Riss³ auslösen. Außer vakuumerschmolzenen Grund- und Zusatzwerkstoffen sind in diesem Fall extrem sorgfältige Fertigungsbedingungen erforderlich.

³Der wasserstoffinduzierte Kaltriss wird im englischen Schrifttum delayed (verzögert) fracture genannt. Das drückt aus, dass die Risse erst Stunden (Tage) nach der Wasserstoffbeladung entstehen.

5.2.4.3 Verbindungs- und Auftragschweißen unterschiedlicher Werkstoffe

Beim Verbinden zweier unterschiedlicher Werkstoffe durch Schmelzschweißverfahren entsteht örtlich eine Zone, in der sich beide Werkstoffe im schmelzflüssigen Zustand vermischt haben. Der Umfang des Vermischens wird mit dem Aufschmelzgrad A_S ausgedrückt (Abschn. 5.1.3 und Abb. 5.2).

Die Eigenschaften der Verbindung werden weitgehend von denen der „*Mischzone*“ ihres Gefüges bestimmt. Sie hängen ab vom Grad der Löslichkeit der beteiligten Elemente ineinander und der Menge und Verteilung (Korngrenzenbereich, Korninneres), siehe Abb. 5.12:

1 Völlige Unlöslichkeit (Eutektikum). Die Güte der Verbindung hängt entscheidend von den Eigenschaften der Komponenten

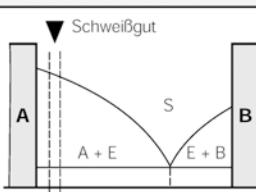
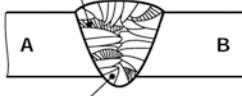
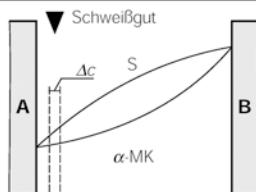
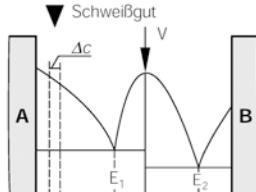
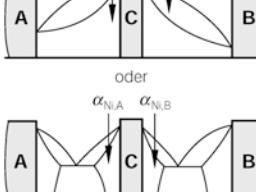
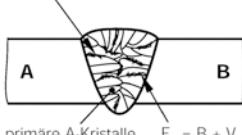
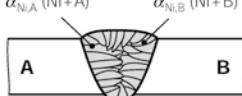
Ifd. Nr.	Zustandsschaubild	Gefüge des Schweißguts, Einlagentechnik (sehr vereinfacht)	zu erwartende Eigenschaften der Schweißverbindung
1	 <p>Δc = Konzentrationsbereich der Legierungselemente im Schweißgut</p>	<p>Zusatzwerkstoff = A Eutektikum $E = A + B$</p> 	<p>1. Wenn A und B völlig unlöslich ineinander sind, ist keine Bindung möglich (z.B. Fe – Pb), nur indirekt über ein weiteres drittes Metall C, wenn A + C und B + C legierbar sind.</p> <p>2. Die Gütwerte der Verbindung sind praktisch nur von den Eigenschaften des Eutektikums und von A bzw. B abhängig. Das Schweißgut besteht überwiegend aus dem Zusatzwerkstoff A und E bzw. dem Zusatzwerkstoff B und E. Niedrigschmelzende Eutektika können aber zum Heißriss führen.</p>
2	 <p>Schweißgut besteht vollständig aus (kristallgeseigerten) α-MK-en</p>	<p>Zusatzwerkstoff = A</p> 	<p>1. Das Schweißgut besteht nur aus zähen, wenig rissanfälligen Mischkristallen.</p> <p>2. Die Schweißverbindung hat optimale metallurgische und mechanische Eigenschaften; aber das Schweißgut ist meistens kristallgeseigert. Das kann in schwierigen Fällen aber die Korrosionsanfälligkeit des Schweißguts deutlich erhöhen.</p>
3	 <p>oder</p> 	<p>Zusatzwerkstoff = A Eutektikum $E_1 = A + V$</p>  <p>System A-C System C-B</p> <p>Zusatzwerkstoff = Ni = C α_{NIA} ($Ni + A$) α_{NIB} ($Ni + B$)</p> 	<p>1. Das Schweißgut enthält eine spröde intermediaire Verbindung V. Geringe Mengen (vor allem an den Korngrenzen!) führen meist zur vollständigen Versprödung der Verbindung.</p> <p>2. a) Verfahren wählen, mit dem geringe Aufschmelzgrade erreichbar sind, dadurch wird V-Gehalt geringer. Hartlöten ist hervorragend geeignet, wenn die Festigkeit ausreicht.</p> <p>b) Sehr teuer, aber nahezu immer erfolgreich ist es, die Flanke mit einem Werkstoff C zu puffern, der weder in der Kombination A+C noch in der Kombination C+B intermediaire Verbindungen bildet. Siehe auch Bild 3-4.</p> <p>c) Häufig wird Ni oder Ni-haltiger Zusatzwerkstoff gewählt: Ni bildet mit vielen Elementen lückenlose MK-Reihen oder ausgedehnte MK-Bereiche. Diese sind sehr zähe, rissicher und korrosionsbeständig, aber extrem empfindlich für Schwefel. Das Schweißgut besteht aus Ni-haltigen Mischkristallen.</p>

Abb. 5.12 Metallurgische Vorgänge beim Schweißen unterschiedlicher Werkstoffe A und B, schematisch

ab. Durch das schnelle Abkühlen entsteht ein sehr feines, hartes eutektisches Gefüge. Niedrigschmelzende Bestandteile (z. B. FeS bei Stahl, NiS bei Nickelwerkstoffen) können zur Heißrissbildung führen.

② Völlige Löslichkeit (lückenlose Mischkristallreihe). Das gesamte Schweißgut besteht aus sehr zähen, wenig rissanfälligen, aber meist kristallgeseigerten Mischkristallen. Die Schweißverbindung hat gute metallurgische und mechanische Eigenschaften.

③ Spröde Gefügebestandteile. Bilden sich **intermediäre Verbindungen**, dann führen selbst geringste Mengen zum Versprüden der Schweißverbindung. Das gilt vor allem dann, wenn sich diese Phase filmartig an den Korngrenzen ausscheidet. Bei entsprechenden Mischungsverhältnissen entsteht z. B. bei

- Cu-Zn-Legierungen (*Messinge*) mit Zinkgehalten über 50 % die Phase **Cu₅Zn₈**
- Cu-Sn-Legierungen (*Bronzen*) **Cu₃₁Sn₈** und bei den
- Al-Fe-Legierungen **Al₃Fe** oder **Al₅Fe₂**.

Durch Mischen der Legierungselemente der zu verbindenden Werkstoffe (insbesondere höher kohlenstoffhaltige bzw. legierte Stähle) kann spröder, rissanfälliger Martensit entstehen. Diese vor allem beim Panzern (Abb. 5.2) zu beobachtende Erscheinung erfordert sorgfältige Wahl des Panzerwerkstoffes, evtl. des Pufferwerkstoffes und des Schweißverfahrens. Von besonderer Wichtigkeit in diesem Fall ist, dass der Anteil des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffes so klein wie möglich bleibt, d. h., das Wärmeeinbringen beim Schweißen muss ausreichend klein gewählt werden. Mit hierfür geeigneten Schweißverfahren (z. B. Gassschweißen, MAG-Schweißen mit Kaltdrahtzufuhr, UP-Schweißen mit Bandelektroden, Flammspritzen, Plasma-Auftragschweißen) wird dieses Ziel erreicht. In Abb. 5.12 sind die Vorgänge bei der Verbindbarkeit zweier Werkstoffe an Hand typischer Zustandsschaubilder dargestellt.

5.2.4.4 Schweißbarkeit metallischer Werkstoffe

Die Schweißbarkeit eines Werkstoffes ist vorhanden, wenn der Stoffschluss durch Schweißen mit einem gegebenen Schweißverfahren bei Beachtung eines geeigneten Fertigungsablaufes erreicht werden kann (nach DIN-Fachbericht ISO/TR 581). Die geschweißten Verbindungen müssen die an sie gestellten Anforderungen sicher erfüllen (z. B. mechanische Beanspruchbarkeit, hohe bzw. tiefe Betriebstemperatur, ausreichende Sprödbruchsicherheit gegen Korrosionseinwirkung).

Dazu ist vor allem ein ausreichendes Verformungsvermögen der durch die Schweißwärme beeinflussten Bereiche der Verbindung (Wärmeeinflusszone) und des Schweißguts erforderlich, um die sehr gefährlichen verformungslosen bzw. verformungsarmen Trennbrüche (Sprödbrüche) mit einiger Sicherheit auszuschließen.

- Die Schweißbarkeit, Abb. 5.13, hängt ab von **Werkstoff** (Teileigenschaft Schweißeignung),
- **Konstruktion** (Teileigenschaft Schweißsicherheit) und
- **Fertigung** (Teileigenschaft Schweißmöglichkeit).

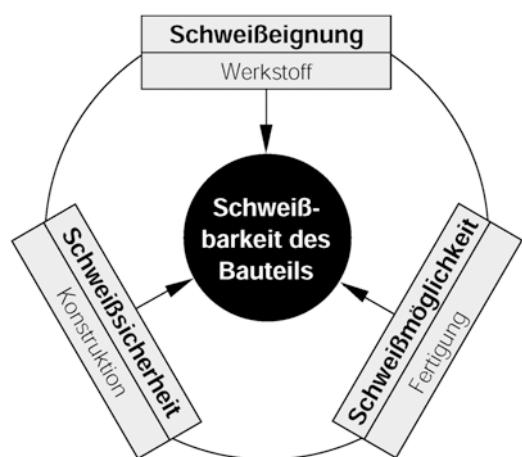


Abb. 5.13 Die Schweißbarkeit eines Bauteils hängt ab von der Schweißeignung, Schweißsicherheit und Schweißmöglichkeit. (nach DIN Fachbericht ISO/TR 581)

Die **Schweißeignung** eines Werkstoffs ist vorhanden, wenn bei der Fertigung aufgrund der chemischen, metallurgischen und physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs eine den jeweiligen Anforderungen entsprechende Schweißung hergestellt werden kann. Die Schweißeignung wird in der Hauptsache von folgenden Faktoren bestimmt:

- *Chemische Zusammensetzung.* Sie ist bestimmd für die Sprödbruchneigung, Alterungsneigung, Aufhärtung, Heißrissneigung, das Korrosionsverhalten und die mechanischen Eigenschaften der Verbindung.
- *Metallurgische Eigenschaften* (Erschmelzungs- und Desoxidationsart, Warm-, Kaltformgebung, Wärmebehandlung). Sie sind bestimmd für Art und Umfang der Seigerungen, Einschlüsse, Korngröße, Gefügeausbildung.
- *Physikalische Eigenschaften.* Die Wärmeleitfähigkeit und das Ausdehnungsverhalten müssen in Sonderfällen (z. B. bei ferritischen oder austenitischen hochlegierten Stählen) berücksichtigt werden.

Die **Schweißsicherheit** einer Konstruktion ist vorhanden, wenn das Bauteil aufgrund seiner konstruktiven Gestaltung unter den vorgesehenen Betriebsbedingungen funktionsfähig bleibt. Auf diese Eigenschaft hat also der Stahlhersteller keinen Einfluss. Sie wird vielmehr von verschiedenen Faktoren bestimmt, die ausschließlich vom Stahlverarbeiter (dem Schweißbetrieb) abhängen:

- *Konstruktive Gestaltung:* Kraftfluss, Werkstückdicke, Nahtanordnung, Kerbwirkung,
- *Beanspruchungszustand:* statisch, dynamisch, schlagartig, Betriebstemperatur,
- *Fertigungsbedingungen:* Temperatur, bei der geschweißt wird (unterhalb +5 °C Außen temperatur sollten z. B. aus unlegiertem Stahl bestehende Fügeteile auf Handwärme angewärmt werden), die Lage der Seigerungszonen ist zu beachten, Schweißbedingungen an Eigenheiten des zu schweißenden Werkstoffes anpassen.

Die **Schweißmöglichkeit** ist vorhanden, wenn die vorgesehenen Schweißungen bei den gewählten Fertigungsbedingungen fachgerecht hergestellt werden können. Das hängt ab von der

- *Vorbereitung zum Schweißen:* Schweißverfahren, Zusatzwerkstoffe, Hilfsstoffe, Wanddicke, Stoßart und der
- *Ausführung der Schweißarbeiten:* Wärmeführung, Wärmeeinbringen, Vorwärmen der Fügeteile, Wärmevor- bzw. -nachbehandlung.

5.3 Schmelzschweißverfahren

5.3.1 Gasschweißen (G) (Ordnungsnummer: 311)

5.3.1.1 Verfahrensprinzip

Der Schmelzfluss entsteht durch unmittelbares, örtlich begrenztes Einwirken einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme. Wärme und Schweißzusatzwerkstoff werden getrennt zugeführt (DIN 1910-100). Als Brenngas wird wegen seines in der ersten Verbrennungsstufe entstehenden hohen Heizwertes ausschließlich **Acetylen** verwendet. Die bei den Reaktionen des Sauerstoffs mit dem Brenngas freiwerdende Wärme wird durch Konvektion und Strahlung auf die Fügeteile übertragen. Da der Schweißbrenner, d. h. die Wärmequelle und der Zusatzwerkstoff von Hand geführt werden, kann der Schweißer das Energieangebot leicht verändern und den Erfordernissen der jeweiligen Schweißaufgabe optimal anpassen. Dadurch werden beispielsweise die Schweißarbeiten an Dünnblechen erleichtert, und beim Auftragschweißen sind Aufschmelzgrade unter 5 % erreichbar.

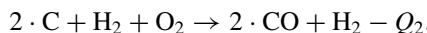
Im Vergleich zu den Lichtbogenschweißverfahren besitzt die Wärmequelle „Flamme“ eine geringere Energiedichte, und der Wärmeübergang auf die Schweißteile ist merklich schlechter. Daraus ergeben sich wirtschaftliche Nachteile und technische Grenzen der Anwendbarkeit dieses Verfahrens.

5.3.1.2 Die Acetylen-Sauerstoff-Flamme

Das aus dem Brennermundstück strömende Gas-Sauerstoffgemisch (1 : 1) bleibt zunächst unverändert beständig, Abb. 5.14, Pos. 1. In dem hellleuchtenden Kern zerfällt das Acetylen unter erheblicher Wärmeentwicklung (Q_1), Position 2:



In der *ersten Verbrennungsstufe*, Position 3, wird der beim Schweißen zugeführte Sauerstoff für eine unvollständige Verbrennung verbraucht:

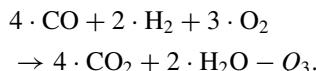


Wegen der in dieser Zone vorhandenen reduzierenden Gase (CO und H₂) und der hier herrschenden höchsten Flammtemperatur (etwa 3400 K) wird in diesem Bereich geschweißt. Vorhandene oder beim Schweißen neu gebildete Oxide können wenigstens z. T. durch die Wirkung der reduzierenden Gase beseitigt werden. Die Wirkung der Gase entspricht damit den Reduktions- und Schutzmechanismen anderer Schweißverfahren (z. B. Schutzgase beim Metall-Schutzgasschweißen, Umhüllungsbestandteile beim Lichtbogenhandschweißen, spezielle Pulver beim UP-Schweißen).

Wird dieser hellleuchtende Kern versehentlich in das Schmelzbad getaucht, dann nimmt er Kohlenstoff, Wasserstoff und (oder) Sauerstoff auf: Die Schmelze wird aufgekohlt (hart und spröde) oder Legierungselemente brennen ab (unerwünschte Eigenschaftsänderungen).

1 m³ Acetylen⁴ benötigt zum vollständigen Verbrennen 2,5 m³ Sauerstoff. Daher reagieren die noch nicht vollständig verbrannten Gase (CO, H₂) in der *zweiten Verbrennungsstufe*, Abb. 5.14, Position 4, mit dem Luftsauerstoff, der der Umgebung entzogen wird.

Sauerstoffmangel, CO₂- bzw. CO-Überschuss, oder die Bildung von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen können die Folge sein:



⁴ Alle Volumenangaben im Folgenden sind Normvolumen nach DIN 1343.

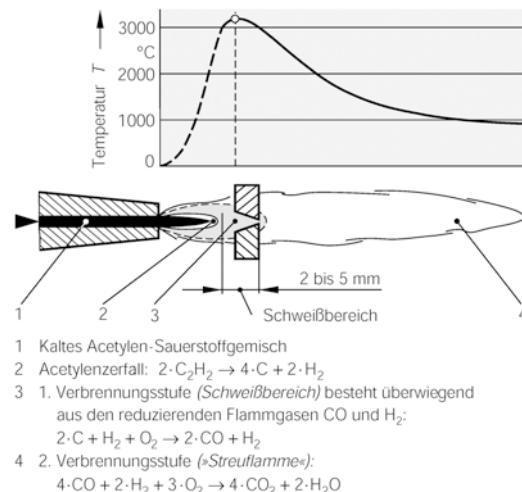


Abb. 5.14 Temperaturverteilung und Verbrennungsvorgänge in der neutralen Acetylen-Sauerstoff-Flamme

Für die Wärmeintensität ist nicht der gesamte Heizwert entscheidend, sondern nur die Summe aus Bildungsenthalpie des Acetylen und dem auf die erste Verbrennungsstufe entfallenden Heizwertanteil. Der Heizwert der 2. Verbrennungsstufe ist größer, er kann aber nicht genutzt werden, da mit der heißen, *reduzierenden* Primärflamme geschweißt werden muss.

Abhängig vom Mischungsverhältnis $M = \text{Acetylen: Sauerstoff}$ unterscheidet man drei Flammeneinstellungen:

- **Neutrale Flamme** ($M = 1 : 1$). Sie wird zum Schweißen nahezu aller Werkstoffe verwendet. Im Schweißbereich 3 herrscht die größte Temperatur. Die Flammgase (CO, H₂) wirken reduzierend.
- **Oxidierende Flamme** (Sauerstoffüberschuss, $M < 1$). Diese Flammeneinstellung wird für die Stahlschweißung *nicht* verwendet, da der überschüssige Sauerstoff in der Primärflamme zu einem starken Abbrand führt. Nur beim Schweißen von Messing wird mit Sauerstoffüberschuss gearbeitet. Dadurch kann die Zinkverdampfung gering gehalten werden.
- **Aufkohlende Flamme** (Acetylenüberschuss, $M > 1$). Sie wird praktisch nur zum Schweißen von Gusseisen verwendet. Dadurch bleibt der erforderliche hohe Kohlenstoffgehalt dieses Werkstoffs erhalten.

5.3.1.3 Betriebsstoffe: Acetylen, Sauerstoff

Das wichtigste Brenngas für die Gasschweißung ist **Acetylen**. Der Heizwert der 1. Verbrennungsstufe und die Zündgeschwindigkeit sind groß (zum Schweißen besonders gut).

Acetylen wird in Entwickler genannten Apparaten aus Calciumcarbid (CaC_2) und Wasser hergestellt:



Die Ausbeute liegt zwischen 250 l und 300 l Acetylen je kg Calciumcarbid. Es wird entweder in Leitungen weitergeführt oder in Stahlflaschen mit Überdruck abgefüllt.

Acetylen ist extrem empfindlich für höhere Drücke und Temperaturen; bei Drücken über 1,5 bar „zerfällt“ es explosionsartig unter Wärmeabgabe (*Acetylenzerfall*). Es ist also sehr gefährlich im Umgang. Daher darf aus Gründen des Unfallschutzes der Betriebsdruck in acetylenführenden Leitungen 1,5 bar nicht übersteigen. Das Gleiche geschieht bei Temperaturen über 300 °C bei einem Mischungsverhältnis $\text{C}_2\text{H}_2 : \text{O}_2 = 1 : 1$. Eine weitere Gefahrenquelle ist die Explosionsneigung von Acetylen-Luft- bzw. Acetylen-Sauerstoff-Gemischen. Bei Acetylenanteilen von 2,8 % bis 93 % (Rest Sauerstoff) entstehen explosionsfähige Gasgemische, d. h., die Explosionsgefahr besteht bei praktisch jedem Mischungsverhältnis. Sorgsamstes Arbeiten und Beachten der einschlägigen *Unfallschutzbestimmungen* sind im Umgang mit Acetylen zwingend erforderlich.

Das Speichern des Acetylens in Stahlflaschen (Kennfarbe neu: kastanienbraun, alt: gelb) ist daher nur auf Umwegen möglich. Man macht sich dabei die Erfahrung zunutze, dass in kleinsten Hohlräumen (*Kapillaren*) der Acetylenzerfall verhindert wird. Außerdem wird die große Lösungsfähigkeit des Acetylens in Aceton genutzt. In die vollständig mit einer *porösen Masse* „gefüllten“ Stahlflasche – nur etwa 10 % des Flaschenvolumens nimmt die Masse ein, das restliche Volumen besteht aus „*kapillaren Räumen*“ – werden 13 l Aceton eingebracht, wobei ein Liter Aceton etwa 25 l Acetylen löst.

Der Flaschenfülldruck des Acetylens beträgt 19 bar. Die Flasche enthält demnach annähernd $13 \cdot 25 \cdot 19 \approx 6000 \text{ l}$ Acetylen. Die Acetylen-Entnahme sollte 1000 l/h nicht überschreiten, weil sonst das in größeren Mengen mitgerissene Aceton die Schweißnaht schädigt und die Armaturen verschmutzt („*verklebt*“).

Der Umgang mit Acetylenflaschen erfordert die Beachtung folgender Vorschriften und Empfehlungen:

- Die Flasche nie der prallen Sonne aussetzen (Baustellen!) oder neben Heizquellen aufstellen: *Ein unzulässiger Druckanstieg ist die Folge!*
- Die Acetylenentnahme sollte dauernd 600 l/h, kurzzeitig 1000 l/h nicht überschreiten: *Mitgerissenes Aceton verschmutzt Schlauch!*
- Die Flasche nicht werfen: *In der porösen Masse können sich größere Hohlräume mit hochverdichtetem Acetylen bilden; es besteht die Gefahr des Acetylenzerfalls!*

Der Flaschendruck wird durch ein *Druckminderventil* auf den erforderlichen Gebrauchsdruck reduziert. Es wird direkt an der Flasche angeschlossen.

Der **Sauerstoff** wird durch fraktionierte Destillation der flüssigen Luft hergestellt und dem Verbraucher flüssig oder gasförmig in Stahlflaschen (Kennfarbe blau) geliefert. Bei einem Rauminhalt von 40 l und einem Fülldruck von 150 bar enthalten sie bei dem Umgebungsdruck $p = 1 \text{ bar}$ nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte 6000 l Sauerstoff:

$$p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2 = \text{konst.}$$

$$= 150 \text{ bar} \cdot 40 \text{ l} = 1 \text{ bar} \cdot 6000 \text{ l}.$$

Auch der Umgang mit Sauerstoff erfordert besondere Vorsicht. Schon ein geringfügig erhöhter Sauerstoffgehalt der Luft ($\geq 25 \%$) führt zu einer stark erhöhten Verbrennungsgeschwindigkeit und einer erheblich geringeren Zündtemperatur. Darauf sind Löschversuche häufig ohne Erfolg, oder sie kommen zu spät. Folgende Maßnahmen und Vorschriften sind im Umgang mit Sauerstoff zu beachten:

- Das Gewinde am Flaschenhals muss frei von Fett und Öl sein: *Feuergefahr!*
- Das Flaschenventil nur eine halbe bis eine Umdrehung öffnen: *Ein schnelles Schließen ist dann im Ernstfall „gefährlos“ möglich!*
- Nie funkenschlagende Werkzeuge verwenden: *Weil durch Funken Brand- und Explosionsgefahr!*
- Die Flasche muss gegen Umfallen gesichert sein: *Ein beschädigtes oder abgebrochenes Flaschenventil kann aus der Sauerstoffflasche eine Rakete machen!*
- Man darf Räume nie mit Sauerstoff belüften: *Sträflicher, weil oft tödlicher Leichtsinn!*

Wegen des großen Flaschendrucks benutzt man für Sauerstoff zweistufige Druckminderer.

5.3.1.4 Der Schweißbrenner

Im Schweißbrenner werden Sauerstoff und Acetylen gemischt. Das Mischungsverhältnis muss dabei auch über längere Schweißzeiten konstant bleiben, weil nur dann die metallurgische Qualität des Schweißguts erhalten bleibt. Die bevorzugte Bauart ist der *Saugbrenner* (*Injektor-* oder *Niederdruckbrenner*), Abb. 5.15. Der Sauerstoff wird dem Brenner mit einem Druck von etwa 2 bar bis 3 bar zugeführt und strömt mit großer Geschwindigkeit durch die Injektorbohrung.

Durch den entstehenden großen Unterdruck (*Bernoulli'sches Gesetz*) wird das Acetylen an-

gesaugt, was einen gefährlichen Druckaufbau (Acetylenzerfall) zuverlässig ausschließt. In der Mischdüse erfolgt die Mischung der Gase im vorgesehenen Mischungsverhältnis.

Für die verschiedenen Werkstückdicken sind unterschiedliche Heizleistungen erforderlich. Sie werden vom Gasdurchsatz, d. h. von der Größe der Injektorbohrung bestimmt. Die Heizleistung ist demnach von der Größe des auswechselbaren Schweißeinsatzes abhängig. Eine sehr sorgfältige Behandlung des Brenners und der Schweißeinsätze ist notwendig. Dichtet der Schweißeinsatz am Griffstück nicht einwandfrei oder ist das Mundstück verstopft, dann dringt Sauerstoff in die Acetylenkanäle (Explosionsgefahr!). Bei einem *Flammenrückschlag* schlägt die Flamme in den Brenner zurück, weil die Zündgeschwindigkeit größer als die Ausströmgeschwindigkeit ist (z. B. weil das Mundstück mit Ablagerungen auf der Werkstückoberfläche verstopft ist). Dann könnte der Acetylenschläuch bzw. die Acetylenflasche explodieren. Dieses Ereignis lässt sich mit einer Vorrichtung (*Sicherheitsvorlage*) verhindern, die die rückschlagende Flamme löscht.

5.3.1.5 Arbeitsweisen beim Gasschweißen

Eine wichtige Voraussetzung zum Herstellen einwandfreier Schweißverbindungen ist das vollständige Aufschmelzen der Fugenflanken der Fügeteile. Der Grundwerkstoff und der von Hand zugesetzte Schweißstab werden gleichzeitig von der Flamme aufgeschmolzen.

Je nach der Haltung des Schweißbrenners und des Schweißstabes unterscheidet man folgende Arbeitstechniken:

• Nachlinksschweißen

Der Schweißstab wird in Schweißrichtung vor der Flamme geführt, Abb. 5.16a. Der Brenner weist nicht direkt auf das Schmelzbad. Dadurch geht ein wesentlicher Teil der Wärmeenergie für den Schweißprozess verloren. Der Schutz der Schmelze durch die Streuflamme ist daher mäßig. Die *Injektorwirkung* der Flamme kann Luft, d. h. Sauerstoff und Stickstoff in die Schmelze reißen.

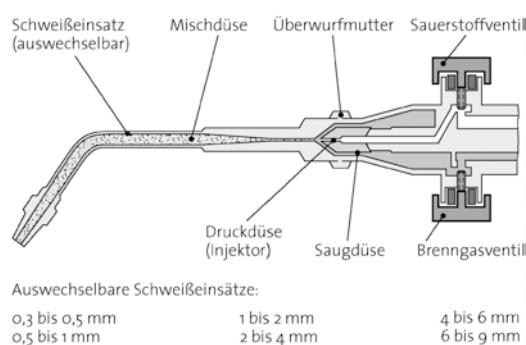


Abb. 5.15 Schnitt durch einen Saugbrenner („Injektorbrenner“) mit auswechselbarem Schweißeinsatz. Das Sauerstoff- und das Brenngasventil liegen aber nicht in einer Ebene, sondern sind tatsächlich um 90° zueinander versetzt angeordnet

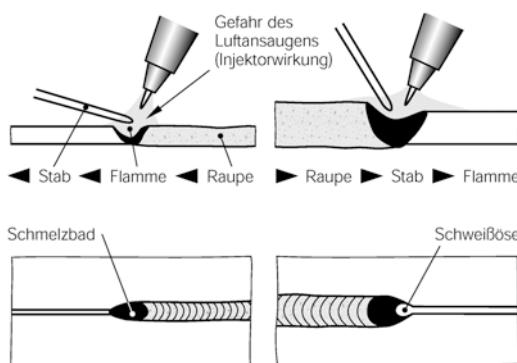


Abb. 5.16 Arbeitstechniken beim Gasschweißen. **a** Nachlinksschweißen **b** Nachrechtsschweißen

Die metallurgische Qualität der Schweißverbindung ist aus diesen Gründen oft nicht ausreichend. Wegen der geringen eingebrachten Wärme und der leichten Handhabung wird das Nachlinksschweißen nur für dünne Bleche ($s \leq 3$ mm) verwendet.

• Nachrechtsschweißen

Die Flamme ist entsprechend Abb. 5.16b direkt auf das Schmelzbad gerichtet. Der Schutz der Schmelze ist wesentlich besser und die auf das Schmelzbad übertragene Wärme erheblich größer als beim Nachlinkschweißen. Für die Güte der geschweißten Wurzel ist u. a. die Ausbildung der charakteristischen birnenförmigen Öffnung (*Schweißöse*) im Schweißspalt erforderlich. Die Schweißöse zeigt an, dass die Wurzelkanten zuverlässig erfasst, also vollständig aufgeschmolzen wurden (keine Bindefehler!). Diese Methode wird zum Schweißen dickerer Bleche ($s \geq 3$ mm) verwendet.

5.3.1.6 Zusatzwerkstoffe; Schweißstäbe

Als Zusatzwerkstoffe werden Schweißstäbe mit einer Regellänge von 1000 mm verwendet. Sie sollten beim Schweißen leicht und gleichmäßig fließen, eine leichtflüssige, einfach entfernbarer Schlacke bilden und nicht zur Poren- und Spritzerbildung neigen. Die chemische Zusammensetzung der immer beruhigt vergossenen Gasschweißstäbe entspricht in der Regel weitgehend der des Grundwerkstoffs. Die Oberfläche der Stäbe muss sauber sein, d. h. frei von

Rost, Fett, Öl, Farbe, Verunreinigungen und groben Oberflächenfehlern.

Gasschweißstäbe sind in DIN EN 12536 genormt. Es werden sieben *Klassen* unterschieden. Die Stabeinteilung besteht aus zwei Merkmalen. Das erste Merkmal ist das Kurzzeichen für das Produkt/den Schweißprozess. Das Kurzzeichen für einen Stab zum Gasschweißen ist der Buchstabe „O“. Das zweite Merkmal enthält das Kurzzeichen für die chemische Zusammensetzung des Stabes, Tab. 5.4.

5.3.1.7 Anwendungsgrenzen

Die Bedeutung des Gasschweißens hat in den letzten Jahren deutlich abgenommen. Wegen der geringen Leistungsdichte der Flamme, der verhältnismäßig schlechten Wärmeübertragung auf die Fügeteile und der damit verbundenen geringen Abschmelzleistung, sollten nur Bleche bis zu einer maximalen Dicke von 8 mm gasgeschweißt werden. Bei größeren Werkstückdicken sind die elektrischen Schweißverfahren (z. B. Lichtbogenhand-, Schutzgas-, UP-Verfahren) wesentlich wirtschaftlicher. Außerdem wird die Breite der wärmebeeinflussten Zone geringer und die Korngröße in der Grobkornzone kleiner. Das Gasschweißen höher- und hochlegierter Stähle ist nicht zu empfehlen (Aufkohlen oder Abbrand der Legierungselemente).

Ein wichtiger Anwendungsbereich des Gasschweißens sind Schweißarbeiten an Rohren im Kessel- und Apparatebau (in Zwangslage oder bei schlechter Zugänglichkeit der Schweißnahtfugen). Der entscheidende Vorteil ist die Möglichkeit, „Wärme“ und *Zusatzwerkstoff* beim Schweißen trennt zuführen zu können.

Auch für Werkstoffe, die z. B. wegen ihrer großen Wärmeleitfähigkeit zum Schweißen vorgewärmt werden müssen (z. B. Kupfer), eignet sich das Gasschweißen: Durch die geringe Leistungsdichte der Flamme werden die Fügeteile während des Schweißens ständig vorgewärmt. Allerdings werden die Korngröße in der WEZ und ihre Breite sehr groß.

Ein anderer wichtiger Anwendungsbereich ist das *Auftragschweißen*. Durch die Möglichkeit, Wärme und Schweißstab den Fügeteilen getrennt von Hand feinfühlig zuzuführen, sind

Tab. 5.4 Chemische Zusammensetzung und Schweißverhalten der Schweißstäbe zum Gasschweißen von unlegierten und warmfesten Stählen, nach DIN EN 12536 (Auswahl)

Kurz-zeichen	Chemische Zusammensetzung in Prozent ^{1), 2)}						Schweißverhalten der Stäbe		
	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Fließ-verhalten	Spritzer	Poren-neigung
O Z	Jede andere vereinbarte Zusammensetzung						Nicht angegeben		
O I	0,03 – 0,12	0,02 – 0,20	0,35 – 0,65	–	–	–	Dünnfließend	Viel	Ja
O II	0,03 – 0,20	0,05 – 0,25	0,50 – 1,20	–	–	–	Weniger dünnfließend	Wenig	Ja
O III	0,05 – 0,15	0,05 – 0,25	0,95 – 1,25	–	0,35 – 0,80	–	Zähfließend	Keine	Nein
O IV	0,08 – 0,15	0,10 – 0,25	0,90 – 1,20	0,45 – 0,65	–	–			
O V	0,10 – 0,15	0,10 – 0,25	0,80 – 1,20	0,45 – 0,65	–	0,80 – 1,20			
O VI	0,03 – 0,10	0,10 – 0,25	0,40 – 0,70	0,90 – 1,20	–	2,00 – 2,20			

¹⁾ Die Gehalte an Phosphor betragen max. 0,30%, die Schwefelgehalte max. 0,025%.

²⁾ Falls nicht anders festgelegt: Cr ≤ 0,15%, Cu ≤ 0,35% und V ≤ 0,03%. Der Anteil an Kupfer im Stahl plus Überzug darf 0,35% nicht überschreiten.

sehr geringe Aufschmelzgrade ($\leq 10\%$) erreichbar. Aus dem gleichen Grunde eignet sich das Verfahren auch hervorragend für *Wurzelschweißungen* bei Baustellenbedingungen. Geringe Investitionskosten und die ortsunabhängige Wärmequelle sind weitere Vorteile des Gas-schweißens.

5.3.2 Lichtbogenhandschweißen (E) (ON: 111) Metall-Lichtbogenschweißen

5.3.2.1 Verfahrensprinzip und Schweißanlage

Als Energiequelle dient ein zwischen der abschmelzenden Stabelektrode und dem Grundwerkstoff gezogener *Lichtbogen*. Abb. 5.17 zeigt einige Einzelheiten. An den Ansatzpunkten des Lichtbogens entstehen Temperaturen von 4500 bis 5000 K. Die Leistungsdichte des Lichtbogens ist wesentlich größer als die der Gasflamme, d. h., die Schweißzeiten sind kürzer, der Verzug der Bauteile ist wesentlich geringer, aber die Schweißeigenspannungen sind sehr viel größer. Der notwendige Schutz des Schweißbades vor den stark versprödenden atmosphärischen

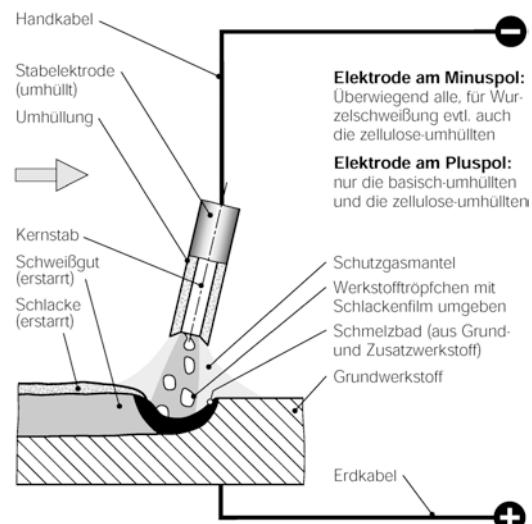


Abb. 5.17 Verfahrensprinzip des Lichtbogenhandschweißens mit umhüllten Stabelektroden

Gasen (Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff) wird durch einen „Schutzgasmantel“ erreicht, der aus verschiedenen Bestandteilen der **Elektrodenumhüllung** gebildet wird, s. Tab. 5.6. Nackte – also nicht umhüllte – Stabelektroden werden nicht mehr verwendet.

Der Werkstoffübergang erfolgt je nach Art der Elektrodenumhüllung und Umhüllungsdicke

in Form mehr oder weniger feiner Tropfen. Die übergehenden metallischen Tröpfchen sind von einem Schlackenfilm umgeben. Dieser bewirkt einen zusätzlichen Schutz der Tröpfchen vor den Gasen der Atmosphäre und ermöglicht vor allem die notwendigen chemischen bzw. metallurgischen Reaktionen (z. B. Desoxidation, Legierungsvorgänge).

Die Qualität der Schweißverbindung wird wie bei allen manuellen Verfahren entscheidend vom Schweißer bestimmt. Er muss den Schweißvorgang kontinuierlich durch Beobachten überwachen und kontrollieren, aber vor allem das Schmelzbad in geeigneter Weise „führen“.

Abb. 5.18 zeigt die einfache Schweißanlage, die im Wesentlichen nur aus der Schweißstromquelle, dem Elektrodenhalter und der umhüllten Stabelektrode besteht.

5.3.2.2 Vorgänge im Lichtbogen

Der Lichtbogen ist ein Stück stromdurchflossener Leiter. Er kann also nur existieren, wenn Ladungsträger vorhanden sind. Das zunächst zwischen den elektrischen Polen vorhandene elektrisch neutrale, nichtleitende Gas (Luft, durch die Elektrodenumhüllung entwickeltes Schutzgas) muss daher leitfähig gemacht, d. h. ionisiert werden. Den positiven Pol des Lichtbogens nennt man **Anode**, den negativen **Kathode**. Der Lichtbogen ist also eine besondere Form der Gasentladung, in der Energie- und Massentransporte (von der Elektrode übergehende Werkstofftröpfchen und Ionen) stattfinden.

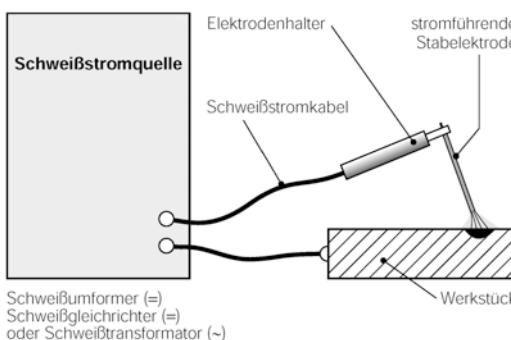


Abb. 5.18 Schweißanlage für das Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektronen

Der Lichtbogen wird i. Allg. gezündet, indem die Elektrode, meistens der negative Pol, das Werkstück „streichend“ oder „tupfend“ berührt. Durch den hohen Kurzschlussstrom wird die Elektrodenspitze aufgeschmolzen. Ein Teil des Werkstoffs verdampft, sodass aus der Kathode sehr leicht Elektronen austreten können (die Elektronenemission ist praktisch nur von der Temperatur abhängig!). Diese negativ geladenen Teilchen bewegen sich unter der Wirkung der Potenzialdifferenz (= Lichtbogenspannung) zwischen Anode und Kathode mit großer Geschwindigkeit zum positiven Pol (= Anode). Dabei erzeugen sie durch *Stoßionisation* neue Ladungsträger: Neutralen Gasmolekülen bzw. Atomen werden durch den Stoß Elektronen aus den äußeren Elektronenschalen herausgeschlagen. Die entstehenden positiven Ladungsträger (*Ionen*) bewegen sich zur Kathode und erwärmen diese durch Abgabe ihrer kinetischen Energie auf etwa 4500 K. Dadurch wird eine ständige Elektronenemission aus der Kathode ermöglicht. Die Temperatur der Anode ist einige Hundert Grad höher, weil die kinetische Energie ($\sim mv^2$) der massearmen, aber sehr schnellen Elektronen größer ist als die der schweren, aber wesentlich langsameren Ionen. Hinzu kommt, dass die Emission der Elektronen aus der Kathode Arbeit erfordert, die dieser entzogen und der Anode beim Auftreffen der Elektronen wieder zugeführt wird.

Im Lichtbogenkern befinden sich positive und negative Ladungsträger in ständiger Bewegung. Diesen Materiezustand bezeichnet man als **Plasma**. Beim Plasmaschweißen und -schneiden können durch geeignete Einrichtungen Leistungsdichten bis zu 10^6 W/cm^2 erreicht werden. In diesem Fall ist die Temperatur im Plasma extrem groß. Sie beträgt etwa 20.000 K.

Im Lichtbogen werden dort hohe Temperaturen erreicht, wo die kinetische Energie der Ladungsträger in potentielle umgewandelt wird. Dort wo Geschwindigkeitsänderungen der Ladungsträger erzwungen werden, d. h. an der

- **Anode**, der
- **Kathode** und in der
- **Lichtbogensäule** (Teilchenzusammenstoß).

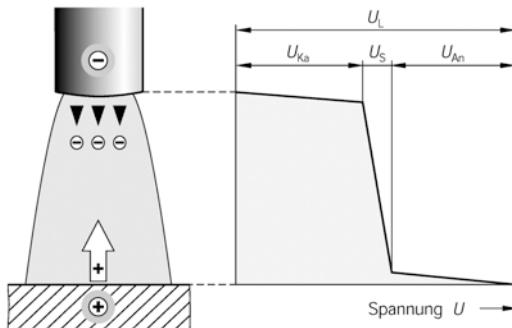


Abb. 5.19 Spannungsverteilung im Lichtbogen

Abb. 5.19 zeigt den nicht-ohmschen Spannungsabfall im Lichtbogen. Man unterscheidet den Kathodenfall U_{Ka} , den Anodenfall U_{An} und den in der Regel wesentlich geringeren Spannungsabfall in der Lichtbogensäule U_S .

Die Fallgebiete haben nur eine sehr geringe Ausdehnung (etwa 10^{-4} mm) und entstehen durch positive (negative) Ladungsträgeranhäufung unmittelbar vor der Kathode (Anode).

Die Wahl der Elektrodenpolung wird hauptsächlich bestimmt von der

- Art der Elektroden, dem
- Schweißverfahren und der
- Nahtgeometrie (Einbrandtiefe).

Unabhängig von den genannten Punkten muss in erster Linie ein stabil brennender Lichtbogen erzeugt werden.

Beim Lichtbogenschweißen wird die Stabelektrode meist negativ, die Drahtelektrode bei den MSG-Verfahren wegen der dann größeren Abschmelzleistung vorwiegend positiv gepolt. Zum Auftragschweißen wird unter Umständen auch negativ gepolt. Beim WIG-Schweißen wird fast ausschließlich mit negativ gepolter Wolframelektrode bzw. mit Wechselstrom (für Leichtmetalle) gearbeitet.

Weiterhin ist zu beachten, dass die positiven Ladungsträger (Ionen) Werkstoffeigenschaften haben, Elektronen dagegen nicht. Daher ist es zweckmäßig, die Elektrode positiv zu polen, wenn die Ionen in das Schmelzbad übergehen sollen (z. B. Legierungselemente beim Schweißen legierter Stähle). Dagegen polt man

die Elektrode negativ, wenn die Ionen in der Schmelze unerwünscht sind, denn sonst würde beim Schweißen mit dem Kohlelichtbogen das Schmelzbad stark aufkochen.

Diese Vorgänge dürfen nicht mit dem *Werkstoffübergang* (in Tröpfchenform) verwechselt werden. Die Tropfen gehen grundsätzlich von der Elektrode zum Werkstück über. Die Form des Werkstoffübergangs ist von der Schutzgasatmosphäre, der chemischen Charakteristik der Elektrodenumhüllung und der Stromdichte abhängig. Er kann kurzschlussfrei (kleinere „heiße“ Tropfen) oder mit Kurzschlüssen durchsetzt sein (große, „kältere“ Tropfen, die gleichzeitig die Elektrodenspitze und das Schmelzbad berühren).

Die Physik und der Mechanismus des Werkstoffübergangs sind verhältnismäßig kompliziert und unübersichtlich. Der wichtigste Teilvorgang ist zweifellos der *Pinch-Effekt*⁵. Danach ziehen sich parallel zueinander angeordnete Leiter an, wenn sie in gleicher Richtung von Strom durchflossen werden. Den metallischen Kernstab der Elektrode kann man sich als eine Anordnung vorstellen, die aus vielen parallel nebeneinander liegenden „Einzelheiten“ besteht. Die Wirkung dieser radial auf die erhitzte Elektrodenspitze angreifenden magnetischen Kraft wird dann verständlich: Der Tropfen wird von ihr ähnlich wie mit der Kneifzange „abgekniffen“.

Bemerkenswert ist, dass der *Tropfenübergang* durch unberuhigten Kernstabwerkstoff sehr begünstigt wird. Die beim Aufschmelzen der Elektrodenspitze wieder einsetzende CO-Bildung beschleunigt den Tropfen *immer* in axialer Richtung, d. h. weg von der Elektrodenspitze auf das Werkstück. Kernstäbe von Elektroden zum Schweißen legierter Stähle müssen wegen der sonst vorhandenen starken Seigerung der Elemente aus beruhigtem Werkstoff bestehen. Für Zwangslagenschweißungen sind sie nicht besonders gut geeignet: Die entscheidende von der Elektrodenspitze axial wegführende Kraft ist nicht mehr vorhanden, der Tropfen bewegt sich in Richtung des Schwefeldes.

⁵englisch: to pinch; abquetschen, abkneifen.

Eine wesentliche Voraussetzung für die *Lichtbogenstabilität* ist eine ausreichende Anzahl von Ladungsträgern im Lichtbogenraum. Daher sind in der Elektrodenumhüllung Stoffe enthalten, die leicht Elektronen abgeben. Somit wird auch verständlich, dass der Wechselstromlichtbogen, bei dem sich Spannung und Stromfluss fünfzigmal in der Sekunde umkehren, wesentlich instabiler brennt als der Gleichstromlichtbogen.

Der im Wesentlichen aus Ladungsträgern bestehende Lichtbogen wird durch äußere Magnetfelder leicht abgelenkt. Diese Blaswirkung (Abschn. 5.3.2.5.3) genannte Erscheinung muss berücksichtigt werden, sonst sind fehlerhafte Schweißungen die Folge.

Für das Verständnis des Schweißvorganges ist die Kenntnis der **Lichtbogenkennlinie**, siehe Abb. 5.20, notwendig. Sie gibt an, welche Spannung erforderlich ist, um einen bestimmten Strom durch den Lichtbogen zu treiben. Mit zunehmender Lichtbogenlänge werden der Lichtbogenwiderstand und der Spannungsabfall an ihm größer, d. h., die Spannung im Lichtbogen nimmt zu. Die Lichtbogenspannung erhöht sich

von U_1 auf U_3 , wenn die Lichtbogenlänge von l_1 auf l_3 vergrößert wird.

5.3.2.3 Schweißstromquellen

Schweißlichtbögen können mit Gleichstrom und Wechselstrom erzeugt werden. Die Schweißumformer und Schweißgleichrichter liefern Gleichstrom, Schweißtransformatoren Wechselstrom.

Der Werkstoffübergang erfolgt in Tropfenform, häufig durchsetzt mit Kurzschlüssen; hierdurch werden extreme Änderungen der Schweißspannung und Schweißstromstärke erzwungen. Wegen dieser und anderer Besonderheiten des Schweißvorganges müssen die Schweißstromquellen bestimmte Anforderungen erfüllen:

- Der *Kurzschlussstrom* I_K muss begrenzt werden, weil beim Zünden des Lichtbogens und beim Schweißen die hohen Ströme die Stromquelle zerstören bzw. thermisch überlasten würden.
- Die *Leerlaufspannung* U_0 darf aus Sicherheitsgründen bei Gleichstrom nicht größer als 113 V, bei Wechselstrom nicht größer als 80 V_{eff} sein. Besteht eine erhöhte elektrische Gefährdung⁶, dann dürfen nur Umformer, Gleichrichter bzw. Schweißtransformatoren mit einer maximalen Spannung von 48 V_{eff} (DIN EN 60974-1) verwendet werden. Andererseits sollte zum leichten Zünden und Wiederzünden des Lichtbogens die Leerlaufspannung möglichst hoch sein. Für bestimmte Elektrodentypen (z. B. B-Elektroden) sind sehr hohe Werte bis 80 V erforderlich.
- Die unvermeidlichen Änderungen der Lichtbogenlänge, d. h. der *Lichtbogenspannung* U_A während des Schweißens, sollten nur zu

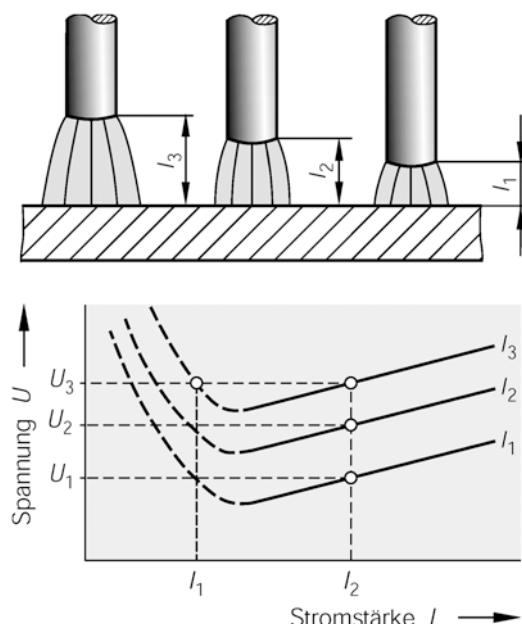


Abb. 5.20 Lichtbogenkennlinie $U = f(I)$. Parameterkurven sind Lichtbogenlänge l_i

⁶ Schweißarbeiten mit einer erhöhten elektrischen Gefährdung liegen vor bei einer Zwangshaltung (z. B. kniend, sitzend, liegend), an einem Arbeitsplatz, dessen freier Bewegungsraum zwischen elektrisch leitfähigen Teilen kleiner als 2 m ist (z. B. bei Schweißarbeiten innerhalb eines Kessels mit Einstieg durch eine Mannlochöffnung oder in nassen, feuchten oder heißen Arbeitsplätzen).

einer geringen Änderung der Stromstärke I_A führen. Eine gleichmäßige Schweißnaht mit gleichbleibender Nahtgeometrie ist nur mit annähernd konstanter Lichtbogenleistung $U_A \cdot I_A$ erreichbar.

- Nach einem Kurzschluss muss möglichst schnell eine ausreichende Lichtbogenspannung zur Verfügung stehen. Der während des Kurzschlusses entstehende dynamische Kurzschlussstrom I_{KS} sollte geringer sein als der Dauerkurzschlussstrom I_{KD} . Die sich von der Elektrodenspitze ablösenden Werkstofftröpfchen würden sonst unter der Wirkung der großen Stromstärke verdampfen bzw. verspritzen. Der Schweißvorgang wäre „hart“, die Spritzerneigung groß. Diese dynamischen Eigenschaften sind nur mit speziellen und „reaktionsschnellen“ Instrumenten nachweisbar (z. B. Oszilloskop) und sollten nur zusammen mit praktischen Schweißversuchen abgeschätzt werden.
- Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Wirtschaftlichkeit der Schweißstromquelle. Neben anderen Faktoren werden die *Leerlaufverluste* nicht genügend beachtet. Bei modernen Schweißstromquellen liegen die Leerlaufverluste zwischen 250 W und etwa 700 W.

Die *dynamischen* und *statischen* Eigenschaften der Schweißstromquelle bestimmen ihre Schweißeigenschaften. Die sich bei langsamem Ändern von Stromstärke und Spannung in der Stromquelle einstellenden elektrischen Werte sind durch die **statische Kennlinie** vorgegeben. Abb. 5.21 zeigt die minimal ① und maximal ② einstellbaren Kennlinien einer Schweißstromquelle. Sie sind mehr oder weniger stark fallend und begrenzen dadurch den Kurzschlussstrom ($I_{KD,min}$ und $I_{KD,max}$) in der erforderlichen Weise.

Der *Arbeitspunkt A* beim Schweißen ist der Schnittpunkt der Lichtbogenkennlinie mit der statischen Kennlinie der Schweißstromquelle. Durch die sich beim Schweißen ständig ändernde Lichtbogenkennlinie (LB) ändert auch der Arbeitspunkt fortwährend seine Lage ($A_1 \Leftarrow A \Leftarrow A_2$).

Diese Änderungen der Lichtbogenlänge verursachen selbst bei einer geringeren Steilheit der

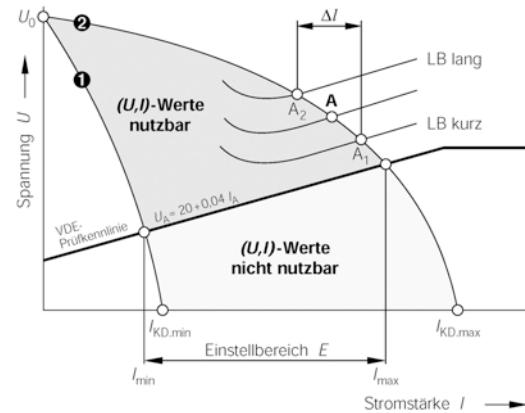


Abb. 5.21 Statische Grenzkennlinien einer Schweißstromquelle mit fallender Kennlinie. Derartige Schweißstromquellen werden für das Lichtbogenhandschweißen, das WIG- und UP-Verfahren (überwiegend bei dickeren Drahtelektroden) verwendet. ①, ②: Minimal (①) und maximal (②) einstellbare statische Kennlinie der Schweißstromquelle A₁, A₂ Arbeitspunkte bei kurzem und langem Lichtbogen E: Einstellbereich der Schweißstromquelle, festgelegt durch die VDE-Prüfkennlinie $U_A = 20 + 0,04 \cdot I_A$

Kennlinie nur eine mäßige Stromstärkeänderung ΔI . Stromquellen mit fallender Kennlinie sind daher für das Lichtbogen-Handschweißen unerlässlich.

Nicht alle U, I -Wertepaare der Kennlinien sind auch schweißtechnisch nutzbar. Die in unterschiedlicher Dicke und Umhüllung verwendeten Stabelektronen haben einen Einstellwertebereich, der näherungsweise durch die VDE-Prüfkennlinie (Abb. 5.21) festgelegt ist:

$$U_A = 20 + 0,04 \cdot I_A.$$

U_A Lichtbogenspannung in V

I_A Stromstärke in A bei U_A
(gilt bis $I_A = 600$ A; für $I_A > 600$ A ist
 $U_A = 44$ V = konst.)

Der Arbeitsbereich (*Einstellbereich E*) der Schweißstromquelle lässt sich damit ebenso einfach wie praktisch sinnvoll festlegen. Er beginnt am Schnittpunkt der minimal einstellbaren statischen Kennlinie ① mit der VDE-Prüfkennlinie (I_{min}) und reicht bis zum Schnittpunkt der maximal einstellbaren statischen Kennlinie ② mit dieser Geraden (I_{max}).

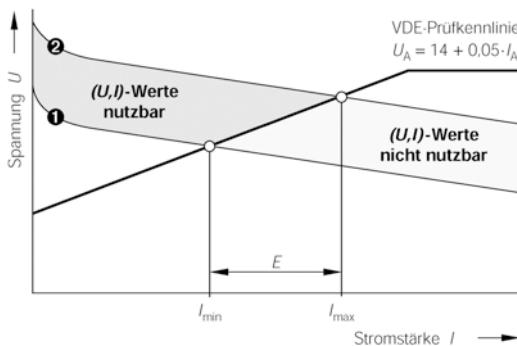


Abb. 5.22 Statische Grenzkennlinien einer Konstantspannungs-Schweißstromquelle (**CP**=Constant Potential). Schweißstromquellen mit CP-Charakteristik werden für die MSG-Verfahren und das UP-Verfahren (vorwiegend für dünnere Drahtelektroden) verwendet. ①, ②: Minimal (①) und maximal (②) einstellbare statische Kennlinie der Schweißstromquelle E : Einstellbereich der Schweißstromquelle. Er wird mithilfe der VDE-Prüfkennlinie $U_A = 14 + 0,05 \cdot I_A$ festgelegt

Schweißverfahren, bei denen sich die Lichtbogenlänge nach dem Prinzip der inneren Regelung einstellt – in erster Linie die MSG-Verfahren auch das UP-Verfahren – benötigen Schweißstromquellen mit **Konstantspannungs-Charakteristik**⁷. Die statische Kennlinie hat eine sehr geringe Neigung (einige Volt je 100 A), wie aus Abb. 5.22 hervorgeht. Der Einstellbereich E dieser Schweißstromquellen wird mithilfe der VDE-Prüfkennlinie festgelegt:

$$U_A = 14 + 0,05 \cdot I_A.$$

Diese Beziehung gilt bis $I_A = 600\text{A}$ für $I_A > 600\text{A}$ ist $U_A = 44\text{V} = \text{konst}$.

Eine wichtige Kenngröße der Schweißstromquellen ist die **Einschaltzeit (ED)**, DIN EN 60974. Sie ist ein praxisnaher Maßstab für die Belastbarkeit der Stromquelle. Die Einschaltzeit ist das prozentuale Verhältnis der Lichtbogenbrennzeit zu der genormten Spielzeit von zehn Minuten. Danach unterscheidet man den **Dauerschweißbetrieb (DB)** mit einer Einschaltzeit $ED = 100\%$, den **Nennhandschweißbetrieb (Nenn-HSB)**, mit einer $E = 60\%$ und den

⁷ Sie wird auch als CP-Charakteristik (Constant Potential) bezeichnet.

Handschweißbetrieb (HSB) mit einer ED von 35 %.

Im Folgenden werden auch Informationen über die zum WIG- (Abschn. 5.3.3.3.1) und MSG-Schweißen (Abschn. 5.3.3.4) verwendeten Stromquellen gegeben. An letztere werden z. T. sehr abweichende Anforderungen gestellt.

Der **Schweißumformer** besteht aus einem Antriebsmotor (Elektro- oder Verbrennungsmotor) und einem Schweißgenerator. Das Gerät kann daher auch netzunabhängig betrieben werden; man bezeichnet es dann als **Aggregat**. Die Geräuschentwicklung ist beträchtlich. Der Wartungsaufwand und die Anschaffungskosten sind im Vergleich zu anderen Stromquellen am größten. Daher werden sie kaum noch eingesetzt.

Der **Schweißtransformator** ist sehr einfach im Aufbau und nahezu wartungsfrei. Lediglich die Wicklungen sollten wegen der notwendigen Wärmeabfuhr mit trockener Luft (nicht Sauerstoff!) ausgeblasen werden.

Polaritätsgebundene (rein basische) Stabelektroden können nicht verschweißt werden, weil der Trafo nur Wechselstrom liefert. Er wird einphasig angeschlossen, wodurch sich eine sehr ungünstige, unsymmetrische Netzbelastrung ergibt. Wegen des sich ständig ändernden magnetischen und elektrischen Feldes ist die Blaswirkung merklich geringer als bei Gleichstrom. Weil die elektrisch wirksamen Teile des Transformators „Spulen“ sind, ist der von ihm erzeugte Blindstromanteil sehr hoch, d. h., der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ (neuerdings λ) ist verhältnismäßig „schlecht“.

Die erforderliche fallende Kennlinie kann mit einfachen Mitteln erzeugt werden. Weit verbreitet ist die Änderung des induktiven Widerstandes mit einem verstellbaren *Streukern* („*Streujoch*“). Ein Nachteil dieser einfachen Bauart ist, dass die Fernverstellung nur sehr aufwendig zu realisieren ist.

Mit einem *Transduktor* als Stellglied lässt sich die fallende Kennlinie weitaus eleganter erzeugen, Abb. 5.23. Dieses Bauteil wird auch als *gleichstromvormagnetisierbare Drossel* bezeichnet und besteht aus dem Eisenkern, der Arbeitswicklung (für den Schweißstrom)

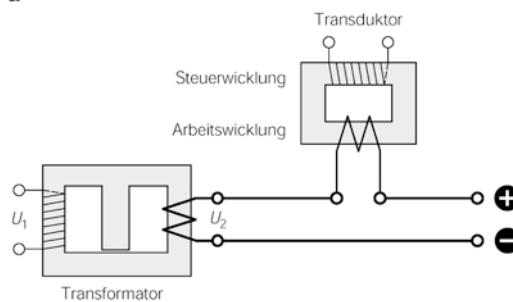
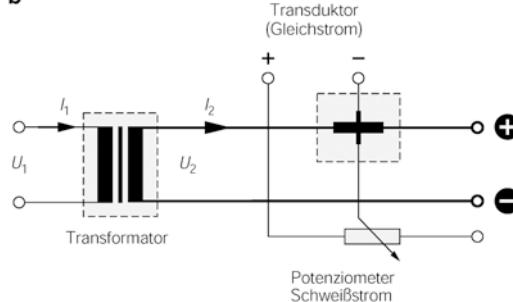
a**b**

Abb. 5.23 Schweißtransformator mit stufenloser Kennlinienverstellung mittels Transduktoren. **a** Bildliche Darstellung **b** Schaltplan

und der Steuerwicklung (für den Steuerstrom=Gleichstrom). Fließt kein Steuerstrom, dann besitzt die Arbeitswicklung den höchsten induktiven Widerstand, und der Schweißstrom ist am geringsten. Mit steigender Gleichstromvormagnetisierung wird der Eisenkern zunehmend magnetisch gesättigt, d. h., der induktive Widerstand nimmt ab, und der Schweißstrom ist am größten. Diese Bauart erlaubt eine einfach zu realisierende, stufenlos fernbedienbare Verstellung des Schweißstromes.

Transduktoren werden als Stellglied für Stromquellen zum Lichtbogenhand- und WIG-Schweißen eingesetzt. Der große induktive Widerstand ist die Ursache für nur mäßige dynamische Eigenschaften, d. h. erheblich verzögerter Strom- bzw. Spannungsanstieg bei steilflankigen Impulsen.

Der **Schweißgleichrichter** besteht aus einem Transformator und einem Gleichrichtersatz (überwiegend Silizium). Der Netzanschluss kann einphasig oder dreiphasig sein (Dreiphasentransformator). Dann ist die

Netzbelastung viel gleichmäßiger und ein Gleichstrom mit einer deutlich geringeren Welligkeit wird erzeugt.

Der Nachteil dieser Bauart besteht darin, dass die Transistoren als schnell reagierende Widerstände auf der Sekundärseite arbeiten, d. h., ein großer Teil der aufgenommenen Leistung muss als Verlustwärme abgeführt werden. Diese analogen Stromquellen haben daher einen verhältnismäßig niedrigen Wirkungsgrad (ca. 50 bis 80 %). Aus diesem Grunde sind sie in der Praxis weitgehend verschwunden.

Bei den neueren **Inverterschweißstromquellen** wird der dem Netz entnommene Wechselstrom mithilfe eines Stromrichters gleichgerichtet und anschließend mit einem thyristor- oder transistorgesteuerten (als Schalter wirkenden) *Inverter* in positive und negative Stromimpulse umgewandelt, Abb. 5.24. Die

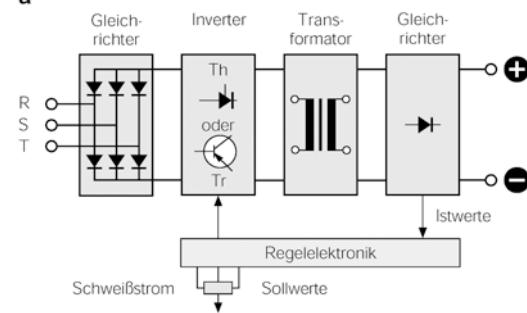
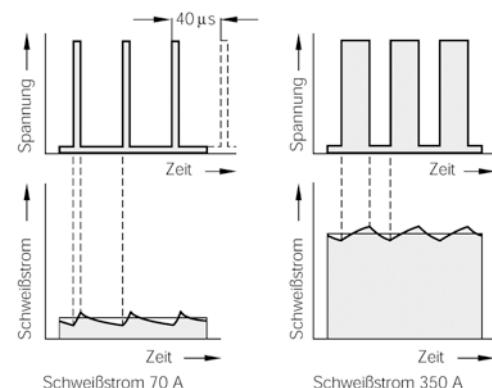
a**b**

Abb. 5.24 Schematische Darstellung einer Inverter-Schweißstromquelle. **a** Schaltplan **b** Regeln des Schweißstroms mittels Impulsweitenmodulation durch Ändern der Öffnungsphase

so erzeugte sehr hochfrequente rechteckige Wechselspannung (20 kHz und höher) wird in einem Transformator auf die zum Schweißen erforderlichen Werte umgespannt, danach gleichgerichtet und bei Bedarf „geglättet“. Bei diesen **primär getakteten Schweißstromquellen** (im Energiepfad ist der Schweißtransformator *nach* dem Schalttransistor angeordnet) wird der Schweißstrom durch Ändern der Öffnungszeit eingestellt. Die Transistoren arbeiten bei dieser Anordnung wie mechanische Ein/Aus-schalter. Die Verlustleistung ist demnach sehr gering. Mit MOS-Transistoren sind sehr große Schaltgeschwindigkeiten (bis 200 kHz) möglich. Für verschiedene Grundwerkstoffe, Schutzgase und Drahtdurchmesser lassen sich optimierte Programme herstellen, die gewöhnlich mit Speicherbausteinen realisiert werden. Eine Umrüstung auf neue Programme ist damit verhältnismäßig einfach und preiswert möglich.

Mit den Inverterstromquellen ist eine vollständige Regelung des Schweißablaufs möglich, die mit keiner anderen Stromquelle erreichbar ist:

- Die Schweißarbeiten werden mit geringen Strömen begonnen, um das Durchfallen der Schmelze zu verhindern.
- Der Strom steigt anschließend bei gleichzeitigem Pulsbetrieb auf die Schweißstromstärke an.
- Der Strom wird gegen Ende der Schweißarbeiten abgesenkt (Prinzip der Kraterfülleneinrichtung), um die Heißrissanfälligkeit im Bereich des Endkraters zu beseitigen.

Damit ist ein optimales Anpassen der Einstellwerte und der thermischen Erfordernisse auch für schlecht schweißgeeignete Werkstoffe möglich.

Ein weiterer großer Vorteil ist die mit zunehmender Wechselstromfrequenz mögliche Verkürzung der „Eisenmasse“ d. h. des Gewichtes des Transformators. Daher sind diese Schweißstromquellen für Montage- und Baustellenbetrieb besonders geeignet.

Ein wichtiges konstruktives Kennzeichen der **sekundär getakteten Schweißstromquellen**

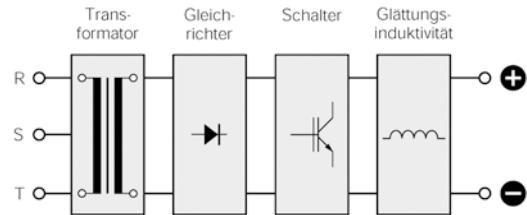


Abb. 5.25 Schematische Darstellung einer sekundär getakteten Schweißstromquelle

(bis 200 kHz) ist ein mit Netzfrequenz betriebener Transformator und die Anordnung der Halbleitersteller auf der Sekundärseite des Transformators, Abb. 5.25. Der Transistor arbeitet als Schalter, d. h., die Schaltgeschwindigkeit ist extrem groß. Diese Bauart wird vor allem für sehr große Schweißleistungsbereiche angewendet.

Tab. 5.5 zeigt die wichtigsten Eigenschaften der Schweißstromquellen im Vergleich.

5.3.2.4 Zusatzwerkstoffe; Stabelektronen

Aus verfahrenstechnischen Gründen (leichtes Zünden, stabiler Lichtbogen) und wegen der besseren Gütekriterien werden beim Lichtbogenhandschweißen überwiegend *umhüllte Stabelektronen* verwendet. Die Umhüllung wird um den Kernstab ausschließlich gepresst (*Pressmantelelektronen*). Wegen der großen Gefahr, die durch dissoziierte bzw. ionisierte Feuchtigkeit im Lichtbogenraum entsteht, werden die Elektroden vor dem Verpacken bei unterschiedlichen Temperaturen getrocknet⁸.

Während bei der „Hüttenmetallurgie“ zum Herstellen des Werkstoffs mindestens einige zehn Minuten zur Verfügung stehen, muss das Schweißgut wegen der spezifischen Besonderheiten des Schweißprozesses (punktformige Wärmequelle, große Leistungsdichte, hohe Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit) in einigen Sekunden desoxidiert und (oder) aufgelegt werden. Allerdings sind die für das Ergebnis

⁸Die sauer- und rutil-sauer-umhüllten Stabelektronen werden bei etwa 100 °C, die basisch-umhüllten bei etwa 250 bis 300 °C getrocknet.

Tab. 5.5 Wichtige Eigenschaften, Vor- und Nachteile der Schweißstromquellen

Merkmal	Schweißumformer	Schweißgleichrichter	Schweißtransformator
Bestimmungen	DIN EN 60974-1	DIN EN 60974-1	DIN EN 60974-1 und DIN EN 60974-6
Stromart	Gleichstrom	Gleichstrom	Wechselstrom
Netzanschluss	netzunabhängig	erforderlich	erforderlich
Netzbelastung	symmetrisch	symmetrisch	unsymmetrisch
Wirkungsgrad	45 % bis 60 %	60 % bis 80 %	80 % bis 90 %
el. Leistungsfaktor ($\cos \varphi$)	0,85 bis 0,9	0,6 ¹⁾ bis 0,8 ²⁾	0,4 ¹⁾ bis 0,8 ²⁾
zulässige Leerlaufspannung	113 V (113 V) ³⁾	113 V (113 V) ³⁾	80 V _{eff} (48 V _{eff}) ³⁾
Ferneinstellung	möglich	möglich	nein
Zünden des Lichtbogen	sehr leicht	sehr leicht	befriedigend
Schweißeigenschaften	sehr gut	gut bis sehr gut	befriedigend bis gut
Blaswirkung	groß	groß	gering
Wartungsaufwand	groß	mittel bis gering	gering
Anschaffungskosten	100 %	80 %	50 %
Anwendung	unbeschränkt	unbeschränkt	ungeeignet für polaritätsgebundene Elektroden

¹⁾ ohne Kompensation²⁾ mit Kompensation³⁾ Werte in Klammern gelten für erhöhte elektrische Gefährdung

entscheidenden Reaktionstemperaturen meistens um einige Hundert Grad höher als im Hüttenwerk. Man kann aber davon ausgehen, dass das entstehende Primärgefüge nicht so weit vom thermodynamischen Gleichgewichtszustand entfernt ist.

5.3.2.4.1 Aufgaben der Elektrodenumhüllung

Die Stabelektroden werden in der Praxis nach der Art der *chemischen Charakteristik der Umhüllung*, dem *Anwendungsgebiet* (z. B. Elektroden für das Verbindungs-, Auftragschweißen) und der *Umhüllungsdicke* eingeteilt. Bisher wurden die verschiedenen Umhüllungsdicken durch folgende Kurzzeichen unterschieden:

- **Dünn-umhüllt (d)** bis zu der Gesamtdicke von 120 %,
 - **mitteldick-umhüllt (m)** über 120 % bis 155 % und
 - **dick-umhüllt (s)** über 155 %,
- jeweils bezogen auf den Kernstabdurchmesser.

In der neuen Norm DIN EN ISO 2560 wird die Umhüllungsdicke nicht mehr explizit mithilfe von Kurzzeichen angegeben.

Mit der Umhüllungsdicke ändern sich die Schweißeigenschaften und die Gütekriterien des Schweißguts erheblich. Mit zunehmenden Umhüllungsbestandteilen laufen

die metallurgischen Reaktionen (Auflegieren, Desoxidieren, Entschwefeln) *vollständiger* ab. Die mechanischen Gütekriterien, vor allem die Zähigkeit, nehmen damit zu. Wegen der großen Menge der entwickelten Gase ist der Schutz der Schweißschmelze sehr gut. Die Viskosität der Schmelze nimmt aber ab.

Die Stabelektrode besteht aus einem metallischen Kern, dem *Kernstab*, und der umpresssten *Umhüllung*⁹. Diese besteht aus Erzen, sauren, basischen und organischen Stoffen. Die Umhüllung bestimmt in hohem Maße das Verhalten des Schweißguts bzw. der Elektrode (*Spaltüberbrückbarkeit, Zwangslagen-Verschweißbarkeit*).

Die Umhüllung hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- *Stabilisieren des Lichtbogens*

Durch Stoffe mit geringer Elektronenaustrittsarbeiten (z. B. Salze der Alkalien Natrium, Kalium und Erdalkalien Calcium, Barium) wird die Ladungsträgerzahl im Lichtbogen erhöht, d. h. die Leitfähigkeit der Lichtbogenstrecke verbessert. Der Bogen zündet besser und brennt stabiler.

⁹⁾Zum Verringern der Reibung an der Pressdüsenwand bei der Herstellung werden jedem Stabelektroden-typ Gleitmittel zugesetzt. In der Hauptsache wird dafür wasserhaltiges Natron- oder Kaliwasserglas (Na_2SiO_3 bzw. K_2SiO_3) verwendet.

- Bilden eines Schutzgasstroms*

Das Schmelzbad und der Lichtbogenraum müssen zuverlässig vor dem Einfluss atmosphärischer Gase (Luft) geschützt werden. Sonst tritt ein starker Abbrand der Legierungselemente auf und die Aufnahme von Stickstoff und anderen Gasen wird begünstigt. Durch Schmelzen und Verdampfen der Umhüllungsbestandteile entsteht die schützende Gasatmosphäre. Außerordentlich wirksam ist das aus Calciumcarbonat entstehende Kohlendioxid: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Die Umhüllung aller Elektroden enthält in unterschiedlichen Mengen Wasser, das im Lichtbogen in die metallurgisch sehr schädlichen Gase Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird.

- Bilden einer metallurgisch wirksamen Schlacke*

Die den Lichtbogenraum durchlaufenden Werkstoff-Tröpfchen sind von einem Schlackenfilm umgeben, der den flüssigen Werkstoff vor Luftpzutritt schützt. Ähnlich wie bei der Stahlherstellung muss das Schweißgut „gereinigt“, d. h., die Gehalte an Sauerstoff, Schwefel, Phosphor, Stickstoff und anderen Verunreinigungen müssen auf Werte begrenzt werden, die unschädlich sind. Auch diese metallurgischen Aufgaben übernimmt die Schlacke. Außerdem formt und stützt die Schlackendecke die Schweißnaht.

5.3.2.4.2 Metallurgische Grundlagen

Die notwendigen Legierungs- und Desoxidationselemente werden dem Schmelzbad aus der Umhüllung und (oder) dem Kernstab zugeführt. Eine der wichtigsten Forderungen für ausreichende mechanische Eigenschaften der Schweißverbindung (und des Schweißguts!) ist das Erzeugen eines in bestimmter Weise zusammengesetzten Schweißguts. Die *Desoxidation* und das *Auflegieren* sind Diffusionsvorgänge, die im Wesentlichen an der Phasengrenze Schlacke/flüssiges Metall-Tröpfchen stattfinden. Der Hauptort aller metallurgischen Reaktionen ist die Elektrodenspitze, weil hier die höchsten (Reaktions-)Temperaturen im System herrschen. Abb. 5.26 zeigt die Vorgänge.

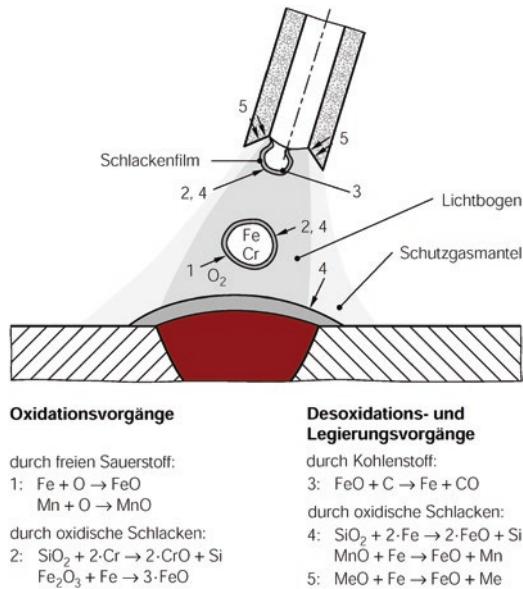


Abb. 5.26 Metallurgische Vorgänge beim Schweißen mit umhüllten Stabelektroden (stark vereinfacht)

Ein Teil der dem Schmelzbad zugeführten Legierungselemente geht durch Oxidation und Verdampfen im Lichtbogenraum sowie durch Spritzerbildung verloren.

Die Schlacken – also die geschmolzenen Elektrodenumhüllungen – verhalten sich je nach Zusammensetzung chemisch *sauer*, *neutral* oder *basisch*. Die Verbindungen des Schwefels und Phosphors sind chemisch *sauer*. Sie lassen sich daher *nur* mit einer basischen Schlacke aus der Schmelze entfernen. Diese Eigenschaft ist im Wesentlichen die Ursache der hervorragenden mechanischen Gütekriterien (Kerbschlagzähigkeit) des mit basisch-umhüllten Stabelektroden hergestellten sehr sauberen Schweißguts.

Einige wichtige Bestandteile der Umhüllung sind in Tab. 5.6 aufgeführt. Danach verhalten sich die Nichtmetalloxide vorwiegend *sauer*; Metallocide niedriger Oxidationsstufen reagieren vorwiegend *basisch*. Überwiegt ein chemisch *sauer*, *neutrales* oder *basisches* Verhalten der aus der Umhüllung entstandenen Schweißschlacke, dann spricht man von *sauer-umhüllten*, *rutile-umhüllten* (*neutraler Typ*) oder *basisch-umhüllten* Stabelektroden.

Tab. 5.6 Wichtige Umhüllungsbestandteile von Stabelektroden, eingeteilt nach ihrer metallurgischen Wirksamkeit

basisch	sauer	oxidierend	reduzierend (desoxidierend)
BaCO ₃ ¹⁾ K ₂ CO ₃ ¹⁾ CaO ⁴⁾ CaCO ₃ ⁴⁾ MgO MgCO ₃ ^{1), MnO} CaF ₂ ⁶⁾	SiO ₂ ²⁾ TiO ₂ ⁵⁾ ZrO ₂ Verbindungen der Eisenbegleiter P und S	Fe ₂ O ₃ ³⁾ Fe ₃ O ₄ ³⁾ MnO ₂ TiO ₂	Al Mn Si C

Hinweise zur Wirkung einzelner Umhüllungsbestandteile

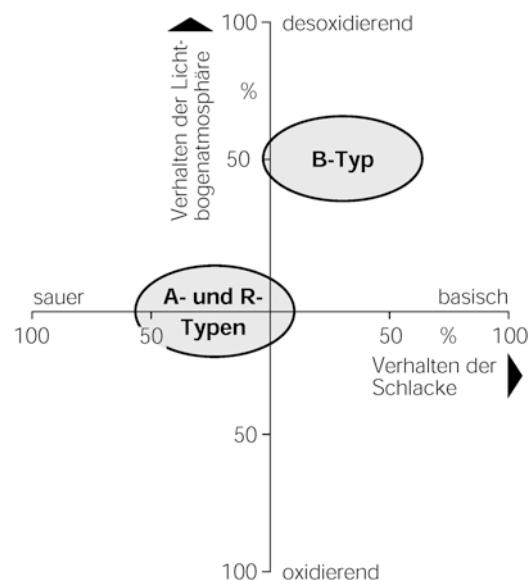
1) Schutzgas- und Schlackebildner
2) erhöht Strombelastbarkeit, dient als Schlackeverdünner
3) feinerer Tropfenübergang, lichtbogenstabilisierend
4) wie Fußnote 1), erniedrigt Lichtbogenspannung
5) erleichtert Wiederzünden des Lichtbogens und Schlackenabgang
6) verdünnt Schlacke bei basisch-umhüllten Stabelektroden

5.3.2.4.3 Die wichtigsten Stabelektrodentypen

Die *sauer-umhüllten*, *rutil-umhüllten*, *zellulose-umhüllten* und *basisch-umhüllten* Elektroden sind die wichtigsten Stabelektrodentypen. Ihr (Schweiß-)Verhalten und ihre Eigenschaften werden vorwiegend bestimmt von dem

- metallurgischen Verhalten der Schweißschlacke: *sauer*, *neutral*, *basisch*, und dem
- „chemischen“ Charakter der Lichtbogenatmosphäre: *oxidierend* (*abbrennend*), *desoxidierend* (*zubrennend*, *reduzierend*), Abb. 5.27.

Sauer-umhüllte Stabelektroden – sie haben das Kennzeichen A¹⁰ – enthalten in der Umhüllung große Anteile Schwermetalloxide (oxidische Eisen- und Manganerze, Fe₂O₃, Fe₃O₄, SiO₂). Der dadurch in der Lichtbogenatmosphäre vorhandene hohe Gehalt an freiem Sauerstoff und oxidischen Schlacken verursacht einen starken Abbrand an Legierungselementen. Daher sind saure Elektroden zum Schweißen legierter Stähle grundsätzlich ungeeignet. Der Sauerstoffgehalt im Schweißgut ist mit etwa

**Abb. 5.27** Verhalten der Lichtbogenatmosphäre und der Schlacke bei den wichtigsten Stabelektrodentypen, schematisch

0,1 % extrem groß und die wichtigste Ursache für die verhältnismäßig schlechten mechanischen Gütekriterien des Schweißguts.

Aufgrund der bei der Verbrennung der Legierungselemente (Mn und Si) freiwerdenden Wärmemenge (stark exothermer Vorgang) und der sauerstoffhaltigen Lichtbogenatmosphäre (geringe Viskosität der Metallschmelze) ergeben sich:

¹⁰englisch: acid; sauer, Säure.

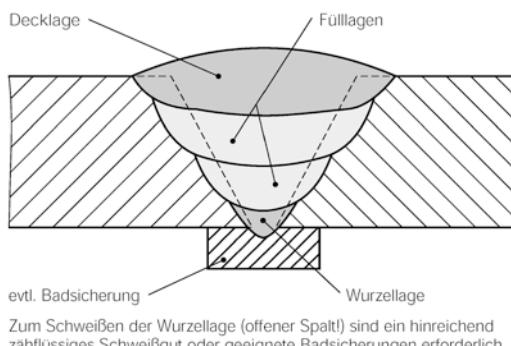


Abb. 5.28 Typischer Aufbau einer schmelzgeschweißten Stumpfnaht

- ein sprühregenartiger, *feintropfiger* Werkstoffübergang,
- eine dünnflüssige, heiße Schmelze (man spricht von einer „*heißgehenden Stabelektrode*“) und damit verbunden
- eine schlechte *Spaltüberbrückbarkeit*. Diese Eigenschaft ist vor allem beim Schweißen der Wurzellagen von Stumpfschweißverbindungen wichtig. Hierfür ist ein hinreichend zähflüssiges Schweißgut oder eine geeignete Badsicherung erforderlich (Abb. 5.28) und
- eine erheblich *eingeschränkte Zwangslagenverschweißbarkeit* der sauer-umhüllten Stabelektroden.

Da die Gütekriterien der Schweißverbindung verhältnismäßig schlecht sind, ist der Anwendungsbereich dieser Stabelektroden sehr begrenzt und nimmt ständig weiter ab.

Der Hauptbestandteil bei den **rutil-umhüllten Stabelektroden** ist Titandioxyd mit dem Kennzeichen R¹¹, das im Lichtbogen wesentlich schwächer oxidierend wirkt als Fe₂O₃, Fe₃O₄ oder MnO₂. Die annähernd neutrale Lichtbogenatmosphäre verhindert den Legierungsabbrand in hohem Maße. Die Schweißschlacke ist aber sauer.

Die rutil-umhüllten Stabelektroden werden in zahlreichen (Misch-)Typen hergestellt. Deren

Umhüllungscharakteristik kann in Richtung sauer-umhüllt (Kennzeichen AR) bzw. basisch-umhüllt (Kennzeichen BR) verschoben sein. Entsprechend groß ist der Bereich der erzielbaren Schweißeigenschaften und mechanischen Gütekriterien. Die rutil-umhüllte Stabelektrode ist daher der am häufigsten verwendete Typ. Der rutil-saure Stabelektrodentyp RA hat sich im Laufe der Zeit wegen seiner günstigen Kombination der Verschweißbarkeit und der erreichbaren Gütekriterien zu einem weiteren Grundtyp entwickelt.

Bei mitteldick-rutil-umhüllten Stabelektroden ist die Spaltüberbrückbarkeit und die Zwangslagenverschweißbarkeit sehr gut, die Heißrissempfindlichkeit gering. Sie sind vor allem zum Schweißen der Wurzellagen geeignet, wenn die damit erzielbaren Gütekriterien ausreichend sind.

Das mit dick-rutil-umhüllten Stabelektroden hergestellte Schweißgut besitzt gute bis sehr gute mechanische Gütekriterien. Ihre (Wieder-)Zündfähigkeit ist wegen der großen elektrischen Leitfähigkeit der Schlacke ausgezeichnet und besser als bei allen anderen Stabelektrodetypen.

Die Umhüllung der **basisch-umhüllten Stabelektroden** mit dem Kennzeichen B¹² enthält etwa 80 % Calciumoxid (CaO) und Calciumfluorid (CaF₂), also basische Bestandteile (Tab. 5.6).

Die Schlacke ist neutral bis reduzierend (Abb. 5.27) und weitgehend frei von Wasserstoff und Stickstoff. Die gebildete Schlacke verhält sich basisch. Der Abbrand an Legierungselementen ist daher gering und das Schweißgut sehr verunreinigungsarm. Die mechanischen Gütekriterien sind hervorragend, ebenso die Sicherheit gegen Heiß- und Kaltrisse sowie gegen Trennbrüche. Ihre herausragenden von keinem anderen Stabelektrodentyp erreichten Eigenschaften sind die extrem niedrige Übergangstemperatur der Kerbschlagarbeit des Schweißguts ($T_{ü.27} = -70 \text{ }^\circ\text{C}$, Charpy-V-Proben). Der sehr geringe Wasserstoffgehalt macht die

¹¹ Diese Bezeichnung leitet sich von Rutil (TiO₂), dem wichtigsten titanhaltigen Erz ab.

¹² englisch: basic; basisch.

B-Stabelektroden zum Schweißen der niedriglegierten, feinkörnigen Vergütungsstähle hervorragend geeignet.

Es ergeben sich die folgenden Anwendungsbereiche:

- *Verunreinigte Stähle:*

Z. B. Thomasstahl, Seigerungszonen von unberuhigten Stählen, Automatenstähle mit ihrem hohen Schwefelgehalt. Sie sind grundsätzlich für alle nicht bzw. schlecht schweißgeeigneten Stähle geeignet.

- *Höhergekohlte und (oder) legierte Stähle:* Bei erhöhtem Kohlenstoffgehalt ($C > 0,25\%$) des Stahls kann das Schweißgut wegen seiner hohen Verformbarkeit die rissbegünstigenden Eigenspannungen des martensitischen Gefüges mittels plastischer Verformungen abbauen.

- *Dickwandige und stark verspannte Konstruktionen:*

Die erforderliche Zähigkeit (d. h. niedrige Übergangstemperatur der Kerbschlagzähigkeit und eine extrem hohe Bruchverformung) lässt sich nur mit den basisch-umhüllten Stabelektroden erreichen.

Im Umgang mit der B-Elektrode müssen aber einige Besonderheiten beachtet werden. Wegen der reduzierenden Lichtbogenatmosphäre wird vorhandener Wasserdampf zu Wasserstoff reduziert, der in das Schweißgut gelangt und dieses versprödet. Daher müssen selbst Spuren von Feuchtigkeit in der Umhüllung beseitigt werden. Ein einstündiges Trocknen bei $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ vor dem Schweißen beseitigt nicht nur das *adsorptive Wasser* (aus der Umgebung von der Umhüllung aufgenommenes Wasser), sondern auch das in den Umhüllungsbestandteilen chemisch gebundene Wasser (*Konstitutionswasser*, z. B. in Kaolin: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$).

Der fachgerechte Umgang mit diesem Elektrodentyp ist aufwendiger als der mit jeder anderen Stabelektrodensorte. Der Schweißer muss in speziellen Schulungen unterwiesen werden.

Rein basische Stabelektroden sind nicht mit Wechselstrom, sondern nur mit Gleichstrom am positiven Pol verschweißbar. Diese Polung

ist notwendig, weil durch die Schwächung des Elektronenstroms der negative Pol wärmer ist als der positive. Außerdem brennt der Lichtbogen nur bei der positiven Polung der Elektrode *stabil*. Jeder andere Elektrodentyp wird am negativen Pol (kälterer Pol) verschweißt und kann normalerweise auch mit Wechselstrom verarbeitet werden.

Die Umhüllung **zellulose-umhüllter Stabelektroden** mit dem Kennzeichen C¹³ enthält einen hohen Anteil verbrennbarer Substanzen (Zellulose). Sie werden fast ausschließlich für Schweißarbeiten in Fallnahtposition verwendet. Hierfür muss die Stabelektrode verschiedene Anforderungen erfüllen:

- Die Menge der entstehenden Schlacke muss gering sein, weil sie in Schweißrichtung vorläuft und dadurch den Schweißprozess empfindlich stört.
- Der Einbrand sollte möglichst tief sein, weil als Folge der großen Schweißgeschwindigkeit die Blechkanten sicher aufgeschmolzen werden müssen, um Wurzelfehler zu vermeiden.

Als Folge der erreichbaren sehr großen Schweißgeschwindigkeit ergeben sich wesentliche wirtschaftliche Vorteile. Aber das Verarbeiten dieser stark spritzenden, große Mengen Qualm und Rauch entwickelnden C-Elektroden ist lästig und unbequem. Außerdem muss der Schweißer zum Erlernen der schwierigen manuellen Technik besonders geschult werden. Die C-Elektroden werden überwiegend im Rohrleitungsbau (Verlegen von Pipelines) eingesetzt.

5.3.2.4.4 Bedeutung des Wasserstoffs

Der Wasserstoff beeinträchtigt die Kerbschlagzähigkeit sehr stark. Insbesondere bei den vergüteten Feinkornbaustählen führt Wasserstoff zu den gefürchteten *wasserstoffinduzierten Kaltrissen*. Für die basisch-umhüllten Stabelektroden garantieren die Hersteller einen Wasserstoffgehalt von weniger als 5 ml H/100 g Schweißgut. Das DVS-Merkblatt 0957 vereinheitlicht

¹³ englisch: cellulose; Zellulose.

und regelt das Verschweißen und Trocknen der basisch-umhüllten Stabelektroden.

Die wichtigsten Wasserstoffquellen beim Schweißen sind:

- Wasserstoffverbindungen in der Umhüllung, die bei der Fertigungstrocknung nicht entfernt werden können. In erster Linie ist das Bindemittel *Wasserglas* zu nennen. Dies erzeugt den für die jeweilige Stabelektrode umhüllungstypischen *Grundwasserstoffgehalt*. Nach DVS-Merkblatt 0957 ist die *Ausgangsfeuchtigkeit* der Stabelektrode der Wasser gehalt der Umhüllung unmittelbar vor ihrer Verpackung.
- Die von dem Wasserstoffpartialdruck, d. h. von der relativen Feuchte und der Temperatur der umgebenden Luft abhängigen *Um gebungsfeuchtigkeit*. Sie wird je nach der Be schaffenheit der Umhüllung zeitabhängig in die Umhüllung aufgenommen. Die *Gesamt feuchtigkeit* ist die Summe aus Ausgangs feuchtigkeit und Umgebungsfeuchtigkeit.
- Bei zu langem Lichtbogen kann Luft in den Lichtbogenraum gelangen.

Aufgrund neuerer Entwicklungen bei der Stahl herstellung (Produktion vergüteter schweißge eigneter, daher extrem wasserstoffempfindlicher Baustähle) sollten Stabelektroden mit einem Wasserstoffgehalt von weniger als 3 ml/100 g zur Verfügung stehen.

Die Vorteile dieser extrem wasserstoffarmen Stabelektroden sind:

- Deutlich reduzierte Vorwärmtemperatur (kein Vorwärmen nötig).
- Feuchteresistente Elektroden nehmen Feuchtigkeit aus der Atmosphäre nur sehr langsam auf. Dann entfallen beheizte Köcher für rückgetrocknete Elektroden.

Die entscheidenden qualitätsbestimmenden Eigenschaften der basisch-umhüllten Stabelektroden hinsichtlich des Wasserstoffs sind:

- Der diffusible Anteil des Wasserstoffs im festen Schweißgut ferritischer Stähle. Dieser

wird nach DIN EN ISO 3690 mit der Queck silbermethode bestimmt.

- Die Feuchteresistenz der Umhüllung von Stabelektroden. Die Vorschriften für ihre Er mittlung und prüftechnische Hinweise sind zu finden in DIN EN ISO 14372.

Für Schweißarbeiten unter vom Normklima ab weichenden klimatischen Bedingungen müssen die von der Luftfeuchte abhängigen meistens sehr viel größeren Wasserstoffgehalte bekannt sein. Schweißungen z. B. an Konstruktionen im Offshore-Bereich oder in anderen Gebieten mit hoher Luftfeuchtigkeit sind Beispiele für ex trem klimatische Bedingungen.

Häufig wird die Bedeutung des Taupunktes un terschätzt. Vor allem unter Baustellen bedingungen (Baugelände ist i. Allg. nicht be heizt!) ist zu beachten, dass ein Unterschreiten dieses von der Umgebungstemperatur ab hängigen Wertes zur Kondensatbildung auf der Werkstückoberfläche führt. Bei den klimatischen Bedingungen Luftfeuchtigkeit $\varphi = 60\%$ und 20°C beginnt z. B. die Kondenswasserbildung auf den (im Freien lagernden) Stabelektroden bei einer Temperatur unter $+12^\circ\text{C}$.

5.3.2.4.5 Normung der umhüllten Stabelektroden

Die jetzt verbindliche Norm ist DIN EN ISO 2560. Sie legt die Anforderungen (Festigkeits und Zähigkeitseigenschaften) fest für die Ein teilung umhüllter Stabelektroden beim Licht bogenhandschweißen unlegierter und mikro legierter Stähle mit einer Mindeststreckgrenze bis zu 500 N/mm^2 . Mit ihrer Hilfe wird die Auswahl und Anwendung erleichtert und ein rationelles Abschätzen der Güte und Wirtschaftlichkeit der Schweißverbindung ermöglicht.

Die DIN EN ISO 2560 wurde unter Anwendung des sog. *Kohabitationsprinzips* erarbeitet (lat.: co habere = zusammenwohnen; eine ungeschickte Wortwahl: „*Kohabitation*“ ist die medizinische Bezeichnung für Geschlechts verkehr). Hierbei werden für denselben Gegen stand der Normung *zwei* Merkmalbeschreibun gen „A“ und „B“ festgelegt. Die Einteilung nach dem System „A“ entspricht dabei weitgehend

den Festlegungen im europäischen Raum, d. h. im Wesentlichen der bisher gültigen DIN EN 499. Die Einteilung nach dem System „B“ beruht überwiegend auf Normen, die im Pazifikraum gelten. Im Folgenden werden überwiegend die Festlegungen des europäischen Systems „A“ etwas ausführlicher beschrieben.

Die ausgewiesenen mechanischen Gütewerte werden an *reinem Schweißgut* im nicht wärmebehandelten Zustand ermittelt. Die mechanischen Gütewerte des Schweißguts sollen denen des unbeeinflussten Grundwerkstoffs entsprechen. Selbst bei einer perfekten Übereinstimmung der mechanischen Gütewerte ist ein Versagen des Bauteils aus verschiedenen Gründen nicht auszuschließen:

- Über die Eigenschaften der Wärmeeinflusszone sind keine Aussagen möglich.
- Die für die Bauteilsicherheit entscheidenden Zähigkeitswerte sind keine Werkstoffkonstanten, sondern werden u. a. von der Werkstückdicke und dem davon abhängigen Eigenspannungszustand beeinflusst.

Die Bezeichnung der umhüllten Stabelektroden nach DIN EN ISO 2560 ist aussagefähig und anwendungs-freundlich. Sie besteht aus den folgenden Teilen:

- Kurzzeichen für den *Schweißprozess* (E=Elektrohandschweißen, auch als Lichtbogenhandschweißen bezeichnet).
- Kennziffer für die *Festigkeit und Dehnung des Schweißguts*, siehe Tab. 5.7.

Tab. 5.7 Kennzeichen für Festigkeit und Dehnung des reinen Schweißguts nach DIN EN ISO 2560

Kenn-ziffer	Mindest-streckgrenze ¹⁾	Zugfestigkeit ²⁾	Mindest-dehnung ²⁾
	N/mm ²	N/mm ²	%
35	355	440 bis 570	22
38	380	470 bis 600	20
42	420	500 bis 640	20
46	460	530 bis 680	20
50	500	560 bis 720	18

¹⁾ Es gilt die untere Streckgrenze (R_{el}). Bei nicht ausgeprägter Streckgrenze ist die 0,2 %-Dehngrenze ($R_{p0,2}$) anzusetzen.

²⁾ $L_0 = 5 \cdot d$.

Tab. 5.8 Kennzeichen der Kerbschlageigenschaften des reinen Schweißguts nach DIN EN ISO 2560

Kennbuchstabe/ Kennziffer	Temperatur (°C) für Mindest-kerbschlagarbeit, KV = 47 J
Z	Keine Anforderungen
A	+ 20
0	± 0
2	- 20
3	- 30
4	- 40
5	- 50
6	- 60

Tab. 5.9 Kurzzeichen für die chemische Zusammensetzung des Schweißguts mit Mindeststreckgrenzen bis zu 500N/mm² nach DIN EN ISO 2560

Legierungs-kurzzeichen	Chemische Zusammensetzung ¹⁾ in Prozent		
	Mn	Mo	Ni
Kein	2,0	–	–
Mo	1,4	0,3 bis 0,6	–
MnMo	> 1,4 bis 1,6	0,3 bis 0,6	–
1Ni	1,4	–	0,6 bis 1,2
2Ni	1,4	–	1,8 bis 2,6
3Ni	1,4	–	2,6 bis 3,8
Mn1Ni	> 1,4 bis 2,0	–	0,6 bis 1,2
1NiMo	1,4	0,3 bis 0,6	0,6 bis 1,2
Z	Jede andere vereinbarte Zusammensetzung		

¹⁾ Falls nicht festgelegt: Mo < 0,2 %, Ni < 0,3 %, Cr < 0,2 %, V < 0,08 %, Nb < 0,05 %, Cu < 0,3 %.

- Kennziffer für die *Kerbschlagarbeit des Schweißguts*, siehe Tab. 5.8.
- Kurzzeichen für die *chemische Zusammensetzung des Schweißguts*, siehe Tab. 5.9.
- Kurzzeichen für die *Art der Umhüllung*, die mit folgenden z. T. schon bekannten Buchstaben bzw. Buchstabengruppen gebildet werden:

- A** = sauer-umhüllt,
- C** = zellulose-umhüllt,
- R** = rutil-umhüllt,
- RR** = dick-rutil-umhüllt,
- RA** = rutil-sauer-umhüllt,
- RB** = rutil-basisch-umhüllt,
- RC** = rutil-zellulose-umhüllt,
- B** = basisch-umhüllt

- Kennziffer für die durch die Umhüllung bestimmte *Ausbringung* (s. Beziehung weiter unten) und die *Stromart*.
- Kennziffer für die *Schweißposition*, die für die Stabelektrode empfohlen wird. Sie wird wie folgt angegeben:
 1. alle Positionen,
 2. alle Positionen, außer Fallposition,
 3. Stumpfnaht, Wannenposition; Kehlnaht, Wannen-, Horizontal-, Steigposition,
 4. Stumpfnaht, Wannenposition,
 5. wie 3, und für Fallposition empfohlen.
- Kennzeichen für *wasserstoffkontrollierte Stabelektroden*. Damit die Wasserstoffgehalte eingehalten werden können, muss der Hersteller die empfohlene Stromart und die Trocknungsbedingungen bekannt geben. Bei diesen Elektroden darf der Wasserstoff im Schweißgut $5 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$, $10 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ bzw. $15 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ nicht überschreiten (**H5**, **H10**, **H15**).

Die *Abschmelzleistung* S und die *Ausbringung* A nach DIN EN 22401 sind Kenngrößen, mit denen sich die Wirtschaftlichkeit der Stabelektrode beurteilen lässt:

- *Abschmelzleistung* $S = \frac{m_s}{t_s}$ in kg/h
- *Ausbringung* $A = \frac{m_s}{m_k} \cdot 100$ in %

mit

m_s abgeschmolzene Masse der Stabelektrode (abzüglich Schlacke und Spritzer) in kg,

m_k Kernstabmasse in kg,

t_s reine Schweißzeit in h

5.3.2.5 Ausführung und Arbeitstechnik

Die *Wirtschaftlichkeit* der schweißtechnischen Fertigung sowie die *technische* und *metallurgische Qualität* der Schweißverbindung sind *u. a.* von den *Fugenformen* und den *Nahtarten* abhängig. Dabei sind das Beseitigen von Verunreinigungen in der Nähe der Schweißstelle, wie z. B. Rost, Fett, Öl, Feuchtigkeit, Farbe, organische Bewichse wichtige vorbereitende

Maßnahmen. Wesentlich ist der Einsatz *geprüfter Schweißer*, auch für weniger kritische Bauteile. Sie bestimmen entscheidend die Qualität des geschweißten Bauteils und wirken darüber hinaus als „Konstrukteur“, da sie abhängig von ihrem handwerklichen Können (und ihrem Verantwortungsbewusstsein!), häufig die Nahtgeometrie (z. B. Naht-, Wurzelüberhöhung, Einbrandkerben, andere Fehler) und auch die metallurgische Qualität und die Festigkeitseigenschaften der Schweißverbindung bestimmen (z. B. Poren, Einschlüsse, Bindefehler).

5.3.2.5.1 Stoßart; Nahtart; Fugenform

Die zu schweißenden Teile werden am *Schweißstoß* durch *Schweißnähte* zu einem *Schweißteil* vereinigt. Abb. 5.29 zeigt die wichtigsten Stoßarten. Die Fuge ist die Stelle, an der die Teile am Schweißstoß durch Schweißen verbunden werden. Sie kann sich ohne Bearbeitung ergeben (z. B. I- oder Kehl-Fuge), oder sie kann bearbeitet sein (z. B. V-, U- oder Y-Fuge, s. DIN EN 12345). Sie soll möglichst einfach herstellbar sein (z. B. mithilfe des Brennschneidens oder Scherschneiden), sich aber zuverlässig und fehlerfrei mit Schweißgut füllen lassen. Dazu muss der Schweißer die Fugenflanken mit dem Lichtbogen vollständig aufschmelzen.

Die wichtigsten Nahtarten sind

- Stumpfnähte,
- Stirnnähte und
- Kehlnähte.

Die Nahtarten sind in Abb. 5.30 mit den zugehörigen auf Konstruktionszeichnungen anzugebenden Sinnbildern nach DIN EN 22553 aufgeführt.

Die gewählte Fugenform hängt ab von dem

- Werkstück (in einigen Fällen auch vom Werkstoff!) und der Werkstückdicke, den
- Sicherheitsanforderungen an das Bauteil, der
- Art der Beanspruchung (statisch, dynamisch, schlagartig, bei tiefer/hoher Temperatur) und den
- Schweißpositionen.

Stoßart	Geometrische Anordnung der Fügeteile	Symbol
Stumpfstoß	Teile liegen in einer Ebene	
Überlappstoß	Teile überlappen sich und liegen flächig aufeinander	
T-Stoß	Zwei Teile stoßen rechtwinklig aufeinander	
Eckstoß	Zwei Teile stoßen mit ihren Enden unter beliebigem Winkel aufeinander	

Abb. 5.29 Die wichtigsten Stoßarten nach DIN EN ISO 17659 (Auswahl)

Nahtart	Benennung	Darstellung	Symbol
Stumpfnähte	I-Naht		
	V-Naht		
	Y-Naht		
	X-Naht		
Stirnnaht	Stirnflachnaht		
Kehlnähte	Kehlnaht		
	Überlappnaht		
	Ecknaht		

Abb. 5.30 Die wichtigsten Nahtarten nach DIN EN ISO 17659 (Auswahl). Stumpfnähte, Stirnnaht, Kehlnähte

Die Geometrie der Schweißnaht – und somit die zu wählende Fugenform – wird durch folgende Faktoren bestimmt

- Einbrandtiefe t ,
- Schweißnahtbreite b und
- Schweißnahtüberhöhung h .

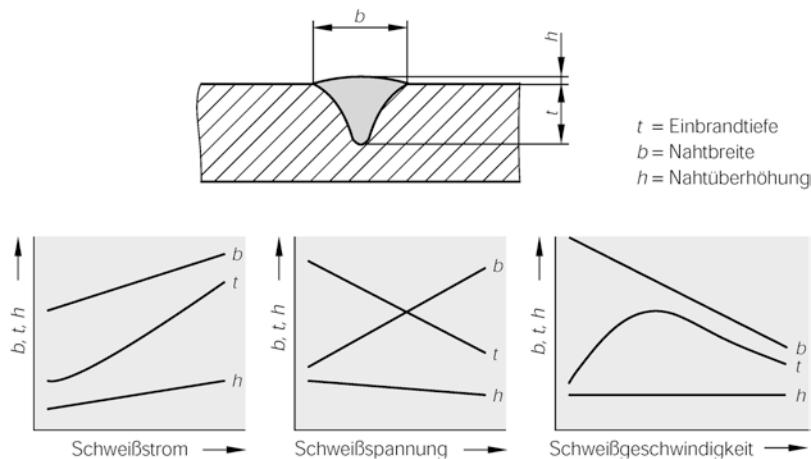


Abb. 5.31 Einfluss der Schweißparameter Spannung U , Strom I und Vorschubgeschwindigkeit v auf die Nahtform, d. h. auf die sie bestimmenden Größen t , b und h

Diese Einflussgrößen hängen ab vom Schweißverfahren (E-Handschweißen oder mechanische Verfahren: MSG-, UP-Verfahren) und den Einstellwerten. Abb. 5.31 zeigt den prinzipiellen Einfluss der Parameter Schweißspannung U , Schweißstrom I und Vorschubgeschwindigkeit v auf die Nahtform, d. h. auf die sie bestimmenden Größen t , b und h .

Bei großer Einbrandtiefe kann eine Fuge mit geringerem Volumen, d. h. kleinerem Öffnungswinkel α und größerer Steghöhe c wie in Abb. 5.32 gewählt werden. Je nach der Einbrandtiefe des verwendeten Schweißverfahrens ergeben sich erhebliche Unterschiede im Schweißgutgewicht aufgrund der unterschiedlich großen Öffnungswinkel. Abb. 5.33 zeigt z. B. die Ver-

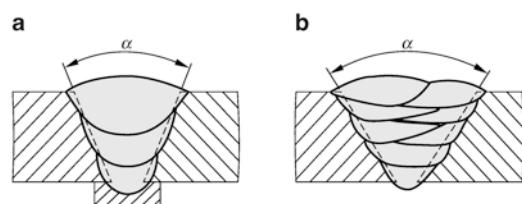


Abb. 5.33 Einfluss des Schweißverfahrens auf die Größe des erforderlichen Öffnungswinkels α , d. h. der Schweißzeit (Wirtschaftlichkeit). **a** MAG, $\alpha = 40^\circ$ bis 45° **b** E-Hand, $\alpha = 60^\circ$ (bis 70° , z. B. bei Zwangslagen, Nickel)

hältnisse für das MAG- und das E-Handschweißen. Grundsätzlich sind mit einer geringeren Schweißgutmenge folgende Vorteile verbunden:

- Größere Wirtschaftlichkeit,
- geringere Lagenzahl,
- geringere Schweißzeit,
- geringerer Bauteilverzug.

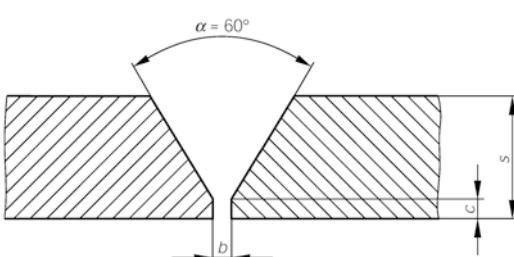


Abb. 5.32 Nahtvorbereitung für eine Stumpfnaht. Der Öffnungswinkel α und der Stegabstand b bestimmen in hohem Maße die Schweißgutmenge (Schweißzeit und Wirtschaftlichkeit) und den Verzug der Schweißverbindung

Abb. 5.34 enthält verschiedene Fugenformen für Stumpfnähte nach DIN EN ISO 9692-1. Die Wahl der Fugenform wird von einer Reihe wirtschaftlicher und technischer Überlegungen bestimmt:

- Sie sollte einen möglichst *geringen Querschnitt* haben. Ein geringeres Schweißgutvolumen bedeutet geringeren Verzug

Wanddicke s mm	Ausführungsart	Benennung	Symbol	Fugenform	Maße				Bemerkungen
					a, β Grad	b mm	c mm	f mm	
< 3 2 bis 5	einseitig beidseitig	I-Naht	(I)		—	0 bis 2 1 bis 3	—	—	Fuge durch sauberen Scheren- bzw. Brennschnitt erzeugt: billig. Aufmischung sehr groß; Vorsicht bei verunreinigtem Werkstoff. Dicke Bleche kann Metall-Lichtbogen nicht mehr (wirtschaftlich) aufschmelzen, aber MSG- und UP-Verfahren.
3 bis 15	einseitig beidseitig	V-Naht	(V)		≈ 60 ≈ 60	2 bis 3 0 bis 2	0 bis 2 ¹⁾	—	Fuge noch einfach herstellbar. Bei beidseitigem Schweißen Wurzel ausarbeiten (Schleifen, Fugenhobeln o. ä.) und Lage gegen-schweißen (Kapplage). Wie bei allen unsymmetrischen Fugenformen Gefahr der Winkelschrumpfung. Bei einseitigem Schweißen ist Schmelzbadsicherung häufig vorteilhafter.
< 12	einseitig	Steilflanken-naht	(W)		8 bis 12	4 bis 8	Fußnote ¹⁾	—	Fuge nahezu symmetrisch. Einzubringendes Schweißgutvolumen geringer als bei der V-Naht. Badsicherung erforderlich (Blechstreifen), der aber erhebliche Kerbwirkung erzeugt. Daher nur sinnvoll, wenn Unterlage belassen werden kann, d. h. bei vorwiegend statischer Belastung.
12 bis 30	beidseitig	2/3-X-Naht	(X)		$\alpha_{1,2} = 60$ $\alpha_1 = 60$ $\alpha_2 = 40$ bis 60	1 bis 3 1 bis 3	0 bis 2 0 bis 2	2/3	Fuge symmetrisch, bei wechselseitigem Schweißen (vor allem bei der 2/3-X-Naht) kaum Winkelschrumpfung. Fugenquerschnitt geringer als bei V-Naht. Herstellung teuer.
< 16	beidseitig	U-Naht	(U)		≈ 8	0 bis 2	2 bis 4	—	Sehr teuer in der Herstellung, geringerer Fugenquerschnitt als bei der X-Naht. Geringe Winkelschrumpfung. Vorwiegend für nur einseitig zugängliche oder (und) hochwertige Verbindungen, z. B. im Kessel- und Apparatebau.

¹⁾ Ist die Steghöhe $c = 0$, dann werden die Kanten aus schweißtechnischen Gründen (Schmelzbad kann sich im Wurzelbereich besser ausbilden) meistens trotzdem gebrochen.

Abb. 5.34 Hinweise zur Wahl der Schweißnahtvorbereitung (Fugenformen) für Stumpfnähte (Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen, Gasschweißen), nach DIN EN ISO 9692-1

und kürzere Schweißzeiten, also höhere Wirtschaftlichkeit.

- Sie sollte *symmetrisch* sein: Die Winkelschrumpfung α wie in Abb. 5.35 ist bei beidseitigem (gleichzeitigem) Schweißen sehr gering.

5.3.2.5.2 Einfluss der Schweißposition

Die Wirtschaftlichkeit der Fertigung und die Güte der Schweißverbindung werden außer von den schon besprochenen Einflüssen (z. B. Schweißzeit, Zusatzwerkstoffe) maßgeblich von der Schweißposition bestimmt. Grundsätzlich sollten aus den folgenden Gründen die PA-(w-) oder PB-(h)-Position, also die *Normallagen* (Abb. 5.4) gewählt werden, denn:

- Schweißarbeiten in Zwangslagen erfordern erheblich längere Schweißzeiten, weil als Folge der Schwerkraft mit dieser Schweißtechnologie nur kleine, d. h. sehr rasch abkühlende Schmelzbäder erzeugt werden können. Außerdem erfordern die schwerer erlernbaren Zwangslagentechniken längere Schulungszeiten als die Technik in Normallage. Zum Füllen des Fugenquerschnittes sind daher wesentlich mehr Raupen erforderlich. Die zweckmäßige und wesentlich wirtschaftlichere Pendellagentechnik (Abb. 5.8) kann daher nicht angewendet wer-

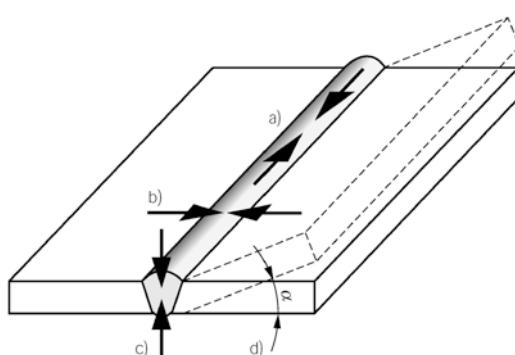


Abb. 5.35 Richtungen der Schrumpfvorgänge in einer Schweißverbindung. a Längsschrumpfung b Querschrumpfung c Dickenschrumpfung d Winkelschrumpfung α

den, sondern nur die sehr zeitaufwendige Zugraupentechnik.

- Trotz der erforderlichen größeren Handfertigkeit des Schweißers ist die Fehlerhäufigkeit in den zwangslagengeschweißten Verbindungen meistens größer, d. h. die Schweißqualität geringer. In einem überkopfgeschweißten Schweißgut ist z. B. der Gehalt nichtmetallischer Einschlüsse und Poren grundsätzlich höher (Gase und Schlacken können nicht mehr ungehindert nach „oben“ steigen) als in jeder anderen Position. Aus diesem Grund sind die Prüfkosten beträchtlich größer.
- Als Folge der nur kleinvolumigen, rasch abkühlenden Schweißbäder werden die Zähigkeit von Schweißgut und der WEZ im Allgemeinen geringer, die Härte in den Wärmeinflusszonen bei Fügeteilen aus Stahl größer und der Verzug der Bauteile in der Regel geringer.

Außer diesen wirtschaftlichen Vorteilen zeichnet sich die Pendellagentechnik noch durch bemerkenswerte metallurgische Vorzüge aus. Das ungünstige dendritische Gussgefüge des Schweißguts und die grobkörnige Ausbildung der WEZ werden durch die große Energiezufuhr der einzelnen Lagen zum Teil durch partielles Aufschmelzen des Schweißguts und Umlöten der WEZ z. T. beseitigt.

5.3.2.5.3 Magnetische Blaswirkung

Der Lichtbogen – ein beweglicher stromdurchflossener Leiter – wird durch die um jeden stromdurchflossenen Leiter aufgebauten magnetischen Felder leicht abgelenkt. Die Ursache sind Dichteunterschiede der magnetischen Kraftlinien bei gekrümmten Strombahnen. Die Blaswirkung des Lichtbogens bei nichtmagnetisierbaren Werkstoffen erfolgt in Richtung der Werkstückaußenkante.

Bei ferromagnetischen Werkstoffen ist die Blasrichtung umgekehrt, Abb. 5.36. Es entsteht

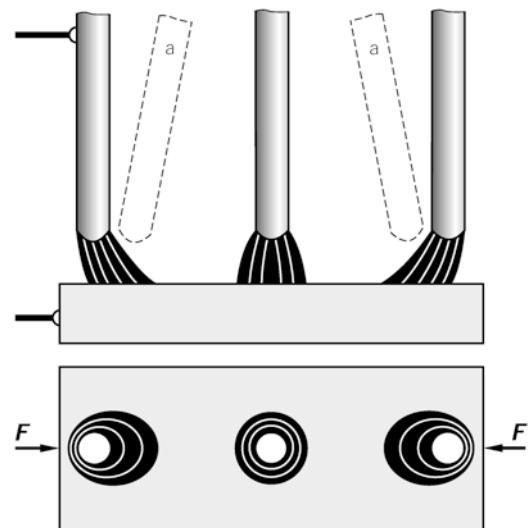


Abb. 5.36 Blaswirkung beim Schweißen eines ferromagnetischen Werkstoffs. Das wesentlich stärkere magnetische Feld wird an den Kanten verdichtet („Kantewirkung“). Es entsteht immer eine ins Blechinnere gerichtete Kraft F . Die häufig starke Blaswirkung wird beim Handschweißen u. a. durch eine besondere Elektrodenhaltung „a“ gemindert

daher *immer* eine ins Blechinnere gerichtete magnetische Kraft bzw. Blaswirkung.

Der Lichtbogen bläst stets

- in Richtung der größeren Werkstoffmasse,
- weg vom Stromanschluss,
- bei Wurzellagen (Spalt) stärker als bei Decklagen.

Das magnetische Feld kann vor allem an Kanten (Schweißstoß) so groß werden, dass ein ordnungsgemäßer Schweißablauf nicht mehr gewährleistet ist. Die Blaswirkung macht sich insbesondere bei Gleichstrom unangenehm bemerkbar. Der Lichtbogen brennt unruhig und kann sogar verlöschen. Weitere in der Praxis verwendete Methoden sind das *Entmagnetisieren* mit kontinuierlich abnehmendem Wechselstrom oder das Erzeugen eines *magnetischen „Gegenfeldes“*. Diese Methode wird bei Rohren vielfach praktiziert.

5.3.2.6 Anwendungsgrenzen

Das Lichtbogenschweißen ist ein universelles Verfahren. Es wird zurzeit wegen seines geringen apparativen Aufwandes und seiner einfachen Handhabung am meisten angewendet. Das Verfahren kann *netzunabhängig* mit Verbrennungsmotor und stromerzeugendem Generator betrieben werden. Es ist daher hervorragend unter Baustellenbedingungen aller Art einsetzbar. Hinzu kommt, dass die Schweißarbeiten mit den entsprechend geeigneten Stabelektroden in jeder Schweißposition ausgeführt werden können. Die zahlreichen Möglichkeiten, das Schweißgut metallurgisch zu beeinflussen (Auflegieren, Desoxidieren) machen es zum Schweißen der meisten metallischen Werkstoffe hervorragend geeignet. Mit basisch-umhüllten Stabelektroden lassen sich Schweißverbindungen mit mechanischen Gütekriterien herstellen, die nur von wenigen anderen Verfahren erreicht werden.

Das Lichtbogenhandschweißen ist in den folgenden Fällen nicht zu empfehlen. Diese Einschränkungen haben überwiegend werkstoffliche und fertigungstechnische Ursachen:

- Bei Werkstückdicken unter 2 mm ist der Einsatz des Kurzlichtbogen-, des WIG- und des Gasschweißverfahrens zweckmäßiger. Hierbei ist die Gefahr des „Durchfallens“ der Schmelze geringer.
- Bei Werkstückdicken über 20 bis 25 mm werden aus wirtschaftlichen Gründen praktisch nur noch Hochleistungsschweißverfahren mit wesentlich größerer Abschmelzleistung verwendet (UP-Schweißen, EB-Schweißen).
- Bei einigen Werkstoffen wie Aluminium und Aluminiumlegierungen, Kupfer und allen hochreaktiven Werkstoffen (z. B. Titan, Tantal, Zirkonium, Beryllium, Molybdän) ist die Gefahr einer Luftaufnahme des flüssigen Schmelzbads und damit einer Versprödung der Schweißverbindung gegeben. Diese Metalle können mit WIG- und Plasmaschweißen wesentlich zuverlässiger geschweißt werden.

5.3.3 Schutzgasschweißen (SG) (ON: 13–15)

5.3.3.1 Verfahrensprinzip

Der Lichtbogen brennt zwischen einer abschmelzenden Drahtelektrode oder einer nicht abschmelzenden Elektrode (Wolfram) und dem Werkstück. Das Schutzgas wird von außen zugeführt, um das

- Schmelzbad, den
- übergehenden Zusatzwerkstoff bzw. die Elektrodenspitze und die
- hoch erhitzten Bereiche der Schweißnaht

vor der Atmosphäre (Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff) zu schützen, Abb. 5.37. Damit das Schutzgas diese Aufgaben erfüllen kann, muss es in ausreichender Reinheit und Menge am Schweißort zur Verfügung stehen. Sind Reaktionen einzelner (aktiver) Gaskomponenten mit dem flüssigen Schweißgut möglich, dann lassen sich mithilfe von Desoxidations- bzw. Legierungselementen im Zusatzwerkstoff metallurgisch nachteilige Reaktionen vermeiden.

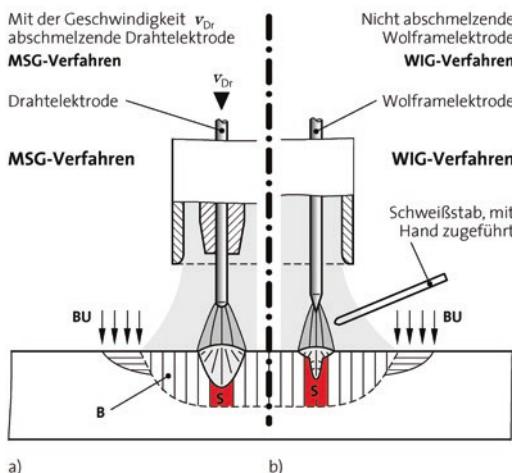
5.3.3.2 Wirkung und Eigenschaften der Schutzgase

Den wirksamsten Schutz des Schmelzbades vor der Atmosphäre bieten Schutzgase, die im flüssigen Metall vollständig *unlöslich* sind. Es entstehen somit keine Poren oder andere Reaktionsprodukte. Dies trifft nur auf die einatomigen Edelgase zu, die chemisch träge (inert) sind, d. h., sie gehen kaum chemische Verbindungen mit der Schmelze ein. Aus Kostengründen werden hauptsächlich Argon und Argon-Helium-Gemische verwendet.

Die wichtigsten Verfahren, bei denen man intere Gase verwendet, sind das

- **Wolfram-Inertgasschweißen (WIG, ON 141)** und das
- **Metall-Inertgasschweißen (MIG, ON 131).**

Schutzgas schützt Elektroden spitze, Schmelzbad und hoherwärmeten Bereich der Schweißnaht vor Zutritt der Atmosphäre.



a) **Schmelzbad (S)** kann große Mengen atmosphärischer Gase lösen: Die Folgen können Gasaufnahme, Poren, Abbrand, Versprödung sein.

Hocherwärmter Bereich (B): Hier können durch Luftzutritt bei verschiedenen Metallen metallurgische Mängel entstehen: Versprödung durch Gasaufnahme und Korrosionsgefahr (z. B. CrNi-Stähle). Vom Schutzgas nicht mehr geschützte auf höhere Temperaturen erwärmte Bereiche (**BU**), können bei den hochreaktiven Werkstoffen (z. B. Titan, Tantal) durch Gasaufnahme vollständig versprüden. Diese Werkstoffe müssen daher durch zusätzliche Maßnahmen (z. B. Schweißen in Schutzgaskammer) vor Luftzutritt vollständig geschützt werden.

Abb. 5.37 Verfahrensprinzip der Schutzgasschweißverfahren (SG). a MSG-Verfahren, b WIG-Verfahren

Die Schutzgase beeinflussen aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften die Lichtbogencharakteristik und damit in weiten Grenzen die *Nahform*, die *Einbrandtiefe*, die *Einbrandform*, die zulässige *Schweißgeschwindigkeit* und die Art des *Werkstoffüberganges*. Letzteres ist bei den Schutzgasschweißverfahren, die mit stromführendem Zusatzwerkstoff (Abschn. 5.3.3.4) arbeiten, für die Qualität der Verbindung und den Verfahrensablauf von großer Bedeutung.

Verschiedene physikalische Eigenschaften von in der Schweißtechnik verwendeten Schutzgasen sind in Tab. 5.10 zusammengestellt. Die hier angegebenen Reinheiten sind Mindestwerte, die Taupunkte sind Höchstwerte. Der Taupunkt ist eine leicht bestimmbare Kenngröße, mit der der Feuchtigkeitsgehalt von Gasen angegeben wird. Unterhalb des Taupunktes scheidet sich aus dem Gas Feuchtigkeit in Form von kondensierten Wassertröpfchen (Tau) aus. Das

Schutzgas ist umso feuchtigkeitsärmer (hochwertiger, d. h. wirksamer!), je niedriger der Taupunkt ist.

Dichte ρ Ein dichteres Gas bedeckt zuverlässiger die Schweißstelle und wird bei Montageschweißungen nicht so leicht durch Luftzug weggedrückt. Die Schutzwirkung von Argon ist daher gegenüber dem leichteren Helium deutlich besser.

Ionisierungsspannung U_I^{14} , **Lichtbogenspannung** U_L : Der Lichtbogen unter Argon brennt bei erheblich niedrigeren Spannungen als unter Helium. Die Ursache ist die geringe Ionisierungsspannung des Argons. Der Lichtbogen lässt sich daher leicht zünden, der Schweißvorgang verläuft weich und ohne wesentliche Geräusche. Der Spannungsabfall in der Lichtbogensäule U_S unter Argon ist außerdem deutlich geringer (siehe Abb. 5.19). Diese Eigenschaft macht Argon besonders geeignet für Handschweißverfahren und zum Schweißen dünner Bleche, denn ein unbedachtiges (bei Handschweißverfahren nahezu unvermeidliches!) Ändern der Lichtbogenlänge führt nur zu einer geringen Änderung der Lichtbogenspannung. Die erzeugte Energie, d. h., das aufgeschmolzene Werkstoffvolumen bleibt nahezu konstant.

Die Lichtbogenspannung U_L und der Spannungsabfall in der Lichtbogensäule U_S sind bei Helium deutlich größer als bei Argon, d. h., die erzeugte Energie ist sehr viel größer (tiefer Einbrand). Der höhere Spannungsabfall ist beim mechanischen WIG-Verfahren (unter Helium) nützlich, weil die Spannung bequem durch Variieren der Lichtbogenlänge geändert werden kann.

Wärmeleitfähigkeit λ : Die Wärmeleitfähigkeit von Argon beträgt etwa 1/10 derjenigen von Helium. Die Stromdichte im Kern ist wesentlich größer als am Rand. Die typische Einbrandform des Argon-Lichtbogens beruht auf dieser Erscheinung: Es entsteht ein tiefer, fingerförmiger

¹⁴Dies ist die Spannung, mit der man ein Elektron beschleunigen muss, damit es ein Atom ionisiert.

Tab. 5.10 Physikalische Eigenschaften einiger für das SG-Schweißen verwendetener Schutzgase im Vergleich zu Luft

Gas	Dichte $\rho^1)$	Molare Masse M	Wärmeleitfähigkeit $\lambda^2)$	Ionisierungsspannung U_i	Reinheit mind.	Taupunkt max.
	kg/m ³	g/mol	W/(m·K)	eV	Vol.-%	°C
Luft	1,29	29	0,03			
Argon	1,784	39,95	0,02	15,7	99,995	-60
Helium	0,178	4,00	0,15	24,5	99,99	-50
Wasserstoff	0,090	2,016	0,18	13,5	99,5	-50
CO ₂	1,978	44,01	0,016	14,4	99,7	-35
Stickstoff	1,25	28,01	0,026	14,5	99,7	-50
Sauerstoff	1,43	32,00	0,026	13,2	99,5	-50

¹⁾ Bei 273 K und 1013,25 hPa
²⁾ Bei 293 K

Einbrand im Zentrum, der am Rand flacher wird, wie Abb. 5.38 zeigt.

Die ungleiche Energieverteilung im Argon-Lichtbogen ist auch die Ursache der bei hohen Schweißgeschwindigkeiten auftretenden Einbrandkerben. Das gilt vor allem für die MSG-Verfahren, die verfahrensbedingt mit sehr großen Schweißgeschwindigkeiten betrieben werden können. Die nur geringe Menge flüssigen Schweißguts, die wegen des hier flachen Einbrandes an die Schmelzränder fließt, kann die entstehenden Kerben nicht mehr auffüllen.

Die große Stromdichte im Argon-Lichtbogenkern, und die große Masse der Argon-Ionen sind die Ursachen der **Reinigungswirkung** des WIG- bzw. MIG-Verfahrens beim Schweißen der Leichtmetalle Aluminium, Magnesium, Titan und deren Legierungen. Die hochschmelzenden, zähen und festen Oxidhäute, die sich auf diesen Werkstoffen spontan bilden, müssen vor dem Schweißen beseitigt werden. Im anderen Fall sind gütemindernde Einschlüsse

im Schweißgut die Folge. Dies kann zwar mit chemisch sehr aggressiven Flussmitteln geschehen (sie müssen die chemisch extrem beständigen Aluminiumoxidhäute lösen können!), oder sauberer, wirtschaftlicher und ohne Rückstände mit dem *Edelgaslichtbogen*. Bei positiv gepolter Elektrode „schlagen“ die Argon-Ionen auf die negativ gepolte Werkstückoberfläche und zerstören die Oxidhaut, unterstützt durch thermische Dissoziation. Diese Erscheinung wird als *Reinigungswirkung* bezeichnet. Ein gleichartiger Prozess findet erstaunlicherweise auch bei dem viel leichteren Edelgas Helium statt. Der Vorgang wird hier offenbar durch die sehr viel größere Lichtbogenspannung (= Feldstärke) ermöglicht, die die Teilchen wesentlich stärker beschleunigen kann. Ihre kinetische Energie, d. h., ihre „Durchschlagskraft“ ist also vergleichbar mit der des Argon-Ionenstromes. Helium wird zzt. nur für mechanische Schweißverfahren verwendet, weil sich die erforderliche kleine Lichtbogenlänge von einem Handschweißer nicht zuverlässig einhalten lässt.

Bei den Schutzgasschweißverfahren mit abschmelzender Drahtelektrode (Abschn. 5.3.3.4) werden außer den Edelgasen/Edelgasgemischen häufig Gasgemische verwendet, die chemisch aktiv sind. Die aktiven Bestandteile sind meistens Sauerstoff (O₂) und Kohlendioxid (CO₂). Die Zugabe kontrollierter Mengen aktiver Gase verändert den *Lichtbogentyp* (Sprühlichtbogen, Langlichtbogen, Kurzlichtbogen) und macht den *Lichtbogen stabiler*. Der *Werkstoffübergang* und die *Nahtform* werden günstig beeinflusst, die

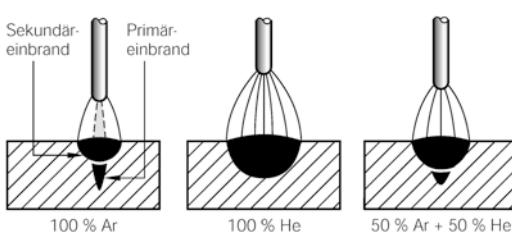


Abb. 5.38 Einbrandformen beim Wolfram-Inertgasschweißenverfahren in Abhängigkeit vom verwendeten Schutzgas

Spritzerneigung nimmt ab. Die in der Schweißpraxis verwendeten Schutzgase sind in DIN EN ISO 14175 genormt.

Von großer Bedeutung für die mechanischen Gütwerte der Schweißverbindung und den gewünschten Verfahrensablauf sind

- Art des Werkstoffübergangs und die
- Menge und Art der aktiven (oxidierenden, reduzierenden) Gasbestandteile.

5.3.3.3 Wolfram-Schutzgasschweißen (WSG) (Ordnungsnummer: 14)

5.3.3.3.1 Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) (Ordnungsnummer: 141)

5.3.3.3.1.1 Verfahrensprinzip

Der Lichtbogen brennt zwischen der nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück unter Edelgasschutz, Abb. 5.39. Für das WIG-Verfahren können nur Edelgase bzw. Edelgasgemische höchster Reinheit (99,99 % bei Argon) verwendet werden. Geringste Sauerstoffgehalte führen zu starkem Abbrand der hoch erhitzten, teuren Wolframelektrode, d. h. zu

deren rascher Zerstörung. Außerdem sind häufig Wolframeinschlüsse im Schweißgut – entstanden durch Abschmelzen der Elektrode – Ursache für die dann sehr schlechten mechanischen Gütwerte des Schweißguts.

Der Schutz der Schmelze unter inertnen Gasen ist vollkommen, die metallurgische Qualität des Schweißguts und die mechanischen Gütwerte sind hervorragend. Denn der Edelgaslichtbogen ist im Gegensatz zu den meisten anderen Schweißverfahren eine „reine“ Wärmequelle ohne Schlacken, Dämpfe, Verbrennungsgase und sonstige Verunreinigungen. Das gilt aber nur dann, wenn sämtliche Verunreinigungen (Rost, Farbe, Öl, andere Oberflächenschichten) im Schweißbereich vollständig beseitigt wurden. Extreme Sauberkeit ist in diesem Fall besonders wichtig, weil während des Schweißens keine Reinigungsvorgänge (Entschwefeln, Denitrieren, Desoxidieren der Schmelze) ablaufen können. Anders ist es z. B. beim Gasschweißen (reduzierende Zone), beim Lichtbogenhandschweißen (Reaktionen der Umhüllungsbestandteile) oder beim UP-Schweißen (Reaktionen der Pulverbestandteile). Das „Reinigen“ der Schmelze muss hier also mithilfe der in dem massiven Schweißstab untergebrachten Desoxidationsmittel zuverlässig erfolgen können.

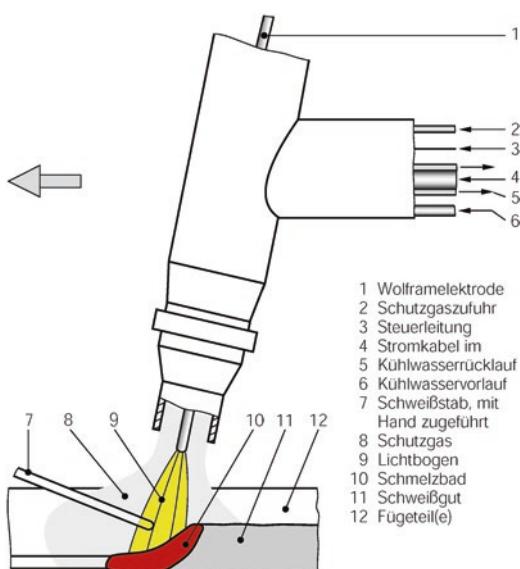


Abb. 5.39 Verfahrensprinzip des WIG-Schweißens

5.3.3.3.1.2 Schweißanlage und Zubehör

Das Schema einer WIG-Schweißanlage zeigt Abb. 5.40. Die wichtigsten Bestandteile sind:

- Schweißstromquelle,
- Schweißbrenner mit Wolframelektrode und dem Schlauchpaket,
- Schaltschrank mit Zündgerät (Impulsgenerator) bei Wechselstrombetrieb,
- Sieb-(Filter-)Kondensator für das Schweißen von Leichtmetallen,
- Schutzgasflasche.

Schweißstromquellen

Es werden Gleich- und Wechselstromquellen mit ausschließlich *fallender* statischer Kennlinie verwendet. Die Gleichrichter sind meistens transduktork- oder bei höheren technologischen Anforderungen (z. B. Wahl verschiedener

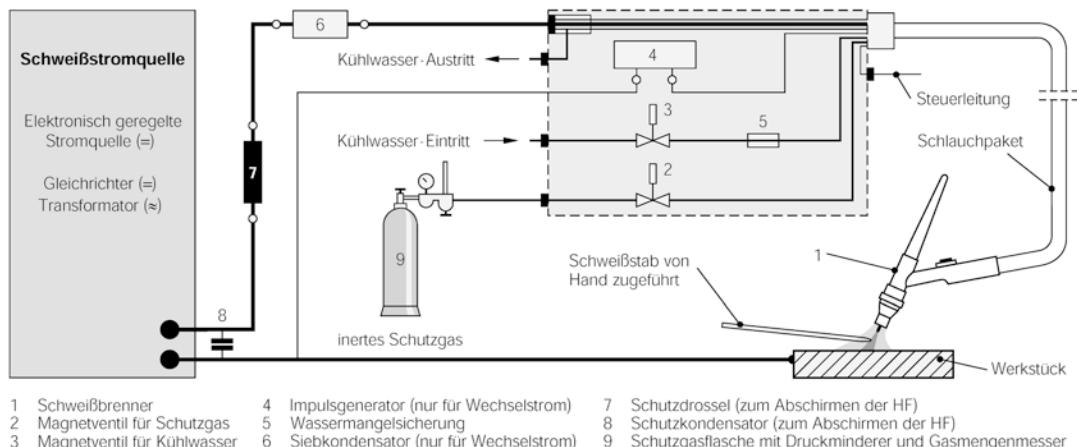


Abb. 5.40 Wassergekühlte WIG-Schweißanlage (schematisch)

Stromprogramme) thyristor- bzw. inverter-gesteuert. Die Stromquellen werden sehr oft mit einem fußbedienbaren Fernsteller zum feinfühligen Ändern des Schweißstromes ausgerüstet, weil i. Allg. beide Hände des Schweißers beschäftigt sind.

Schweißbrenner

Bis zu Schweißstromstärken von etwa 150 A sind die Schweißbrenner luftgekühlt, darüber wassergekühlt. Spannhülsen dienen zur Aufnahme der in der Regel 175 mm langen Wolframelektroden. Die Standzeit dieser Elektroden beträgt trotz der hohen Lichtbogen-temperatur (bei einer Schmelztemperatur des Wolframs von 3410 °C) etwa 40 h.

Wolframelektrode

Im Allgemeinen wird sie am negativen Pol angeschlossen. Die Erwärmung ist dann am ge-

ringsten, d. h. die Strombelastbarkeit der Elektrode am größten. Die positive Polung wird wegen der extrem großen thermischen Belastung der Elektrode praktisch nicht verwendet. Aluminium, Magnesium und deren Legierungen schweißt man wegen der „oxidlösenden“ Wirkung („Reinigungswirkung“) mit Wechselstrom: Während der positiven Halbwellen wird die Oxidhaut zerstört, und während der negativen kühl die Elektrode ab. Zum Verbessern der Elektronenemission und der Zündfreudigkeit des Lichtbogens enthalten die Elektroden (genormt in DIN EN ISO 6848) häufig Oxide, die die Elektronenaustrittsarbeit erheblich verringern: Thoriumoxid (ThO_2), Zirkoniumoxid (ZrO_2) und Lanthanoxid (LaO_2), siehe Tab. 5.11.

Die Stabilität des Lichtbogens, d. h., letztlich das Schweißergebnis, hängt weitgehend von der richtigen Form der Elektrodenspitze ab. Die Elektrode muss umso spitzer sein, je geringer

Tab. 5.11 Chemische Zusammensetzung und Eigenschaften von Wolframelektroden nach DIN EN ISO 6848, Auswahl

Kurz-zeichen	Farbkenn-zeichnung	Oxidzusätze Massegehalt in %	Strombe-lastbarkeit	Eigenschaften
WP	Grün	–	5 (5=niedrig)	Weicher Lichtbogen, geringe Strombelastbarkeit, geringe Standzeit, hauptsächlich für WIG-Schweißen von Al und Al-Leg. verwendet
WZr 3 WZr 8	Braun Weiß	0,30 bis 0,50 ZrO_2 0,70 bis 0,90 ZrO_2	4 3	Besonders geeignet für Schweißarbeiten an Kernkraftwerkskomponenten, für Gleichstromschweißung nur bedingt geeignet
WLa 15 WLa 20	Gold Blau	1,40 bis 1,60 LaO_2 1,90 bis 2,10 LaO_2	2 1	Für niedrige Schweißströme ist WL 15 Universalelektrode. Für Mikroplasmaschweißen und Plasmamuschmelzschniden

Stromart	Form der Elektrodenspitze
Wechselstrom und Gleichstrom, Elektrode positiv gepolt.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Strombelastung richtig ■ Strombelastung zu hoch <p>Die gewünschte Halbkugelform der Wolframelektrodenspitze ergibt sich durch ein kurzzeitiges »Warmbrennen« auf einem Kupferblech oder technisch eleganter mit Hilfe digitaler Stromquellen.</p>
Gleichstrom, Elektrode negativ gepolt.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Für kleinste Schweißstromstärken, Kegel 1:6 bis 1:3, Elektrodenspitze <i>nicht</i> verrunden, möglichst glatte Kegeloberfläche durch Schleifen und anschließendes Polieren erzeugen. ■ Für übliche Schweißstromstärken Kegel > 1:3, Spitze nicht verrunden. ■ Für mechanische Schweißverfahren Kegel 1:1 bis 1:2, Spitze nicht verrunden.

Abb. 5.41 Formen der Wolframelektrodenspitze beim WIG-Schweißen

die Stromstärke ist. Sonst bildet sich nicht der für die Lichtbogenstabilität erforderliche flüssige Oberflächenfilm an der Elektrodenspitze, Abb. 5.41. Die gewünschte Spitzenform und die Oberflächengüte werden beim Schweißen mit Gleichstrom mit speziellen Schleifscheiben hergestellt. Beim Schweißen mit Wechselstrom sollte der etwa halbkugelförmige Tropfen durch kurzzeitiges Warmbrennen z. B. auf einem Kupferblech vor dem Schweißen oder mittels digitaler Stromquellen erzeugt werden.

Zündhilfen

Sie erlauben ein *berührungsloses* Zünden des Lichtbogens, wodurch Wolframeinschlüsse und vorzeitiger Verschleiß der Elektrode vermieden werden. Beim Schweißen mit Wechselstrom muss eine Zündhilfe vorhanden sein, weil sonst nach jedem Nulldurchgang der Spannung der Lichtbogen verlöschen würde. Die Rekombination der Ladungsträger erfolgt so schnell, dass bei ihrem Wiederanstieg nach dem Nulldurchgang auf den Betrag der Lichtbogenzündspannung keine Ladungsträger mehr vorhanden sind. Der Lichtbogen kann also nicht geziündet werden.

Ein Wiederzünden des Lichtbogens wird durch *Hochfrequenzspannungen* (einige MHz) erreicht, die der Schweißspannung überlagert werden oder technisch besser mit *Impulszündgeräten* (Hochspannungs-Impulszündgeräte). Die nur im Nulldurchgang der Spannung abgegebenen Spannungsimpulse (bis 10.000 V) verursachen deutlich geringere Störungen des Rundfunk- und Fernsehempfangs als die schwer beherrschbare Hochfrequenzspannung. Wenn die (HF-)Spannungsimpulse stören (z. B. Prozessindustrie, Kraftwerke), sollte das digitale Berührungszünden verwendet werden, mit dem sich auch die schädlichen Wolframeinschlüsse vermeiden lassen.

Sieb- oder Filter-Kondensator

Das Schweißen der Leichtmetalle (Al, Mg) erfolgt wegen der Reinigungswirkung und im Hinblick auf eine möglichst lange Standzeit der Elektroden mit *Wechselstrom*. Die Elektronenemission ist bei negativ gepolter Elektrode wegen ihrer im Vergleich zum Werkstück geringen Masse deutlich stärker als bei einem negativ gepolten Werkstück. Der Elektronenaustritt wird durch die relativ kalte Schmelzbadoberfläche erheblich erschwert. Die Folge dieser sehr unterschiedlichen Elektronenemission ist ein *Gleichrichtungseffekt*: Die Amplitude der positiven Stromhalbwelle, die die Reinigungswirkung erzeugt, ist merklich geringer als die negative. Die Fähigkeit, Oxide zu zerstören nimmt ab, der Lichtbogen wird „härter“ und die thermische Belastung des Transformatoren durch den Gleichstromanteil größer. Daher wird in den meisten Fällen der Gleichstromanteil I_{gl} mithilfe von Kondensatoren „ausgesiebt“. Dies bewirkt der im Schweißstromkreis in Reihe geschaltete *Sieb-* oder *Filterkondensator*. Der Kondensator muss aber so dimensioniert sein, dass der Schweißstrom ihn nicht zerstört, d. h., er ist groß und teuer, Abb. 5.42.

Eine negativ gepolte Elektrode zündet schlechter und viel langsamer. Bei den neuen elektronischen Stromquellen wird mit positiver Polarität gezündet und danach sofort automatisch umgepolzt.

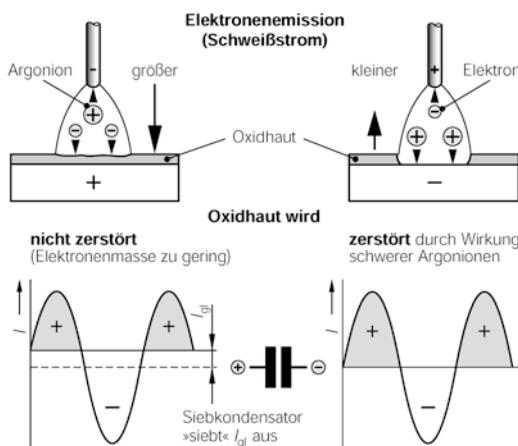


Abb. 5.42 Gleichrichterwirkung beim WIG-Schweißverfahren bei Anwendung von Wechselstrom, Reinigungswirkung

Kraterfüleinrichtung

Der Endkraterbereich von Schweißnähten weist eine Reihe metallurgischer Mängel auf: Das Nachfließen der Schmelze ist *plötzlich* beendet (Gefahr von ErstarrungsrisSEN oder Endkraterlunkern), und die Abkühlgeschwindigkeit ist sehr groß, weil die Wärmezufuhr schlagartig beendet wird (Spannungsrisse). Der Einsatz von Kraterfüleinrichtungen, besonders für heißenanfällige und thermisch empfindliche Werkstoffe (Legierungen mit einem größeren Erstarrungsintervall), ist hier sehr zweckmäßig. Durch stufenweises oder kontinuierliches Abschalten des Stromes kühlt der rissanfällige Endkrater langsamer ab und kann noch mit abschmelzendem Zusatzwerkstoff aufgefüllt werden.

5.3.3.3.1.3 Hinweise zur praktischen Ausführung
Die zu verbindenden Teile sollten metallisch blank sein. Dies kann durch Bürsten, Schleifen (oder vor allem bei Aluminium, Magnesium und deren Legierungen) sehr wirksam durch eine chemische Behandlung (Beizen) erreicht werden. Aus Gründen der Korrosionsbeständigkeit dürfen zum Säubern von NE-Metallen nur Bürsten aus CrNi-Stahl verwendet werden. In manchen Fällen, wie z. B. bei Messingen, Kupfer oder Bronzen, müssen die sich beim Schweißen erneut bildenden Oxide bzw. Schlacken mithilfe von Flussmitteln gelöst werden.

Der Lichtbogen wird gewöhnlich durch Berühren des Werkstücks mit der Elektrode gezündet. Diese Methode ist aber nicht empfehlenswert. Wenn keine Zündhilfe (z. B. das im Abschnitt „Zündhilfen“ bereits besprochene digitale Berührungsände) verwendet wird, sollte der Lichtbogen auf einem Stück Kupfer gezündet (und „warmgebrannt“) werden.

Es kann mit oder ohne Zusatzwerkstoff geschweißt werden. Der Schweißstab wird unter einem Winkel von 10° bis 30° gegen die Werkstückoberfläche geneigt und tropfenweise im Schmelzbad abgesetzt. Für Verbindungsschweißungen wird meistens das von der Gasschweißung bekannte Nachlinksschweißen bevorzugt (Abschn. 5.3.1.5). Nach dem Abschalten des Schweißstromes muss das Schutzgas noch einige Sekunden auf das Schmelzbad strömen, damit dieses und die heiße Wolframelektrode nicht mit der Luft in Berührung kommen. In den meisten Fällen ist ein Schweißen ohne Zusatzwerkstoff nicht empfehlenswert, weil der Grundwerkstoff unzureichende Mengen an Desoxidationsmitteln enthält. Eine ausgeprägte Porenbildung ist daher oft die Folge.

Bei den hochreaktiven Metallen, die in hohem Maß zur Gasaufnahme neigen (z. B. Ti, Mo, Zr), oder für die Herstellung hochwertiger schlacke- und anlauffarbenfreier Nähte (z. B. Wurzelnähte in hoch beanspruchten Druckrohren) muss auch die Wurzelseite geschützt werden. Das geschieht am häufigsten durch Spülen mit einem sog. Formergas. Dafür kommen in Betracht: Argon, Ar-H₂-Gemische (schwerer als Luft) sowie Stickstoff und N₂-H₂-Gemische (leichter als Luft), Tab. 5.12.

Andere Möglichkeiten zum Schutz der Wurzelseite sind genutzte Unterlegschielen aus Kupfer oder (hochlegiertem) Flachstahl bzw. untergelegte Pulverkissen wie in Abb. 5.65 (4).

5.3.3.3.1.4 WIG-Impulslichtbogenschweißen

Eine neuere Entwicklung stellt die *Impulstechnik* dar, verdeutlicht in Abb. 5.43. Hierbei wird zum Schweißen ein Grundstrom I_g verwendet, dem ein rechteckförmiger Impulstrom I_m bestimmter Amplitude und Frequenz

Tab. 5.12 Anwendungsbereiche der wichtigsten Schutzgase beim MSG-Schweißen. Die Klammerwerte entsprechen den Bezeichnungen der Schutzgase nach DIN EN ISO 14175 (alt: DIN EN 439)

Schutzgas	chemisches Verhalten	Anwendung
Ar (I1) He (I2)	inert	Al, Mg, Cu, Ti (Ti nur mit I1), Ni und deren Legierungen sowie andere stark oxidierende Metalle. Hervorragend zum Schweißen der zähen, korrosionsbeständigen, Oxidschichten bildenden Metalle geeignet (»Reinigungswirkung«): Al, Mg, Ti.
Ar – He (I3)		Al, Mg, Cu, Ni und deren Legierungen. He erhöht Temperatur und Einbrand, erlaubt höhere Schweißgeschwindigkeiten, ohne dass Einbrandkerben entstehen.
Ar – O ₂ (M13)	schwach oxidierend	Für hochlegierte Stähle gut geeignet, wenn O ₂ -Zusatz gering ($\leq 3\%$). Technisch besser und wirtschaftlicher ist die Verwendung der Impulstechnik.
Ar – CO ₂ (M12, M21)	oxidierend	Für Kurzlichtbogentechnik $\geq 5\% \text{CO}_2$, für unlegierte Stähle 10% bis 25% CO ₂ erforderlich. Standardgemisch mit 18% CO ₂ , in einigen Fällen für hochlegierte Stähle anwendbar, aber nur bei geringer Korrosionsbeanspruchung empfehlenswert.
Ar – CO ₂ – O ₂ (M14, M23, M24, M25, M33, M34, M35)		Mit CO ₂ -Anteilen bis 50% und O ₂ -Anteilen bis 6% für un- und (niedrig-)legierte Stähle und Feinkornbaustähle ($R_p \leq 500 \text{ N/mm}^2$). Bei geringer Korrosionsbeanspruchung auch für hochlegierte Stähle anwendbar.
CO ₂ (C1)		Für unlegierte und viele (niedrig-)legierte Stähle sowie für normalgeglühte und TM-behandelte Feinkornbaustähle geeignet, aber nicht für höhergekohlte Stähle.

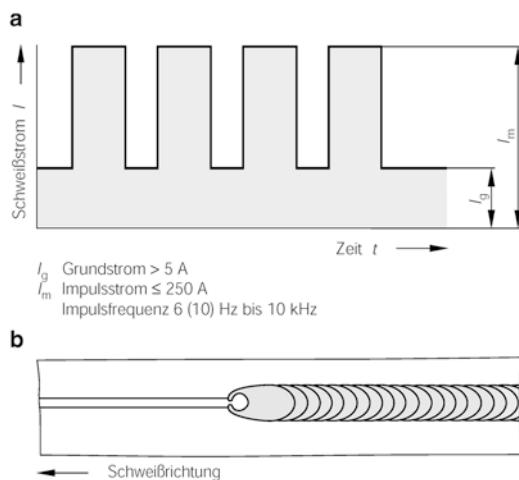


Abb. 5.43 WIG-Schweißen mit Stromimpulsen. **a** Verlauf des Schweißstroms **b** impulsgeschweißte Naht; jeder „Schweißpunkt“ wird durch einen Impuls erzeugt

überlagert ist. Es werden überwiegend *Inverterschweißstromquellen* verwendet. Der Grundstrom wird so bemessen, dass der Lichtbogen in der Pausenzeit stabil bleibt und die Spitze des Schweißstabes ausreichend erwärmt wird. Der Impulstrom dient dazu, den Tropfen vom Zusatzwerkstoff zu lösen und den Grundwerkstoff aufzuschmelzen. Um eine dichte Schweißnaht erzeugen zu können, müssen die Einstellwerte

(Grund-, Impulsstrom, Impulszeit und Schweißgeschwindigkeit) sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Daher wird dieses Verfahren zweckmäßig mechanisiert eingesetzt. Durch die verringerte gut kontrollierbare Wärmezufuhr ist es vorzugsweise für Dünnbleche, für die Wurzelschweißung sowie zum Schweißen wärme- und gasempfindlicher und leicht versprödbarer Werkstoffe (Al-, Ti-Werkstoffe, hochlegierte Stähle) geeignet. Schweißarbeiten in Zwangslagen sind hier einfacher ausführbar, weil das Schmelzbad besser beherrschbar ist und durch Wahl geeigneter Impulsparameter dickflüssiger gehalten werden kann. Die Gefahr des „Durchfallens“ der Wurzel ist geringer. Außerdem wird das Einbrandverhalten verbessert und die Schweißgeschwindigkeit erhöht.

5.3.3.3.1.5 Anwendung und Grenzen

Das Verfahren eignet sich zum Schweißen aller Metalle (außer Blei oder Zinn). Es wird vor allem für Werkstückdicken bis zu ungefähr 10 mm und zum Schweißen hochwertiger Wurzellagen verwendet.

Andererseits gelingen Schweißverbindungen noch bei sehr geringen Werkstückdicken von ca. 0,1 mm (z. B. Faltenbälge), wenn spitzgeschliffene und polierte Wolframelektroden und Spannvorrichtungen verwendet werden.

Die Schweißstromquellen müssen noch bei einigen Ampere Schweißstrom einen stabil brennenden Lichtbogen erzeugen können.

Von überragender Bedeutung ist das Verfahren für das Schweißen der *Leichtmetalle*. Der Reinigungseffekt ermöglicht die Beseitigung der hochschmelzenden Oxide (Al_2O_3 , MgO) ohne Anwendung der sonst erforderlichen äußerst aktiven Flussmittel. Das Schweißgut ist daher von hoher metallurgischer Qualität und die Verbindung wegen nicht vorhandener Flussmittelrückstände korrosions- und rissicher. Es ist empfehlenswert, Fügeteile aus Aluminium mit Werkstückdicken $s \geq 5$ bis 6 mm auf 100 bis 250 °C ($s \geq 15$ bis 20 mm) vorzuwärmten.

Das WIG-Verfahren eignet sich hervorragend zum Schweißen der hochlegierten CrNi(MoMn)-Stähle sowie aller Leichtmetalle.

Das austenitische Schweißgut (CrNi-Stähle) ist sehr heißenfällig. Mit metallurgischen (z. B. erhöhter Mangangehalt im Schweißgut) und verfahrenstechnischen Maßnahmen (schnell schweißen, geringe Streckenenergie) lässt sich die Heißrissenfälligkeit beseitigen. Auf der erwärmten Werkstoffoberfläche bilden sich bei diesen Stählen Oxide (Anlauffarben), die nicht nur das Aussehen beeinträchtigen, sondern auch die Korrosionsbeständigkeit entscheidend verringern. Das Besprühen dieser Werkstoffbereiche mit zusätzlichem „Schutzgas“ (z. B. Argon, Argon-Wasserstoff, Formiergas) während des Schweißens oder das Beizen des Bauteils nach dem Schweißen schafft Abhilfe.

Die *hochreaktiven Werkstoffe*, wie z. B. Titan, Tantal, Molybdän und Zirkonium, nehmen schon bei geringfügig erhöhten Temperaturen (> 200 °C) Gase wie Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff auf. Die Folge sind Eigenschaftsänderungen, die bis zur völligen Unbrauchbarkeit der geschweißten Verbindung (Versprödung!) führen. Durch Schweißen mit brauseähnlichen Vorrichtungen, die den erwärmten Werkstoff ständig mit Gas besprühen, Schweißen in einer Schutzgaskammer oder unter Vakuum, kann der Einfluss der atmosphärischen Gase ausgeschlossen werden. Mit dem WIG-Verfahren lassen sich dann zähe und korrosionsbeständige Verbindungen herstellen.

Aus wirtschaftlichen Gründen (niedrige Schweißgeschwindigkeit und relativ kleine Abschmelzleistung) wird das Verfahren bei Werkstückdicken $s \geq 10$ mm nicht mehr angewendet. Die metallurgische Qualität der Schweißverbindung und die nahezu universelle Anwendbarkeit des WIG-Verfahrens werden von keinem anderen Verfahren erreicht.

5.3.3.3.2 Wolfram-Plasmaschweißen (WP) (Ordnungsnummer: 15)

5.3.3.3.2.1 Physikalische Grundlagen

Das *thermische Plasma* ist eine Erscheinungsform der Materie. Es ist ein dissoziertes, hochionisiertes, elektrisch leitendes Gas, das somit überwiegend aus Ladungsträgern, also aus Elektronen (e^-) und Ionen (z. B. Ar^+) besteht. Diesen Zustand erreicht man durch Energiezufuhr zum Gas. Infolge der Geschwindigkeitszunahme der Gasteilchen werden sie beim Zusammenstoß *dissoziiert* (z. B. $\text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H} - Q_1$) bzw. *ioniert* (z. B. $\text{H} \rightarrow \text{H}^+ + e^- - Q_2$).

Der Plasmazustand kann mit einem elektrischen Lichtbogen einfach erzeugt werden. Dieser brennt aber nicht frei wie bei üblichen Lichtbogenschweißverfahren, sondern wird mithilfe geeigneter Einrichtungen – wie z. B. wassergekühlte Kupferdüsen – sehr stark eingeschnürt. Bei höheren Stromstärken wird der Plasmastrahl nach Verlassen der Düse häufig durch ein kaltes, elektrisch schlecht leitendes Gas stabilisiert. Abb. 5.44 zeigt die Arbeitsweise des Verfahrens. Im Plasmakern werden Temperaturen bis 30.000 K mit entsprechenden Leistungsichten von 10^5 bis 10^6 W/cm^2 erreicht.

5.3.3.3.2.2 Verfahrensgrundlagen

Die Geschwindigkeit der Ladungsträger ist in weiten Grenzen einstellbar. Sie hängt hauptsächlich von der Menge und der Geschwindigkeit des verwendeten Gases und der im Plasma herrschenden Stromstärke ab, d. h. von der zugeführten elektrischen Energie. Bei geringer kinetischer Plasmaenergie wird der flüssige Werkstoff *nicht* weggeblasen, d. h., diese Verfahrensbedingungen sind zum *Schweißen* geeignet.

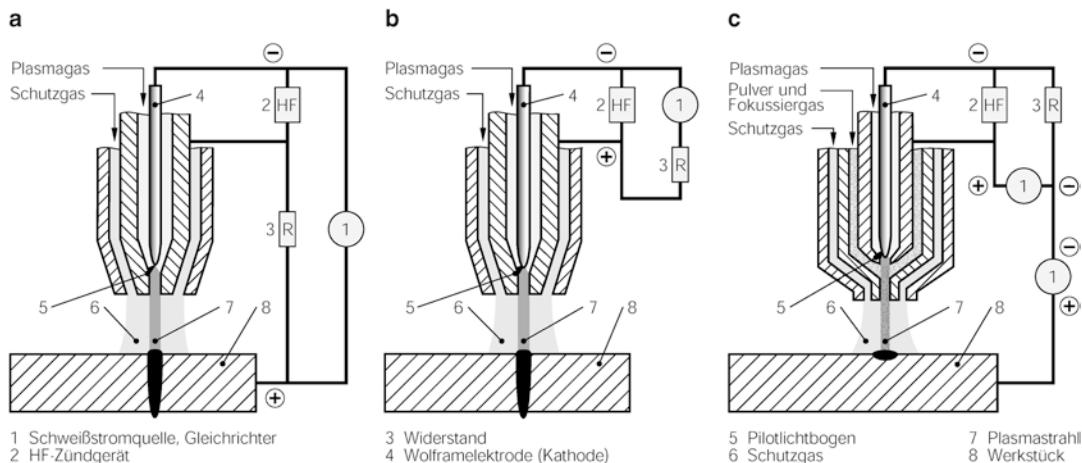


Abb. 5.44 Mögliche Lichtbogenvarianten der Plasmatechnik. **a** Übertragener Lichtbogen (WPL, Ordnungsnummer 153): Für Verbindungsschweißen und Plasmaschneiden **b** nicht übertragener Lichtbogen (WPS, Ordnungsnummer 154): Für Plasmaspritzen, seltener Plasmaauftragschweißen **c** übertragener und nicht übertragener Lichtbogen (WPSL, Ordnungsnummer 155): Für Plasmaauftragschweißen, Mikroplasma- und Verbindungsschweißen

Mit zunehmender Energie des Plasmas wird dessen mechanische Wirkung größer und der verflüssigte Werkstoff durch die kinetische Energie des Plasmastrahls aus der Fuge geblasen. Der Werkstoff ist getrennt, er wurde *plasma-schnitten*.

Das *Plasmaschweißen* ist eine neuere Weiterentwicklung des WIG-Verfahrens. Eine Verfahrensübersicht, Hinweise zur Gaseauswahl und Kennwerte des Verfahrens enthält das DVS-Merkblatt 2707. Das Plasmaschweißverfahren eignet sich hervorragend für folgende Arbeiten:

- Verbindungsschweißen an Werkstückdicken ab 0,01 mm mit dem Mikroplasmaschweißen,
- Verbindungsschweißen der *hochlegierten Chrom-Nickel-Stähle* bis etwa 13 mm Dicke (I-Stoß!) mithilfe des „*Schlüsselloch-Effekts*“ mit im Vergleich zum WIG-Schweißen etwa der doppelten Schweißgeschwindigkeit sowie
- Auftragschweißungen vor allem von Hartmetallen, Legierungen auf Eisen-, Nickel- und Kobalbasis mit sehr geringem Aufschmelzgrad (Abschn. 5.1.3 und Abb. 5.2).

Je nach der Art der Erzeugung des eingeschränkten Lichtbogens (Plasma) unterscheidet

man folgende Formen, die unterschiedliche Plasmabrenner-Bauarten erfordern (Abb. 5.44):

- **WPL:** Plasmalichtbogenschweißen mit übertragenem Lichtbogen, Ordnungsnummer: 153,
- **WPS:** Plasmastrahlschweißen mit nicht übertragenem Lichtbogen, Ordnungsnummer: 154,
- **WPSL:** Plasmastrahl-Plasmalichtbogenschweißen mit übertragenem und nicht übertragenem Lichtbogen, Ordnungsnummer: 155.

Bei dem **übertragenen Lichtbogen (WPL)** dient das Werkstück als Anode (positiver Pol), die Wolframelektrode als Kathode (negativer Pol). Als Plasmagas („Zentrumsgas“) wird hauptsächlich das Edelgas Argon verwendet, das geringe Mengen Wasserstoff (5 bis 10 % zum Schweißen der hochlegierten CrNi-Stähle) oder Helium (Schweißen von Titan und Zirkonium) enthalten kann. Argon ist leicht ionisierbar und ermöglicht daher ein leichtes Zünden des Lichtbogens. Der Schutz der hoch erhitzten Wolframelektrode vor einer Oxidation ist dadurch ähnlich gut wie beim WIG-Schweißen.

Der (Haupt-)Lichtbogen muss bei allen Plasmavarianten mit externen Hilfsmitteln

gezündet werden. Bei mechanisierten Schweiß- und Schneidanlagen erfolgt die Zündung mit Hochfrequenzstrom, (2) in Abb. 5.44. Dabei entsteht ein Hilfslichtbogen (5) (*Pilotlichtbogen*) zwischen der Elektrode und der Düse. Dieser ionisiert das Plasmagas. Zum Schutz der wassergekühlten Düse (Gefahr des Aufschmelzens!) begrenzt ein Widerstand im Pilotstromkreis (3) den Strom. Der Hauptlichtbogen (7) kann dann auf das Werkstück überspringen. Nach einer maschinenintern vorgebbaren Zeit erlischt der Pilotlichtbogen. Ein zusätzlicher Schutzgasmantel umgibt konzentrisch den als Plasmastrahl brennenden Lichtbogen und schützt das flüssige Schweißgut vor der Atmosphäre (Gasaufnahme, Oxidation). Der Plasmastrahl hat nach dem Austreten aus der Düse die Neigung sich zu verbreitern, wodurch seine Leistungsdichte abnimmt. Ein schwer ionisierbares *Fokussiergas*, wie Ar-He- oder Ar-H₂-Gemische, stützt und formt das Plasma und engt es zusätzlich ein. Das Fokussiergas wird dem Lichtbogen durch einen ringförmigen Schlitzkanal (zwischen dem Schutzgas- und dem Plasmakanal liegend) konzentrisch zugeführt. Diese Verfahrensvariante wird überwiegend für das **Plasmaspritzen (Metallspritzen)**, seltener für das **Plasmaauftragschweißen** verwendet.

Durch die Zugabe molekularer Gase wie Wasserstoff oder Stickstoff zum Plasmagas wird der Wärmeinhalt dieser Gase viel größer als der des Argons bei gleicher Temperatur. Die Dissoziations- und Ionisierungswärme wird beim Auftreffen des heißen Gases auf das kalte Werkstück durch Rekombination der Gasatome bzw. -ionen wieder frei. Dadurch werden der Einbrand deutlich erhöht, der Plasmabogen weitgehend stabilisiert und der Wärmeübergang zum Werkstück verbessert.

Der **nicht übertragene Lichtbogen (WPS)** brennt zwischen der Wolframelektrode und der positiv gepolten Düse innerhalb des Brenners (Abb. 5.44b). Es tritt also nur das Plasma aus dem Brenner aus. Mit beiden Verfahrensvarianten können elektrisch leitende Werkstoffe (übertragener/nicht übertragener Lichtbogen) und nicht leitende (nicht übertragener Lichtbogen) geschweißt und auch thermisch getrennt werden.

Die Kombination von **übertragenem/nicht übertragener Lichtbogen (WPSL)** in einer Anlage führt zu einem für das Auftragschweißen (Plasmapulverauftragschweißen) sehr geeigneten Verfahren. Die Vorteile des Verfahrens bestehen im Wesentlichen in der Möglichkeit, die *Auftragdicke* und vor allem die *Einbrandtiefe* (Aufschmelzgrad) sehr genau einzustellen zu können.

5.3.3.3.2.3 Verfahrensvarianten

Abhängig von dem Zweck des Verfahrens unterscheidet man das:

- Mikroplasmaschweißen,
- Plasmadickblechschweißen oder auch Hochstrom-Plasmaschweißen für Werkstückdicken ab 3 mm bis etwa 13 mm mithilfe des „*Schlüssellocheffekts*“;
- Plasmapulverauftragschweißen.

Der geringe Verzug und die hohe Schweißnahtqualität sind die Ursache dafür, dass das Hauptanwendungsgebiet das Schweißen hochlegierter Stähle ist. Die große Viskosität des Schmelzbades ermöglicht es, ohne Schmelzbad-sicherungen zu arbeiten.

Das **Mikroplasmaschweißen** kann bei Werkstückdicken ab 0,05 mm angewendet werden. Es wird mit übertragenem Lichtbogen mit Schweißströmen im Bereich von 0,01 A bis etwa 20 A betrieben. Vorzugsweise werden Bleche, Folien, Drähte, Siebe und vor allem Membranteller ($s \approx 0,2$ mm) und Streckmetallrohre ($s \approx 0,8$ mm) geschweißt. Bei Schweißströmen bis zu etwa 20 A ergibt sich ein sehr stabil brennender, nadelförmiger Lichtbogen. In diesem Bereich ist das Verfahren nahezu konkurrenzlos, da mit keinem anderen Schweißverfahren bei derartig kleinen Schweißströmen noch stabile Lichtbögen erzeugt werden können. Nachteilig ist die erforderliche sehr genaue Stoßkantenvorbereitung, das zuverlässige Spannen der Bleche (Vorrichtungen erforderlich!) und die absolute Notwendigkeit einer maschinellen Schweißung.

Beim **Plasmadickblechschweißen** wird für Werkstückdicken ab 3 mm der sog. *Schlüsselloch-Effekt* (auch *Stichlochtechnik* genannt)

ausgenutzt. Dabei durchsticht der Plasmastrahl den Grundwerkstoff und bildet die Öffnung eines sich nach oben verjüngenden Zylinders („Öse“). Hinter der in Schweißrichtung entstehenden Öse fließt der flüssige Werkstoff aufgrund der Oberflächenspannung der Schmelze zusammen und erstarrt. Die Wärme wird dabei nicht nur von der Oberfläche aus in das Blechinnere, sondern über die gesamte Werkstückdicke übertragen. Auf diese Weise können zzt. 13 mm dicke Bleche ohne jede Nahtvorbereitung stumpf in einer Lage geschweißt werden. Die dickflüssige Schmelze hochlegierter Stähle verhindert ihr frühzeitiges Zusammenfließen hinter dem sich vorwärts bewegenden „*Plasmazylinder*“. Diese Werkstoffgruppe eignet sich daher hervorragend zum Plasmaschweißen.

Das große Nahtformverhältnis $\varphi = b/t$ (s. Abschn. 5.3.4.3) kann wegen der dann ungenügenden Ausgasung zu einer verstärkten Porenbildung führen. Daher muss in kritischen Fällen Zusatzwerkstoff verwendet werden.

Beim **Plasmapulverauftragschweißen** wird gleichzeitig mit einem übertragenen und einem nicht übertragenen Lichtbogen gearbeitet, Abb. 5.44c. Der Auftragwerkstoff, z. B. Hartmetalle, Cr-, Fe-Legierungen, wird pulverförmig in einem Schutzgasstrom dem Pilotlichtbogen zugeführt. Der besondere Vorteil des Verfahrens besteht in der Möglichkeit, den Aufschmelzgrad (Hauptlichtbogen) und das teilweise Anschmelzen des Auftragpulvers (Pilotlichtbogen) in weiten Grenzen einzustellen. Aufschmelzgrade von $\leq 5\%$ sind dadurch sicher erreichbar.

Das Verfahren bietet gegenüber dem verwandten WIG-Verfahren eine Reihe wesentlicher Vorteile:

- Der Zusatzwerkstoff wird ebenso wie beim WIG-Schweißen getrennt zugeführt. Dadurch ist eine exaktere Prozessführung als bei den Verfahren mit abschmelzender Elektrode möglich. Das ist eine der wichtigsten Ursachen für die Überlegenheit des Plasma- und WIG-Verfahrens bei hohen Qualitätsanforderungen.

- Deutlich höhere Schweißgeschwindigkeiten.
- Größerer Einbrand *und* schmaleres Schmelzbad verursachen geringere Werkstoffbeeinflussung der WEZ durch den Schweißprozess und einen deutlich geringeren Verzug.
- Sehr stabiler, nadelförmiger Lichtbogen. Durch äußere Einflüsse (Kanten, Werkstoffmassen, Änderung der Lichtbogenlänge) nur wenig ablenkbar (sehr geringe Blaswirkung!).
- Die berührungslose Zündung des Plasmalichtbogens ist sehr zuverlässig.
- Keine bzw. nur geringe Nacharbeit, da Nahtüberhöhung und Wurzeldurchhang gering sind.
- Der Brennerabstand ist wegen des zylindrischen, sehr konzentrierten (stark eingeschnürten) Lichtbogens weniger kritisch. Die erwünschte Folge ist eine nur geringe Änderung der Energie, d. h. der Einbrandtiefe.

Als *Plasmagas* wird fast ausschließlich Argon, als *Schutzgas* werden Argon, Ar/H₂- oder Ar/He-Gemische verwendet. Mit Wasserstoff oder Helium lässt sich die Schweißgeschwindigkeit um ca. 20 % erhöhen.

5.3.3.4 Metall-Schutzgasschweißen (MSG)(Ordnungsnummer: 13)

5.3.3.4.1 Verfahrensprinzip

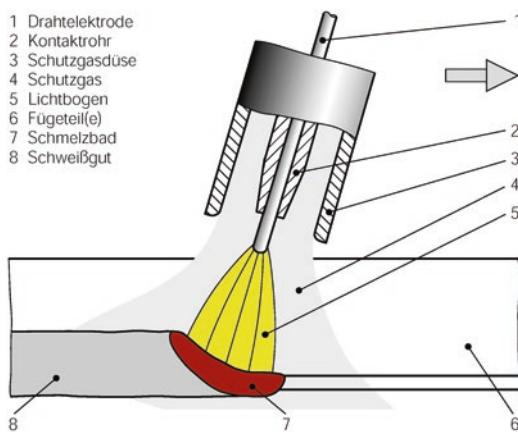
Der Lichtbogen brennt zwischen der i. Allg. positiv gepolten abschmelzenden Drahtelektrode und dem Werkstück innerhalb eines von Schutzgas ausgefüllten Raumes (Schutzgasglocke), siehe Abb. 5.45. Je nach der chemischen Charakteristik der Schutzgase unterscheidet man:

• Metall-Inertgasschweißen (MIG), Ordnungsnummer: 131

Es werden ausschließlich inerte Gase, wie z. B. Ar und He oder ihre Gemische verwendet.

• Metall-Aktivgasschweißen (MAG), Ordnungsnummer: 136

Es werden Gemische aus aktiven und inerten Gasen oder CO₂ verwendet. Die aktiven



Schutzgas schützt Schmelzbad, Elektrodenspitze und hocherhitzten Bereich der Schweißnaht vor Zutritt der Atmosphäre (H, N, O).

Schmelzbad kann große Mengen atmosphärischer Gase lösen. Die Folgen können Poren (O_2 , N_2), Einschlüsse (SiO_2), Abbrand (FeO , MeO) und Versprödung (N, H, O) sein.

Abb. 5.45 Verfahrensprinzip des Metall-Schutzgasschweißens

Bestandteile sind reiner Sauerstoff (O_2) oder sauerstoffhaltige Gase (CO_2). Das mit Gemischen aus inerten und aktiven Schutzgasen arbeitende Verfahren ist das **Mischgasschweißen**, Kurzzeichen **MAGM**. Wenn als Schutzgas nur CO_2 verwendet wird, dann bezeichnet man das Verfahren als **CO_2 -Schweißen**, Kurzzeichen **MAGC**.

Ein wichtiges Kennzeichen dieser Verfahren ist die kleine *freie Drahlänge* f . Dies ist die Länge des stromdurchflossenen Drahtendes. Sie ist u. a. abhängig vom Durchmesser der Drahtelektrode und beträgt etwa 10 mm bis 30 mm¹⁵. Somit ist die Strombelastbarkeit der Drahtelektrode wesentlich größer als sie beispielsweise mit umhüllten Stabelektroden möglich ist ($i \approx 100 \text{ A/mm}^2$ bis $i \approx 200 \text{ A/mm}^2$), ohne dass die Gefahr einer unzulässigen Erwärmung der Elektrode besteht (*Joule'sche Wärme* $Q \sim I^2 \cdot R$). Beim Lichtbogenhandschweißen würden derartige Stromdichten zu einem

Erweichen der Elektrode und zum Abplatzen der Umhüllung führen¹⁶.

Die Nahtgeometrie hängt überwiegend ab von den

- *Einstellwerten*: Schweißstrom, Schweißspannung, der Vorschubgeschwindigkeit des Lichtbogens, der
- *Brennerführung*, der
- *Art des Schutzgases* (Tab. 5.12) und den
- *physikalischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes*, z. B. Schmelzpunkt, thermische und elektrische Leitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient.

Man schweißt nur mit Gleichstrom, wobei die Drahtelektrode meist positiv gepolt ist. Wegen der ausgezeichneten Reinigungswirkung (Abschn. 5.3.3.2) eignet sich das MIG-Verfahren hervorragend zum Schweißen der Leichtmetalle.

Die MIG/MAG-Schweißverfahren sind die am weitesten verbreiteten Schweißverfahren (belegbar an Hand des Verbrauchs an Zusatzwerkstoff). Diese Entwicklung beruht auf der Möglichkeit, hochwertige Schweißverbindungen bei einfacher Handhabung herzustellen, verbunden mit einer guten Mechanisierbarkeit des Schweißablaufs. Dies gilt vor allem für das Impulslichtbogenschweißen, für das die Steuerungsart *synergic control* entwickelt wurde. Hierbei wird die große Anzahl der einzustellenden Schweißparameter durch eine Sollwertgröße ersetzt, die vom Schweißer eingestellt wird.

Mit elektronisch steuerbaren Schweißstromquellen kann ihr Ausgangsverhalten sehr schnell geändert werden. Von besonderer Bedeutung für den gesamten Schweißablauf beim MSG-Schweißen ist das *dynamische* Verhalten der Stromquellen. Dieses lässt sich durch die (nur schwer ermittelbare) *Reaktionszeit* oder den

¹⁵ Mit genügender Genauigkeit gilt $f \sim (10 \text{ bis } 15) \cdot D$.

¹⁶ Eine Stabelektrode mit einem (Kernstab-)Durchmesser von 4 mm besitzt einen metallischen Querschnitt von ca. 12,6 mm^2 . Bei einer mittleren Schweißstromstärke von 170 A ergibt sich eine Stromdichte von nur 13,5 A/mm^2 .

maximal möglichen Stromanstieg bzw. Stromabfall im Schweißstromkreis beschreiben. Die Reaktionszeit charakterisiert die Dauer der bei der Umsetzung von Prozessanforderungen erforderlichen Zeit und ist abhängig vom Schweißstromquellentyp. Abb. 5.46 zeigt die Reaktionszeiten verschiedener Schweißstromquellenarten.

5.3.3.4.2 Schweißanlage; Zubehör

Abb. 5.47 zeigt das Schema einer MSG-Schweißanlage. Sie besteht aus.

- *Stromquelle,*
- *Schweißbrenner mit Schlauchpaket,*
- *Drahtvorschubeinrichtung* und
- *Gasflasche mit Druckminderer* und *Gasmengenmesser.*

Unabhängig von der Art des verwendeten Schutzgases wird immer die gleiche Schweißanlage benutzt. Man verwendet ausschließlich Schweißstromquellen mit **Konstantspannungscharakteristik**, die für einen störungsfreien Vorschub der Drahtelektrode erforderlich sind.

Schweißbrenner und **Schlauchpaket.** Die Schweißbrenner sind luft- und bei höheren Schweißströmen (oberhalb 200 bis 250 A) wassergekühlt. Die *Drahtführungsdüse* (*Kontaktdüse*) und die *Gasdüse* werden thermisch stark beansprucht. Sie sind die Hauptverschleißteile des Schweißbrenners.

Die Drahtelektrode wird im Schlauchpaket mit einem Führungsschlauch daran gehindert, seitlich auszuknicken. Bei Eisenwerkstoffen ist der Führungseinsatz eine *Drahtspirale*, bei den weicheren Aluminiumwerkstoffen ein *Kunststoffschlauch*. Drahtelektroden werden nach DIN EN ISO 544 mit Durchmessern von (0,6 mm); 0,8 mm; 0,9 mm; 1,0 mm; 1,2 mm; 1,6 mm (bis 3,2 mm) geliefert. Sie sind verkupfert, sollen gleichmäßig rund und frei von Herstellungsfehlern (Oberflächenfehler durch den Walzprozess) und sauber (Flugrost, Walzfett, Adsorptionswasser aus der Umgebung) sein, um einen störungsfreien Drahtvorschub zu gewährleisten.

Die **Drahtvorschubeinrichtung** sorgt für einen gleichmäßigen und ruckfreien Drahttransport. Diese Einheit besteht aus einem Motor,

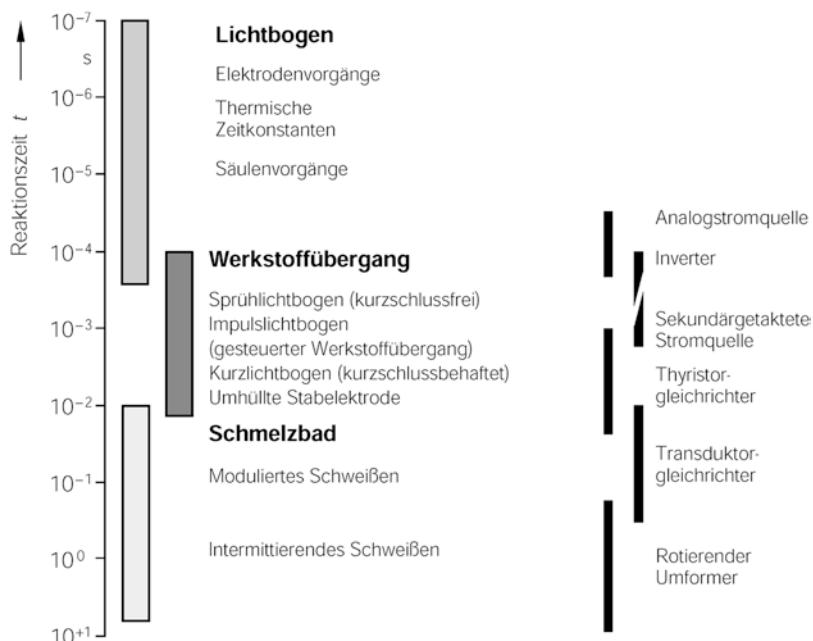


Abb. 5.46 Elementarvorgänge beim Lichtbogenschweißen und typische Reaktionszeiten von Schweißstromquellen. (nach Mecke, Fischer u. Merfert)

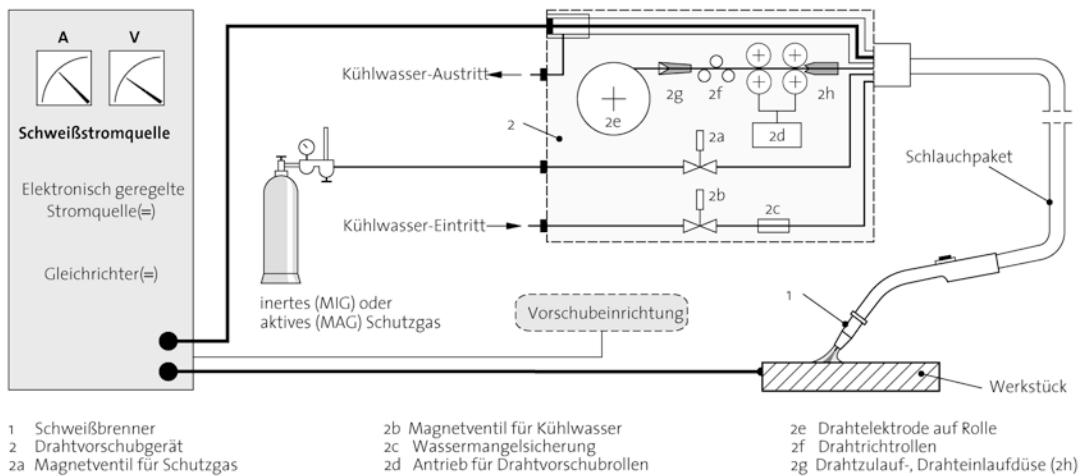


Abb. 5.47 Wassergekühlte MSG-Anlage (schematisch)

den Förder- und Druckrollen und der Drahtrichteinrichtung. Die stufenlose Einstellung der Drahtvorschubgeschwindigkeit kann mit einem Motor (konstante Drehzahl) mit Getriebe oder mit einem drehzahlveränderbaren Motor (z. B. Gleichstrom-Nebenschlussmotor) erfolgen. In den meisten Fällen wird ein Vierrollen-Antrieb eingesetzt, der im Vergleich zu einem Zweirollen-Antrieb die Drahteletrode praktisch kaum verformt und sehr gleichmäßig vorschiebt. Drahtfördererschwierigkeiten durch „unrunde“ Drahteletroden können daher nicht entstehen.

5.3.3.4.3 Die innere Regelung

Der Schweißvorgang ist stabil, wenn die Drahtvorschubgeschwindigkeit v_{Dr} gleich der Abschmelzgeschwindigkeit der Drahteletrode v_{ab} ist. Die Geschwindigkeit v_{ab} wird stufenlos auf einen für die jeweilige Schweißaufgabe angepassten konstanten Wert eingestellt. Die Höhe des Schweißstroms hängt also unmittelbar von der Drahtvorschubgeschwindigkeit v_{Dr} ab. Er wird damit nicht direkt, sondern indirekt über v_{Dr} eingestellt.

Die Einstellwerte, d. h., der Schweißstrom I_A und die Arbeitsspannung U_A ergeben sich aus dem Schnittpunkt der eingestellten statischen Kennlinie mit der Lichtbogenkennlinie: Dies ist der Arbeitspunkt „A“ in Abb. 5.48. Die jeweilige Lichtbogenkennlinie hängt ausschließlich von v_{Dr} ab.

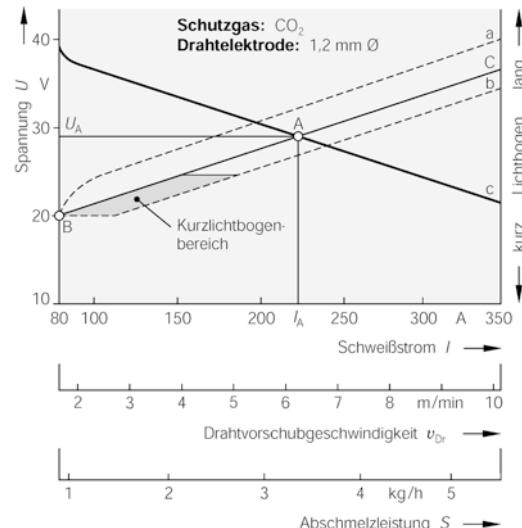


Abb. 5.48 Lichtbogenkennlinienbereich, in dem noch sicheres Schweißen möglich ist. Die Gerade B-A-C ist eine der möglichen (vom Schweißer frei wählbaren) Lichtbogenkennlinien. Linie **a** Kennlinie, die dem **längsten** ausziehbaren Lichtbogen entspricht (sonst Abreißen des Lichtbogens). Linie **b** Kennlinie, die dem **kürzesten** Lichtbogen entspricht (sonst Verlöschen des Lichtbogens im Kurzschluss). Linie **c** Eingestellte statische Kennlinie der Schweißstromquelle, deren Schnittpunkt mit der Lichtbogenkennlinie B-A-C ergibt den Arbeitspunkt „A“

Während des Schweißvorganges muss der Arbeitspunkt konstant bleiben, damit sich die Nahtabmessungen (Nahtbreite, Einbrandtiefe) möglichst wenig ändern. Dies geschieht beim

MSG-Schweißen mit Stromquellen, die eine Konstantspannungscharakteristik haben und eine während des Schweißens gleichbleibende Drahtvorschubgeschwindigkeit ermöglichen. Darauf beruht die *innere Regelung*, die einen sehr geringen konstruktiven Aufwand erfordert. Ihre Wirkungsweise ist aus Abb. 5.49 ersichtlich. Unbeabsichtigte Änderungen der Lichtbogenlänge führen zu Änderungen des Lichtbogenwiderstandes R_{LB} . Die Arbeitsspannung U_A ändert sich während des Schweißens kaum, weil die Spannung der Stromquelle nahezu konstant bleibt. Es gilt mit dem Schweißstrom I_A :

$$U_A = R_{LB} \cdot I_A \approx \text{konst.}$$

Eine Änderung des Lichtbogenwiderstands ($\pm \Delta R_{LB}$) ruft daher eine gegensinnige Änderung des Schweißstroms ΔI hervor:

Der Lichtbogen wird länger (Abb. 5.49a)

R_{LB} wird größer, I_A um ΔI kleiner. Die Drahtabschmelzgeschwindigkeit wird wie gewünscht

so lange kleiner, bis der ursprüngliche Arbeitspunkt „A“, d. h. die ursprüngliche Lichtbogenlänge wieder erreicht ist.

Der Lichtbogen wird kürzer (Abb. 5.49b)

R_{LB} wird kleiner, I_A um ΔI größer. v_{Dr} wird wie gewünscht so lange größer, bis der ursprüngliche Arbeitspunkt „A“, d. h. die ursprüngliche Lichtbogenlänge wieder erreicht ist.

Der Regeleffekt bei der inneren Regelung beruht auf Verzögerungen bzw. Beschleunigungen des Abschmelzprozesses, die durch genügend schnelle und große Änderungen des Schweißstroms entstehen. Diese Regelzeiten liegen im Bereich von 1/300 s. Daher wird diese Regelung auch als ΔI -Regelung bezeichnet.

5.3.3.4.4 Lichtbogenformen und Werkstoffübergang

Von großer Bedeutung für die Qualität der Schweißverbindung (und die mechanischen Eigenschaften der Wärmeeinflusszone) und den gewünschten Verfahrensablauf sind die

- Art des Werkstoffübergangs und die
- Zusammensetzung des Schutzgases, d. h. Art und Menge der Bestandteile.

Abhängig von der Art des Schutzgases (und der Stromdichte) ergeben sich Lichtbogenformen, die eine sehr unterschiedliche Form des Werkstoffüberganges von der Drahtelektrode auf das Werkstück bewirken:

- Als sehr kleine axial gerichtete, sehr heiße, d. h. dünnflüssige Tröpfchen; der konzentrierte Tropfenstrom erzeugt den typischen tiefen Einbrand dieser Verfahren. Der Lichtbogen ist stabil und brennt ruhig. Der Werkstoffübergang ist kurzschlussfrei und damit praktisch auch spritzerfrei. Diesen Lichtbogentyp bezeichnet man als **Sprühlichtbogen**. Er entsteht in der Hauptsache bei den inerten Gasen und den argonreichen Mischgasen, wenn eine kritische Stromdichte überschritten wird (Abb. 5.50). Bei geringeren Stromdichten ergeben sich größere Werkstofftröpfchen, ein unstabilerer Lichtbogen

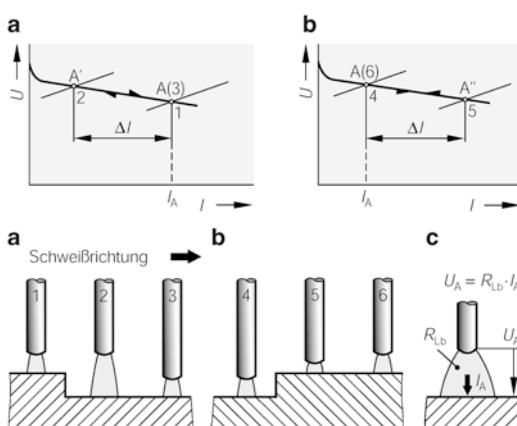


Abb. 5.49 Mechanismus der inneren Regelung beim MSG-Schweißen **a** Der Lichtbogen (LB) wird „plötzlich“ länger: R_{LB} steigt, und I_A wird sofort um ΔI geringer. Der Arbeitspunkt „A“ ist nach „A“‘ gewandert. Die Drahtabschmelzgeschwindigkeit v_{Dr} wird so lange kleiner, bis der ursprüngliche Arbeitspunkt „A“ wieder erreicht ist. **b** Der LB wird „plötzlich“ kürzer: R_{LB} nimmt ab, und R_{LB} nimmt um ΔI zu; „A“‘ wandert nach „A“‘. v_{Dr} wird so lange größer, bis der Arbeitspunkt „A“ wieder erreicht ist. **c** Die Spannung der Stromquelle ist nahezu konstant, ebenso die Arbeitsspannung U_A während des Schweißens: $U_A = R_{LB} \cdot I_A \approx \text{konst}$

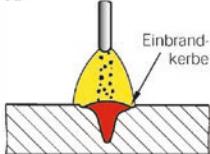
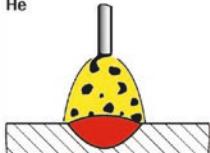
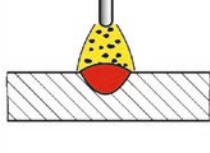
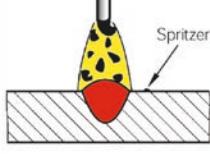
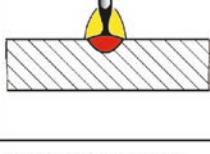
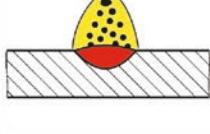
Art des Werkstoff-übergangs	Bemerkungen
Ar  <p>Einbrandkerbe</p>	Ar: Stark gerichteter Tropfenstrom, kurzschlussfreier, feinsttropfiger Werkstoffübergang, typischer fingerförmiger Einbrand, daher Vorsicht bei Wurzellagen (Schmelzbad kann »durchfallen!«). Bei höherer Schweißgeschwindigkeit besteht die Neigung zu Einbrandkerben, weil die Bereiche am Decklagenauslauf nicht mehr mit Schmelze aufgefüllt werden können. Beste »Reinigungswirkung«, stabiler, nicht zum »Wandern« neigender Lichtbogen, geringer Spannungsabfall in der Lichtbogensäule, daher wegen annähernd konstanter Lichtbogenleistung gut geeignet für Handschweißverfahren.
He 	He: Schwach gerichteter Tropfenstrom, heißer Lichtbogen, Einbrand breiter und flacher als bei Ar. Einbrandkerben entstehen erst bei um ca. 40 % höherer Schweißgeschwindigkeit im Vergleich zu Ar. Geeignet für mechanische Schweißverfahren und größere Werkstückdicken. Trotz der geringen Masse der Heliumatome gute Reinigungswirkung, weil die relativ große Lichtbogenspannung (Feldstärke) die übergehenden Werkstofftröpfchen stark beschleunigt. Ihre große kinetische Energie hilft effektiv, die Oxihaut zu durchschlagen, d. h. zu beseitigen.
Mischgase Ar + CO₂ + O₂ 	Noch feinsttropfiger, kurzschlussfreier Werkstoffübergang, günstige Einbrandform, gut geeignet zum Schweißen un- und (niedrig-)legierter Stähle. Die aktiven Bestandteile (CO ₂ , O ₂) im Lichtbogenraum bewirken Legierungsabbrand. Drahtelektroden müssen daher entsprechend legiert und desoxidiert sein (Abschn. 3.3.3.4.5). Nicht (bzw. nur sehr bedingt) geeignet zum Schweißen hochlegierter Stähle und NE-Metalle (Sauerstoff!).
Lichtbogenform Sprühlichtbogen 	CO₂ Wenig gerichteter, grobtropfiger Werkstoffübergang durch überwiegende Wirkung der Schwerkraft, relativ tiefer Einbrand, deutliche Spritzerbildung und merklicher Abbrand von Legierungs- und Desoxidationselementen. Daher nur für unlegierte und bestimmte (niedrig-)legierte Stähle zu empfehlen. Hoch desoxidierte Drahtelektroden (z. B. G4Si, G3Si2) erforderlich. Biliges Schutzgas. Für die Kurzlichtbogenvariante (Abschn. 3.3.3.4.6.2) besonders geeignet.
Lichtbogenform Langlichtbogen: Gröbere, um die Elektrodenspitze häufig rotierende Tröpfchen mit einzelnen Kurzschlüssen.	
CO₂ und hoch CO₂-haltige Gase 	Durch erzwungene, periodische Kurzschlüsse sind energiearme (»kältere«) Tropfen erzeugbar. Lichtbogenform ist für Schweißarbeiten zweckmäßig, die ein geringes Wärmeeinbringen erfordern: Wurzellagen, Dünnschichten, Zwangslagen, Auftragschweißungen, thermisch empfindliche Werkstoffe. Nur für CO ₂ und hoch CO ₂ -haltige Mischgase anwendbar. Es sind Schweißstromquellen mit einer Mindestinduktivität erforderlich.
Lichtbogenform Kurzlichtbogen: Kleinere, kältere Tropfen, die durch gesteuerte (gewollte) Kurzschlüsse mit einer für diesen Prozess geeigneten Schweißstromquelle erzeugt werden. Die hohen Kurzschlussströme müssen mit Hilfe von Induktivitäten begrenzt werden.	
inerte und hoch argon-haltige Gase 	Durch Überlagern eines Grundstromes mit Stromimpulsen (<i>Frequenz</i> und <i>Amplitude</i> vom Anwender »frei« einstellbar) kann praktisch jede gewünschte Tropfengröße, Tropfenzahl und Viskosität der übergehenden Tropfen unabhängig von der Art des Schutzgases erzeugt werden. Nur unter inerten und hoch argonhaltigen Schutzgasen möglich, weil der <i>Pinch-Effekt</i> erforderlich ist (Abschn. 3.3.2.2).
Lichtbogenform Impulslichtbogen	

Abb. 5.50 Werkstoffübergang und Lichtbogenformen beim MSG-Schweißen in Abhängigkeit von der Art der Schutzgase (schematisch)

und ein weniger konzentrierter Tropfenstrom. Die Spritzerneigung ist größer. Der Werkstoffübergang ist unter Helium etwas grobtropfiger und nicht so stark gerichtet. Der Einbrand ist aber wegen der sehr viel größeren Lichtbogenspannung deutlich tiefer und breiter.

- Als größere, unregelmäßig geformte Tropfen, die häufig um die Elektrodenspitze rotieren. Der Werkstoffübergang ist mit Kurzschlüssen durchsetzt, die Spritzerneigung ist deutlich größer als bei dem Sprühlichtbogen. Diese Lichtbogenform wird **Langlichtbogen** genannt und ist typisch für CO₂ und hoch CO₂-haltige Schutzgase.
- Als größere, rundliche, regelmäßige Tropfen, die mithilfe bestimmter verfahrenstechnischer und elektrischer Maßnahmen nicht mehr kurzschlussfrei, sondern durch „gesteuerte“ Kurzschlüsse auf das Werkstück übergehen. Dieser Lichtbogentyp ist nur unter CO₂ und Gasen mit hohem CO₂-Anteil realisierbar; er wird als Kurzlichtbogen bezeichnet.

5.3.3.4.5 Auswahl der Schutzgase und Drahtelektroden

Die Art (inert/aktiv) und die Zusammensetzung (Art und Menge der Gasbestandteile) der Schutzgase bestimmen ihr *metallurgisches* (Abbrand) und *metallphysikalisches* (Tropfengröße, Tropfenzahl, Lichtbogenform) Verhalten. Diese Zusammenhänge und Anforderungen müssen bei der Wahl des Schutzgases zum Schweißen der verschiedenen Werkstoffe beachtet werden. Andernfalls sind z. B. unzureichende Gütekriterien des Schweißguts bzw. ein unruhiger, unstabiler Lichtbogen die Folge.

Im Folgenden werden einige werkstoffliche und metallphysikalische Besonderheiten besprochen. Beim Schweißen von Eisen-Werkstoffen unter inertem Gasen ergibt sich überraschenderweise ein unruhiger, zur Spritzerbildung neigender Lichtbogen. Die Oberflächenspannung des Schweißguts ist sehr groß und damit die Benetzungsfähigkeit der Schmelze gering. Es entsteht ein sehr dickflüssiges, poröses, völlig unbrauch-

bares Schweißgut. Ein geringer Sauerstoffzusatz (1 bis 5 %) und (oder) CO₂-Zusatz (bis 20 %) stabilisiert den Lichtbogen und verringert die Viskosität der Schmelze so weit, dass jeder unlegierte Kohlenstoff-Mangan-Stahl ohne besondere Schwierigkeiten geschweißt werden kann. Bei hochlegierten Stählen lassen sich die Oberflächenspannung, die sehr große Schmelzenviskosität und die Größe der übergehenden Werkstofftröpfchen wirksamer mit der Impulslichtbogentechnik beeinflussen.

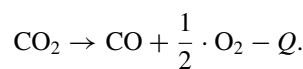
Der Zusatz aktiver Gase (O₂, CO₂) führt aber außer zu den oben geschilderten Vorteilen zu einem Abbrand vor allem der sauerstoffaffinen Legierungselemente (Cr, Al, V, Mn, Si).

Daraus folgt:

Zum erfolgreichen Schweißen der meisten Werkstoffe sind ihre metallurgischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Andernfalls sind gravierende Mängel die Folge (Poren, Abbrand, Versprödung, Korrosionsanfälligkeit).

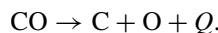
Mit zunehmendem Sauerstoffgehalt werden der Abbrandverlust und die Menge an Reaktionsprodukten (MeO) im Schweißgut größer. Ein erheblicher Teil dieser (Mikro-)Schlacken bleibt im Schweißgut zurück und verringert besonders die Zähigkeit. Wenn der Werkstoff das Gas nicht lösen kann, erzeugen die zurückbleibenden gasförmigen Reaktionsprodukte außerdem Poren. Der negativen Wirkung des Sauerstoffs muss daher durch ausreichende Zugaben von Desoxidationsmitteln (Mangan, Silicium) begegnet werden. Daraus ergibt sich, dass mit zunehmendem Legierungsgehalt der zu schweißenden Werkstoffe die Menge der aktiven Bestandteile im Schutzgas aus technischen und wirtschaftlichen Gründen abnehmen muss.

CO₂ ist das einzige aktive Schutzgas, das in reiner Form verwendet wird, also nicht gemischt mit anderen aktiven Gasen oder Edelgasen. Im Lichtbogen wird es dissoziiert. Die hierfür erforderliche Energie (Q) wird dem Lichtbogen entnommen:



Die Wärmemenge Q wird bei der Rekombination an der verhältnismäßig kalten Werkstückoberfläche wieder frei. Diese zusätzliche Wärme ist die Ursache für den typischen schmaleren, tiefen Einbrand beim Schutzgas Kohlendioxid (CO_2). Die Tropfen sind groß und gehen relativ wenig gerichtet auf das Werkstück über. Die Folge ist eine merkliche Spritzerneigung. Der erhebliche Sauerstoffanteil macht die Schmelze dünnflüssig und erfordert stark desoxidierte Zusatzwerkstoffe.

Die hohen Lichtbogentemperaturen führen nach der folgenden Beziehung zu einer weiteren Dissoziation des sauerstoffhaltigen CO:



Diese Reaktion ist temperaturabhängig und befindet sich in Abhängigkeit von der Temperatur in einem (dynamischen) Gleichgewicht. Enthält das metallurgische System – das aus Schweißgut +C + CO besteht – z. B. wenig Kohlenstoff, dann verläuft die Reaktion nach rechts, d. h., durch „Zerfall“ weiterer CO-Moleküle wird das Schweißgut aufgekohlt. Dieser Vorgang ist vor allem bei den hochlegierten CrNi-Stählen von großer Bedeutung. Ihre Korrosionsbeständigkeit nimmt sehr stark mit einem zunehmenden Kohlenstoffgehalt im Schweißgut ab. Schon geringste Mengen CO_2 im Schutzgas ($\geq 2\%$) führen zu einem erheblichen Anstieg des Kohlenstoffgehaltes im Schweißgut. Das MAG-Schweißen dieser Werkstoffe unter CO_2 ist daher bei hoher Korrosionsbeanspruchung nicht zu empfehlen.

Die in der Schweißpraxis verwendeten Schutzgase sind in DIN EN ISO 14175 normiert. Sie werden nach ihrem chemischen Verhalten (inert/aktiv) und ihrer Zusammensetzung eingeteilt. Eine Zusammenstellung der Anwendungsbereiche der verschiedenen Schutzgase zeigt Tab. 5.12. Die grundsätzlichen Überlegungen für die Wahl des „richtigen“ Schutzgases sind:

- Mit zunehmendem Legierungsgehalt muss die Aktivität des Schutzgases abnehmen,
- für sauerstoffaffine Werkstoffe müssen inerte Schutzgase verwendet werden.

Bei der Wahl der Drahtelektroden ist zu beachten:

- An den Grundwerkstoff anpassen, d. h. artgleiche oder artähnliche Drahtelektroden wählen.
- Mit zunehmender Aktivität des Schutzgases (Sauerstoff und CO_2), muss die Drahtelektrode wegen des stärkeren Abbrands mehr Legierungs- bzw. Desoxidationsmittel enthalten.

Die Drahtelektrode muss also in Abhängigkeit von dem Abbrandverhalten des verwendeten Schutzgases ausgewählt werden. Die Gütewerte des reinen Schweißguts werden (neben den Schweißparametern und den Eigenschaften des Grundwerkstoffs) von der Elektrode und dem Schutzgas bestimmt.

Fülldrahtelektroden

Außer den massiven Drahtelektroden werden zunehmend Fülldrahtelektroden (DIN EN ISO 17632) verwendet, die unter CO_2 oder Mischgas verschweißt werden. Sie bestehen aus einem verschiedenartig geformten Stahlmantel (Röhrchendraht oder in unterschiedlichen Formen gefalzter Draht), der basische, rutile oder Füllungen aus Metallpulver enthalten kann. Sie bieten eine Reihe entscheidender Vorteile:

- Die Füllstoffe ermöglichen umfangreichere metallurgische Reaktionen als Massivdrähte und erzeugen eine größere Lichtbogenstabilität.
- Über das Pulver können dem Schmelzbad größere Mengen verschiedenartiger Legierungselemente zugeführt werden.
- Im Vergleich zu den massiven Drahtelektroden ist die Stromdichte deutlich höher, weil der Strom nur im Stahlmantel fließt, nicht aber im schlecht stromleitenden Pulverkern. Aus diesem Grund ist die Abschmelzleistung größer.
- Bei hohem basischem Pulveranteil können hochwertige Schweißverbindungen auch an schlecht schweißgeeigneten Werkstoffen erzielt werden („Säubern“ der Schmelze möglich!).
- Die Schlackendecke schützt die Schweißnaht vor dem Zutritt der atmosphärischen Gase und verbessert ihre Oberfläche.

Tab. 5.13 Die wichtigsten Eigenschaften und Anwendungsbereiche sowie Kennzeichen für die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Füllung von Fülldrahtelektroden, nach DIN EN ISO 17632

Kennbuchstabe	Eigenschaften der Füllung	(S) Einlagen-, (M) Mehrlagen-schweißung	Schutzgas	Eigenschaften und Anwendung der Fülldrahtelektroden
R	Rutilbasis, langsam erstarrende Schlacke	S und M	erforderlich	Feintropfiger Werkstoffübergang und sehr geringe Spritzerverluste. Schlacke bedeckt vollständig die Naht. Für Ein- und Mehrlagenschweißungen in Wannen- und Horizontal-Vertikalposition. Allgemein unter CO ₂ verschweißt, aber auch für Argon-CO ₂ -Mischgase geeignet, wenn dies vom Hersteller empfohlen wird. Damit Verbessern des Werkstoffübergangs und Reduzieren der Spritzerbildung.
P	Rutilbasis, schnell erstarrende Schlacke	S und M	erforderlich	Ähnlicher Aufbau wie der R-Typ. Sie ergeben aber eine schnell erstarrende Schlacke und sind damit für alle Positionen geeignet. Sie werden mit kleinerem Drahtdurchmesser hergestellt und haben unter CO ₂ einen feintropfigen Werkstoffübergang. Das Schweißverhalten wird mit Argon-CO ₂ -Mischgasen (wenn dies vom Hersteller empfohlen wird) verbessert.
B	Basische Schlacke	S und M	erforderlich	Grobtröpfiger Werkstoffübergang. Vorzugsweise in Wannen- und Horizontal-Vertikalposition mit CO ₂ angewendet. Basische Schlacke (Fluoride und Oxide der Erdalkalimetalle) ergibt Schweißgut mit bester Kerbschlagarbeit.
M	Metallpulver-Füllung	S und M	erforderlich	Sehr feintropfiger Werkstoffübergang und sehr dünne Schlackenschicht. Füllung besteht im Wesentlichen aus Metall-Legierungen, Eisenpulver und lichtbogenstabilisierenden Bestandteilen. Dadurch ergibt sich hohe Abschmelzleistung und tiefer Einbrand. Wird vorzugsweise in Wannen- und Horizontal-Vertikalposition mit Argon-CO ₂ -Mischgasen verwendet. Andere Positionen mit Kurzlichtbogen- und Impulstechnik möglich.
V	Rutil- oder Fluoridbasis	S	nicht erforderlich	Selbstschützend, grob- bis feintropfiger Werkstoffübergang. Rutiles oder fluoridbasisches Schlackensystem ergibt Bereich von langsamer (bevorzugt für Einlagenschweißung von verzinkten, aluminierteren oder anders beschichteten Blechen in allen Positionen) bis rascher Schlackenerstarrung, aber bevorzugt für automatisches Schweißen mit hoher Schweißgeschwindigkeit, vor allem in Wannen- und Horizontal-Vertikalposition verwendet.
W	Fluoridbasis, langsam erstarrende Schlacke	S und M	nicht erforderlich	Selbstschützend, grobtröpfiger Werkstoffübergang. Fluoridbasisches Schlackensystem ermöglicht hohe Abschmelzleistungen. Aufgrund des sehr geringen Schwefelgehalts ergibt sich ein sehr rissicheres Schweißgut. Gut geeignet für Ein- und Mehrlagenschweißungen in Wannen- und Horizontal-Vertikalposition.
Y	Fluoridbasis, schnell erstarrende Schlacke	S und M	nicht erforderlich	Selbstschützend, fast feintropfiger Werkstoffübergang. Aufgrund ihrer fluoridbasischen Schlacke geeignet für Ein- und Mehrlagenschweißungen in allen Positionen. Rissicheres Schweißgut mit hoher Kerbschlagarbeit bei tiefen Temperaturen.
Z	Alle Fülldrahtelektroden, die durch die vorstehenden Beschreibungen <i>nicht</i> erfasst werden.			

Durch die Schlacke und das zusätzlich gebildete Schutzgas ist der Schutz der Schweißnaht vor Zugluft wesentlich besser als bei Massivdrähten. Mäßige Luftbewegungen können den Schutzgasmantel nicht mehr aufreißen. Trotzdem eignen sich aber auch Röhrchendrähte

unter Baustellenbedingungen (u. U. starke Luftbewegungen) nur bedingt.

In Tab. 5.13 sind einige wichtige Fülldrahtelektroden, sowie ihre Zusammensetzung, ihre Anwendungsgebiete und die chemischen Eigenschaften der Füllung zum MSG-Schweißen von

unlegiertem (niedriglegiertem) Stahl nach DIN EN ISO 17632 zusammengestellt.

5.3.3.4.6 MSG-Verfahrensvarianten

5.3.3.4.6.1 MIG-Schweißen (ON: 131)

Beim **MIG-Schweißen** werden Argon, Helium oder deren Gemische verwendet. Der Werkstoffübergang ist bei Argon feintropfig, stark gerichtet und kurzschlussfrei, bei Helium nicht ganz so feintropfig und weniger stark gerichtet.

Die sehr ungleiche Energieverteilung im Argon-Lichtbogen verursacht die bei hohen Schweißgeschwindigkeiten auftretenden Einbrandkerben. Das gilt vor allem für die MSG-Verfahren, die verfahrensbedingt mit großen Schweißgeschwindigkeiten betrieben werden: Die geringe Menge flüssigen Schweißguts, die wegen des flachen Einbrandes an die Schmelzränder fließt, kann die Kerben nicht mehr auffüllen, Abb. 5.50.

Damit entsteht der für das MIG-Verfahren typische **Sprühlichtbogen**. Die Spritzerverluste sind gering, und die Nahtoberfläche ist meistens glatt und kerbenfrei. Die mit hoher Geschwindigkeit auf das Schmelzbad auftreffenden Tröpfchen verursachen den typischen, tiefen Einbrand.

Das Verfahren ist für das Verbindungsschweißen der sehr sauerstoffaffinen NE-Metalle wie z. B. Aluminium, Kupfer und deren Legierungen hervorragend geeignet. Bei nicht fachgerechter Handhabung besteht aber die Gefahr, dass die Nahtflanken nicht vollständig aufgeschmolzen werden. Diese *Bindfehler* oder *Kaltstellen* genannten Defekte, die für das Verfahren charakteristisch sind, vermindern die Bauteilsicherheit entscheidend, da sie in ihrer Wirkung Risse gleichzusetzen sind.

Impulslichtbogenschweißen

Eine für hochlegierte Stähle, sowie Aluminium, Kupfer und deren Legierungen wichtige Verfahrensvariante ist Schweißen mit dem Impulslichtbogen. In den meisten Fällen ist die hierfür erforderliche spezielle Stromquelle eine parallel geschaltete Einheit, bestehend aus einem Gleichrichter (erzeugt den Grundstrom) und

einem transistorgeregelten, d. h. steuerbaren Gleichrichter (erzeugt den Impulsstrom). Mit ihnen lassen sich stufenlos von der Netzfrequenz unabhängige Impulsfrequenzen (zwischen Null und einigen Hundert Hertz) und nahezu beliebige Impulsbreiten einstellen.

Der Grundstrom erwärmt die Elektroden spitze soweit, dass die ihn überlagerten Stromimpulse eine mechanische Tropfenablösung durch den Pinch-Effekt bewirken, wie Abb. 5.51 zeigt. Durch die erheblichen elektromagnetischen Kräfte (*Lorentz-Kraft*) werden die Tropfen mit großer Geschwindigkeit axial auf das Schmelzbad bewegt. Die Größe des Grundstroms ist nur vom Werkstoff und der Werkstückdicke abhängig.

Der Tropfenübergang erfolgt synchron mit der einstellbaren Frequenz der Stromimpulse. Die Anzahl und Größe der übergehenden Tropfen werden also durch die *Größe* und *Frequenz* bestimmt.

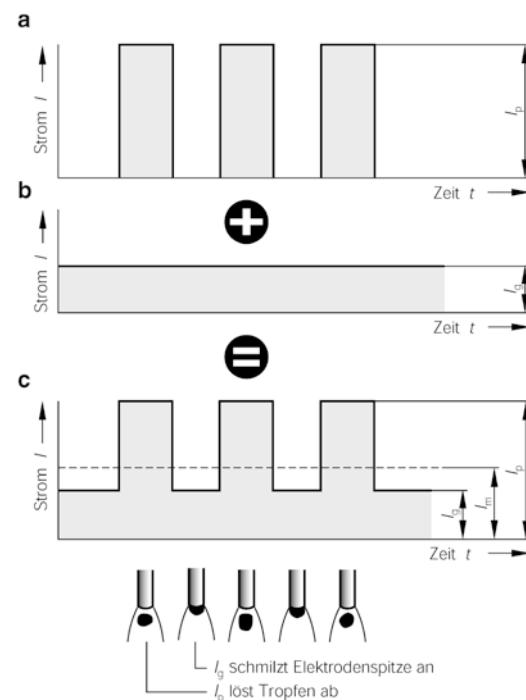


Abb. 5.51 Stromverlauf beim MSG-Impulslichtbogen-schweißen. **a** Stromimpulse I_p **b** Grundstrom (Gleichstrom) I_g **c** Verfahren arbeitet mit einem Strommittelwert I_m , der unterhalb der kritischen Stromstärke I_{kr} liegt. Der Stromimpuls erzwingt trotzdem den gewünschten Tropfenübergang

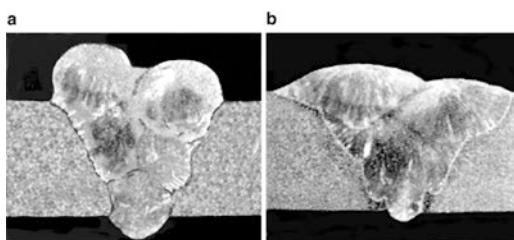


Abb. 5.52 Makrogefüge einer MSG-geschweißten Stumpfnaht unter ArS1, entspricht M22 nach DIN EN ISO 14175, Vergrößerung. **a** Übliche Technik **b** Impulstechnik (Impulsfrequenz 100 Hz)

quenz der Wechselstromimpulse bestimmt. Die unkontrollierte Bildung von Großtropfen, die zum Spritzen führt, wird damit vermieden. Anders als beim Kurzlichtbogenschweißen kommt es in diesem Fall nie zu „Kurzschlüssen“, d. h., der Schweißvorgang ist weitestgehend spritzerfrei.

Mit dieser nur unter Argon und hoch argonhaltigen Schutzgasen möglichen Verfahrensvariante wird schon bei geringeren Stromdichten als beim Sprühlichtbogen der gewünschte Tropfenübergang *erzwungen*. Anstelle der dünneren, teuren und knickanfälligen Drahtelektroden (0,8 mm Ø) können dicke (1,6 mm Ø) verwendet werden; daher lassen sich auch die weichen Aluminium-Drahtelektroden störungsfrei verschweißen. Ein weiterer wichtiger Vorteil dieser Verfahrensvariante ist ihre sehr gute Eignung für *Zwangslagenschweißungen*, denn Größe und Viskosität der übergehenden Tröpfchen können nahezu frei gewählt werden.

Abb. 5.52a zeigt das Makrogefüge einer mit M22 (etwa ArS1) geschweißten Stumpfnaht aus hochlegiertem Stahl. Man erkennt die durch die große Oberflächenspannung der Schmelze verursachten typischen Schweißfeh-

ler: Bindefehler zwischen den Raupen und Nahtflanken und eine unzulässige Nahtüberhöhung, die eine extreme Kerbwirkung erzeugt. Die Impulstechnik führt durch den *erzwungenen* feintropfigen Werkstoffübergang zu einem wesentlich heißeren, d. h. dünnflüssigeren Schmelzbad, siehe Abb. 5.52b. In bestimmten Fällen werden für hochlegierte Stähle die stärker oxidierenden Schutzgase auf der Basis Ar-CO₂ bzw. Ar-CO₂ – O₂ verwendet (s. Tab. 5.12). Der Abbrand an Legierungselementen ist zwar deutlich größer und die Korrosionsbeständigkeit wegen des Zubrandes an Kohlenstoff und der damit zusammenhängenden Chromcarbidbildung etwas geringer, das Schweißverhalten ist aber wesentlich besser.

5.3.3.4.6.2 MAG-Verfahrensvarianten

Beim **MAG-Schweißen (ON: 136)** werden aktive Schutzgase verwendet (s. Tab. 5.12). Mit zunehmender Aktivität des Schutzgases, d. h. mit zunehmendem Sauerstoffgehalt wird der Abbrand erhöht. Außer bei CO₂ und bei Schutzgasen mit einem CO₂-Anteil unter 15 % überwiegt der kurzschlussfreie, sprühregenartige Werkstoffübergang.

Beim **CO₂-Schweißen (MAGC)** ist mit praxisgerechten Stromdichten kein kurzschlussfreier, feintropfiger Werkstoffübergang möglich. Die kritische Stromdichte liegt in diesem Fall bei 380 A/mm². Sie ist damit technisch nicht mehr nutzbar¹⁷. Die Spritzerbildung ist unter CO₂ merklich und die Nahtzeichnung verhältnismäßig schuppig. Dieser **Langlichtbogen** ist die für das Schutzgas CO₂ typische Form des Lichtbogens.

Für die Bildung des Sprühlichtbogens (Ar und Mischgase mit ≥ 80 % Ar) bzw. Langlichtbogens (CO₂) sind relativ große Stromdichten erforderlich. Das führt zu dem für diese Verfahrensvarianten typischen tiefen Einbrand. Damit scheiden die Sprühlichtbogenverfahren für alle Schweißaufgaben aus, die einen flachen Einbrand und (oder) eine zähflüssige, vom Schweißer noch gut modellierbare und manuell „einfach“ handhabbare Schmelze erfordern, wie z. B.

¹⁷Die Stromdichte ist so groß, dass extreme Überhitzungserscheinungen in der Schmelze beobachtet werden (Verlust an Legierungselementen und Desoxidationsmitteln). Diese „Hochstromverfahren“ können nur maschinell betrieben werden.

- Wurzelschweißungen,
- Schweißen in Zwangslage,
- Schweißen von Dünn- und Feinblechen,
- Auftragschweißen.

Kurzlichtbogentechnik

Diese Verfahrensvariante erschließt den MSG-Verfahren auch diese Anwendungsgebiete (flacher Einbrand, zähflüssiges Schweißgut). Der Name deutet bereits an, dass mit einem kurzen Lichtbogen – also niedriger Schweißspannung – und mit Schweißströmen im unteren Bereich der Lichtbogenkennlinie gearbeitet wird (Abb. 5.48). Die Lichtbogenleistung wird außerdem durch Verkürzen der *Lichtbogenbrenndauer* verringert. Dies geschieht mithilfe erzwungener periodischer Kurzschlüsse. Die hierbei entstehenden großen Kurzschlussströme müssen durch *Drosseln (Induktivitäten)* soweit begrenzt werden, dass das Zerplatzen der übergehenden flüssigen Tropfen ausgeschlossen ist (sonst starke Spritzerbildung). Andererseits muss der Strom groß genug sein, um die Tropfen zuverlässig vom Drahtende zu lösen und um eine hinreichend dünnflüssige Schmelze zu erzeugen, anderenfalls besteht die Gefahr der Kaltstellenbildung.

Das dynamische Verhalten der Stromquelle muss dem ständigen Wechsel Kurzschluss-Leerlauf bzw. Lichtbogenbrennphase angepasst sein und hinreichend schnell folgen können. Insbesondere muss die Lichtbogenspannung nach einem Kurzschluss wieder ausreichend schnell zur Verfügung stehen. In Abb. 5.53 ist der Werkstoffübergang beim Kurzlichtbogen schematisch dargestellt.

Außer CO₂ können auch *Mischgase* (bestehend aus Gemischen von Ar, CO₂, O₂) verwendet werden. Sie bieten den Vorteil eines geringeren *Einbrands* und einer besseren *Spaltüberbrückbarkeit*. Diese Eigenschaften sind besonders für die Wurzel- und Dünnblechschweißung vorteilhaft.

5.3.3.4.7 Praktische Hinweise; Anwendung und Möglichkeiten

Für eine fachgerechte Durchführung der Schweißarbeiten und die notwendige Gütesicherung sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

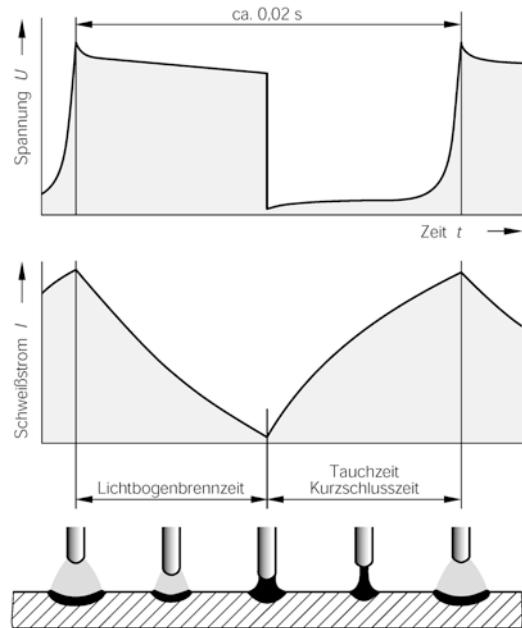


Abb. 5.53 Werkstoffübergang bei der Kurzlichtbogentechnik (schematisch). Die während der Kurzschlusszeit wirksame elektrische Leistung $N = U \cdot I$ ist wesentlich geringer als die in der Lichtbogenbrennzeit

- Werkstückoberflächen müssen frei von Verunreinigungen sein (z. B. Rost, Fett, Öl, Farben).
- Wegen der begrenzten Wirksamkeit und Vielfalt der metallurgischen Reaktionen eignen sich die üblichen MSG-Verfahren (außer Fülldrahtelektroden) nicht zum Schweißen stärker verunreinigter Stähle.
- Schweißarbeiten *außerhalb* der Werkstatt sind wegen der Gefahr der Schutzgasverwehung als Folge von Luftbewegungen problematisch. Man sollte ein weniger empfindliches Verfahren für Schweißarbeiten auf Baustellen wählen.

Anders als z. B. beim Lichtbogenhandschweißen ist der Bereich der Einstellwerte (I_A , U_A) erheblich größer. Eine Drahtelektrode mit einem Durchmesser von 1,2 mm kann z. B. für Schweißarbeiten an Dünnblech mit 80 bis 100 A, zum Schweißen einer Kehlnaht aber auch mit 250 bis 350 A belastet werden. Die daraus resultierende

Änderung der Abschmelzleistung ist bedeutend. Je nach der Schweißaufgabe müssen also geeignete Einstellwerte gewählt werden. Außer von den Einstellwerten werden die Nahtabmessungen in großem Umfang von der Haltung des Brenners, d. h. der *Richtung* des Schweißprozesses bezüglich der Schweißnaht beeinflusst. Je nach der Brennerneigung unterscheidet man das *ziehende* (oft auch als „Nachrechtschweißen“ bezeichnet) und das *stechende* Schweißen („Nachlinksschweißen“). In Abb. 5.54 sind die beiden Arbeitstechniken erläutert.

Die kleinste noch gut schweißbare Werkstückdicke liegt bei 0,6 mm. Für Schweißarbeiten im *Dünnblechbereich* ist das Kurzlichtbogenverfahren nahezu konkurrenzlos. Bei größeren Werkstückdicken macht sich die große Einbrandtiefe positiv bemerkbar. Bei dem tief einbrennenden CO₂-Verfahren ist für Stumpfnähte i. Allg. nur ein Öffnungswinkel von ca. 40 bis 45° erforderlich, beim Lichtbogenhandschweißen z. B. wegen des wesentlich geringeren Einbrandes aber ein Winkel von ca. 60°.

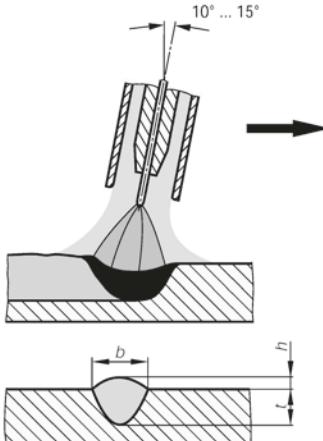
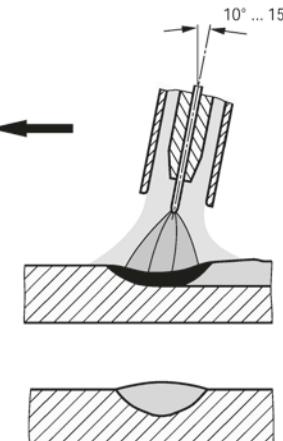
Ziehendes Schweißen (»Nachrechts«)	Stechendes Schweißen (»Nachlinks«)
	
Einbrandtiefe t Nahtbreite b Nahtüberhöhung h	größer kleiner größer
Porenanfälligkeit	geringer, Schweißgut bleibt länger flüssig, Schutzgas bedeckt Schweißgut und fertige Naht länger;
Beobachtbarkeit	der Nahtoberfläche erleichtert, der Wurzel erschwert;
Kaltstellen, Bindefehler	Vorlaufen des Schmelzbades leichter vermeidbar, d. h., Kaltstellen sind unwahrscheinlicher;
Anwendung bei Stumpfnähten	bevorzugt für Füll- und Decklagen, für Wurzellagen weniger geeignet;
Anwendung bei Kehlnähten	für Kehlnahtdicken $a > 4$ mm oft angewendet. Nahtüberhöhung und Einbrandkerben schwerer vermeidbar.

Abb. 5.54 Arbeitstechniken beim MSG-Schweißen

5.3.4 Unterpulverschweißen (UP) (ON: 12)

5.3.4.1 Verfahrensprinzip; Schweißanlage

Der Lichtbogen brennt unter einer Schicht körnigen *Pulvers* zwischen der abschmelzenden Drahtelektrode und dem Werkstück, in einem mit Gasen und Dämpfen erfüllten Hohlraum (*Schweißkaverne*), (Abb. 5.55). Die Schweißkaverne entsteht durch das sich aufblähende geschmolzene Pulver (*Schlacke*), das die Schweißkaverne umhüllt und die Schweißnaht abdeckt. Der Lichtbogen ist also unsichtbar. Das UP-Schweißen ist ein verdecktes Lichtbogenschweißen; das Schema der Anlage gibt Abb. 5.56 wieder. Die bei vielen anderen Schweißverfahren entstehenden Spritzer treten daher nicht auf. Eine Kontrolle des Schweißvorgangs ist aber als Folge der Pulverabdeckung der Schweißnaht sehr erschwert, sie kann nur mit elektrischen Messinstrumenten (z. B. Volt- und Ampemeter) erfolgen. Eine genaue Parallelführung des Schweißkopfes zur Schweißnaht und die präzise Einstellung aller Führungs- und Richteinrichtungen sind erforderlich, sonst sind Fehlschweißungen unvermeidlich.

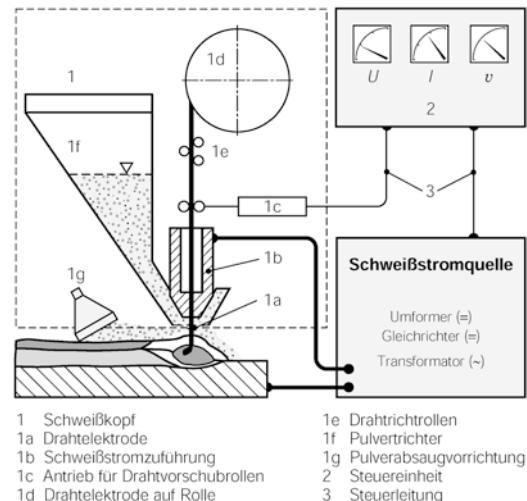


Abb. 5.56 UP-Schweißanlage (schematisch)

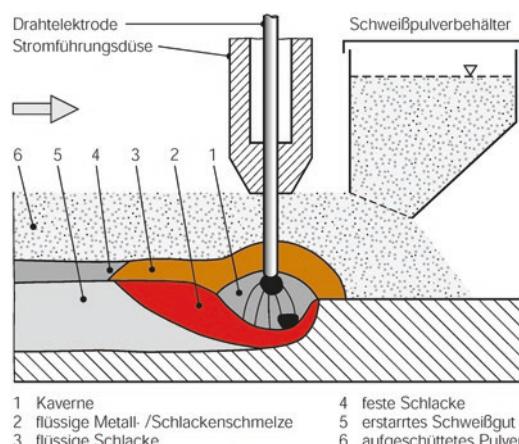


Abb. 5.55 Verfahrensprinzip des UP-Schweißens

Das Pulver (genauer die daraus entstehende Schlacke) schützt die Schmelze und die übergehenden Tropfen vor dem schädlichen Einfluss der umgebenden Atmosphäre. Wegen der dickenen Schlackenschicht ist die Schutzwirkung besser als bei anderen Verfahren. Es verhindert eine zu rasche Abkühlung, formt die Naht, erleichtert das Ausgasen der Schmelze und bestimmt zusammen mit der Drahtelektrode und dem Grundwerkstoff die chemische Zusammensetzung des Schweißguts. Umfang und Vollständigkeit der metallurgischen Reaktionen (und damit die mechanischen Gütekriterien der Schweißverbindung!) werden im Wesentlichen durch die gewählte *Draht-Pulver-Kombination* bestimmt. Der Zusatzwerkstoff (Drahtelektrode) kann als *Draht* (Massiv- oder Fülldraht) oder *Band* vorliegen. Zum Erzielen eines besseren Stromüberganges und Verringern der Reibungswiderstände in Drahtführungseinrichtungen wird seine Oberfläche meist verkupfert. Ein merklicher Korrosionsschutz ist dadurch allerdings nicht erreichbar.

Die kleine freie Drahtlänge und das erst kurz vor dem Abschmelzen zugeführte Pulver sind die Ursache für die große *Strombelastbarkeit* der Drahtelektrode. Mit diesem Hochleistungsschweißverfahren können große

Abschmelzleistungen und ein (aus metallurgischen Gründen meist nicht erwünschter) tiefer Einbrand erreicht werden. Der große Bereich der Einstellwerte macht das Verfahren zum Schweißen unterschiedlicher Werkstückdicken und Konstruktionen geeignet. Folgende Grenzwerte für die Einstellwerte können angegeben werden:

- *Schweißstrom I*: 100 bis 2000 A,
- *Schweißspannung U*: 20 bis 50 V,
- *Schweißgeschwindigkeit v* : 10 bis 500 cm/min,
- *Schweißstromdichte i*: 20 bis 200 A/mm².

Die für das Verfahren typischen großen und heißen *Schmelzbäder* gestatten i. Allg. nur das Schweißen in waagerechter Position und erfordern eine Badsicherung beim Schweißen der Wurzellagen. Die Nahtfuge muss sorgfältig vorbereitet werden. Die zulässigen Toleranzen, insbesondere der Spaltbreiten und Steghöhen, sind deutlich geringer als z. B. beim Lichtbogenhandschweißen. Die Nahtvorbereitung (genormt in DIN EN ISO 9692-2) erfolgt daher meistens mit dem maschinellen Brennschneiden oder (vor allem bei Rohrrundnähten) mit spangebenden Verfahren.

Da beim Erstarren großer Schmelzbäder häufig die nur aufwendig zu beseitigenden Heißrisse entstehen (Abb. 5.60), gilt für die Entwicklung des UP-Verfahrens:

- Die *Pendellagentechnik (Mehrlagentechnik)* wird der mit höheren Schweißströmen arbeitenden *Einlagentechnik* eindeutig vorgezogen. Durch das „Umkörnen“ der unteren Lagen wird das ungünstige primäre Gussgefüge beseitigt und die in Nahtmitte konzentrierten Verunreinigungen werden neu und gleichmäßiger verteilt.
- *Dünnere Drahtelektroden*, die mit höheren Stromdichten belastet werden, führen bei größeren Schweißgeschwindigkeiten zu den gewünschten kleineren Schmelzbädern.

Wegen der geringen Strahlungsverluste und der größeren Schweißgeschwindigkeit, die die

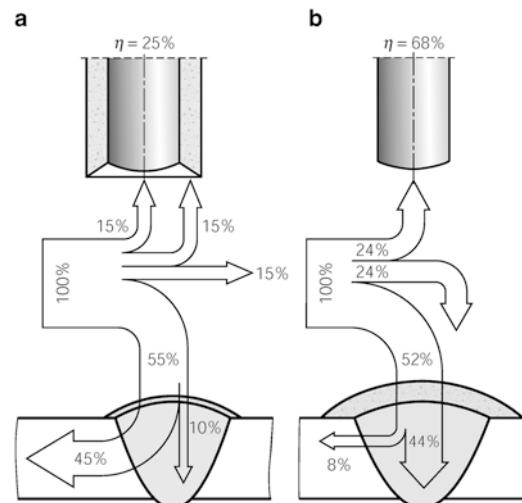


Abb. 5.57 Wärmebilanz beim **a** Lichtbogenschweißen $\eta = 25\%(15 \% + 10 \%)$ und **b** Unterpulverschweißen $\eta = 68\%(24 \% + 44 \%)$

Gesamtverluste an die Umgebung vermindert, ist der thermische Wirkungsgrad des UP-Verfahrens sehr groß. Abb. 5.57 zeigt die Wärmebilanzen für das Lichtbogenhand- und das UP-Schweißen. Die unmittelbar zum Schweißen erforderliche Energie (Aufschmelzen des Grund- und Zusatzwerkstoffes) beträgt beim Schweißen mit der Stabelektrode 25 %, aber 68 % beim UP-Schweißen.

Der Mechanisierungsgrad dieses vollmechanisch betriebenen Verfahrens kann sehr groß sein. Zur vollständigen Nutzung der wirtschaftlichen und technischen Möglichkeiten sind daher fast immer Vorrichtungen erforderlich.

5.3.4.2 Verfahrensvarianten

Einige der zahlreichen Varianten des UP-Schweißverfahrens haben eine große technische Bedeutung. Mit ihnen können die

- *Abschmelzleistung erhöht*,
- *neue Anwendungsbereiche erschlossen oder*
- *besondere technologische und fertigungstechnische Vorteile*

erreicht werden.

Die Drahtelektrode wird in den meisten Fällen positiv gepolt, weil der

- Lichtbogen besser zündet, die
- Naht besser geformt wird, der
- Lichtbogen komplizierten Schweißkonturen bei hohen Schweißgeschwindigkeiten ohne Schwierigkeiten folgen kann, der
- Einbrand sehr groß ist.

Die wichtigsten UP-Verfahrensvarianten sind das

- *Doppeldrahtverfahren* (d. h. ein Schmelzbad, ein Schweißkopf, eine Schweißstromquelle), das
- *Mehrdrahtverfahren* (zwei oder mehrere selbstständige Lichtbögen und Schweißköpfe, oft getrennte Schweißstromquellen) und das
- Schweißen mit *Bandelektroden*.

UP-Doppeldrahtverfahren

In einigen Fällen ist der Einbrand des normalen Eindrahtverfahrens zu tief und (oder) das Schmelzbad zu groß. Große Schmelzbäder neigen zur Heißrissbildung und einer ungünstigen Erstarrungsform. Hierbei werden zwei Drahtelektroden verwendet, die in einem Schmelzbad niedergeschmolzen werden. Die Drähte werden wie in Abb. 5.58 in einem Abstand von 5 bis 10 mm zugeführt. Sie können in Schweißrichtung hintereinander (*Tandem*) oder senkrecht zu

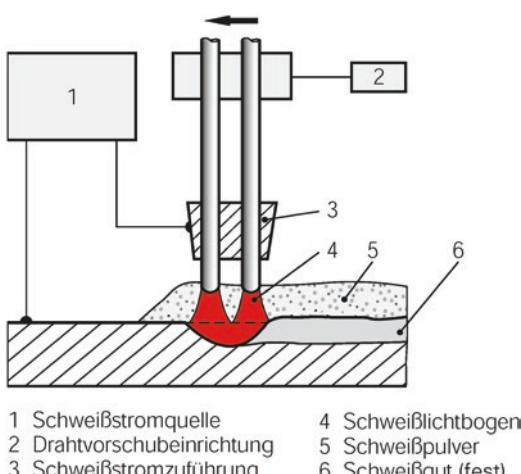


Abb. 5.58 Prinzip des UP-Doppel drahtschweißens

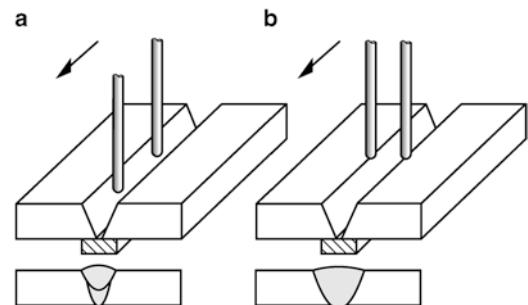


Abb. 5.59 Anordnung der Drahtelektroden und typische Einbrandverhältnisse beim UP-Mehr drahtverfahren.
a Tandemverfahren b Parallel drahtverfahren

ihr (*Parallel draht*) angeordnet werden. Die Tandem-Methode wie in Abb. 5.59a hat folgende Vorteile:

- Die Schweißgeschwindigkeit ist größer, d. h., die Wirtschaftlichkeit wird erhöht;
- größere Riss- und Poresicherheit durch leichteres Ausgasen des „langen“ Schmelzbades, d. h. bessere Güte werte der Schweißverbindung.

Die Parallel drahttechnik nach Abb. 5.59b ist durch folgende Besonderheiten gekennzeichnet:

- Die *Einbrandtiefe* kann leicht verringert werden: Der Lichtbogen ist auf die Fugenflanken gerichtet, nicht auf den Luftspalt.
- Die Gefahr eines *Schmelzbaddurchbruchs* ist daher geringer.
- Die zulässigen *Luftspalttoleranzen* sind größer als bei der Eindrahttechnik.
- Das *Auftragen großer Flächen* (z. B. bei Walzen) wird erleichtert.

Ein grundsätzlicher Vorteil der Mehrdrahttechnik besteht darin, dass die große Abschmelzleistung mit mehreren Drahtelektroden erzielt wird, die ebenso wie das Pulver deutlich niedriger strombelastet werden (geringere „*Abbrandverluste*“).

UP-Mehr drahtverfahren

Zwei oder mehr Drahtelektroden – meistens hintereinander angeordnet – werden mittels ge-

trennter Schweißstromquellen gespeist. Die Lichtbögen können durch eine eigene Steuerung beeinflusst werden. Je nach dem Abstand der Drahtelektroden ergibt sich ein gemeinsames Schmelzbad bzw. zwei oder mehrere getrennte Schmelzbäder. Der Abstand der Drahtelektroden darf höchstens so groß sein, dass der nachfolgende Draht in die noch flüssige Schlacke des vorlaufenden Drahtes eintaucht. Eine bereits erstarrte Schlacke wird nicht wieder vollständig aufgeschmolzen und metallurgische Fehler, z. B. Schlackeneinschlüsse, sind dann unvermeidlich.

Die Vorteile dieses Verfahrens sind:

- Vollständigeres Ausgasen (Schmelze bleibt länger flüssig, dadurch ergibt sich eine geringere Porenneigung).
- Günstigere Kristallisation der Schweißschmelze durch gezieltes Verändern der Nahtform (geringere Gefahr der Heißrissbildung).
- Die Schweißgeschwindigkeit wird erheblich gesteigert.

UP-Auftragschweißen mit Bandelektroden

Mit bandförmigen Zusatzwerkstoffen¹⁸ wird der Einbrand in den Grundwerkstoff soweit verringert, dass Aufschmelzgrade von etwa 5 % erreichbar sind. Daher eignet sich das Verfahren hervorragend zum großflächigen Auftragen nicht artgleicher Werkstoffe, wie z. B. korrosionsbeständiger oder verschleißbeständiger Plättierungen. Der unregelmäßig an der Bandkante hin und her pendelnde Lichtbogen erzeugt eine Raupenbreite, die etwa der Breite der Bandelektrode entspricht. Das Verfahren ist daher sehr wirtschaftlich.

Die Wirtschaftlichkeit und die metallurgische Qualität der mit Bandelektroden hergestellten Auftragschweißungen lassen sich mit anderen Schweißverfahren kaum erreichen.

5.3.4.3 Aufbau und Eigenschaften der UP-Schweißnaht

Die häufig großvolumigen Schmelzbäder erstarren in charakteristischer Form. Die Kristallisation beginnt an den Schmelzgrenzen. Es entstehen längliche Kristalle (Stängelkristalle). Sie schieben vor ihren Erstarrungsfronten die bei niedrigeren Temperaturen kristallisierende Restschmelze her. Deren Gehalt ist in Nahtmitte – hier stoßen die Kristallisationsfronten zusammen, wie Abb. 5.60 zeigt – am größten. Die Folgen sind eine ausgeprägte Heißrissneigung und unzureichende Zähigkeitseigenschaften. Daher ist die Anwendung der Eindrahttechnik (große Durchmesser der Drahtelektroden und große Schweißströme) aus technischen Gründen begrenzt.

Die Art der Kristallisation wird entscheidend von der *Nahtform* bestimmt, d. h. im Wesentlichen von der Nahtvorbereitung, dem Schweißverfahren und den Einstellwerten beim Schweißen. Der große Einfluss des *Nahtformverhältnisses* $\varphi = b/t$ ist in Abb. 5.61 zu erkennen. Die Nahtform b) ist anzustreben, denn sie gewährleistet Heißrissssicherheit und ermöglicht ein weitgehendes Ausgasen des Schmelzbades.

Bisher war lediglich von Einlagenschweißungen die Rede, deren Schweißgut etwa aus

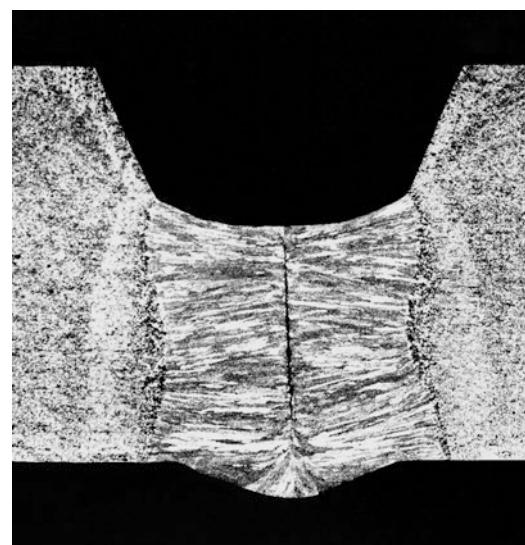


Abb. 5.60 Heißrissbildung in einer UP-geschweißten Wurzellage

¹⁸Die Standardabmessungen der Bandelektroden betragen 30 mm × 0,5 mm und 60 mm × 0,5 mm. In der Praxis werden bereits Elektroden mit 120 mm × 0,5 mm verwendet.

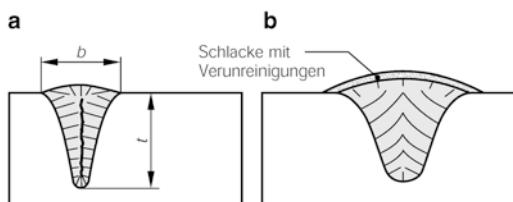


Abb. 5.61 Kennzeichnung der Nahtform durch das Nahtform-Verhältnis (Einlagenschweißung): $\varphi = b/t$. **a** $\varphi < 1$: nahezu parallele Schmelzgrenzen, Heißrissgefahr, niedrige Kerbschlagzähigkeit. **b** $\varphi > 1$: Heißrissbegünstigende niedrigschmelzende Verunreinigungen werden an die Nahtoberfläche in die Schlacke gedrängt; gute mechanische Eigenschaften sind die Folge

2/3 Grundwerkstoff und 1/3 Zusatzwerkstoff besteht. Wegen des hohen Grundwerkstoffanteils im Schweißgut werden prinzipiell *Draht-Pulver-Kombinationen* gewählt, die im Schweißgut einen Mangangehalt von ca. 0,8 bis 1,3 % ergeben. Mangan ist notwendig, weil es als Schwefelbinder Sicherheit gegen Heißrisse im Schweißgut bietet.

Ein weiterer Nachteil der Einlagentechnik ist das grobstängelige Gussgefüge. Außerdem führt die verhältnismäßig niedrige Abkühlgeschwindigkeit großvolumiger Schmelzbäder bei unlegiertem Schweißgut zu einem grobkörnigen Primärgefüge, das den voreutektoiden Ferrit nicht in der günstigen *nadeligen*, sondern in der unerwünschten *körnigen* Form enthält. Rasches Abkühlen ist demnach vorteilhaft.

Mit mehrlagig geschweißten Verbindungen lassen sich die genannten Nachteile (Heißrissgefahr, grobstängeliges Gefüge, körniger *Widmannstätten'scher* Ferrit) weitgehend vermeiden. Voraussetzung sind aber geeignete Einstellwerte und die Wahl einer auf den Grundwerkstoff abgestimmten Draht-Pulver-Kombination.

5.3.4.4 Zusatzstoffe

Anders als beim Handschweißen müssen das der Elektrodenumhüllung entsprechende Schweißpulver *und* die dem Kernstab entsprechende Drahtelektrode extra ausgewählt werden. Die Zusammensetzung des Schweißguts und damit die Gütekriterien der Schweißverbindung werden von folgenden Faktoren bestimmt:

- *Metallurgische Wirksamkeit* der gewählten Drahtelektroden-Pulver-Kombination, von der die Legierungsvorgänge, sowie das Entschwefeln und die Porenfreiheit des Schweißguts abhängen;
- *Anteil an aufgeschmolzenem Grundwerkstoff*, der bei Verbindungsschweißungen bis 70 % betragen kann und durch den Gehalt an Verunreinigungen besonders die Zähigkeit des Schweißguts beeinträchtigt;
- *Einstellwerte*, die von der Werkstückdicke, der Temperatur und dem Werkstoff abhängen.

5.3.4.4.1 Zusatzwerkstoffe

Das sind unlegierte, niedrig- und hochlegierte *Runddrähte* oder *Flachbänder* sowie spezielle *Füllmaterialien*, wie aus dem Schema Abb. 5.62 hervorgeht. Die chemische Zusammensetzung entspricht weitgehend der zu schweißenden Stahlsorte; sie sind *artgleich*. Die Drahtelektroden sind für das UP-Schweißen der un- und (niedrig-)legierten Stähle in DIN EN 756 genormt. Die Heißrissfreiheit des UP-Schweißguts ist von großer Bedeutung und die wohl wichtigste Forderung an eine „betriebssichere“ Schweißverbindung. Aus diesem Grunde ist es naheliegend, die Einteilung der Drahtelektroden zum Schweißen der unlegierten und (niedrig-)legierten Stähle nach dem Mangangehalt vorzunehmen. Man unterscheidet die folgenden Qualitäten:

$$S1 - S1Si - S2 - S2Si - S3 - S3Si - S4.$$

Der ungefähre Mangangehalt ergibt sich aus der Division der nach dem Symbol „S“ stehenden Ziffer durch 2. Der mittlere Mangangehalt der Drahtelektrode S. 3 beträgt danach $3 : 2 \approx 1,5\%$

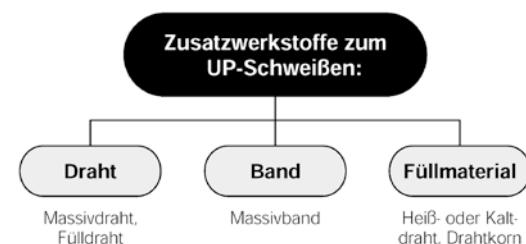


Abb. 5.62 Zusatzwerkstoffe für das UP-Schweißen

Abhängig von der Art des verwendeten Schweißpulvers kann u. U. ein beträchtlicher Siliciumzubrand erfolgen. Der Siliciumgehalt muss aber in den meisten Fällen sehr gering sein, da anderenfalls besonders die Kerbschlagzähigkeit verringert wird.

Drahtelektroden sind zum Verbessern des Stromübergangs und zum Schutz gegen atmosphärische Korrosion verkuipfert. Sie sollten sorgfältig aufgespult, kreisrund und fettfrei sein und müssen beim Lagern vor Feuchtigkeit geschützt werden (sonst Gefahr des Anrostens mit Gasaufnahme beim späteren Verschweißen).

In zunehmendem Umfang werden Fülldrahtelektroden verwendet, die wesentlich teurer sind. Ihre entscheidenden Vorteile sind aber die hohen erreichbaren mechanischen Gütewerte und die Möglichkeit, das Füllpuver in seiner chemischen Zusammensetzung auf die geforderten Eigenschaften perfekt abzustimmen. Der für gleichmäßig hohe Kerbschlagwerte erforderliche Sauerstoffgehalt von etwa 300 ppm kann exakt eingehalten werden. Weiterhin lässt sich jede gewünschte Zusatzwerkstofflegierung verhältnismäßig leicht erzeugen.

Unterschieden werden – ähnlich wie bei den Schutzgasschweißverfahren – die *nahtlosen* und die *formgeschlossenen* Fülldrahtelektroden. Die nahtlosen Fülldrahtelektroden weisen gegenüber den Falzdrähten eine Reihe von Vorteilen auf:

- Unempfindlich gegenüber Feuchtigkeitsaufnahme,
- auch nach langer Lagerung ist kein Rücktrocknen erforderlich,
- der Gehalt an diffusiblem Wasserstoff ist gering.

5.3.4.4.2 Schweißpulver

Ähnlich wie die Umhüllung der Elektroden soll das Schweißpulver das Schmelzbad vor dem Einfluss der atmosphärischen Gase (Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff) schützen, sowie die Leitfähigkeit des Lichtbogens verbessern. Die mechanischen Gütewerte des Schweißguts werden von der Schweißgutzusammensetzung bestimmt. Diese hängt ab von der Art der Schweißpulver und deren metallurgischen Re-

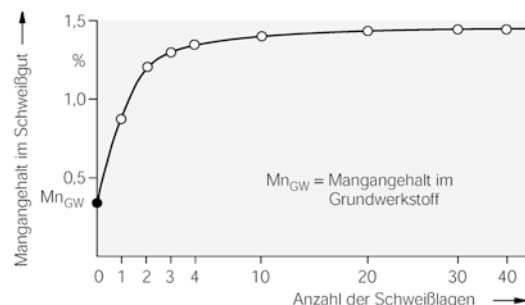


Abb. 5.63 Einfluss der Lagenzahl auf den Mangan-gehalt im Schweißgut, hergestellt mit einer bestimmten Draht-Pulver-Kombination. Jede Kombination ergibt im Schweißgut einen charakteristischen „Endgehalt“ der einzelnen Legierungselemente

aktionen in den übergehenden Tropfen in der Lichtbogenzone. Die Badreaktion mit der Schla-cke ist meist zu vernachlässigen.

Als Folge des großen Aufschmelzgrades wird bei *Einlagenschweißungen* die Zusam-mensetzung des Schweißguts überwiegend vom auf-geschmolzenen Grundwerkstoffanteil bestimmt. Bei *Mehrlagenschweißungen* ist sie praktisch ausschließlich von der Draht-Pulver-Kombination und den Einstellwerten abhängig. Die me-chanischen Gütewerte mehrlagig geschweißter Verbindungen gleichen damit denen des reinen Schweißguts.

Abb. 5.63 zeigt den charakteristischen Legierungsverlauf des Elements Mangan im Schweißgut einer Mehrlagenschweißung von un- und niedriglegierten Stählen. Man erkennt, dass sich die Legierungsvorgänge (Zubrand/ Abbrand) bereits nach der vierten Lage dem thermodynamischen (metallurgischen) Gleich-gewicht nähern.

Das Herstellungsverfahren ist ein wichtiges Charakteristikum der Schweißpulver. Nach DIN EN 760 unterscheidet man die folgenden Her-stellungsverfahren mit den Kennzeichen:

- F** (*fused*) für *erschmolzenes* Schweißpulver,
- B** (*bonded*) für *agglomeriertes* Schweißpulver,
- M** (*mixed*) für *Mischpulver*, die vom Hersteller (nicht etwa vom Fertigungsbetrieb!) aus verschiedenen Pulvertypen gemischt werden

Tab. 5.14 Chemische Zusammensetzung und Kennzeichen von Schweißpulvern zum Unterpulverschweißen, nach DIN EN 760

Kennzeichen	Chemische Zusammensetzung, Massengehalt (Hauptbestandteile)	Pulvertyp
MS	MnO + SiO ₂ (min. 50 %), CaO (max. 15 %)	Mangan-Silikat
CS	CaO + MgO + SiO ₂ (min. 55 %), CaO + MgO (min. 15 %)	Calcium-Silikat
ZS	ZrO ₂ + SiO ₂ + MnO (min. 45 %), ZrO ₂ (min. 15 %)	Zirkonium-Silikat
RS	TiO ₂ + SiO ₂ (min. 50 %), TiO ₂ (min. 20 %)	Rutil-Silikat
AB	Al ₂ O ₃ + CaO + MgO (min. 40 %), Al ₂ O ₃ (min. 20 %), CaF ₂ (max. 22 %)	Aluminat-Basisch
AF	Al ₂ O ₃ + CaF ₂ (min. 70 %)	Aluminat-Fluorid-basisch
FB	CaO + MgO + MnO + CaF ₂ (min. 50 %), SiO ₂ (max. 20 %), CaF ₂ (min. 15 %)	Fluorid-Basisch
AR	Al ₂ O ₃ + TiO ₂ (min. 40 %)	Aluminat-Rutil
AS	Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + ZrO ₂ (min. 40 %), CaF ₂ + MgO (min. 30 %), ZrO ₂ (min. 5 %)	Aluminat-Silikat
Z	Andere Zusammensetzungen	speZial

Die Einteilung der Schweißpulver berücksichtigt ihren mineralogischen Aufbau (z. B Rutil-Silikat-Typ, basischer, fluorid-basischer Typ). In den Bezeichnungen werden nur die Hauptbestandteile genannt. Die Herstellungsart (F, B oder M) muss aber zusätzlich angegeben werden. Eine Übersicht vermittelt Tab. 5.14.

Schmelzpulver

Schmelzpulver sind homogene, glasartige Substanzen, deren einzelne Bestandteile nicht mehr einzeln reagieren können, weil sie ein metallurgisches Vielstoffsystem gebildet haben. Beim Herstellprozess geht ein Teil der Reaktionsfähigkeit des Pulvers verloren, weil die Ofentemperatur größer sein muss als die Schmelztemperatur des am höchsten schmelzenden Bestandteils. Temperaturempfindliche Stoffe, d. h., fast alle (sauerstoffaffine) Legierungselemente können den Schmelzpulvern daher *nicht* zugegeben werden. Sie eignen sich damit weniger zum Schweißen der legierten Stähle. Die Vorteile dieser Pulver sind aber die

- *geringe Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme*, die auf ihrer glasartigen Struktur beruht, die
- *besonders abriebfesten Körner*, die die Ursache für ihre geringe Entmischungsneigung bei den Handlungsvorgängen sind und der
- *geringe Staubanteil im Pulver*, der die schweißtechnische Verarbeitung sehr erleichtert und die metallurgische Qualität des Schweißguts konstant hält.

Die Pulver sind ähnlich wie die basisch-umhüllten Stabelektronen vor dem Gebrauch nach Herstellerangaben zu trocknen. Als erste Schätzung der Trocknungstemperaturen können die folgenden Werte gelten:

- *Schmelzpulver*: 200 °C ± 50 °C,
- *geschäumte Schmelzpulver*: 400 °C ± 100 °C.

Agglomerierte Pulver

Agglomerierte Pulver sind heterogene Substanzen, deren Einzelbestandteile ihren ursprünglichen Zustand behalten haben. Ihre Reaktionsfähigkeit ist im Gegensatz zu den Schmelzpulvern vollständig erhalten, d. h., die metallurgischen Reaktionen sind sehr intensiv. Wegen der niedrigen Herstelltemperatur können temperaturempfindliche Stoffe (Desoxidationsmittel und Legierungselemente) wirtschaftlich zugegeben werden. Sie eignen sich daher bevorzugt zum Schweißen (hoch-)legierter Stähle. Die wesentlichsten Nachteile sind ihre starke Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme – Trocknen ist daher immer erforderlich – und ihre geringere Abriebfestigkeit. Vor dem Gebrauch müssen sie bei ca. 300 °C ± 50 °C getrocknet werden.

Schweißpulver-Kennwerte

Eine wichtige Eigenschaft der Schweißpulver ist ihre **Strombelastbarkeit**. Dies ist die Stromstärke, oberhalb der die Schlacke örtlich zu „köchen“ beginnt. Die hoch kieselsäurehaltigen

(die sauren Mangan-Silikat-Typen MS) Pulver sind am höchsten (~ 2000 Å), die basischen am niedrigsten (~ 1000 Å) strombelastbar.

Die Schmelzpulver werden in **Körnungen** verschiedener Größe, die agglomeriert in *einer* Korngröße hergestellt. Mit feinkörnigem Pulver werden besonders saubere und glatte Nahtoberflächen erzeugt und die Abkühlung der Schweißnaht durch starkes Behindern der Wärmestrahlung vermindert. Grobkörniges Pulver erleichtert in großem Umfang das Ausgasen des Schmelzbades; es wird daher häufig bei höheren Schweißgeschwindigkeiten und zum Schweißen verschmutzter Werkstücke verwendet.

Metallurgisches Verhalten der Draht-Pulver-Kombination

Die Kenntnis der Zu- und Abbrandverhältnisse, d. h. der metallurgischen Wirksamkeit der Draht-Pulver-Kombination, ist für eine zuverlässige Abschätzung der Schweißnahteigenschaften unerlässlich. Die Methoden zum Bestimmen des metallurgischen Verhaltens des Schweißpulvers müssen berücksichtigen, dass die Zusammensetzung des Schweißguts abhängt von

- Schweißpulver,
- Grundwerkstoff,
- Drahtelektrode,
- Einstellwerten beim Schweißen und
- Anzahl der geschweißten Lagen.

Beim UP-Verfahren ist die metallurgische Wirksamkeit (Legierungsarbeit, Desoxidationsvorgänge, Entschwefeln) in weiten Grenzen durch die freie Kombination von Drahtelektrode und Schweißpulver einstellbar. Die chemische Charakteristik des Schweißpulvers wird i. Allg. mit dem *Basizitätsgrad* beschrieben, der oft mit der Formel von Boniszewski berechnet wird:

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + 0,5 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)} + \frac{\text{Li}_2\text{O} + \text{CaF}_2 + 0,5 \cdot (\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + 0,5 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)}$$

Nach dieser Beziehung wird die Summe der basisch wirkenden Bestandteile durch die Summe

der sauer wirkenden dividiert. Ähnlich wie bei den umhüllten Stabelektroden ergibt sich folgende auf der chemischen Wirksamkeit der Pulver beruhende Einteilung:

- $B > 1$: **Basische Schweißpulver**,
- $B \approx 1$: **Neutrale Schweißpulver**,
- $B < 1$: **Saure Schweißpulver**.

Die Einteilung der Schweißpulver und ihre grundlegenden metallurgischen Eigenschaften sind vergleichbar mit den für die Stabelektroden bekannten Bezeichnungen.

Das Legierungsverhalten einer beliebigen Draht-Pulver-Kombination wird daher meistens mit der im DVS-Merkblatt 0907 vorgeschlagenen Versuchstechnik bestimmt. *Achtlagen-Auftragschweißungen* werden mit dem zu untersuchenden Pulver und den verschiedenen Drahtelektroden (z. B. S1 bis S4) mit gleichbleibenden, festgelegten Einstellwerten hergestellt. Zum Ermitteln der chemischen Zusammensetzung des Schweißguts, d. h. des Zu- und Abbrandverhaltens, wird die oberste Lage verwendet, die weitgehend der chemischen Zusammensetzung des reinen Schweißguts entspricht (Abb. 5.64, mit Ort für die Spanentnahme).

Das Ergebnis dieser Auftragschweißversuche wird in Schaubildern dargestellt. Der Zu- und Abbrand – dies ist die Differenz zwischen dem Gehalt des jeweiligen Legierungselementes im Schweißgut und in der Drahtelektrode – wird in Abhängigkeit vom Legierungsgehalt der Drahtelektrode grafisch ermittelt. In vielen Fällen schneiden die „Legierungsgeraden“ die Abszisse. Diese Schnittpunkte werden *neutrale Punkte* genannt, weil für eine gegebene Draht-Pulver-Kombination weder Zu- noch Abbrände entstehen. Das metallurgische Verhalten ist demnach von der gewählten Draht-Pulver-Kombination abhängig, d. h., ein neutrales Pulver gibt es nicht.

Mithilfe dieser Schaubilder können über das metallurgische Verhalten des Schweißguts bestimmte Aussagen (Abbrand, Zubrand von Legierungselementen) gemacht werden. Dies sei an Hand von Abb. 5.64 für das Element Mangan erläutert:

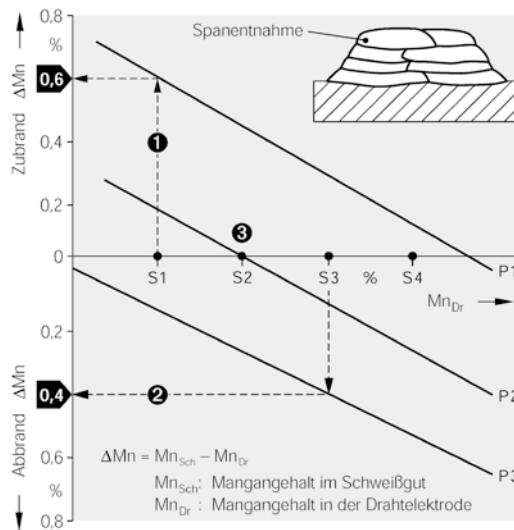


Abb. 5.64 Zu- und Abbrandverhältnisse von Mangan bei verschiedenen Schweißpulvern (P1, P2, P3) in Abhängigkeit vom Mangangehalt der verwendeten Drahtelektroden (S1, S2, S3, S4)

• Beispiel 1:

Mit welchem Zubrand (bzw. Abbrand) ist zu rechnen, wenn die Draht-(S1)-Pulver-(P1)-Kombination verwendet wird?

Man ermittelt $\Delta M_n \approx 0,6\%$.

• Beispiel 2:

Mit welcher Drahtelektrode wird bei dem gewählten Pulver P3 ein gewünschter Legierungsgehalt von z. B. 1,1 % Mn im Schweißgut erreicht?

Mit der Drahtelektrode S3 ($\approx 1,5\%$ Mn) erhält man $\Delta M_n \approx -0,4\%$ (also Abbrand), d. h., der Mangangehalt im Schweißgut beträgt: $1,5\% - 0,4\% = 1,1\%$.

• Beispiel 3:

Feststellen des neutralen Punktes. Mit der Drahtelektrode S2 verhält sich das Schweißpulver P2 neutral.

5.3.4.5 Hinweise zur praktischen Ausführung

Es sind besondere Maßnahmen erforderlich, um das Durchbrechen des verhältnismäßig großvolumigen, heißen, also dünnflüssigen

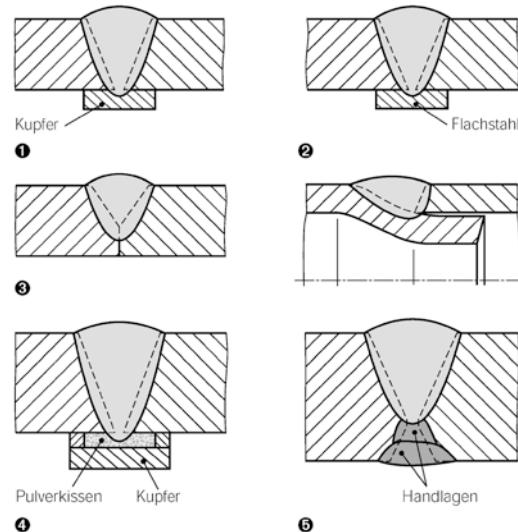


Abb. 5.65 Schmelzbadsicherungen beim UP-Schweißen. ①: Genutete Kupferschiene ②: Flachstahl-Unterlage ③: geeignete Anordnung der Fügeteile ④: Pulverkissen auf Kupferschiene ⑤: Vorlegen von Handlagen

Schweißguts zu verhindern. In Abb. 5.65 sind einige Möglichkeiten der Schmelzbadsicherung dargestellt:

- ① Eine genutzte Kupferschiene führt die Wärme des Schmelzbades ab, ohne selbst aufgeschmolzen zu werden.
- ② Ein unter die Fügeteile gelegter Flachstahl (Mindestdicke $\geq 10\text{ mm}$) wird angeschmolzen, bleibt also in der Regel mit der Schweißnaht verbunden.
- ③ Die geometrische Anordnung der Fügeteile verhindert das Durchbrechen der Schmelze (Y-Nahtvorbereitung oder Überlappstoß mit Sicker).
- ④ Kupferschienen, die mit Schweißpulver bedeckt sind („Pulverkissen“). Das geschmolzene Pulver (Schlacke) stützt und formt die Unterseite der Wurzel.
- ⑤ Schweißen von Handlagen.

Kupferschienen eignen sich normalerweise nur zum Schweißen dünnerer Bleche. Bei großen Stromstärken besteht die Gefahr, dass Kupfer

angeschmolzen wird und so in das Schmelzbad gelangt und eine ausgeprägte Heißrissbildung verursacht.

Die Schweißnahtvorbereitung für das UP-Schweißen muss wesentlich genauer erfolgen als beim Handschweißen, weil die dünnflüssige Schmelze durchbrechen kann. Die Vorbereitung der Fugenflanken erfolgt durch spanende Bearbeitung oder maschinelles Brennschneiden.

5.3.4.6 Anwendungsgrenzen

Das UP-Verfahren eignet sich besonders zum Schweißen langer, gerader Nähte, d. h. von Längs- und Rohrrundnähten. Für gekrümmte Nähte sind teure Führungseinrichtungen des Schweißkopfes oder des Werkstücks erforderlich. Die sehr große Abschmelzleistung und hohe Schweißgeschwindigkeit (bis 4 m/min), die größere Poren- und Riss sicherheit sind die herausragenden Merkmale des Verfahrens. In den meisten Fällen ist es wirtschaftlicher und technisch zweckmäßiger, eine große Schweißgeschwindigkeit zu wählen als eine große Abschmelzleistung (ungünstige Kristallisationsform, Heißrissgefahr). UP-Schweißen wird bevorzugt in folgenden Bereichen eingesetzt:

- *Kessel- und Apparatebau* (Rund-, Längs-, Innen-, Außen- und Spiralrohr-Schweißungen),
- *Tankbau*,
- *Werften* (Paneele, Rippen, Sektionen, Deck, Außenhaut),
- *Fahrzeugbau* (Chassis, Achsbrücken),
- *Maschinenbau* (Ständer, Gehäuse),
- *Stahlbau, Brückenbau* (Träger, Platten).

Das Schweißen von Stumpfnähten bei Werkstückdicken unter 4 mm ist wegen des tiefen Einbrands problematisch. Es erfordert fest spannende und massive Vorrichtungen. Mit speziellen Fülldrahtelektroden lassen sich bei der Wahl von I-Stößen sehr betriebssichere Schweißnähte herstellen.

5.3.5 Elektronenstrahlschweißen (EB) (ON: 51)

5.3.5.1 Verfahrensprinzip

Bei diesem Verfahren¹⁹ dient die Energie eines hochbeschleunigten, scharfgebündelten Elektronenstrahls zum Erwärmen und Aufschmelzen des Werkstoffs. Die Wärme wird nicht wie üblich durch Wärmeleitung und Konvektion, sondern von Umwandlung kinetischer Energie in Wärme erzeugt. Bei einer verfahrenstypischen Beschleunigungsspannung von etwa 150 kV erreichen die Elektronen rund zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit. Diese Methode als Werkzeug zur Materialbearbeitung ist bereits seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts bekannt. Seit dieser Zeit nimmt der Anwendungsbereich der „Strahlenschweißverfahren“ ständig zu.

Abb. 5.66 zeigt schematisch den Aufbau einer Elektronenschweißanlage. Der Elektronenstrahl entsteht mithilfe eines aus Kathode (1), Steuerelektrode (2) (*Wehnelt-Zylinder*) und Anode (3) bestehenden Triodensystems zur Strahlerzeugung. Diese Anordnung ähnelt einer *Braun'schen* Röhre, sie besitzt aber im Vergleich zu dieser eine weitaus größere Strahlleistung. Die Elektronen treten aus einer im Vakuum beheizten Wolframelektrode durch thermische Emission aus. Sie werden durch die zwischen Kathode und Anode anliegende Spannung auf etwa zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Hohe Strahlströme erfordern in erster Linie möglichst hohe Temperaturen an der Kathode, was sehr große Schmelztemperaturen des Kathodenwerkstoffs bedeutet. Besonders geeignet hierfür sind Tantal und Wolfram (z. T. legiert mit Rhenium), die einen sehr geringen Dampfdruck im Vakuum besitzen. Dadurch wird eine hohe Lebensdauer der Kathode erreicht. Die zwischen Kathode und Anode angebrachte

¹⁹ Die Verfahrensbezeichnung „EB“ ist die Abkürzung für Electron Beam Welding.

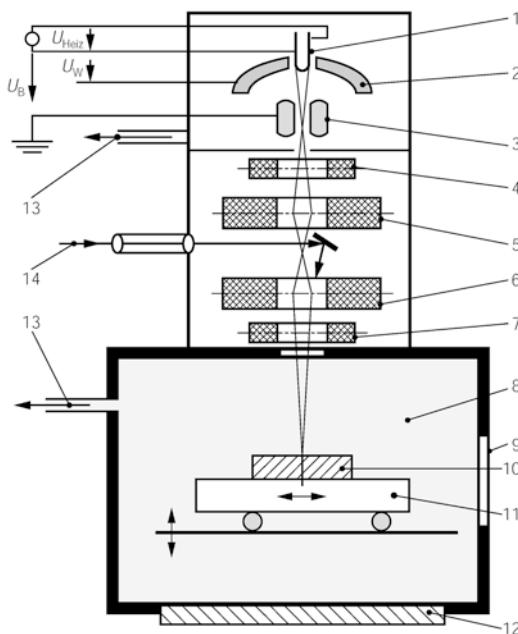


Abb. 5.66 Schematische Darstellung einer Elektronenschweißanlage. Es bedeuten: 1 Kathode 2 Wehnelt-Zylinder 3 Anode 4 Justierspule 5 Vor- bzw. Hauptfokussier-Spule 6 Hauptfokussier-Spule 7 Ablenkspule 8 Vakuumkammer 9 Sichtfenster 10 Werkstück 11 Werkstückschlitten 12 Kammertür 13 zur Vakuumpumpe 14 Einblickoptik

Steuerelektrode (2) regelt den Elektronenfluss, wobei die spezielle Form des *Wehnelt-Zylinders* die Bündelung des Elektronenflusses bewirkt, vergleichbar mit einem Hohlspiegel in der Lichtoptik. Diese fokussierende Wirkung führt zu einer Einschnürung des Elektronenstrahls („*Crossover*“). Die Potentialhöhe an der Steuerelektrode bestimmt also die Größe des Strahlstroms. Nach dem Passieren der Anodenbohrung divergiert der Elektronenstrahl. Er wird durch das sich anschließende Strahlführungssystem auf die zum Schweißen erforderliche Leistungsdichte fokussiert. Mit Ablenkspulen (7) lässt sich der Elektronenstrahl oszillierend bewegen. Der Schweißprozess erfolgt in der Vakuumkammer (8).

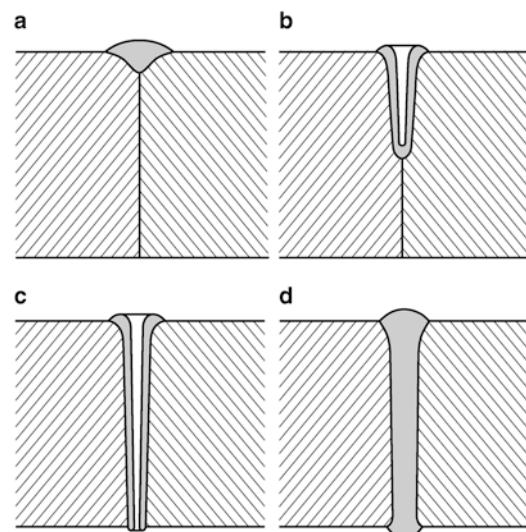


Abb. 5.67 Vorgänge beim Tiefschweißen mittels EB-Schweißverfahrens. (nach Messer-Griesheim). **a** Beim Auftreffen des Elektronenstrahls wird die kinetische Energie in Wärme umgewandelt, die den Werkstoff örtlich aufschmilzt und teilweise verdampft. **b** Der hohe Dampfdruck der Schmelze drückt sie zur Seite, wodurch der Strahl tiefer in den Werkstoff eindringen kann. **c** Es entsteht eine durchgehende Dampfkapillare, umgeben von einer „flüssigen“ Wand. **d** Je nach Ziel entsteht am Ende des Erstarrungsprozesses eine Schweißnaht, Schnittfuge oder ein Bohrloch

5.3.5.2 Eigenschaften und Anwendungen

5.3.5.2.1 Der Tiefschweißeffekt

Die extrem große Leistungsdichte des Verfahrens – sie liegt bei etwa 10^7 (Dauerstrahl) bis 10^8 W/cm^2 (Pulsbetrieb) – führt beim Auftreffen des Elektronenstrahls auf die Werkstückoberfläche zu extrem tiefen, schmalen Schweißnähten, Abb. 5.67. Das und die hohe Schweißgeschwindigkeit sind die Vorteile für die Wirtschaftlichkeit des Elektronenstrahlschweißverfahrens.

Abb. 5.68 zeigt beispielhaft die Einbrandformen einiger bekannter Schweißverfahren im Vergleich zum Elektronenstrahlschweißen. Die Überlegenheit dieses Verfahrens hinsichtlich der

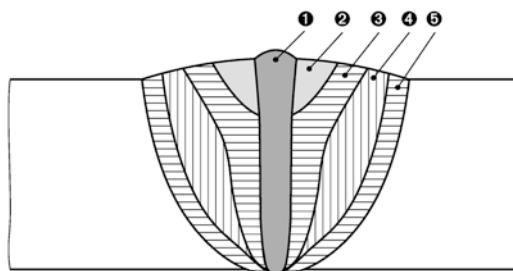


Abb. 5.68 Vergleich von Aufschmelz-Querschnitten verschiedener Schmelzschweißverfahren. Es bedeuten: ①: Elektronenstrahlschweißnaht (Tiefschweißen) ②: Elektronenstrahlschweißen (Wärmeleitungsschweißen) ③: Plasmeschweißnaht ④: MAG-Schweißnaht ⑤: WIG-Schweißnaht

erreichbaren Einbrandtiefe ist deutlich erkennbar. (Allerdings ist in dieser Darstellungsweise die WIG-Naht im Vergleich zu EB zu riesig dargestellt.)

Wird das Verfahren mit einer geringen Strahlintensität ($\sim 100 \text{ kW/cm}^2$) betrieben oder der Strahl defokussiert („Wärmeleitungsschweißen“), dann lassen sich Einbrandtiefen erreichen wie bei konventionellen Verfahren. Da Metalle Laserstrahlen bis zu 95 % reflektieren (abhängig von der eingestrahlten Wellenlänge), reicht die Strahlungsintensität nicht aus, um eine Dampfkapillare („keyhole“) zu erzeugen.

5.3.5.2.2 Die Schweißnahtvorbereitung

Konventionelle Schweißverfahren schmelzen die Nahtflanken nur einige Millimeter nach dem Mechanismus der Wärmeleitung auf. Größere Wanddicken erfordern daher eine der Werkstückdicke angepasste Nahtvorbereitung. Diese muss sicherstellen, dass die Wärmequelle die gesamte Fugenflanke aufschmelzen kann. Daraus ergibt sich das Konzept der Mehrlagen-technik. Mit dem EB-Schweißverfahren können mithilfe des Tiefschweißeffekts Schweißverbindungen (Stumpfstoß) ohne Zusatzwerkstoff als I-Naht hergestellt werden, Abb. 5.69. Diese lässt sich einfach erzeugen und ist deshalb die bevorzugte Nahtform für dieses Schweißverfahren. Die damit schweißbare maximale Wand-

dicke liegt für Stahl bei ungefähr 150 mm, bei Aluminium bei 300 mm. Hohlräume im Bereich der Naht müssen vermieden werden, weil die Schmelze diese Räume explosionsartig ausfüllt. Lunker und gravierende Fehlschweißungen wären die Folge.

Mit Badunterlagen oder Zentrierlippen (Abb. 5.69) lässt sich eine gute Zentrierung der Fügeteile erreichen, im Gegensatz zum einfachen I-Stoß. Außerdem entsteht bei nicht zugänglichen Hohlkörpern innen keine Spritzerbildung. Das wird z. B. gefordert, wenn während des späteren Betriebs Korrosionserscheinungen möglich wären.

5.3.5.2.3 Anwendungsbeispiele

Einer der größten Vorteile des EB-Schweißverfahrens ist die extreme Leistungsdichte und damit verbunden die sehr große Schweißgeschwindigkeit, wodurch fast verzugsfreie Schweißverbindungen möglich sind. Selbst fertig bearbeitete Werkstücke lassen sich daher EB-Schweißen, ohne dass nach dem Schweißen eine Nachbearbeitung erforderlich ist. Typische Anwendungsfälle sind der Getriebebau und die Automobilindustrie. Da der Schweißprozess im Hochvakuum abläuft sind die Schweißteile vollständig frei von Oberflächenbelägen (z. B. Anlauffarben). Die exakte Reproduzierbarkeit der Schweißarbeiten ist die Garantie für eine gleichbleibende Qualität der geschweißten Erzeugnisse.

Der Elektronenstrahl bietet außer dem Verbinden metallischer Werkstoffe durch Schweißen eine Reihe von weiteren Anwendungsmöglichkeiten, wie z. B. das Härteln, Beschichten und Umschmelzen von Oberflächen sowie das Bohren ($\geq 0,1 \text{ mm}$ Durchmesser, gepulster Strahl).

5.3.5.2.4 Schweißeignung der Werkstoffe

Eine wichtige Voraussetzung für betriebssichere und wirtschaftliche Schweißverbindungen ist die Kenntnis des Werkstoffverhaltens bei den thermischen Ereignissen der EB-Schweißverfahren.

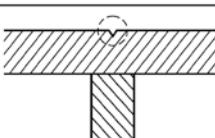
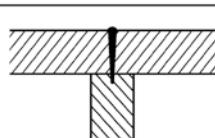
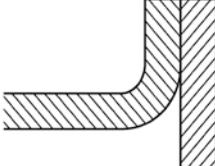
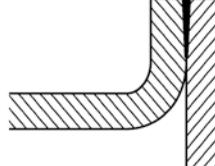
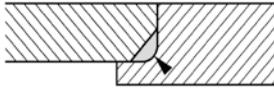
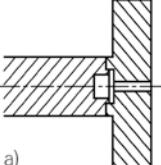
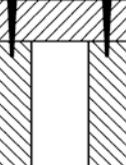
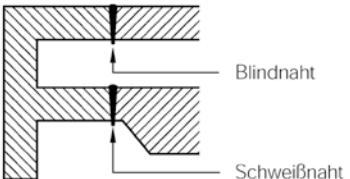
Nahtform	Vorbereiteter Stoß	Geschweißter Stoß
I-Naht, Maßangaben so tolerieren, dass Spaltbreite = 0, bzw. einen zulässigen Maximalwert nicht übersteigt		
I-Naht mit Zentrierung		
I-Naht mit Unterlage als Schmelzsicherung (Unterlage kann nach dem Schweißen entfernt werden)		
I-Naht am Überlapptoß, bevorzugt angewendet im Dünblechbereich ($s \leq 3$ mm)		
I-Naht am T-Stoß (»Stichnaht«) mit Markierung für die Strahlpositionierung		
Stirnflächennaht		
Gestaltungsgrundsatz	Konstruktives Beispiel	
Vermeiden von Hohlräumen (die Schweißschmelze füllt die Hohlräume im Vakuum explosionsartig aus und verursacht Lunkerbildung und gravierende Fehlschweißungen)	Hohlräum (Pfeil) zu groß	
a) Hohlräum mit Entlüftungsbohrung versehen b) Keine besondere Vorbereitung für Überlapnaht erforderlich	a)  b) 	Hohlräum (Pfeil) richtig
Schweißen von Fügeebenen, die für konventionelle Schweißverfahren nicht zugänglich sind		

Abb. 5.69 Konstruktionshinweise und Gestaltungsgrundsätze für Elektronenstrahlschweißen, nach Merkblatt DVS 3201

Die extreme Abkühlgeschwindigkeit des Schweißnahtbereichs führt zu einer sehr feinkörnigen Erstarrung und einer minimalen Überhitzung des Schweißguts. Die gütevermindernde Gussstruktur ist daher nur schwach ausgebildet. Da die Breite der Wärmeeinflusszone sehr schmal ist, sind die mechanischen Gütewerte der Schweißverbindung i. Allg. gut. Die mit den großen Abkühlgeschwindigkeiten verbundenen extremen (mehrachsigen) Schweißeigenspannungen können allerdings bei wenig verformbaren Werkstoffen zur Rissbildung im Bereich der Schmelzgrenze bzw. im Schweißgut führen.

Das Ausgasen der Schweißschmelze wird durch das Hochvakuum sehr begünstigt, was hervorragende mechanische Gütewerte der Schweißverbindung ergibt.

Im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren nimmt wegen der großen Abkühlgeschwindigkeit die Härteneigung bei Stählen schon oberhalb 0,15 % C beträchtlich zu. Allerdings ist die höhere Härte auf einen sehr schmalen Bereich begrenzt, d. h. diese Zone wird zuverlässig durch benachbarte zähe Bereiche gestützt. Stähle C \geq 0,4 % müssen zum Vermeiden von Kaltrissen allerdings wärmever- bzw. -nachbehandelt werden.

Hochlegierte Stähle sind immer EB-schweißgeeignet. Das hier vorherrschende Problem der Heißrissbildung (Schweißgut und Wärmeeinflusszone) lässt sich mit einem delta-Primär-ferritanteil im Schweißgut von > 5 bis 10 % sicher beherrschen. Die hochreaktiven Metalle, z. B. Titan, lassen sich wegen der Abwesenheit atmosphärischer Gase hervorragend schweißen. So ist das EB-Verfahren das einzige zum (Tief-) Schweißen von Titan.

Die schweißtechnische Verarbeitung von Grauguss, Temperguss sowie Gusseisen mit Kugelgrafit bereitet allerdings wegen des sehr großen Kohlenstoffgehalts große Probleme. Die Schweißnaht ist extrem spröde und rissanfällig. Eine Wärmever- bzw. -nachbehandlung ist hier daher zwingend erforderlich.

5.3.5.2.5 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Die wichtigsten Vorteile des EB-Schweißverfahrens sind:

- Im Vergleich zu allen konventionellen Schweißverfahren ist das spezifische Wärme-einbringen am niedrigsten.
- Es ergeben sich schmalste Wärmeeinflus-zonen, die zu einem extrem geringen Verzug führen.
- Auflösen komplizierter Konstruktionen in einfach zu fertigende Baugruppen möglich, die sich ohne Nachbearbeitung maßhaltig schweißen lassen.
- Der Tiefschweißeffekt ermöglicht kurze Fertigungszeiten (I-Naht ohne Spalt) und Wegfall von Schweißzusatzwerkstoffen.
- Im Hochvakuum lassen sich problemlos alle hochreaktiven Werkstoffe (Ti, Zr, Ta, Mo) schweißen (anlauffarbenfreie Schweißnähte).
- Gleichzeitiges Schweißen an mehreren Orten: Der Strahl wird durch das Ablenk-system in Bruchteilen von Sekunden an die jeweiligen Schweißorte geführt.
- Hohe Wirtschaftlichkeit durch Einlagen-schweißungen bei großen Wanddicken und sehr großer Schweißgeschwindigkeit.
- Verbindungsschweißungen unterschiedlicher Werkstoffe ist problemloser als mit konventionellen Verfahren.

Es existieren aber auch einige Nachteile des EB-Schweißverfahrens:

- Große Abkühlgeschwindigkeit erhöht die Aufhärtungsgefahr und damit die Rissgefahr.
- Große Investitionskosten fallen an.
- Die Abschirmung der beim Schweißen entstehenden Röntgenstrahlen verursacht zusätzliche Kosten.
- Zum Sichern optimaler Schweißergebnisse sind eine Vielzahl von Schweißparametern aufeinander abzustimmen.
- Die maximal verschweißbare Bauteilgröße ist durch die Größe der Strahlkammer begrenzt.

5.3.6 Laserstrahlschweißen (LA) (ON: 52)

Beitrag von Kai Hilgenberg

5.3.6.1 Verfahrensprinzip

Das Wort „Laser“ steht als Abkürzung für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, das sinngemäß mit Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission übersetzt werden kann.

Bei Laserstrahlung handelt es sich um elektromagnetische Strahlung, die aber im Gegensatz zu „normalem“ Licht, z. B. einer Glühbirne, eine Reihe besonderer Eigenschaften aufweist: Laserstrahlung kann sehr gut gebündelt werden und erreicht dann sehr hohe Intensitäten, besitzt ein schmales Frequenzspektrum und ist nur geringfügig divergent, d. h. weitet sich auch bei einem lange Strahlenweg nur wenig auf. Zudem ist sie phasengleich und besitzt eine hohe Kohärenzlänge (gleiche Phasenlage zu unterschiedlichen Zeiten an verschiedenen Orten im Raum).

Abb. 5.70 zeigt sehr vereinfacht das Prinzip der Erzeugung von Laserstrahlung. Im Resonator werden Elektronen des aktiven Lasermediums durch Energiezufuhr (elektrische Gasentladung, Blitzlampen, elektrischer Strom bei Diodenlaser) in den *angeregten Zustand* gebracht. Beim Rücksprung in den Grundzustand oder in einen energetisch niedrigeren Zustand wird Energie in Form eines Lichtquants

(*Photon*) frei. Angeregte Elektronen im aktiven Medium springen nach etwa 10^{-8} bis 10^{-7} s in den Grundzustand zurück, ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit in metastabilen Niveaus beträgt aber bis zu 1 s. Diese dienen als „*Speicher*“ für angeregte Elektronen. Durch Energiezufuhr („*Pumpen*“) werden die metastabilen Niveaus mit Elektronen gefüllt. Ziel ist das Erreichen einer Besetzungsinvolution, bei der sich mehr Elektronen im angeregten als im Grundzustand befinden. Beim Zurückfallen eines Elektrons vom höheren Energieniveau E_2 auf das Ausgangsniveau E_1 wird ein Photon der Energie

$$E_{ph} = h^*f = E_2 - E_1$$

ausgesandt (f : Frequenz f , h : Plancksches Wirkungsquantum). Dieser Vorgang verläuft spontan und ungerichtet (*spontane Emission*). Er kann aber auch dadurch „*induziert*“ werden, dass ein Elektron zu einem Übergang von E_2 nach E_1 durch ein einfallendes Photon angeregt wird, das freigesetzte Photon ist phasengleich und gleich gerichtet zum einfallenden Photon (*stimulierte Emission*). Zwischen den parallel angeordneten Spiegeln des Resonators (einer von ihnen ist halbdurchlässig) kann sich eine stehende Welle ausbilden, Abb. 5.70.

Photonen, die sich senkrecht zu den Spiegeloberflächen bewegen, durchqueren immer wieder das aktive Material, stimulieren weitere Elektronenübergänge und setzen weitere Photonen frei, die Strahlung wird zunehmend verstärkt. Die sich schräg zur Längsachse bewegenden Photonen verlassen das aktive Medium und werden nicht verstärkt. Den teildurchlässigen Auskoppelspiegel verlässt ständig ein Bruchteil der Photonen als nutzbare Laserstrahlung. Abhängig von der Art des aktiven Mediums unterscheidet sich die Wellenlänge der Laserstrahlung und damit eine Reihe physikalischer und technischer Eigenschaften. Die wichtigsten technischen Lasertypen sind:

- **CO₂-Laser.** Der aktive Bestandteil dieses Gaslasers besteht aus CO₂-Molekülen sowie N₂- und He-Anteilen. Die Anregung des

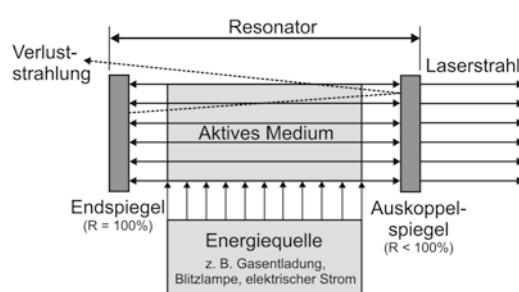


Abb. 5.70 Prinzip der Laserstrahlerzeugung

Mediums erfolgt indirekt über eine elektrische Gasentladung. Die Wellenlänge beträgt $10,6\text{ }\mu\text{m}$, der Wirkungsgrad (Verhältnis von abgegebener Strahlungsenergie zum elektrischen Energieeinsatz) ca. 5 %–15 %. CO₂-Laser werden zunehmend durch Faser- und Scheibenlaser verdrängt.

- **Diodenlaser.** Der Laserstrahl wird hier von einer mikroelektronischen Diode (z. B. GaAs-Halbleiter) erzeugt. Hoher Wirkungsgrad bis zu 50 %. Entkopplung mit Lichtleitkabeln ist möglich. Diodenlaser werden als Pumplaser aber auch direkt zur Materialbearbeitung eingesetzt.
- **Faserlaser.** Dieser Festkörperlaser besitzt eine dotierte Glasfaser als laseraktives Medium, die durch Diodenlaser angeregt wird. Statt Spiegeln wird der Resonator durch reflektierende Bereiche der Glasfaser selbst gebildet. Faserlaser existieren bis in den 100-kW-Bereich, die Wellenlänge liegt bei 1,07–1,08 μm , Wirkungsgrad 30 %–40 %.
- **Nd:YAG-Laser.** Ein Festkörperlaser mit stabförmigen Nd:YAG-Kristall²⁰ als laseraktives Medium, die Anregung erfolgt mit Blitzlampen oder Diodenlasern. Die Wellenlänge der Laserstrahlung beträgt 1,06 μm , der Wirkungsgrad 5 %–20 %.
- **Scheibenlaser.** Festkörperlaser mit einer dünnen Scheibe aus Yb:YAG²¹ als laseraktives Medium. Eine Stirnseite der Scheibe ist zur Kühlung auf eine Wärmesenke montiert, womit eine sehr gute Kühlung und hohe Laserleistungen erreicht werden können. Die Anregung erfolgt über Diodenlaser, die Wellenlänge liegt bei 1,03 μm , Wirkungsgrad 30 %–40 %.

Abb. 5.71 zeigt schematisch den Aufbau einer robotergestützten Laserschweißanlage mit

Faserlaser. Der Laserstrahl wird vom Resonator in eine Lichtleitfaser (*Prozessfaser*) eingekoppelt, zum Werkstück geführt und dort in einer Bearbeitungsoptik fokussiert. Alternativ (zwingend bei CO₂-Lasern), kann der Strahl auch über Spiegel zu Bearbeitungsoptik gelenkt werden. Die Bearbeitungsoptik wird durch einen koaxial oder quer geführten Gasstrom vor Schweißspritzen geschützt. Sie kann zusätzlich mit Systemen zur Prozessbeobachtung (u. a. Kamera, Pyrometer) ausgerüstet sein. Technische Lasersysteme besitzen in der Regel einen zusätzlichen Laser mit Wellenlänge im sichtbaren Spektrum, der zur Positionierung der Bearbeitungsoptik genutzt wird (*Pilotlaser*). Schweißlaser sind der höchsten Laserklasse 4 zuzuordnen und erfordern im Betrieb entsprechende Schutzmaßnahmen (Einhäusungen, Tragen von Laserschutzbrillen).

5.3.6.2 Eigenschaften und Anwendung

Die wesentlichen Prozessparameter sind die Laserstrahlleistung, die Schweißgeschwindigkeit und die Fokuslage, d. h. der Abstand vom Strahlfokus zur Werkstückoberfläche. Auch beim Laserstrahlschweißen wird der Tiefschweißeffekt angewendet, der bereits in Abschn. 5.3.5.2.1 für das EB-Schweißverfahren beschrieben wurde. Der Tiefschweißeffekt entsteht bei Stahl bei Strahlleistungen über 10^6 W/cm^2 . Dabei bildet sich ein schmaler mit verdampfendem Werkstoff gefüllter Kanal (*Key-hole*), dessen Durchmesser etwa dem des Laserstrahls entspricht. Der Dampfkanal bewegt sich entlang des Schweißstoßes. Der aus ihm entweichende Metalldampf kann in Abhängigkeit der Laserstrahlwellenlänge ein Plasma über der Werkstückoberfläche bilden. Damit dieses Plasma den einfallenden Laserstrahl nicht defokussieren kann, führt man inerte Gase (z. B. Argon) als Prozessgas zu. Dieses schützt das Schmelzbad zudem vor dem Einfluss der atmosphärischen Gase.

Die Energieeinkopplung hängt sehr stark von der Absorption der Laserstrahlung ab. Dieser Vorgang wird von Oberflächenbeschaffenheit,

²⁰Der Kristall ist ein Yttrium-Aluminium-Granat (YAG), bei dem im Gitter Y³⁺-Ionen durch Nd³⁺-Ionen (Neodym) als aktiver Bestandteil ersetzt werden.

²¹Ytterbium dotierter Yttrium-Aluminium-Granat

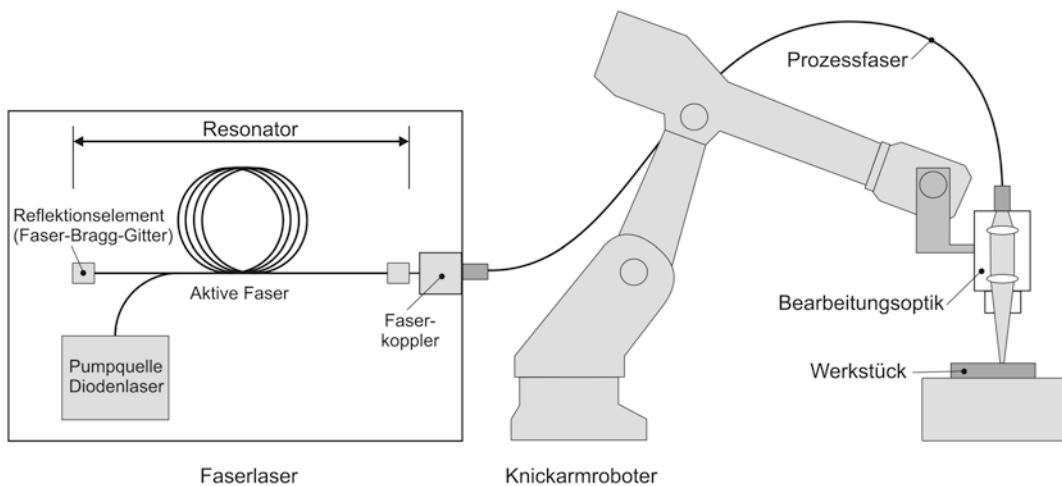


Abb. 5.71 Schematischer Aufbau einer Laserschweißanlage mit Faserlaser

Einstrahlwinkel und Wellenlänge der Laserstrahlung bestimmt, Abb. 5.72.

Die niedrigeren Wellenlängen der Festkörperlaser werden dabei von metallischen Werkstoffen besser absorbiert als die des CO₂-Laser. Für schwer laserschweißbare Werkstoffe wie Kupfer stehen spezielle, frequenzverdoppelte Festkörperlaser zur Verfügung. Bei Metallen mit niedrigerem Absorptionsgrad lässt sich mitunter die Schwellintensität zur Erreichung eines Tiefschweißeffektes nicht erreichen, daher ist lediglich ein Wärmeleitungsschweißen mit Ein-

schweißtiefen bis ca. 1 mm möglich. Durch eine leichte Schiefstellung der Bearbeitungsoptik wird eine Beschädigung durch die reflektierte Laserstrahlung vermieden. Wird durch Einsatz eines leistungsstarken Lasers der Tiefschweißeffekt erreicht, steigt die Absorption durch Mehrfachreflexionen des Laserstrahls im sich ausbildenden Dampfkanal schlagartig an, so dass eine nahezu vollständige Energieeinkopplung ins Material resultiert. Damit lassen sich hohe Einschweißtiefen erreichen.

Gegenüber dem Elektronenstrahlschweißen erfordert das Laserstrahlschweißen kein Vakuum, daher wird die Bauteilgröße nicht durch eine Kammer begrenzt. Außerdem ist das Laserstrahlschweißen wesentlich einfacher und schneller in der Handhabung (Erzeugen des Vakuums entfällt). Die Art der Nahtvorbereitung entspricht weitgehend der für das EB-Schweißen angewendeten, Abb. 5.69. Grundsätzlich lassen sich alle Werkstoffe schweißen, die sich auch mit konventionellen Schweißverfahren verbinden lassen. Vor allem Stahl und Aluminium werden lasergeschweißt. Unlegierte Stähle mit einem C-Gehalt bis 0,15 % lassen sich ausgezeichnet schweißen. In Stählen über 0,2 % C entstehen als Folge der extremen Abkühlgeschwindigkeit oftmals unzulässige Härtespitzen.

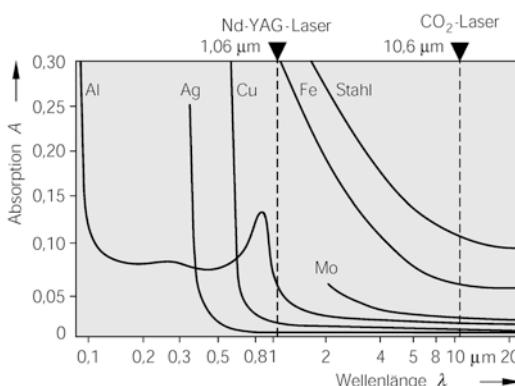


Abb. 5.72 Absorption verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Laserstrahlung

Das Laserstrahlschweißen kommt in vielen Anwendungsbereichen zum Einsatz. Im Bereich der Blechbearbeitung z. B. in der Automobilindustrie zum Schweißen von Teilen der Fahrzeugkarosserie. Tailored Welded Blanks sind maßgeschneiderte Blechplatten, die aus verschiedenen Blehdicken zu einem vorgefertigten Halbzeug mittels Laserstrahl geschweißt werden, um anschließend durch Tiefziehen in die gewünschte Bauteilform umgeformt zu werden. Weitere Anwendungen finden sich im Schienenfahrzeugbau, im Getriebebau, in der Messtechnik (Schweißen von Sensorgehäusen) und der Medizintechnik. Ein Anwendungsbeispiel für Dickbleche ist der Schiffsbau, wo hauptsächlich Bleche aus Stahl im Stumpfstoß verschweißt werden sowie die Rohrherstellung und der Pipelinebau.

Auch thermoplastische Kunststoffe lassen sich schweißen. Die Schweißnähte werden meist als Überlappnähte ausgeführt, wobei das obere Kunststoff-Fügeteil für die verwendete Wellenlänge der Laserstrahlung transparent sein muss, während der untere die Strahlung absorbiert. Häufig setzt man Partikel (z. B. ca. 0,3 % Ruß) zu, um die Absorptionsfähigkeit zu verbessern. Die im unteren Fügeteil entstandene Wärme wird auch an das obere Fügeteil abgegeben und plastifiziert den Kunststoff. Beide Fügeteile müssen durch äußeren Druck fixiert werden.

5.3.6.3 Verfahrensvarianten

Laserstrahlschweißen mit Zusatzdraht Laserstrahlschweißen wird in der Regel ohne Zusatzmaterial eingesetzt, jedoch ist eine gezielte Zufuhr von Zusatzmaterial als Kalt- oder Heißdraht möglich. Hiermit kann die Schweißnaht gezielt metallurgisch beeinflusst und größere Spaltabstände überbrückt werden. Aufgrund der kleinen Schmelzbäder ist eine sehr exakte Zuführung des Zusatzdrahtes erforderlich.

Laserstrahl-Hybrid schweißen Durch die Kombination eines Lichtbogenschweißverfahrens (z. B. MIG) mit dem Laserstrahlschweißverfahren kann die Nahtqualität und Produktivität beim

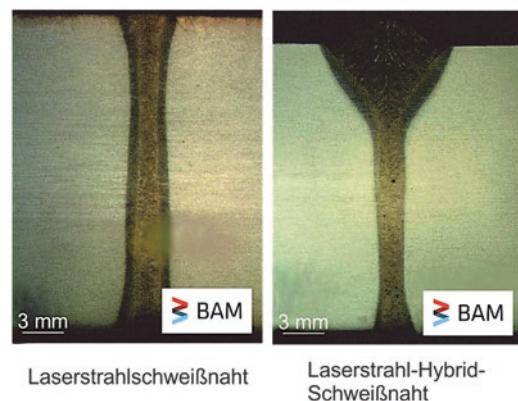


Abb. 5.73 Querschnitt einer Laserstrahl- und Laserstrahlhybridschweißnaht bei Dickblechen

Schweißen dicker Bleche verbessert werden. Das Laserstrahlschweißen kann keine größeren Spaltabstände überbrücken. Der zusätzlich eingesetzte Lichtbogenprozess überbrückt den Spalt und füllt ihn mit dem Zusatzwerkstoff. Im Vergleich zum konventionellen MSG-Schweißen werden durch die hohe Leistungsdichte des Laserstrahls die Schweißgeschwindigkeit und die Einschweißtiefe gesteigert sowie der Lichtbogenprozess stabilisiert. Anwendungen finden sich im Schiffs-, Schienenfahrzeug-, Nutzfahrzeug- und Kranbau. Abb. 5.73 zeigt eine Laser- und Laserstrahlhybridschweißnaht im Vergleich.

Remote-Laserstrahlschweißen Wird eine Bearbeitungsoptik mit großem Arbeitsabstand (Abstand zwischen Optik und Werkstück) genutzt, kann durch eine bereits leichte Verkippung der Optik schnell eine neue Schweißposition angefahren und damit bei komplexen Schweißaufgaben ein Geschwindigkeitsvorteil erzielt werden. Die Strahlpositionierung kann auch über eine Spiegeloptik erfolgen (sogenannte Scanneroptik), bei der verkippbare Ablenkspiegeln den Laserstrahl schnell an unterschiedliche Positionen reflektieren können. Voraussetzung ist, dass der Laserstrahl auch bei einem langen Strahlweg wenig aufweitet (*hohe Strahlqualität*). Das Remote-Verfahren wird bevorzugt in der

Großserienfertigung wie z. B. in der Automobilindustrie angewendet.

Gepulstes Laserstrahlschweißen Es ist möglich, die Laserstrahlung nicht nur kontinuierlich (engl. continuous wave, cw), sondern auch in einzelnen Pulsen abzugeben. Charakteristische Kenngrößen sind die Pulsdauer, die max. in einem Puls erreichte Leistung (Pulsspitzenleistung), die Pulsenegie und die Pulsfrequenz. Beim Schweißen können punktuelle oder durch Aneinanderreihung und Überlappung von Schmelzpunkten auch linienförmige Schweißnähte erzeugt werden. Durch zeitliche Anpassung der Leistung in einem Puls (*Pulsformung*) kann wirkungsvoll Einfluss auf das Schmelzbad genommen werden. Die Vorteile liegen in einer noch besser kontrollierbaren Energieeinbringung. Anwendungen liegen u. a. bei filigranen Bauteilen im Bereich der Elektronik (u. a. elektrische Kontaktierungen in der Batterietechnik) und Medizintechnik.

5.3.6.4 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Vorteile:

- Hohe Intensität und vergleichsweise geringe Energieeinbringung, damit verbunden geringerer Verzug und schmalere wärmebeeinflusste Zonen
- Hohe Schweißgeschwindigkeiten erreichbar
- Hohe Einschweißtiefen erreichbar und damit große Blechstärken einlagig schweißbar
- Hoher Arbeitsabstand
- Strahlführung bei Festkörperlaser erfolgt mit beweglichen Glasfaserkabeln, damit lassen sich dreidimensionale Konturen mit Hilfe von Robotern schweißen
- Gegenüber EB-Schweißen: Keine Vakuumkammer und Abschirmung des Arbeitsraumes gegen Röntgenstrahlung nötig, keine elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffs erforderlich

Nachteile:

- Hohe Abkühlgeschwindigkeiten können zu unzulässigen Aufhärtungen und Rissen führen

- Hohe Anforderungen an die Nahtvorbereitung, geringe Spaltüberbrückbarkeit ohne Zusatzmaterial
- Hohe Investitionskosten
- Abschirmung des Arbeitsraumes gegen Austritt von Laserstrahlung erforderlich

5.4 Widerstandsschweißen (ON: 2)

Die stoffschlüssige Verbindung der Fügeteile beim Widerstandsschweißen elektrisch leitfähiger Werkstoffe wird bei einem durch die Verbindungsstelle fließenden elektrischen Strom durch den **elektrischen Widerstand** der Schweißzone erzeugt (Widerstandswärme, Joule'sche Wärme). Es wird mit oder ohne Kraft und in den meisten Fällen ohne Schweißzusatz geschweißt.

Je nach der Art der Stromübertragung und dem Ablauf des Schweißens unterscheidet man zwei große Verfahrensgruppen:

- **Widerstandspressschweißen** Der Strom für die Erwärmung der Fügeteile wird konduktiv über Elektroden zugeführt oder induktiv durch gut wärmeleitende Induktoren übertragen (DIN 1910-100).
- **Widerstandsschmelzschweißen** Durch Widerstandserwärmungen werden die Stoßflächen der Fügeteile aufgeschmolzen, und etwaiger Schweißzusatz wird verflüssigt, siehe Abschn. 5.4.2.

Die wichtigsten Widerstandspressschweißverfahren sind

- Punktschweißen,
- Rollennahtschweißen (Foliennahtschweißen, Folienstumpfnahtschweißen),
- Buckelschweißen,
- Pressstumpfschweißen und
- Abbrennstumpfschweißen.

Der Anwendungsbereich der Verfahren erstreckt sich von Folienschweißungen bis zu Verbindungen mit einer Werkstück-Dicke von etwa 10 mm. Bei Schweißströmen zwischen 1000 bis

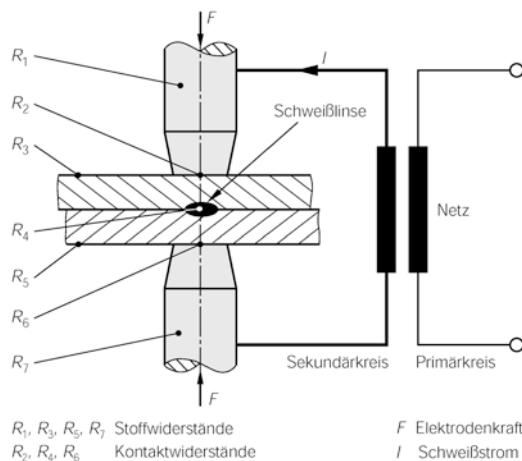


Abb. 5.74 Verfahrensprinzip des Widerstandspunktschweißens

100.000 A liegen die Schweißspannungen deutlich unter 20 V. Die erhebliche erforderliche elektrische Leistung wird im Sekundärkreis von leistungsfähigen Transformatoren erzeugt. Das Prinzip des Punktschweiß-Verfahrens verdeutlicht Abb. 5.74.

5.4.1 Widerstandspressschweißen (ON: 21–24)

5.4.1.1 Widerstandspunktschweißen (Ordnungsnummer: 21)

5.4.1.1.1 Wärmeerzeugung an der Schweißstelle

Durchfließt ein elektrischer Strom I den *ohmschen* Widerstand R während einer Zeit t , dann wird in ihm eine Wärmemenge erzeugt, die nach dem Joule'schen Gesetz berechnet werden kann, Abb. 5.75:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t.$$

Hier ist $R = \sum R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_7$ praktisch der Gesamtwiderstand im Sekundärkreis (ohne den Widerstand des Kabels und der sekundären Trafowicklung), der aus

- *Stoffwiderständen*: Elektroden, (R_1, R_7), Werkstücken (R_3, R_5) und
- *Kontaktwiderständen*: Elektrode-Werkstück (R_2, R_6), Werkstück-Werkstück (R_4) besteht.

Die Stoffwiderstände sind i. Allg. als unveränderlich anzusehen. Die Kontaktwiderstände schwanken aber erheblich in Abhängigkeit vom Oberflächenzustand der Werkstücke und der Elektrodenspitzen.

Die Schweiß- und Fertigungsbedingungen sind so zu steuern, dass im Widerstand R_4 – die gewünschte Verbindungsstelle zwischen den Werkstücken – die *größte* Wärmemenge erzeugt wird. Die Erwärmung aller anderen Teilwiderstände sollte möglichst gering sein („Verlustwärme“, verschleißt auch die Punktschweißelektroden). Dies lässt sich mit der „richtigen“ Wahl der Schweißbedingungen Schweißstrom I , Schweißzeit t und Elektrodenkraft F erreichen. Die Kontaktwiderstände R_2, R_4, R_6 sind dabei für die Güte der Verbindung von wesentlicher Bedeutung.

Die Differenz aus erzeugter Wärmemenge je Zeiteinheit durch Leitung und abgeföhrter Wärme muss zum Herstellen der Schweißverbindung ausreichen. Das ist die wichtigste Voraussetzung für die Herstellung der Schweißverbindung. Die große thermische Leitfähigkeit des Kupfers ist die wesentlichste Ursache für die schlechte Schweißeignung dieses Werkstoffs für das Widerstandspressschweißen.

Große Abkühlgeschwindigkeiten als Folge einer großen Wärmeleitfähigkeit können außerdem bei Werkstoffen wie Stahl der Gruppe 3 nach DVS-Merkblatt 2902-2 zu Aufhärtungserscheinungen und damit zur Rissneigung führen. Eine große Wärmeleitfähigkeit, wassergekühlte Elektroden und von Oberflächenschichten (z. B. Rost, Farbe) freie Werkstoffoberflächen sind dagegen sehr erwünscht, da die an den Kontaktstellen Elektrode-Werkstück (R_2, R_6) entstehende Wärmemenge möglichst gering sein soll, um ein Anlegieren („Kleben“) der Elektroden auf dem Werkstück zu vermeiden.

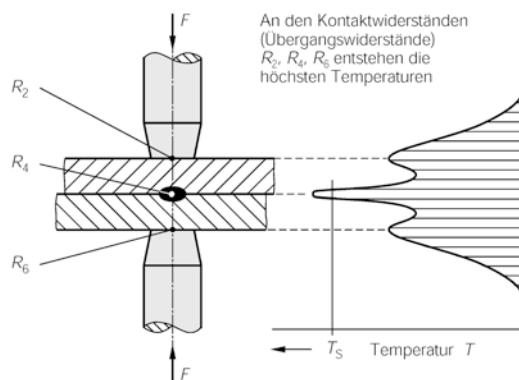


Abb. 5.75 Typische Temperaturverteilung beim Punktschweißen

Abb. 5.75 zeigt schematisch die typische Temperaturverteilung beim Punktschweißen. Die Temperatur an der Schweißstelle (R_4) überschreitet im Allgemeinen die Schmelztemperatur T_S der Grundwerkstoffe. Der Bereich des beim Punktschweißen flüssig gewordenen Werkstoffs wird nach dem Erstarren als *Schweißlinse* bezeichnet.

5.4.1.1.2 Verfahrenstechnische Grundlagen

Die innerhalb einer bestimmten Schweißzeit bei gegebenem Schweißstrom erzeugte Wärmemenge ist abhängig von der

- *Wärmeleitfähigkeit* des Werkstoffs und des Elektrodenwerkstoffs und von den
- *Kontaktwiderständen*, d. h. vom Oberflächenzustand von Elektrode und Werkstück.

Der Kontaktwiderstand wird durch die Oberflächenrauigkeit und die Art und Menge nicht- bzw. schlechteitender Oberflächenschichten, wie z. B. Oxide, Öl oder Farbe bestimmt.

Die Oberflächenrauigkeit ist die Ursache dafür, dass zu Beginn der Schweißung nicht die gesamte vorhandene Kontaktfläche stromleitend ist, sondern nur ein bestimmter Anteil, nämlich die *wahre Kontaktfläche*. Mit zunehmender Elektrodenkraft wird diese durch plastische Verformung größer und damit der

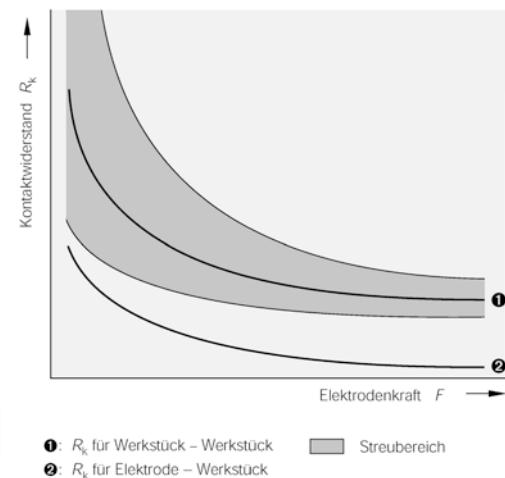


Abb. 5.76 Einfluss der Elektrodenkraft auf den Kontaktwiderstand beim Punktschweißen

Kontaktwiderstand geringer, wie Abb. 5.76 zeigt. Bemerkenswert ist der bei geringen Elektrodenkräften sehr große Streubereich der Kontaktwiderstände. Die Folgen sind unterschiedliche Schweißströme, d. h. unterschiedliche Festigkeitseigenschaften der einzelnen Schweißpunkte.

Ähnlich problematisch verhalten sich die Oberflächenschichten, wie z. B. Oxide, Fette, Anstriche bzw. Beläge aller Art. Durch genügend große Elektrodenkräfte können zwar dünne Oberflächenschichten bei geeigneten Formen der Elektrodenspitze – z. B. leicht ballig (Abschn. 5.4.1.1.4) – zerquetscht werden, die Werkstückoberfläche weist aber dann häufig Markierungen auf, und der Verschleiß der Elektrode ist i. Allg. wesentlich größer. In den meisten Fällen müssen daher die Oberflächenschichten beseitigt werden. Das kann erreicht werden durch:

- *mechanische Verfahren* (Bürsten, Schleifen, Schaben) oder
- *physikalisch-chemische Verfahren* (Glühen in reduzierender Atmosphäre, Beizen).

Nach dem Joule'schen Gesetz $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ ist der Einfluss des Schweißstroms auf die zu

erzeugende Wärmemenge Q am größten. Der Schweißstrom I in einem Wechselstromkreis beträgt bei der Sekundärspannung U

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}}$$

Hierin bedeuten:

- R gesamter ohmscher Widerstand im Sekundärkreis einschließlich aller Kontaktwiderstände,
- ω Kreisfrequenz $= 2 \cdot \pi \cdot f$ (f = Netzfrequenz),
- L Gesamtinduktivität

Bei konstanter Sekundärspannung nimmt der Schweißstrom mit dem Widerstand und der Induktivität ab. Je nach Größe der „Sekundärschleife“ und der Menge des sich in ihr befindlichen magnetisierbaren Werkstoffs kann die Induktivität erhebliche Werte annehmen.

Den grundsätzlichen Einfluss des Schweißstroms auf die *Scherzugfestigkeit*²² der Verbindung zeigt Abb. 5.77. Unterhalb bestimmter Werte ist die *erzeugte* Wärmemenge geringer als die *abgeführte*, eine Verbindung kommt daher nicht zustande (Punkt ①, ②). Zu große Schweißströme führen zum Spritzen des verflüssigten Werkstoffs d. h. zur Bildung von Lunkern und Poren, zum Verringern der Querschnittsfläche, evtl. zur Rissbildung und damit zu einer erheblichen Abnahme der Scherzugfestigkeit (Punkt ④). Optimale Scherzugfestigkeiten ergeben sich, wenn der Prozess des Spritzens gerade beginnt (Punkt ③).

Die erforderliche Wärmemenge ist zweckmäßiger in Form von sehr kurzzeitig wirkenden, großen elektrischen Leistungen ($U^2 \cdot R$) zu erzeugen, als mittels entsprechend geringeren Leistungen und längeren Zeiten. Die *Schweißzeit* – genauer die Stromzeit, also die Dauer, während der der Schweißstrom fließt – beträgt bei dünnwandigen Werkstücken einige Perioden

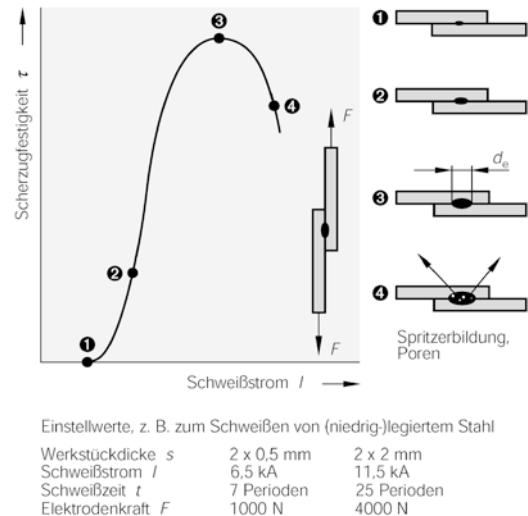


Abb. 5.77 Einfluss des Schweißstroms auf die Größe der Scherzugfestigkeit von Punktschweißverbindungen

und bei dickwandigen bis zu einigen Sekunden²³.

Zum Verbinden dicker Werkstücke ($s \geq 3$ mm) ist es zweckmäßiger, mit kurzzeitigen Impulsen (sog. *Phasenanschnitttechnik*) zu arbeiten als mit einer kontinuierlich wirkenden Schweißzeit. Hierdurch wird überwiegend die Temperatur in der Schweißstelle (Abb. 5.75) erhöht, weniger die an den Kontaktstellen Werkstück-Elektrode. Denn die wassergekühlte, gut wärmeleitende Elektrode leitet die Wärme an diesen Orten sehr viel rascher ab als die Schweißlinse und der sie umgebende hoch erhitzte Bereich.

Das Ergebnis der Schweißung ist ein linsenförmig ausgebildeter Schweißpunkt, die **Schweißlinse** (Abb. 5.74). Diese ist der durch den Schweißvorgang in seinem Gefüge veränderte, aus dem flüssig gewordenen Grundwerkstoff bestehende Bereich, der die Werkstücke miteinander verbindet.

Die Güte der Schweißpunkte wird in erster Linie von folgenden Faktoren bestimmt:

²²Die Scherzugfestigkeit wird vielfach als Kennwert für die erreichten Festigkeitseigenschaften von Punktschweißverbindungen verwendet.

²³Zum Beispiel drei Perioden bei 0,8 mm dickem und 0,3 s bei 4 mm dickem Stahlblech, s. DVS 2902-1.

- Richtige Wahl der an der Schweißmaschine einstellbaren Einflussgrößen: Schweißstrom, Stromzeit, Elektrodenkraft, Durchmesser der Elektrodenkontaktefläche.
- Zustand der Werkstückoberfläche und der Elektrodenspitzen.
- Symmetrische Ausbildung der Punkte, d. h., die verflüssigten Anteile der beiden Werkstücke sollten im Idealfall gleich sein.

5.4.1.1.3 Verfahrensvarianten

Aus konstruktiven, fertigungstechnischen und werkstofflichen Gründen werden außer dem *direkten Punktschweißen* eine Reihe von Verfahrensvarianten verwendet, die besondere Vorteile und Möglichkeiten bieten, s. DVS-Merkblatt 2939.

Beim direkten Punktschweißen wirken die einer Transformatorwicklung zugeordneten Elektroden auf beiden Seiten der Werkstücke. Beim *Doppelpunktschweißen* ist es häufig bei kleinen Punktabständen schwierig, an beiden Schweißstellen gleiche Elektrodenkräfte zu erzeugen. In diesen Fällen ist dann das Buckelschweißen oft geeigneter (siehe Abschn. 5.4.1.3).

Abb. 5.78 zeigt zwei Varianten des *indirekten Punktschweißens*, bei denen die der Sekundärwicklung des Transformators zugeordneten Elektroden auf *einer* Seite der Werkstücke wirken. Diese Verfahren können bei schlechter Zugänglichkeit bzw. bei großen, sperrigen Teilen fertigungstechnische Vorteile bieten. Das Punktschweißen einseitig mit Kunststoff beschichteter

Bleche ist nur mit dieser Verfahrensvariante möglich, da die Kunststoffsicht einen Stromfluss unmöglich macht. Sehr schlecht oder nicht punktschweißgeeignet sind lackierte Bleche, feinperlitische („sorbitisch vergütete“) Federstähle und Stähle mit einer emaillierten Oberfläche.

5.4.1.1.4 Punktschweißelektroden

Elektroden sind Verschleißteile und deshalb auswechselbar. An sie werden folgende Anforderungen gestellt:

- Gute elektrische und thermische Leitfähigkeit,
- große Warmhärte,
- hohe Anlassbeständigkeit,
- geringe Neigung zum Anlegieren mit dem Werkstück („Kleben“, bei verzinkten Blechen),
- sichere Kühlung der Elektrodenspitze.

Wegen der geringen Festigkeit wird reines Kupfer sehr selten verwendet. Kupfer legiert mit Chrom, Silber, Beryllium, Molybdän und anderen Metallen sind die bevorzugten Werkstoffe. Eine solche Legierung eignet sich wegen der wesentlich größeren Festigkeit auch bei höheren Temperaturen sehr viel besser als Elektrodenwerkstoff.

Form und Abmessungen der Elektroden bestimmen weitgehend die Wärmeleitung, Stromdichte, Kontaktwiderstände und Größe der Schweißlinse. Der größte Durchmesser der Elektrode d_1 wie in Abb. 5.79a) ist so zu wählen, dass er für die Übertragung des Schweißstroms und der Elektrodenkraft ausreicht.

Die plane Elektrode wird vorzugsweise für Schweißteile mit blanken Oberflächen verwendet, Abb. 5.79a). Zweckmäßiger ist die ballige Form, da dünne Oxidschichten zerquetscht werden und wegen der anfänglichen Punktbewehrung die gewünschten sehr großen Stromdichten entstehen, Abb. 5.79b).

Der Punktdurchmesser d_e (Linsendurchmesser, Abb. 5.80) beträgt üblicherweise:

$$0,7 \cdot d_2 \leq d_e \leq 0,8 \cdot d_2.$$

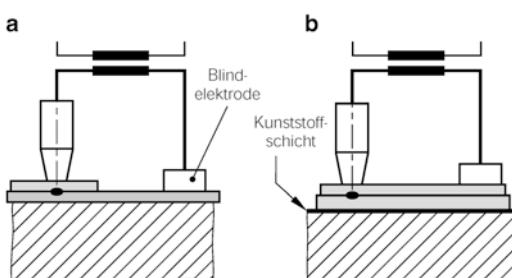


Abb. 5.78 Verfahrensvarianten des indirekten Punktschweißens. **a** Punktschweißen mit Blindelektrode **b** Punktschweißen kunststoffbeschichteter Bleche

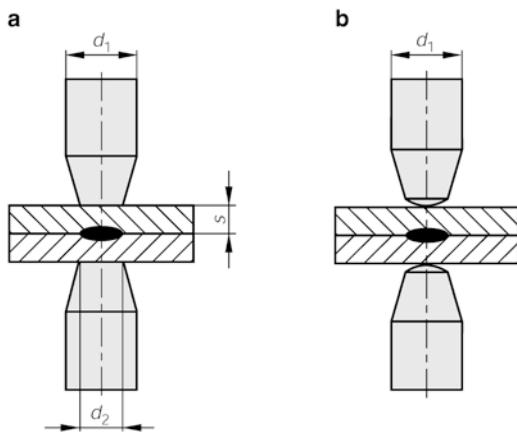


Abb. 5.79 Geometrie üblicher Punktschweißelektroden. **a** Elektrode plan ($d_2 \approx 4 \cdot s$ bis $d_2 \approx 10 \cdot s$) **b** Elektrode ballig

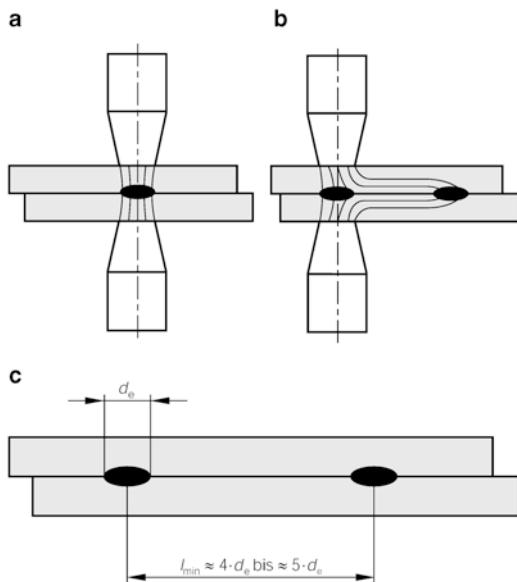


Abb. 5.80 Stromnebenschlüsse in Punktschweißverbindungen. **a** Stromverlauf ohne Nebenschlüsse **b** Nebenschluss als Folge zu dicht nebeneinander liegender Schweißpunkte **c** Vermeidung von Nebenschüssen

Um die Standzeit zu verlängern, werden die Elektroden grundsätzlich wassergekühlt. Der Verschleiß der Elektrodenspitze führt zwangsläufig zu einer größeren Kontaktfläche, d. h. zu einer geringeren Stromdichte. Dieser „schleifende Fehler“ muss besonders bei der Massenfertigung kontrolliert und behoben werden. Die

Oberfläche der Elektrodenspitze ist durch vorsichtiges Schmirlgeln und Polieren, am besten durch Drehen – auf keinen Fall durch Feilen – metallisch blank zu halten, damit die Kontaktwiderstände möglichst klein bleiben.

5.4.1.1.5 Technologische Besonderheiten

Elektrodeneindrücke

In manchen Fällen ist es notwendig, dass die *Eindrücke* der Elektrode auf der Werkstückoberfläche nicht erscheinen. Dies gelingt mit einer großflächigen äquidistanten Elektrode, die an der zu schützenden Oberfläche angeordnet wird. Diese Maßnahme ist nur geeignet, wenn der Eindruck auf *einer* Seite vermieden werden soll, da wegen der erforderlichen sehr hohen Stromdichte *eine* Stirnfläche der Elektroden klein genug sein muss.

Stromnebenschluss

Stromnebenschlüsse können u. a. infolge einer nicht punktschweißgerechten Konstruktionen und wegen zu kleiner Punktabstände entstehen. Das verdeutlicht Abb. 5.80. Die Folgen sind geringere Schweißströme, die wegen der dann entstehenden kleineren Linsendurchmesser d_e zu kleineren Scherzugfestigkeiten der Schweißpunkte führen. Als brauchbarer Anhaltswert für Stahl kann ein Mindestpunktabstand l_{\min} von etwa $4 \cdot d_e$ bis $5 \cdot d_e$, für gut leitende Werkstoffe wie Aluminium ein solcher von $8 \cdot d_e$ bis $10 \cdot d_e$ angenommen werden.

Thermisches Gleichgewicht

Symmetrische Schweißlinsen sind eine wichtige Voraussetzung für die Herstellung hochwertiger Schweißpunkte. Sie können nur erreicht werden, wenn in den zu verbindenden Teilen die gleiche Wärmemenge erzeugt wird.

Das *thermische Gleichgewicht* wird von der *thermischen Leitfähigkeit* der Werkstücke sowie von ihren Abmessungen beeinflusst. Abb. 5.81a zeigt die unsymmetrische Ausbildung der Schweißpunkte bei unterschiedlicher Wanddicke und Leitfähigkeit der Fügeteile. Durch Elektroden mit großen Arbeitsflächen am Werkstück mit dem größeren

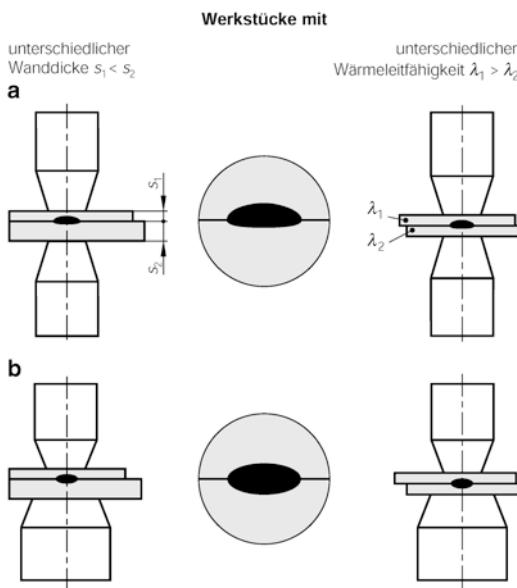


Abb. 5.81 Zum thermischen Gleichgewicht beim Punktschweißen. **a** Unsymmetrische Schweißlinsen als Folge unterschiedlicher Wanddicken bzw. unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit der Fügeteile **b** Elektroden mit großen Arbeitsflächen auf dem stärker zu erwärmenden Fügeteil (größere Wanddicke, geringere Wärmeleitfähigkeit) symmetrieren die Schweißlinsen

Widerstand bzw. der geringeren Wärmeleitfähigkeit ergeben sich die gewünschten symmetrischen Schweißpunkte wie in Abb. 5.81b.

Sekundärfensteröffnung

Diese ist eine Fläche und wird gebildet aus Armabstand und Ausladung L entsprechend Abb. 5.82. Je größer sie ist, und je mehr magnetisierbarer Werkstoff in sie eintaucht

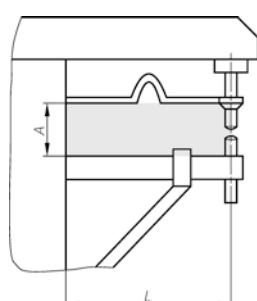


Abb. 5.82 Zur Definition der Sekundärfensteröffnung, $S = A \cdot L$

oder sich in ihrer unmittelbaren Nähe befindet, umso größer wird der induktive Widerstand ωL . Die Folge ist eine Abnahme des wirksamen Schweißstroms (*Impedanzverlust*). Mit zunehmender Kreisfrequenz ω werden auch die induktiven Verluste größer. Bei Gleichstrom-Schweißmaschinen können daher induktive Ströme (Blindströme) nur noch beim Einschalten entstehen. Der Konstrukteur muss darauf achten, dass die Fügeteile in möglichst geringem Umfang in die „*Fensteröffnung*“ eintauchen. Vorrichtungen aus unmagnetischen Werkstoffen sind ebenfalls sinnvoll.

Strom- und Kraftprogramme

Die weitgehende Verwendung elektrischer und elektronischer Steuer- und Regelsysteme in modernen Punktschweißmaschinen erlaubt die beliebige Abfolge der wichtigsten Einstellgrößen Schweißstrom und Elektrodenkraft, wie es Abb. 5.83 zeigt. Diese Strom- und Kraftprogramme werden für folgende Werkstoffe angewendet:

- Schlecht schweißgeeignete Stähle, die aufhärzungsempfindlich sind ($C > 0,2\%$), d. h. zur Rissbildung neigen,
- thermisch und metallurgisch empfindliche Werkstoffe, wie z. B. Aluminiumlegierungen und aushärtbare Werkstoffe, z. B. AlMgSi-Typen,
- dickwandige Werkstoffe ($s > 4\text{ mm}$) oder für höchste Qualitätsansprüche, z. B. in der Luftfahrttechnik.



Abb. 5.83 Beispiel für ein Elektrodenkraft- und Schweißstromprogramm beim Punktschweißen

Der Ablauf und die schweißtechnischen Vorteile eines derartigen Programms lassen sich wie folgt beschreiben:

- **Vorwärmen.** Der Vorwärmstrom erzeugt eine Wärmeenergie, die zum Schweißen unzureichend ist, die Abkühlgeschwindigkeit aber entsprechend verringert. Die hohe Vorpresskraft sorgt für ein sattes Anliegen der Fügeteile.
- **Schweißen.** Während des eigentlichen Schweißvorgangs wird die Presskraft herabgesetzt (R und $I^2 \cdot R$ nehmen zu), und der Schweißstrom wird erhöht. Dieser kann in Form eines Impulses oder mehrerer Impulse wirken.
- **Nachwärmen.** Mit dieser Wärmebehandlung wird in erster Linie die metallurgische Qualität der Verbindung verbessert. Das Verringern der Abkühlgeschwindigkeit infolge des Stromabfalls ist das wichtigste Ziel dieser Behandlung.

5.4.1.1.6 Anwendungsgrenzen

Die meisten in der Technik verwendeten metallischen Werkstoffe lassen sich punktschweißen. Lediglich Kupfer, Molybdän, Tantal und Wolfram sind schlecht oder nicht punktschweißgeeignet. Alle gut wärmeleitenden Metalle (Kupfer, Aluminium) müssen wegen der raschen Wärmeableitung mit sehr hohen Strömen (bis 10^5 A) und extrem kurzen Zeiten geschweißt werden. Besonders bei den verhältnismäßig weichen Aluminiumlegierungen müssen zusätzlich bestimmte apparative Voraussetzungen erfüllt werden: Die Elektrode muss dem nachgebenden Werkstoff folgen können, damit der Kontakt zwischen ihr und dem Werkstück aufrecht erhalten bleibt.

Das Verfahren wird hauptsächlich in der Blech verarbeitenden Industrie (stationäre oder Tischpunktschweißmaschinen) angewendet. Einige wichtige Einsatzgebiete sind der Haushaltsgerätebau, die Automobilfertigung, der Stahlbau, die Feinwerktechnik und eine Vielzahl von Massenbedarfsartikeln.

Die verarbeiteten Werkstückdicken liegen hauptsächlich zwischen 0,2 mm und 2,5 mm; die maximale in der Praxis angewendete

Werkstückdicke beträgt etwa 8 mm. Im Luftfahrzeugbau werden Aluminiumlegierungen und Titanlegierungen im großen Umfang punktgeschweißt.

Lassen sich die Werkstücke nicht einfach transportieren, kann die Maschine in Form leicht beweglicher *Punktschweißzangen* an die Werkstücke herangeführt werden. Dies geschieht weitgehend in der Automobilfertigung. In einem solchen großen Fertigungsbereich wird der Arbeitsablauf durch Industrieroboter bestimmt. Diese können als Träger der Punktschweißzangen dienen oder als Zubringer- oder Übergabeeinrichtungen arbeiten, die die Punktschweißmaschine mit den Fügeteilen beschicken und die fertigen Teile entnehmen und weiterleiten. Die universelle Verwendbarkeit der frei programmierbaren Industrieroboter erspart in vielen Fällen die teuren Transferstraßen.

5.4.1.2 Rollennahtschweißen (ON: 22)

Beim Punktschweißen können je nach Wahl des Punktabstandes *Heftnähte*, *Festnähte* oder bei sich überlappenden Punkten *Dichtnähte* entstehen. Besonders hohe Punktfolgen, wie sie für Dichtnähte erforderlich sind, verursachen einen erheblichen Elektrodenverschleiß. Diese Schwierigkeiten werden durch Rollenelektroden wie in Abb. 5.84 vermieden, die

- den Schweißstrom zuführen,
- die Elektrodenkraft ausüben und
- den Transport der Werkstücke übernehmen.

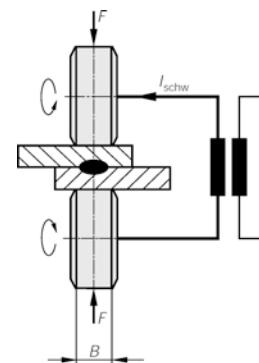


Abb. 5.84 Prinzip des Rollennahtschweißverfahrens. Mindestens eine der beiden Rollen wird angetrieben (B = Rollenbreite)

Im Gegensatz zum Punktschweißen heben die Rollenelektroden beim Vorschub, der auch durch die Elektroden erfolgt, nicht ab. Zum Schweißen von Stahl wird meist nur eine, bei Leichtmetallen werden wegen der größeren Gefahr des Rutschens beide Rollenelektroden angetrieben. Die Geschwindigkeit der Rollenelektroden darf nur so groß sein, dass diese das Schweißgut so lange unter Druck setzen, bis eine ausreichende Bindung, d. h. die Kristallisation der Schmelze erreicht ist. Daraus und wegen der unvermeidbaren Nebenschlusswirkung ergibt sich im Vergleich zum Punktschweißen eine deutlich geringere maximal schweißbare Werkstückdicke. Sie beträgt bei Stahl etwa 2 bis 3 mm. Die Wirkung der Nebenschlüsse ist aber wesentlich geringer als beim Punktschweißen, da der elektrische Widerstand des gerade erzeugten Schweißpunktes wegen seiner hohen Temperatur noch sehr groß ist.

Die *Dicht-* und *Rollenpunkt nähte* lassen sich entsprechend Abb. 5.85 mit kontinuierlicher oder intermittierender Elektrodendrehbewegung (abhängig von der Schweißaufgabe) mithilfe von *Dauerwechselstrom* oder mit *Stromimpulsen* herstellen.

Beim Schweißen mit Dauerwechselstrom hängt der Punktabstand von der Schweißgeschwindigkeit und der Schweißstromfrequenz ab. Diese Verfahrensvariante wird bevorzugt

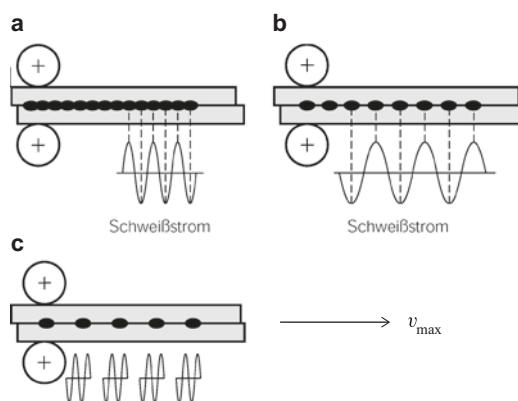


Abb. 5.85 Verschiedene Nahtformen beim Rollennahtschweißen. **a** Dichtnaht, hergestellt mit Dauerwechselstrom **b** Rollenpunkt naht, hergestellt mit Dauerwechselstrom **c** Rollenpunkt naht, hergestellt mit unterbrochenem Strom (Gleich- oder Wechselstrom)

zum Schweißen dünner, blanker Bleche bis zu etwa 1,5 mm Dicke angewendet, wenn der Verzug vernachlässigbar ist. Der Verzug geschweißter Teile lässt sich praktisch nur mit Strom- und Kraftprogrammen verringern. Das Schweißen mit Stromimpulsen erlaubt es auch, dickere oder schweißempfindlichere Werkstoffe sicherer zu verarbeiten, wie z. B. die austenitischen CrNi-Stähle, die eine nur geringe elektrische Leitfähigkeit aufweisen.

Mit den üblichen Schweißmaschinen ($f = 50 \text{ Hz}$) kann je Stromhalbwelle eine Schweißlinse erzeugt werden, wenn man ohne Stromprogramm arbeitet. Für Dichtnähte sind ungefähr $p = 4$ Punkte je cm Schweißnahtlänge erforderlich. Damit ergibt sich die maximal mögliche Schweißgeschwindigkeit

$$v_{\max} = \frac{2 \cdot 60 \cdot f}{100 \cdot p} \approx 15 \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Der Punktabstand $e = 1/p$ beim Rollenpunkt-schweißen ergibt sich bei gegebener Schweißgeschwindigkeit demnach zu

$$e \approx 0,8 \cdot \frac{v}{f} \text{ in cm.}$$

Die Abmessungen der Rollenelektroden (Breite B in mm, Abb. 5.84) werden von der Konstruktion, vor allem aber von der Werkstückdicke s bestimmt. Bei blanken Stahlblechen werden Elektroden mit flacher, bei verunreinigten oder metallisch beschichteten Werkstoffen solche mit leicht balliger Arbeitsfläche verwendet. Abhängig von der Schweißnahtbreite b soll die Kontaktflächenbreite B der flachen Elektrode sein:

$$B = b + 1 \text{ in mm.}$$

Für die Schweißnahtbreite b gilt der Anhaltswert:

$$b \approx 2 \cdot s + 2 \text{ in mm.}$$

Das Elektrodenprofil sollte möglichst lange unverändert erhalten bleiben, da es weitgehend das Aussehen und die Qualität der geschweißten Verbindung bestimmt. Die Auswahl der Elektrodenwerkstoffe wird nach den gleichen Überlegungen getroffen wie beim Punktschweißen.

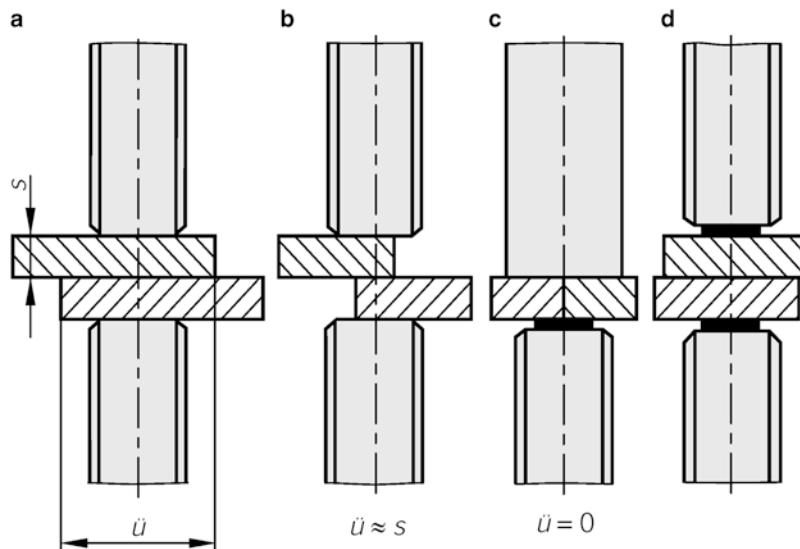


Abb. 5.86 Fügeteilanordnungen beim Rollennahtschweißen für: **a** Überlappnaht ($\ddot{U} \approx 3 \cdot s$), Ordnungsnummer: 226
b Quetschnaht ($\ddot{U} \geq s$), Ordnungsnummer: 222 **c** Folienstumpfnaht ($\ddot{U} = 0$), Ordnungsnummer: 225 **d** Folienüberlappnaht, Ordnungsnummer: 226

Die *Überlappnaht* wie in Abb. 5.86a ist sehr sicher herzustellen. Sie wird daher am häufigsten angewendet. Die Breite der Überlappung wird etwa gleich der 3-fachen Einzelblechdicke gewählt. Unsaubere Bleche und Passungenauigkeiten – z. B. Einschweißen von Böden in zylindrischen Behältern – führen zum Spritzen, Durchbrennen der Bleche und zu starkem Verschleiß der Elektroden. Blanke und glatte Bleche sind daher für das Rollennahtschweißen unabdingbar.

Bei der *Quetschnaht* entsprechend Abb. 5.86b verschwindet die Überlappung nach dem Schweißen vollständig, d. h., die Bleche liegen bündig nebeneinander. Geeignete Vorrichtungen verhindern das Verziehen der Bleche. Die Schweißnahtqualität hängt sehr stark von der Gleichmäßigkeit der Überlappung ab. Größere Abweichungen als $\pm 10\%$ vom eingestellten Maß sind nicht zulässig.

Es werden Elektroden mit breiter, flacher Arbeitsfläche verwendet. Wegen der linienförmigen Berührung an den Blechkanten ist der Verschleiß der Elektroden verhältnismäßig hoch (Riefenbildung). Sie müssen daher aus hochfestem Stahl bestehen.

Die *Folienüberlappnaht* nach Abb. 5.86d bietet nur bei metallisch beschichteten Stahlblechen (z. B. verzinkt) Vorteile, weil die Deckschicht vor dem Schweißen nicht entfernt werden muss. Die Standzeit der Rollenelektroden ist groß, da kein unmittelbarer Kontakt zum Werkstück besteht.

Grundsätzlich können mit diesem Verfahren alle Werkstoffe geschweißt werden, die auch punktschweißgeeignet sind. Die elektrische, die thermische Leitfähigkeit, die unvermeidbare Nebenschlusswirkung und besonders der Oberflächenzustand sind aber von größerer Bedeutung als beim Punktschweißen.

Mit dem Verfahren können z. B. aus meist dünnwandigen Werkstoffen Bauteile hergestellt werden, die aus einem Stück nur unwirtschaftlich zu fertigen sind. Diese Methode wird praktisch in der gesamten Blech verarbeitenden Industrie eingesetzt (Flugzeugbau, Automobilbau, Waggonbau) und für Massenbedarfsgüter (Haushaltsgeräte, Gehäuse, Stahlradiatoren).

5.4.1.3 Buckelschweißen (ON: 23)

Meist ist eines der Fügeteile mit einem oder mehreren Schweißbuckeln versehen. Der Strom

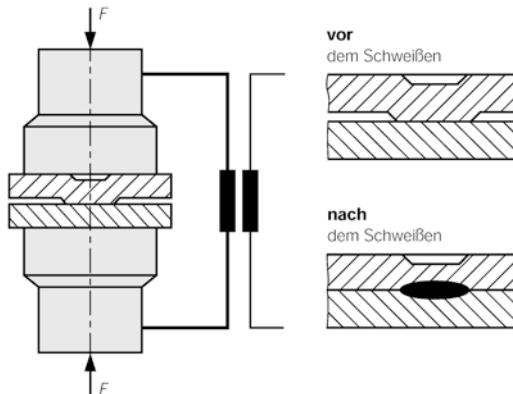


Abb. 5.87 Verfahrensprinzip des (einseitigen) Buckelschweißens

wird durch großflächige Elektroden zugeführt und fließt über die Buckel zur gegenüberliegenden Elektrode. Durch die Elektrodenkraft werden die Buckel zusammengedrückt und ganz oder teilweise eingeebnet. Es entstehen punktschweißähnliche Verbindungen entsprechend Abb. 5.87, deren Querschnitte die Buckel bestimmen. Wie beim Punktschweißen geht ein erheblicher Anteil der Schweißwärme infolge Wärmeleitung zu den wassergekühlten Elektroden verloren. Zu klein gewählte Stromstärken können daher durch Verlängern der Schweißzeit nicht ausgeglichen werden²⁴.

Ein wesentlicher wirtschaftlicher Vorteil ist die Möglichkeit, bis etwa 20 Buckel gleichzeitig zu schweißen. Dies setzt möglichst gleichmäßige Buckelabmessungen voraus: die Toleranz der Buckelhöhen sollte maximal $\pm 5\%$ betragen. Außerdem erfordert es eine gleichmäßige Verteilung der Elektrodenkraft und des Schweißstroms auf jeden Buckel. Die Lebensdauer der großflächigen Buckelschweißelektroden ist größer als die der kleineren Punktschweißelektroden.

Eine gleichmäßige Stromverteilung ist wegen der unterschiedlich langen Strompfade schwer zu erreichen. Häufig können daher nicht alle Buckel gleichzeitig geschweißt werden. In vielen Fällen sind daher Einzelschritte schon wegen

der extremen Netzbelastrung (bis 1000 kVA) notwendig.

Ein mit der gleichzeitigen Schweißung vieler Buckel verbundener Nachteil ist weiterhin das Wandern („Schwimmen“) der Werkstücke durch die Erweichung der Buckel. Die Maßhaltigkeit kann insoweit verlorengehen.

Das Verfahren wird vorteilhaft in der Großserienfertigung im Dünblechbereich verwendet, wenn mehrere Schweißpunkte notwendig sind, z. B. bei der Herstellung von Haushaltsgeräten und Fahrzeugen. In den meisten Fällen werden die Buckel gleichzeitig mit dem Pressen der Fügeteile eingeprägt. Die Buckelform wird von der Werkstückdicke und den konstruktiven Möglichkeiten bestimmt, wie Abb. 5.88 zeigt. Der Ringbuckel bietet die größte Steifigkeit und wegen der großen Querschnittsfläche auch die größte Festigkeit.

5.4.1.4 Pressstumpfschweißen (ON: 25)

Wie Abb. 5.89 verdeutlicht, werden die Fügeteile von wassergekühlten kupfernen Spannbacken gehalten, die die gleichen Funktionen ausüben wie die Elektroden beim Punkt- und Buckelschweißen. Sie führen den Schweißstrom zu und erzeugen durch ein in Stauchrichtung beweglich angeordnetes Backenpaar (*Stauchschlitten*) die Presskraft. Die Fügeteile ragen um die Einspannlänge E_1 bzw. E_2 aus den Spannbacken heraus und werden durch die Presskraft F zusammengedrückt. An der Kontaktstelle „K“ ist der elektrische Widerstand am größten; hier wird also die zum Schweißen erforderliche höchste Temperatur erreicht (bei Stahl etwa 1100 bis 1300 °C).

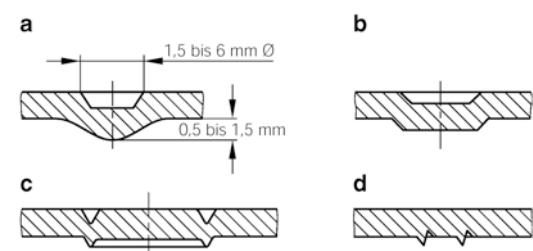
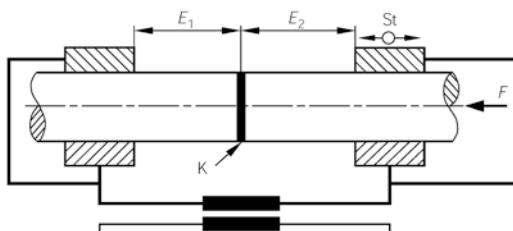


Abb. 5.88 Wichtige Buckelformen. **a** Rundbuckel **b** Langbuckel **c** Ringbuckel **d** „angeschobener“ Buckel

²⁴ Buckelschweißen. Fa. Schlatter. [Youtube wissensfloater](#).



F Stauchkraft, erzeugt mit beweglichem Stauchschlitten (St)
 E_1, E_2 Einspannlängen
K Kontaktstelle, Berührungsfläche der Fügeteile

Abb. 5.89 Verfahrensprinzip des Pressstumpfschweißens

Größe und Form der Berührungsflächen der Fügeteile müssen gleich sein; die notwendige gleichmäßige Erwärmung ist nur mit einer über den gesamten Querschnitt gleichmäßigen Stromdichte erreichbar. Liegen ungleiche Querschnitte vor, dann müssen sie in Form und Größe angeglichen werden, wie Abb. 5.90 zeigt. Die „Halslänge“ h muss mindestens so groß sein wie der beim Stauchen entstehende Längenverlust.

Ebenso wichtig für die Güte der Schweißverbindung ist die gleichmäßige Erwärmung der vom Schweißstrom durchflossenen Fügeteile (Einspannlänge E_1 bzw. E_2 , Abb. 5.89). Bei gleichen Werkstoffen, Querschnitten und Einspannlängen ist auch die in den Einspannenden entwickelte Wärmemenge gleich. Bei unterschiedlichen Werkstoffen muss die Einspannlänge des besser leitenden größer sein. Das Verhältnis der Einspannlängen ist etwa gleich dem der Wärmeleitfähigkeiten.

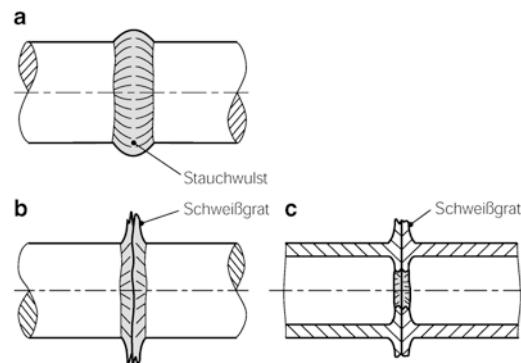


Abb. 5.91 Stauchwulst- bzw. Schweißgratformen beim a Pressstumpfschweißen b Abbrennstumpfschweißen mit massivem Querschnitt c Abbrennstumpfschweißen mit rohrförmigem Querschnitt

Die Berührungsflächen der zu schweißenden Fügeteile müssen möglichst metallisch blank und planparallel sein. Der Schweißstrom erwärmt die Fügeteile auf die Schweißtemperatur (etwa 1200 °C), und der sich daran anschließende Stauchvorgang beendet das Schweißen. Danach wird der Schweißstrom abgeschaltet. Es entsteht der für das Schweißen von Stählen typische *Stauchwulst* wie in Abb. 5.91a, der auch die sehr anschauliche Bezeichnung *Wulststumpfschweißen* verständlich macht. Die Qualität der Schweißverbindung hängt entscheidend von der Sauberkeit und Parallelität der Kontaktflächen ab.

Angewendet wird das Verfahren vorwiegend für Fügeteile mit kreisförmigem Querschnitt (z. B. Drähte aus unlegiertem und legiertem Stahl, Kupfer, Aluminium, Messing von 0,3 bis 14 mm Ø) mit einem maximalen Querschnitt bis etwa 2000 mm². Vorteilhaft sind die einfache Handhabung und der verhältnismäßig einfache Aufbau der Schweißmaschinen.

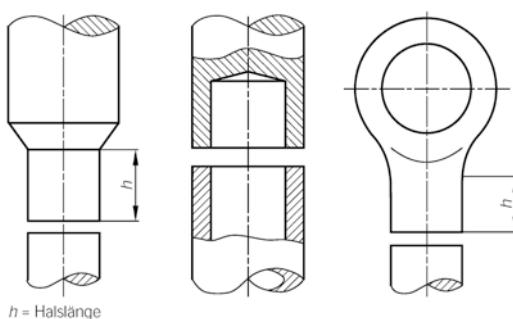


Abb. 5.90 Anpassen von Fügeteilen mit unterschiedlichen Querschnitten für das Pressstumpfschweißen

5.4.1.5 Abbrennstumpfschweißen (ON: 24)

Je nach Größe und Form der zu verbindenden Querschnitte wird das Abbrennstumpfschweißen ohne Vorwärmung (Abbrennen aus dem Kalten) oder mit Vorwärmung angewendet. Charakteristisches Kennzeichen beider Verfahrensvarianten ist, dass an den Zustand der Stoßflächen der Fügeteile keine besonderen Anforderungen

gestellt werden müssen. Die Stoßflächen sollten allerdings planparallel und keine Versetzung in Stauchrichtung aufweisen²⁵.

Beim **Abbrennstumpfschweißen ohne Vorwärmung** werden die eingespannten Fügeteile unter geringem Druck zusammengeführt. Die Berührung erfolgt nicht gleichmäßig über die gesamten Kontaktflächen, sondern örtlich über Unebenheiten. Als Folge der geringen Stauchkraft und des hohen Übergangswiderstandes entstehen extrem große Stromdichten, die zum schnellen Schmelzen und Verdampfen der Werkstoffbrücken führen. Die explosionsartig herausgeschleuderten Metallpartikel und Metalldämpfe („Funkenregen“) befreien die Stoßflächen von jeder Verunreinigung und brennen sie „plan“. Der Metalldampf sorgt für eine wirksame „Schutzgasatmosphäre“, sodass eine erneute Oxidation vermieden wird. Der Werkstoffverlust beim Abbrennen muss durch einen verfahrenstypisch großen Vorschub des Stauchschlittens ausgeglichen werden. Die Abbrennphase ist beendet, wenn die Stoßflächen ausreichend gesäubert sind und die Fügeteilenden die Schweißtemperatur erreicht haben. Im Gegensatz zum Pressstumpfschweißen werden nur die Werkstoffbereiche in unmittelbarer Nähe der Stoßfläche erwärmt. Anschließend werden die Fügeteile schlagartig zusammengepresst. Der Schweißstrom darf erst eine gewisse Zeit nach dem Einsetzen des Stauchvorganges abgeschaltet werden, damit die evtl. noch vorhandenen Verunreinigungen möglichst restlos aus dem Schweißstoß gepresst werden.

Der für das Abbrennstumpfschweißen so typische scharfzackige Schweißgrat (Abb. 5.91b) wird meist im warmen Zustand abgearbeitet (Abscheren oder spanende Bearbeitung). Bei Rohren (Abb. 5.91c) wird er innen mit einem scharfkantigen Dorn abgeschert und ausgestoßen. Er ist verhältnismäßig leicht entfernbbar. Die dynamische Bauteilbeanspruchung wird durch das Beseitigen dieser scharfen Kerben

erheblich verbessert. Die Maschinenleistung nimmt mit der Größe der zu schweißenden Querschnitte erheblich zu.

Aus Qualitätsgründen wird häufiger das **Abbrennstumpfschweißen mit Vorwärmung** angewendet. Das Vorwärmen geschieht induktiv oder mithilfe der Widerstandswärme direkt in der Maschine. Die Fügeteile werden zusammengedrückt und nach einer kurzen Zeit wieder getrennt. Die zugeführte Energie reicht nicht für ein Abbrennen, sondern nur zum Vorwärmen der Fügeteilenden. Dieser Vorgang wird einige Male wiederholt (reversierender Betrieb), bis die notwendige Temperatur erreicht ist. Das anschließende Abbrennen kann dann in der gewünschten Weise erfolgen.

In den modernen Stumpfschweißmaschinen können die geschweißten Teile nach dem Schweißprozess noch wärmebehandelt werden. Dies ist häufig bei schlecht schweißgeeigneten Werkstoffen (z. B. NE-Metallen) zweckmäßig. Diese Behandlung kann in einem verzögerten Abschalten des Schweißstroms oder in einem Stoßglühen bei erhöhter Leistung bestehen. In manchen Fällen wird ein Maßstauchen (*Kalibrieren*) angeschlossen, mit dem die Schweißteile auf das gewünschtes Maß gebracht werden.

Durch Abbrenn-Pressstumpfschweißen können Fügeteile mit großen Querschnitten bis zu 100.000 mm^2 verbunden werden. Weitere Vorteile sind:

- Höhere Festigkeit der Schweißverbindung,
- Stoßflächen müssen nicht besonders vorbereitet werden,
- geringere Schweißzeit,
- unterschiedliche Werkstoffe, wie z. B. Aluminium und Kupfer, können wesentlich besser verbunden werden. Die Vermischung ist gering, weil der flüssige Werkstoff aus der Stoßfläche herausgepresst wird.

Das Verfahren wird in der Flugzeugindustrie, zum Schweißen von Eisenbahnschienen, in der Automobilfertigung (z. B. bei der Herstellung von Felgen, Gelenkwellen, Achsteilen, Bremsgestängen) und in der Hausgeräteindustrie angewendet.

²⁵ Abbrennstumpfschweißen von Schienen. [youtube wissensfloater](https://www.youtube.com/watch?v=JyLjXWVQHqU).

5.4.2 Widerstandsschmelzschweißen (ON: 72)

Durch *Widerstandserwärmung* werden die Stoßflächen der Fugenflanken aufgeschmolzen und evtl. verwendeter Zusatzwerkstoff verflüssigt und so die Schweißverbindung erzeugt.

5.4.2.1 Elektroschlackeschweißen

Das mechanisch arbeitende, sehr wirtschaftliche Schweißverfahren wird sowohl zum Verbindungsschweißen vorwiegend dickwandiger Halbzeuge als auch zum Auftragschweißen verwendet, Abb. 5.92. Das Verfahrensprinzip ähnelt dem UP-Schweißverfahrenen. Zum Schmelzen (Grundwerkstoff, Pulver, Drahtelektrode) wird aber nicht die Energie eines Lichtbogens verwendet, sondern vielmehr die Widerstandswärme eines bis 25 mm hohen vom Schweißstrom durchflossenen Schlackenbades, in das die Drahtelektrode eintaucht. Der zu Beginn des Schweißprozesses vorhandene Lichtbogen erlischt nach dem Aufschmelzen einer ausreichenden Pulvermenge (Schlackenmenge). Der Schweißprozess geht in das *lichtbogenlose Elektroschlackeschweißen* über. Für den gewünschten Prozessablauf muss der Schlackenwiderstand also deutlich unter dem des Lichtbogens liegen. Nur unter diesen Bedingungen kann der Lichtbogen verlöschen und der Strom über die Schla-

cke fließen. Daraus ergeben sich bestimmte Anforderungen an die zu verwendenden Pulver. Die Lichtbogenstabilität muss zum raschen Erreichen des lichtbogenlosen Schweißzustandes ausreichend gering und die elektrische Leitfähigkeit (entspricht der Joule'schen Wärme der Schmelze!) möglichst groß sein.

Die Nahtform für Stumpfstöße ist in der Regel die I-Naht mit Spaltbreiten von etwa 30 mm. Sie wird in den meisten Fällen als Einlagenschweißung ausgeführt. Das Schweißgut und die Schmelze werden durch wassergekühlte, kupferne Gleitschuhe gehalten, die mit der Schweißgeschwindigkeit nach oben bewegt werden (Abb. 5.92).

Die extrem große abgeschmolzene Schweißgutmenge ist das charakteristische Kennzeichen des Verfahrens und die Ursache für die nachstehend aufgeführten verfahrensabhängigen Besonderheiten:

- *Wirtschaftlich*

Querschnitte bis etwa 2000 mm^2 können in einer Lage geschweißt werden.

- *Geringe Abkühlgeschwindigkeit*

Martensitische, d. h. harte und spröde Zonen in der WEZ können in keinem Fall entstehen. Allerdings besteht die Gefahr der Versprödung und des extremen Kornwachstums in der Wärmeeinflusszone und im Schweißgut. Fast vollständige Porenfreiheit.

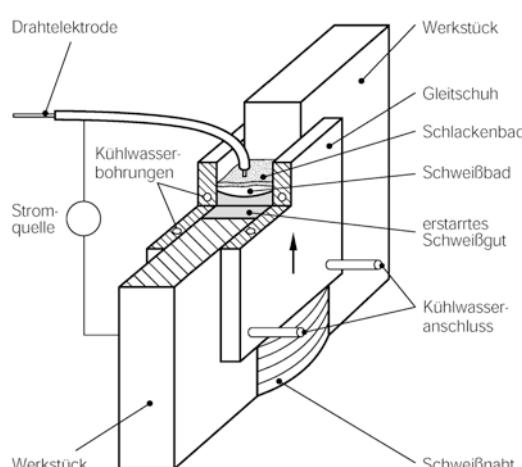


Abb. 5.92 Verfahrensprinzip des Elektroschlackeschweißverfahrens

Das Verfahren eignet sich vor allem zum Schweißen dickwandiger Bauteile aus un- und (niedrig-)legierten Stählen (auch mit hohem C-Gehalt!) aus den Bereichen Schiffbau (Außenhaut, Schiffsegmente), Behälter- und Großmaschinenbau (Fundamente, Rahmen) sowie Reaktorbauteile. Es ist besonders gut geeignet zum Schweißen langer, gerader Nähte in steigender Position. Es wurden bereits Werkstücke mit Wanddicken bis zu 2000 mm geschweißt.

5.4.3 Reibschweißen (Ordnungsnummer: 42)

Das Reibschweißen gehört zu den Pressschweißprozessen, bei denen die Energie aus der

Bewegung fester Massen gewonnen wird. Durch die Relativbewegung der zu fügenden Bauteile, meist ein rotierendes und ein feststehendes Werkstück, erfolgt an der Stoßstelle eine Erwärmung durch Reibung. In Ausnahmefällen ist die Relativbewegung nicht rotatorisch, sondern linear. So werden z. B. Leitschaufeln auf Achsen nach der Linearschweißtechnik verbunden. Nach einer von Werkstoff und Bauteil abhängigen Drehzahl und Reibzeit wird die Rotation gestoppt, und beide Teile werden mit einer flächenbezogenen Stauchkraft linear zusammengeführt. Dabei entsteht ein Schweißwulst, der unmittelbar nach Beendigung des Schweißvorganges abgedreht wird, sofern es die Einbaumaße erfordern.

Viele nicht schmelzschweißgeeignete Werkstoffpaarungen lassen sich durch Reibschiessen als Fügeverfahren in fester Phase ohne Schmelze verbinden, da die Fügetemperatur unterhalb der Schmelztemperatur der Grundwerkstoffe liegt. Die Reibungswärme erzeugt Temperaturen über dem Rekristallisationsbereich und ergibt wegen des hohen lokalen Umformgrads immer ein feinkörniges Gefüge in der Fügezone.

Es werden meist rotationssymmetrische Querschnitte verbunden. Für Rechteck- oder Vieleckquerschnitte benötigt man eine drehwinkelgenaue Abbremsung. Sofern der sich bildende Reibwulst (z. B. bei quadratischen Querschnitten) die Fügezone nicht vollständig umschließt, muss zur Vermeidung von Oxidation unter Schutzgas geschweißt werden.

Verfahrensprinzip

Zwei Werkstücke werden in einer Reibschiessmaschine fest eingespannt, Abb. 5.93, Phase (01). Dann wird eines in Rotation versetzt. In der Erwärmungsphase (02) werden beide Bauteile mit einer definierten Kraft aneinander gedrückt. Durch die Reibung wird die Schweißstelle erwärmt, und nach der Ausbildung des Ringwulstes in Phase (03) muss die Rotation gestoppt werden. Das drehende Werkstück wird also nach einer definierten Zeit abgebremst und danach muss die Reibkraft bis zum Anpressdruck erhöht werden. Diese flächenbezogene Stauchkraft bewirkt die eigentliche Schweißung und hat demnach einen großen Einfluss auf die Festigkeit der Schweißverbindung. Die Stauchzeit ergibt sich über den Stauchweg und liegt zwischen 2 und 10 s. Durch das Stauchen werden die Bauteile insgesamt verkürzt. Die Längenverkürzung setzt sich aus Reibweg und Stauchweg zusammen und hängt vom Werkstoff und von der Reib- und Stauchkraft ab. Die Reibzeit wird bauteilspezifisch so eingestellt, dass als Oberflächentemperatur in der Fügezone gerade die Rekristallisationstemperatur erreicht wird. Die flächenbezogene Reibkraft und Reibzeit bestimmen die Erwärmung und Verformung des Schweißstoßes.

Die Reibzeit hängt vorwiegend vom Werkstoff und von der Beschaffenheit der Stoßflächen ab. Sie beträgt bei unlegierten Stählen 2 bis 100 s, bei legierten Stählen 3 bis 120 s, bei warmfesten Stählen 5 bis 150 s. Die Reibzeiten für Leicht- und Schwermetalle (Al, Ti, Cu, Ni) liegen zwischen 0,1 und 10 s.

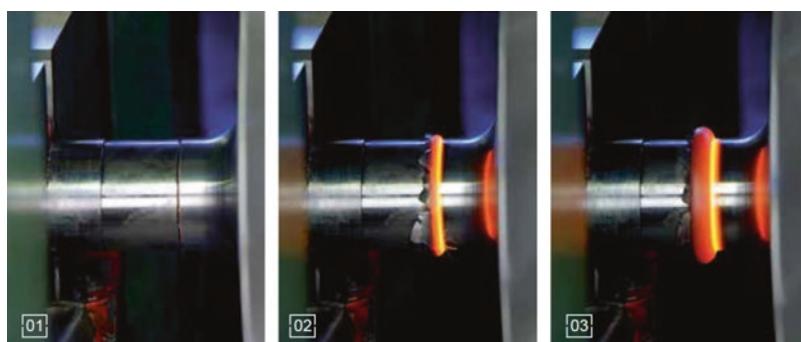


Abb. 5.93 Reibschiessen, in 3 Phasen dargestellt. (Quelle: KUKA Systems GmbH)



Abb. 5.94 Gusseisenformstück mit schräg aufgeschweißtem Stahlrohr. (Quelle: Volkmar Schuler, Ulm)

Vorteile des Reibschweißens

- Viele Werkstoffkombinationen sind schweißbar, auch nicht schmelzschweißgeeignete Werkstoffe wie Keramik mit Al oder Guss-eisen mit diversen Stahlsorten (s. Abb. 5.94),
- vollmechanisiert anwendbar mit Überwachung der Prozessparameter,
- Voll- und Hohlquerschnitte können verbunden werden
- kein Schweißzusatz erforderlich, meist auch kein Schutzgas,
- es entsteht ein feinkörniges, re-kristallisiertes Gefüge (werkstoffabhängig),
- symmetrische Erwärmung führt zu günstigem Eigenspannungszustand und geringem Verzug,
- keine Spritzer, kein Rauch, keine Strahlung,
- hohe Wiederholgenauigkeit,
- am Schweißstoß sind meist schon die Sägeschnitte ausreichend.

Werkstoffeinfluss

Die Fügetemperatur liegt unterhalb der Schmelztemperatur der Grundwerkstoffe und die Verformung führt in Verbindung mit der eingebrachten Wärme zu einem feinkörnigen Gefüge. Die eingebrachte Wärmemenge ist verhältnismäßig klein, was zu schmalen Wärme-einflusszonen führt. Festigkeit, Warmfestigkeit, Verformungsfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit bestimmen die Parameter beim Reibschweißen.

Bei unlegierten Stählen vergrößern sich Reibkraft und Reibzeit mit steigender Warmfestigkeit. Legierte Stähle hingegen benötigen größere

flächenbezogene Reibkräfte und Reibzeiten wegen der geringeren Verformungsfähigkeit. Werkstoffe mit niedriger Wärmeleitfähigkeit benötigen geringere Kräfte und Reibzeiten.

Für aufhärtungsempfindliche Werkstoffe wird mitunter ein Anlassvorgang erforderlich. Kupfer und Kupferlegierungen werden bei kleinen flächenbezogenen Kräften mit hoher Drehzahl geschweißt. Bei Aluminium und Aluminium-legierungen sind die Drehzahlen ebenfalls hoch, sie müssen aber wegen der guten Wärmeleitfähigkeit mit kurzen Reibzeiten gefügt werden. Titan und Ti-Legierungen schweißt man mit kleinen flächenbezogenen Energien und Kräften, üblicherweise unter Einsatz von Schutzgasen.

Anwendungen

(Beispiele siehe Abb. 5.95)

- Maschinenbau: Hydraulikzylinder, Kolbenstangen, Kurbelwellen,
- Fahrzeugbau: Turbolader, Auslassventile, Schaltstangen,
- Werkzeuge: Wendelbohrer, Fräser, Lochstempel,
- Elektrotechnik: Schaltkontakte, Kabelverbinder,
- Bauindustrie: Verankerungen aller Art,
- Medizin: Hüftprothesen, Knochendrähte,
- Luft- und Raumfahrt: Rotoren, Wellen, Turbinen,
- Apparatebau: Rohre, Flansche, Ventilgehäuse.



Abb. 5.95 Beispiele reibgeschweißter Maschinenbauteile (KUKA Systems GmbH)

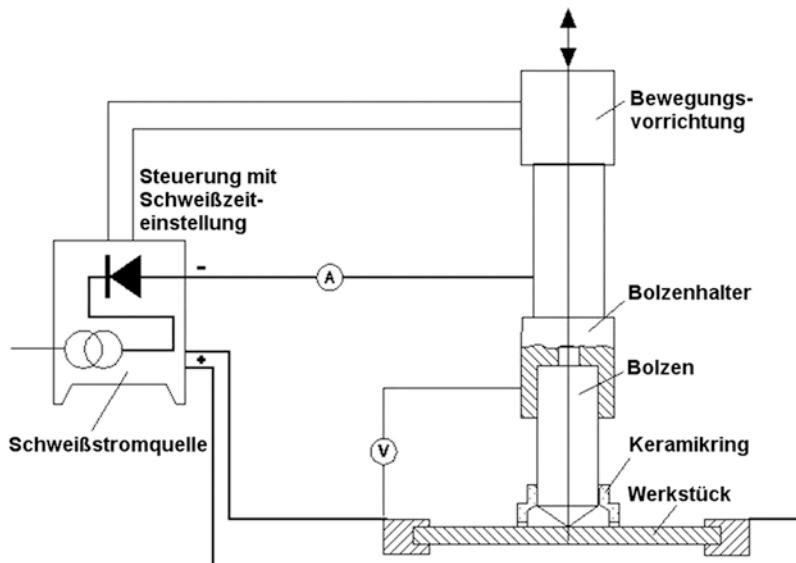


Abb. 5.96 Schaltanordnung einer Bolzenschweißanlage mit Keramikring. (Quelle: DVS 0902)

Quellenhinweise

- V. Schuler u. J. Twrdek: Praxiswissen Schweißtechnik – Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, 6. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden 2019
- DVS Merkblätter 2909/1-5: Verfahren, Begriffe, Werkstoffe für das Rotationsreibschweißen.
- DIN EN ISO 15620: Schweißen – Reibschiessen von metallischen Werkstoffen.

5.4.4 Bolzenschweißen (ON: 783 bis 786)

Unter Bolzenschweißen versteht man das Verbinden von stiftförmigen Teilen mit flächigen Werkstücken durch Pressschweißen (DIN 1910-2). Die am meisten verbreiteten Verfahren sind das Lichtbogen-Bolzenschweißen mit Hubzündung und das Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. Diese beiden Verfahren werden kurz beschrieben.

Das **Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung** ist dem Lichtbogenpressschweißen zugeordnet und kann z. B. mithilfe von Schweiß-

pistolen mechanisch oder automatisiert ausgeführt werden²⁶. Die Schaltanordnung einer solchen Anlage zeigt Abb. 5.96.

Der Bolzen wird in den Halter eingesetzt und die Pistole mit einer Abstützvorrichtung auf das flächige Werkstück aufgesetzt. Die Bewegungsvorrichtung hebt den Bolzen zunächst an, dann wird ein Hilfslichtbogen zwischen Bolzenspitze und Werkstück gezündet. Der dann folgende Hauptlichtbogen schmilzt die Bolzenstirnfläche und den Grundwerkstoff an. Nach der vorgegebenen Schweißzeit wird der Bolzen mit einer geringen Kraft in das Schmelzbad eingetaucht. Kurz danach wird der Strom abgeschaltet. Die einzelnen Arbeitsphasen gehen aus Abb. 5.97 hervor.

Das Bolzenschweißen mit Keramikring wird im Durchmesserbereich von 3 bis 25 mm und mit Schweißzeiten zwischen 50 bis 2000 ms durchgeführt. Der Spitzenstrom liegt bei 3000 A. Die Mindestblechdicke beträgt 1/4 des Bolzendurchmessers d, bei Verwendung von Schutzgas ist sogar 1/8d möglich.

²⁶ Lichtbogenschweißen-Bolzenschweißen (SLV München). [Youtube wissensfloater](#).

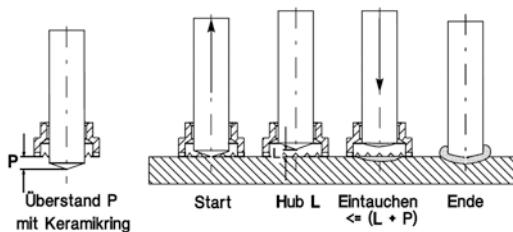


Abb. 5.97 Arbeitsphasen beim Lichtbogenschweißen mit Hubzündung. (Quelle DVS 0902)

Der Keramikring (CF) ist ab ca. $d = 12\text{ mm}$ und beim Bolzenschweißen in Quer- und Überkopfposition (PC und PE) zur Konzentration des Lichtbogens und zur Wulstformung erforderlich. In Wannenlage (PA) kann statt des Keramikringes auch Schutzgas zur Verbesserung der Schweißqualität und zum Verringern der Porengefahr verwendet werden (für Al: Ar 99,99 %; für Stahl: 82 %Ar + 18 %CO₂).

Als Bolzenwerkstoff kommt vorzugsweise der unlegierte Baustahl S235FF mit den Werkstoffeigenschaften nach DIN EN ISO 13918 zur Anwendung. Als Grundwerkstoff wird im Stahlbau bei unlegierten Stählen vorzugsweise S235 und S335 nach EN 10025 verwendet.

Das Bolzenschweißen mit Spitzenzündung arbeitet mit einer Kondensator-Entladung. Dabei wird ein Bolzen mit herausstehender Spitze in den Bolzenhalter eingeschoben und diese Zündspitze auf eine definierte Distanz zum Werkstück gebracht. Nach dem Auslösen des Bewegungsvorgangs und dem Zünden des Thyristors berührt die Bolzenspitze die Werkstückoberfläche und schmilzt bei einem Strom von etwa 10.000 A explosionsartig bzw. verdampft teilweise. Während der Zustellung erfasst der Lichtbogen die gesamte Stirnfläche des Bolzens und erlischt, wenn der Bolzen in die Schmelze getaucht wird. Vorteilhaft ist die geringe Schweißzeit von 1 bis 3 ms, wodurch kaum Einbrand auftritt. Das Verfahren hat den Schwerpunkt bei Blechen ab 0,5 mm Dicke. Dabei treten nur minimale Rückseitenmarkierungen auf.

Vorteile des Bolzenschweißens

- vollständige Verschweißung in sehr kurzer Schweißzeit,
- geringe Wärmeeinbringung mit nur geringem Verzug,
- es wird kein Schweißzusatz gebraucht,
- alle Schweißpositionen sind anwendbar (bis $d = 16\text{ mm}$),
- das Verfahren ist gut automatisierbar (bis zu 30 Bolzen/min),
- Prozessparameter sind gut zu überwachen.

Hauptanwendungsgebiete

- Bauwesen: Aufschweißen von Kopfbolzen auf Träger für Betonverguss,
- Fahrzeugbau: Bolzen zur Befestigung von Dämmmaterial, Kabeln u. Schläuchen,
- Schiffbau: Befestigungsbolzen für Isolierungen, Kabelsysteme und Holzdecks,
- Kesselbau: Bolzen zur Verbindung von feuerfester Auskleidung und Rohrwandung,
- Dünnblechbereich: einseitige Blechhalterung ohne Markierungen auf der Sichtseite.

Die Geometrie der Bolzen kann sehr unterschiedlich gestaltet werden. Vom Kopfbolzen über Gewindestifte und spezielle Bolzen mit Halteclips bis zu abgeflachten Bolzenkörpern ist alles möglich, Abb. 5.98.

Prüfung von Bolzenschweißungen

Die Prüfung erfolgt auf gleichmäßig ausgebildeten Wulst, auf unvollständig verschweizte Bolzenstirnflächen, auf Poren oder Risse in der Schweißzone bzw. in der WEZ. Besonders einfach ist die Maßkontrolle vor Ort. Denn eine gute Schweißung ergibt die nach Norm vorgegebene Bolzenlänge L. Ist dieser Wert zu klein, dann war die Energie zu hoch, es wurde zu viel abgeschmolzen. Wird L aber zu lang gemessen, war die Energie zu gering, d. h. die Schweißung genügt nicht den Qualitätsanforderungen.

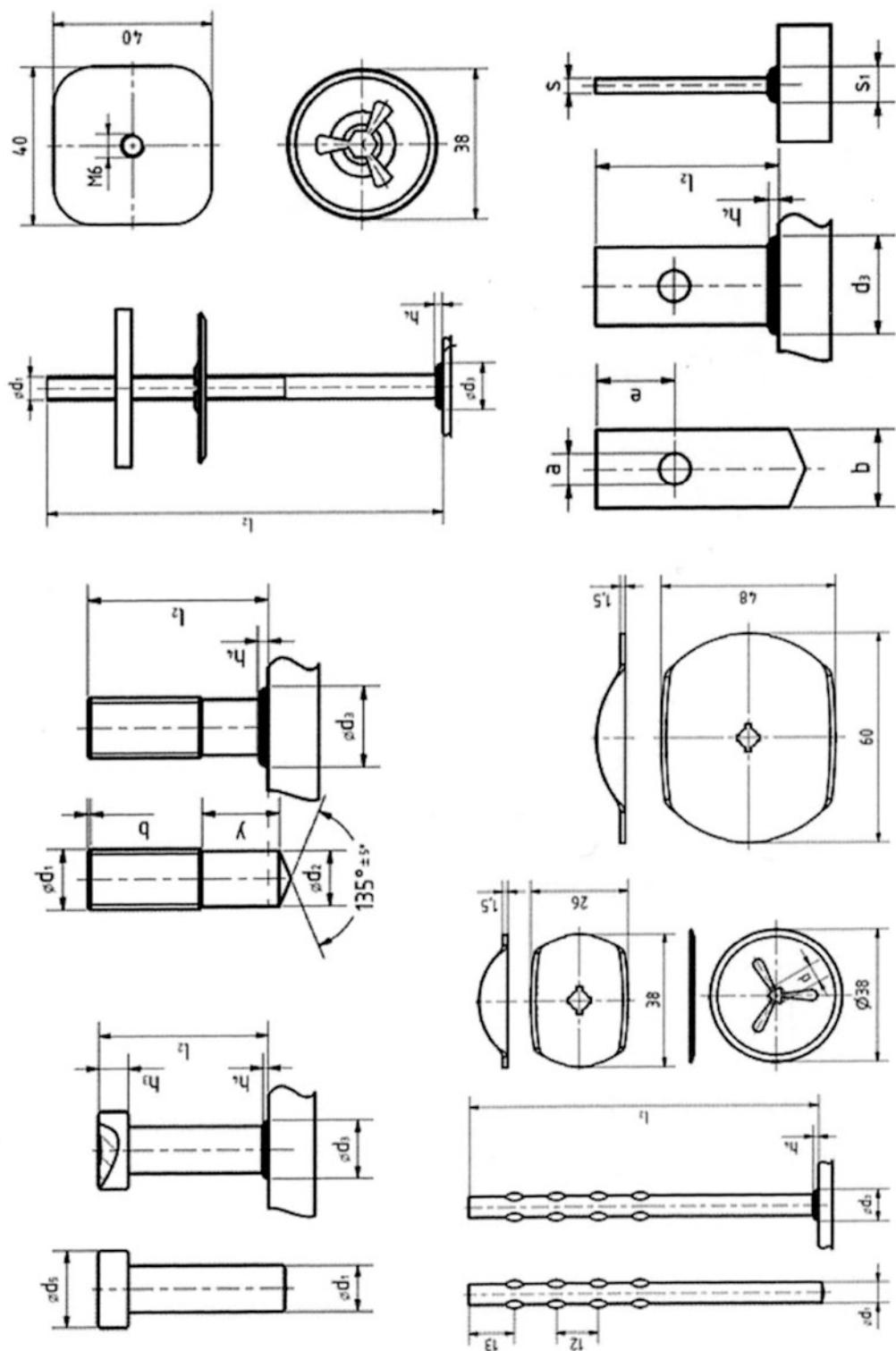


Abb. 5.98 Bolzenformen: Kopfbolzen, Gewindestifte, Bolzen mit Clips für Isolatoren, flache Bolzen. (Quelle: V. Schuler und J. Twrdk: Praxiswissen Schweißtechnik, 6. Aufl. Springer Vieweg 2019)



Abb. 5.99 Verschiedene Formen von Bolzen, Keramikringen und Clips (Werksfoto Fa. Köco)

Verschiedene Bolzen-Formen, Keramikringe und Clips aus der Praxis zeigt Abb. 5.99.

Die Kenngrößen der verschiedenen Bolzenschweißverfahren sind in Tab. 5.15 zusammengestellt.

Quellenangaben

- DVS Merkblatt 0901 Bolzenschweißprozesse für Metalle, Übersicht
- DVS Merkblatt 0902 Lichtbolzenschweißen mit Hubzündung
- DVS Merkblatt 0903 Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung
- DVS Merkblatt 0967 Berechnung von Bolzenschweißverbindungen
- DIN EN ISO 13918 Bolzen und Keramikringe für das Lichtbogenschweißen
- DIN EN ISO 14555 Lichtbogenbolzenschweißen von metallischen Werkstoffen
- V. Schuler u. J. Twrdek: Praxiswissen Schweißtechnik – Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, 6. Aufl. Springer Vieweg 2019
- Trillmich, R. u. W. Welz: Bolzenschweißen. DVS-Fachbuch 133, 2. Aufl. DVS Verlag 2014

5.4.5 Aluminothermisches Schweißen (Thermit-Verfahren)

Dieses Schmelzschweiß-Verfahren geht auf H. Goldschmidt zurück, der es um 1900 einföhrte, um hochschmelzende Metalle (Chrom, Cobalt, Mangan, Silicium) kohlenstofffrei aus deren Oxiden durch Reduktion mit Aluminium zu gewinnen. Es ist auch als Thermit®-Schweißen bekannt. Dabei wird flüssiger Stahl über ein Tiegelsystem in die Schweißstelle (z. B. Stumpfstoß von Schienen) geleitet und schmilzt so die Stoßflächen an. Oft wird es auch als Schienenschweißen bezeichnet (*nach Volkmar Schuler et al.*).

Grundlage ist ein Gemisch aus Eisenoxid- und Aluminium-Pulver in einem Reaktionsriegel, der auf die Stoßstelle der ausgerichteten Schienen gesetzt wird, Abb. 5.100.

Dem Schienenprofil angepasste Formstücke halten die Schienenenden zusammen. Diese Formhälften werden mit tonhaltigem Quarzsand abgedichtet, sodass die flüssige Schmelze nicht aus der Schweißstelle herausfließen kann. Nach dem Zünden durch eine sog. Zündkirsche (Bariumperoxid und Magnesium) beginnt die

Tab. 5.15 Kenngrößen verschiedener Bolzenschweißverfahren (Quelle: DVS 0901)

	Hubzündungsbolzen-schweißen mit Keramik-ring oder Schutzgas	Kurzzeitbolzen-schweißen mit Hubzündung	Kondensatorenladungs-Bolzenschweißen mit Hubzündung	Bolzen-schweißen mit Spitzenzündung	Widerstandsbohlen-schweißen	Reibbolzen-schweißen
Nr. nach ISO 4063	783	784	785	786	26	423
Bolzendurchmesser d (mm)	3 bis 25	3 bis 12	2 bis 8	2 bis 8	bis 14	bis 14
Spitzenstrom A	2500	1500	5000	10.000	25.000	–
Schweißzeit ms	100 bis 2000	5 bis 100	3 bis 10	1 bis 3	bis 350	bis 10.000
Fügekraft N	< 100	< 100	< 100	< 100	< 9000	< 10.000
Energiequelle	Schweißgleichrichter/-um-former	Schweißgleichrichter	Kondensator	Kondensator	Schweißtransformator	Druckluft- oder Elektromotor
Schweißbad- Schutz	Keramikring oder Schutz-gas	Ohne Schutz oder Schutzgas	Ohne Schutz	Ohne Schutz	Ohne Schutz	Ohne Schutz
Bolzenwerkstoff	Baustahl, CrNi-Stahl, Al < 12mm	Baustahl, CrNi-Stahl, Messing	Bau-/ CrNi-Stahl, Messing, Cu, Al	Bau-/ CrNi-Stahl, Messing, Cu, Al	Baustahl, CrNi-Stahl	Reibschweißge-eignete Werk-stoffe
Blechober-fläche	Metallisch blank	Metallisch blank, ver-zinkt, geölt	Metallisch blank, leicht geölt	Metallisch blank, verzinkt	Blank, verzinkt, leicht geölt	Metallisch blank, leicht geölt
Mindestblechdicke	1/4d, bei Schutzgas 1/8d	1/8d	1/10d	1/10d ab etwa 0,5 mm	1/10d	–

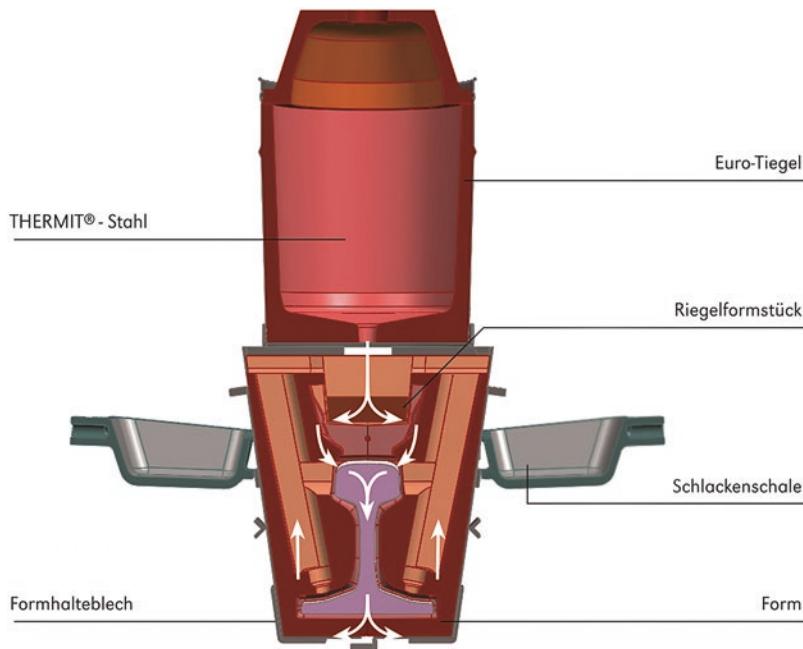
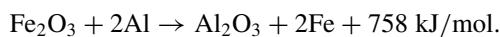


Abb. 5.100 Gießschema SKV mit fallender Befüllung. (Quelle: Fa. Elektro-Thermit: <http://www.elektro-thermit.de>)

stark exotherme Reaktion, bei der in kurzer Zeit Temperaturen bis zu 2400 °C entstehen:



Der notwendige Sauerstoff für die Verbrennung des Aluminiums stammt aus dem Eisenoxid, das zu Eisen reduziert wird, während das Aluminiumoxid als Schlacke obenauf schwimmt. Das Eisen bzw. der Stahl sammelt sich im unteren Teil des Tiegels. Durch die Zugabe verschiedener Legierungselemente (C, Mn, Si, Cr, Mo, V) wird das Thermit-Gemisch legierungstechnisch an den Grundwerkstoff angepasst. Die Auslauföffnung des Tiegels ist meist durch einen selbstschmelzenden Stöpsel verschlossen. Nach etwa 20 s fließt die Stahlschmelze in den Schweißspalt, der ca. 24 bis 26 mm breit ist. Die Befüllung des Schienenstoßes kann steigend oder fallend erfolgen. Je nach Grundwerkstoff der Schienen werden diese vor dem Zünden des Thermit-Gemisches auf 600 bis 1000 °C mit Propan-Brennern vorgewärmt. Nach dem Einguss ist der Stahl in 3 bis 4 min erstarrt. Tiegel und Formhälften können nun entfernt werden und die

mechanische Nacharbeit beginnt. Die mitunter fest anhaftende Schlacke kann mit hydraulischen Abscher-Werkzeugen entfernt werden, anschließend wird der Schienenstoß geschliffen.

Abb. 5.101a zeigt die Aufsicht auf eine eingeförmte Kranschiene Typ A 120. Das Vorwärmten mittels Propanbrenner ist im Bildteil b ersichtlich.

Abb. 5.101c zeigt das Zünden des Thermit-Gemisches. Die noch glühenden Wülste in Bildteil d müssen noch abgeschert und beschliffen werden.

Die Zertifizierung erfolgt nach DIN EN 14730-1. Weitere Zulassungen existieren, bei der Deutschen Bahn (DB Netz AG). Die Eignungsbescheinigung für Schweißbetriebe wird nach Ril 826.1020 (Betriebsgleise) und Ril 826.1030 (Gleise und Weichen) erteilt. Im Bereich aller deutschen Bahnen wurden in den letzten 30 Jahren etwa 20 Mio. Thermit®-Schweißungen ausgeführt²⁷.

²⁷ Podcast: Schienenschweißen mit dem Thermit-Prozess, Master: [youtube wissensfloater](https://youtube.com/wissensfloater).



Abb. 5.101 Vorbereitung zum Schienenschweißen: Einformen einer Kranschiene Typ A 120 (a) und Vorwärmung mittels Propanbrenner (b). Gießschmelzschweißen von Kranschienen: Zünden des Thermit-Gemisches (c) und Fertigguss (d), Naht und Wülste noch nicht abgeschert. (Quelle: V. Schuler und J. Twrdek: Praxiswissen Schweißtechnik. Springer Vieweg, 6. Aufl. 2019)

Verfahrensvarianten des Schnellschweißverfahrens mit kurzer Vorwärmung sind das Verschweißen von Lückenweiten 40 bis 50 mm (L50) und 65 bis 70 mm (L70).

Weitere Anwendungen des aluminothermischen Schweißens sind Reparatschweißungen an Bauteilen aus Stahlguss und Grauguss. Mit diesem Verfahren sind Reparaturen an lokalen Defekten von Schienenköpfen genauso gut möglich.

5.5 Gestaltung von Schweißverbindungen

5.5.1 Allgemeines

In Schweißkonstruktionen sind Schweißnähte die verbindenden und kraftübertragenden Elemente. Lage, Form und Art der Schweißnähte haben einen wesentlichen Einfluss auf das Bauteilverhalten (Festigkeit und Zähigkeit) und die wirtschaftliche Herstellung der Bauteile. Weiter-

hin ist die Schweißeignung der Werkstoffe zu berücksichtigen.

5.5.2 Gestaltungsregeln

- Die gewählten Grundwerkstoffe sollten ausreichend schweißgeeignet sein, d. h. hinreichend sauber und kohlenstoffarm ($C \leq 0,2\%$);
- keine Guss- oder Nietkonstruktion nachahmen (schweißgerecht konstruieren);
- möglichst gleich dicke Teile zusammenschweißen (sonst Kerbwirkung);
- bei großen Wanddicken wegen der Sprödbruchgefahr auftretende Spannungen beachten (Spannungsarmglühen);
- Schweißnähte nicht in Querschnitte legen, in denen große Zugspannungen herrschen;
- einseitige Kehlnaht vermeiden (rissähnlicher Spalt, d. h. extreme Kerbwirkung);
- große, ebene Wände vermeiden, da sie zum Ausbeulen neigen, Aussteifungen vorsehen;
- auf gute Zugänglichkeit der Schweißnähte achten (Fehleranfälligkeit ist geringer);
- so konstruieren, dass in Normallagen geschweißt werden kann. Arbeiten in Zwangslagen vermeiden, da es hohe Anforderungen an die Handfertigkeit des Schweißers stellt und einen erhöhten Prüfaufwand erfordert;
- Reihenfolge der Schweißarbeiten beachten; sie wird im Schweißfolgeplan festgelegt und beeinflusst die Bemaßung in der Zeichnung;
- Allgemeintoleranzen für Schweißkonstruktionen (DIN EN ISO 13920) beachten;
- bei hoher Maßgenauigkeit des geschweißten Bauteils muss dieses oft vor der mechanischen Bearbeitung spannungsarm gechlüht werden;
- die vorgeschriebenen Prüfungen müssen durchführbar sein, d. h., die zu prüfenden Schweißnähte sollten für Prüfer und Prüfgeräte einfach zugänglich sein.

In den folgenden Beispielen ist immer links die ungünstige, rechts die zweckmäßige Gestaltung dargestellt.

5.5.3 Gestaltung von Schmelzschweißverbindungen

(Siehe Abb. 5.102, 5.103, 5.104, 5.105, 5.106, 5.107, 5.108, 5.109, 5.110, 5.111, 5.112, 5.113, 5.114, 5.115, 5.116, 5.117, 5.118, 5.119, 5.120, 5.121, 5.122, 5.123, 5.124, 5.125, 5.126, 5.127, und 5.128)

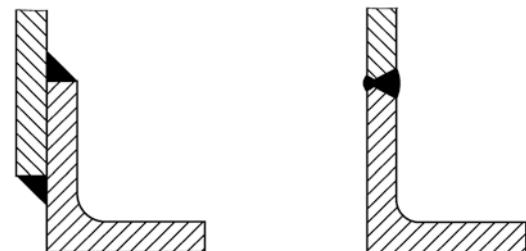


Abb. 5.102 Der Anschluss mit Kehlnähten ist manchmal scheinbar wirtschaftlicher, weil die Kosten für die Nahtvorbereitung entfallen. Kehlnähte lenken jedoch den Kraftfluss um (Kerbwirkung!). Die Qualifikation eines Schweißers für Stumpfnähte muss aber deutlich größer sein als die für Kehlnähte

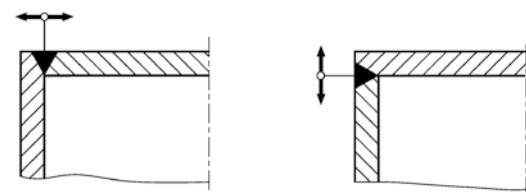


Abb. 5.103 Schweißnähte soll man so legen, dass die Fügeteile möglichst lange den Schrumpfbewegungen frei folgen können, da sonst unerwünschte Reaktionsspannungen (und wanddickenabhängige Eigenspannungen!) auftreten

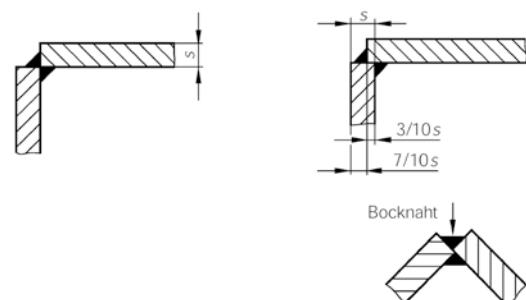


Abb. 5.104 Der Zusammenbau und die gegenseitige Fixierung von Fügeteilen werden erleichtert, wenn eine teilweise Überdeckung als Anlage dient. Zweckmäßig ist ein Verhältnis 3/10 Überdeckung zu 7/10 für die Kehlnaht, bezogen auf die Werkstückdicke s

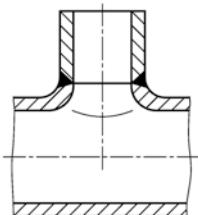
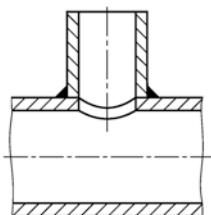


Abb. 5.105 Eine elliptische Schweißnaht (kompliziert herzustellen und zu schweißen) kann durch Aushälften in eine kreisförmige überführt werden

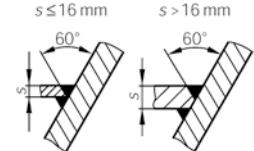
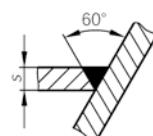


Abb. 5.109 Bei Schrägangschlüssen ist eine scharfkantige Abschrägung unzweckmäßig (zu viel Schweißgut, Verformungen, Wurzelkerbe); diese sollte nur bei dünnen Blechen angewendet werden. Bei dickeren Blechen ($s > 16 \text{ mm}$) sollte die Abschrägung maximal $0,5 \cdot s$ betragen

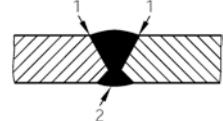
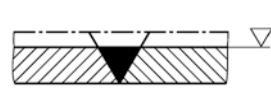
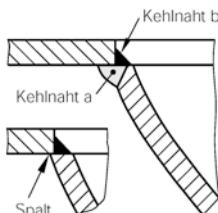
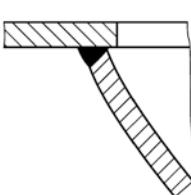


Abb. 5.106 Die Naht ist am Flansch (meist ein ebaues und *nicht* ein räumliches Gebilde) einfacher vorzubereiten als am Gehäuse. Die Kehlnaht *a* ist erforderlich, um die extreme Kerbwirkung des Spaltes zu beseitigen

Abb. 5.110 Eine mechanische Bearbeitung verringert (evtl. unzulässig) den Querschnitt der Schweißnaht. Bei hochbeanspruchten Nähten ist es empfehlenswert (aber teuer!), die Nahtübergänge zu beschleifen (1) und (oder) eine Kapplage zu schweißen (2)

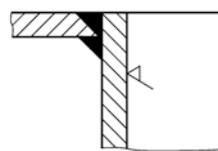
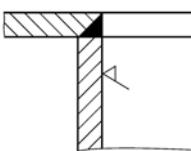


Abb. 5.107 Bei hoher geforderter Oberflächengüte oder geringer Maßtoleranz soll die Funktionsfläche nicht durch Schweißnähte (Verzug!) gestört werden

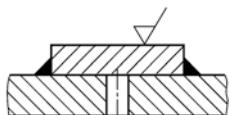
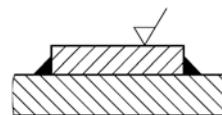


Abb. 5.111 Beim Aufschweißen von Blechen, die bearbeitet werden sollen, sind Entlüftungsbohrungen oder unterbrochene Nähte vorzusehen. Zwischen den Blechen bildet sich anderenfalls ein abgeschlossener und unter Druck stehender Luftraum, der bei einem nachträglichen Spannungsarmglühen zu Verwerfungen, Ausbeulungen oder sogar zu Rissen führt

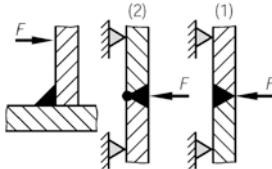
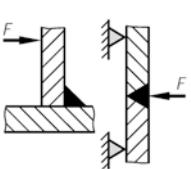


Abb. 5.108 Die Wurzel einer Schweißnaht sollte nicht in der zugbeanspruchten, sondern in der druckbeanspruchten (1) Zone liegen. Wenn sich dies nicht vermeiden lässt, dann ist die Wurzel auszuschleifen („auszukreuzen“) und nachzuschweißen (2) (= „Kapplage“)

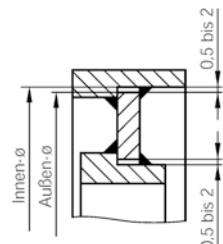
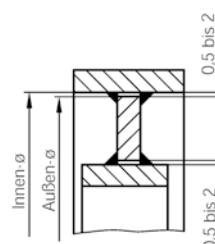


Abb. 5.112 Beim Schweißen von Ringen, Buchsen, Scheiben, Wellen und Ähnlichem soll ein Luftspalt von mindestens 0,5 mm vorgesehen werden. Er kann bis zu einer Breite von 2 mm ohne Schwierigkeit mit einer normalen Schweißnaht überbrückt werden. Bei Einzelfertigung ist die rechte Darstellung zu bevorzugen, da für die Ausführung nach der linken Abbildung eine Schweißvorrichtung erforderlich ist

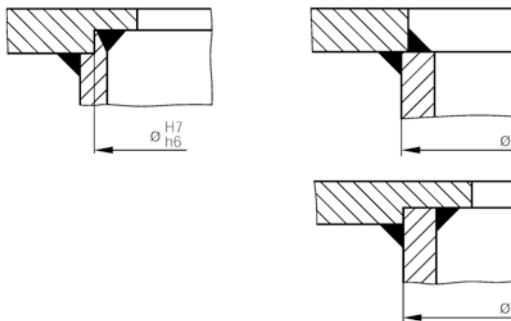


Abb. 5.113 Fügeteile sollen vor dem Schweißen nicht übertrieben zentriert werden (unnötig und teuer). Auf eine ausreichende Zugänglichkeit der Schweißnähte ist zu achten (hier die innere Schweißnaht)



Abb. 5.114 Bei genuteten Bearbeitungsflächen sind außer den Entlüftungsbohrungen auch Lochschweißungen vorzusehen, um z. B. beim Nuten ein Abheben der Flächen zu vermeiden



Abb. 5.115 Schweißnähte in schroffen Querschnittsübergängen (unterschiedliche Querschnitte erzeugen Kerbwirkung, d. h. Spannungsspitzen!) sind zu vermeiden. Angleichen der Querschnitte schafft Abhilfe

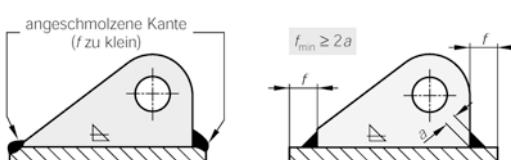


Abb. 5.116 Abflachungen und Überstände sind vorzusehen. Der Überstand f muss mindestens das Zweifache der Nahtdicke a betragen, um ein unkontrolliertes und unerwünschtes Anschmelzen der Kanten zu vermeiden und die geforderte Dicke a zu erreichen



Abb. 5.117 Bei aufgeschweißten Flanschen ist die Dichtnaht stets nach innen zu legen

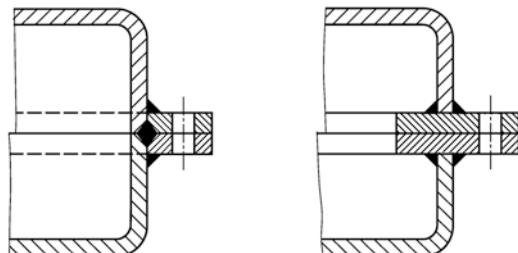


Abb. 5.118 Schweißnähte sollten möglichst nicht in zu bearbeitende Flächen oder in Werkstoffbereiche mit hohen (Zug-) Spannungen gelegt werden

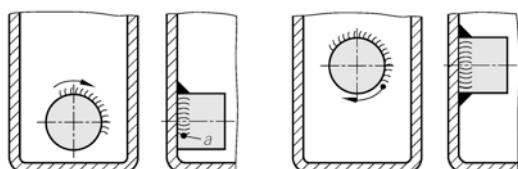


Abb. 5.119 Auf gute Zugänglichkeit der Schweißnähte ist zu achten. Das dargestellte Auge muss ringsum geschweißt werden können. Bei der unzweckmäßigen Variante lässt sich die Rundnaht nicht vollständig, sondern nur etwa bis zum Punkt a schweißen

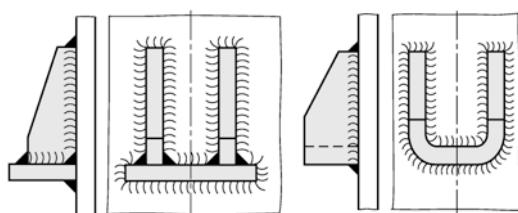


Abb. 5.120 Die Herstellung eines Winkels durch Abkanten ist billiger als das Zusammenschweißen aus drei Teilen. Die Kaltverformung kann bei Stählen mit geringerer Zähigkeit zu Grobkorn und Alterungerscheinungen führen. Bei hochlegierten austenitischen CrNi-Stählen besteht die Gefahr der Spannungsrißkorrosion

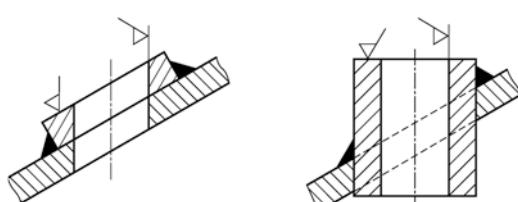


Abb. 5.121 Bei zu bearbeitenden Teilen mit Bohrung, die an schrägen Wänden angeschweißt werden, ist die Bearbeitung in einer Aufspannung sowie ein gerader Anschnitt zu gewährleisten

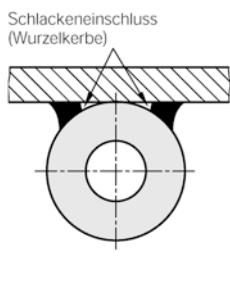


Abb. 5.122 Rundstäbe parallel an eine ebene Fläche anzuschweißen ist unzweckmäßig, da der Öffnungswinkel für die Schweißnaht (Kehlnaht) zu klein ist und Schlacke in den Spalt vorläuft (Kerbwirkung), aber nicht die Schweißschmelze. Zweckmäßiger ist es, eine andere Form zu wählen oder den Rundstab einseitig abzuflachen

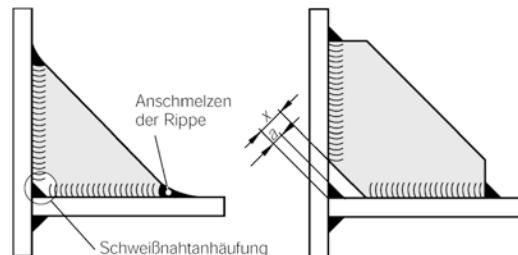
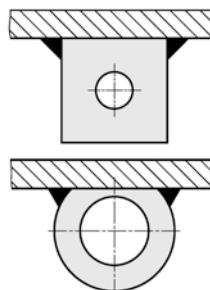


Abb. 5.125 Rippen sollten allseitig ausgeklinkt werden, weil anderenfalls die Sollschweißnahtdicke a nicht eingehalten werden kann (unkontrolliertes Anschmelzen der Rippe) und Schweißnahtanhäufungen große Eigenspannungen erzeugen. Der Abstand x der Ausklinkung in der Rippe hängt von der Dicke der darunter liegenden Naht ab; er soll aber nicht weniger als etwa $x = a + 6$ mm betragen

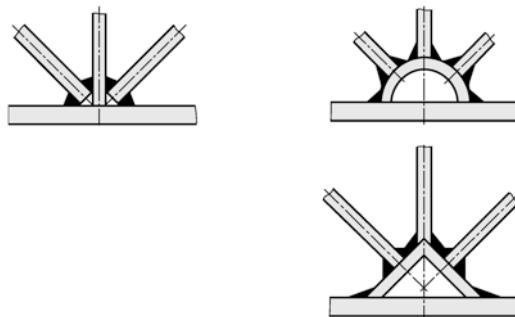


Abb. 5.123 Anhäufungen von Schweißnähten sind wegen der Entstehung konzentrierter und großer Schweißeigenspannungen (großer Verzug und Gefahr der Kaltrissbildung) zu vermeiden. Die Schweißstellen müssen gut zugänglich sein

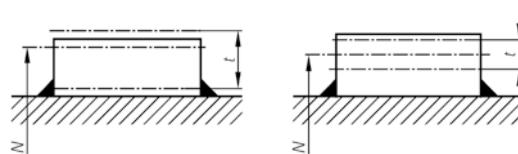


Abb. 5.126 Bei der Bemessung der Bearbeitungszugaben sind die jeweiligen Toleranzen zu beachten. Die Höhe des Anschweiß-Teils muss so gewählt werden, dass das Nennmaß N bei gegebener Toleranz t erreicht wird, ohne die Schweißnaht zu zerstören

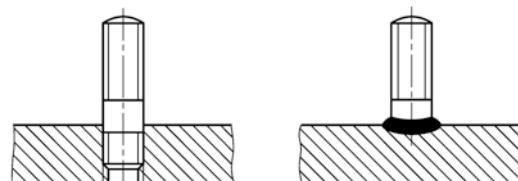
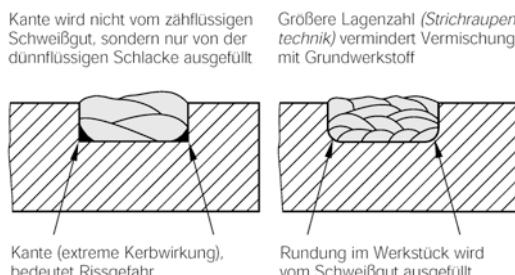


Abb. 5.127 Mithilfe des Bolzenschweißens können Gewindegelenkbolzen bis M24 aufgeschweißt werden. Dies ist im Allgemeinen wirtschaftlicher als die Verwendung von Stiftschrauben (Kernloch bohren, Gewinde schneiden, Bolzen eindrehen)

Abb. 5.124 Durch Auftragschweißen lassen sich z. B. Werkzeuge und Verschleißteile wirtschaftlich herstellen bzw. in Stand setzen. In dem aufzutragenden Werkstück dürfen sich keine Kanten, die das Schweißgut nicht mehr ausfüllen kann, sondern nur Rundungen befinden. Es sind zwei, besser drei Lagen erforderlich (Vermischung gering halten!)

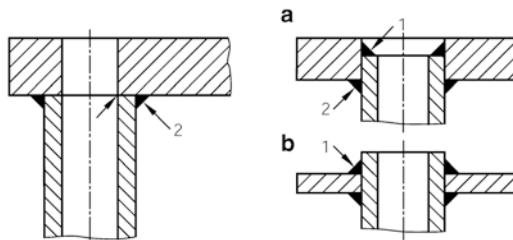


Abb. 5.128 Sollen über einen Rohrabschluss große Kräfte oder Momente übertragen werden, so ist es zweckmäßig, das Rohr in der Bohrung des Blechs zu führen (a). Bei dünneren Blechen wird das Rohr durchgesteckt und von außen verschiebt (b)

5.5.4 Gestaltung von Punktschweißverbindungen

(Siehe Abb. 5.129, 5.130, 5.131, 5.132 und 5.133, 5.134)

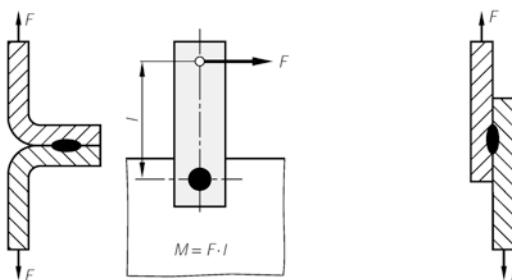


Abb. 5.129 Punktschweißverbindungen sind nach Möglichkeit so anzubringen, dass sie nicht auf Schälen, sondern auf Abscheren beansprucht werden. Eine Torsionsbeanspruchung bei Einzelpunkten ist unbedingt zu vermeiden

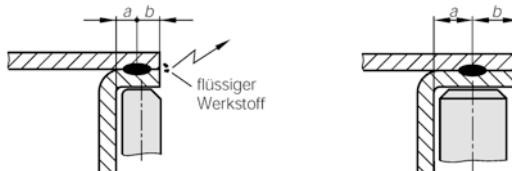


Abb. 5.130 Es ist auf einen ausreichenden Abstand der Elektroden von der Fügeteilwandung zu achten. Bei zu kleinem Maß a kann die Elektrode schlecht aufgesetzt bzw. es müssen schlankere, weniger formstabile Elektroden verwendet werden. Bei zu kleinem Maß b kann flüssiger Werkstoff aus der Trennfuge herausgepresst werden

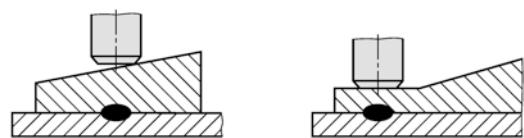


Abb. 5.131 Für die Punktschweißelektroden sind ausreichend große, möglichst ebene und parallele Auflageflächen vorzusehen

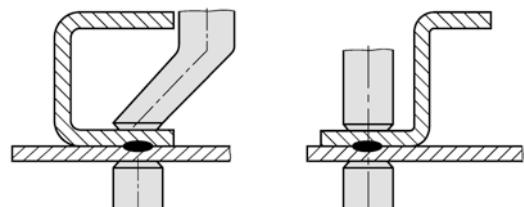


Abb. 5.132 Auf gute Zugänglichkeit der Schweißpunkte ist zu achten, da sonst gekröpfte (teure!) Speialelektroden zu verwenden sind, die weniger formstabil als die üblichen zylindrischen Elektroden sind

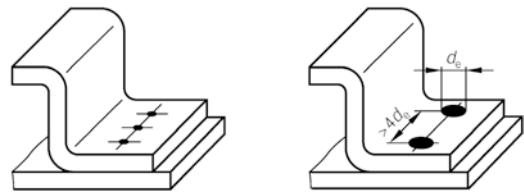


Abb. 5.133 Mit vielen kleinen Punkten wird meist keine ausreichende Festigkeit erzielt. Wenige größere Punkte ergeben zuverlässigere Verbindungen

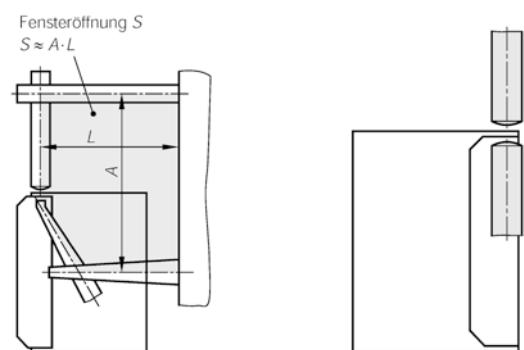


Abb. 5.134 Größere Werkstücke sind so zu gestalten, dass mit möglichst kleiner Armausladung L und gerinem Armabstand A (d. h. einer kleinen „Fensteröffnung“ $S = A \cdot L$) geschweißt werden kann. Größere Werkstoffmassen zwischen den Elektrodenarmen erhöhen die Induktionsverluste, d. h., sie verringern den (ohmschen) Schweißstrom

5.6 Löten (Ordnungsnummer: 9)

Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Verbinden und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen entsteht. Die Schmelz- bzw. Solidustemperatur des Grundwerkstoffs wird nicht erreicht. Begriffe und Definitionen der Lötverfahren sind in DIN ISO 857-2 zu finden.

Das Verfahren wird aufgrund seiner technischen Leistungsfähigkeit und wirtschaftlichen Vorteile zum stoffschlüssigen Verbinden der unterschiedlichsten Werkstoffe in allen Bereichen der Industrie, vor allem bei dünnwandigen Konstruktionen und schlechter Zugänglichkeit der Lötstellen in zunehmendem Maße angewendet. Weitere Vorteile sind:

- Die Mechanisierbarkeit bzw. Automatisierbarkeit der Fertigung ist relativ einfach.
- Die thermische Beeinflussung der Lötteile, vor allem bei Verwendung der niedrigschmelzenden kadmiumhaltigen Universalhartlote (mit ca. 40 % Ag), ist relativ gering: Verzug und Umfang der Gefügeänderungen sind also minimal.
- Die Wahl der Lote ist im Wesentlichen werkstoffunabhängig, weil metallurgische Reaktionen nahezu vernachlässigbar sind. Diese Tatsache ist ein entscheidender (praktischer und fertigungstechnischer) Vorteil im Vergleich zum Schweißen!

5.6.1 Grundlagen des Löten

Beim Löten werden die festen Grundwerkstoffe durch ein geschmolzenes Lot verbunden. Die hierfür maßgeblichen Vorgänge sind *Grenzflächenreaktionen*, da sie an der Phasengrenze flüssiges Lot/fester Grundwerkstoff stattfinden:

- Benetzungs- und Ausbreitungsvorgänge von Lot und Flussmittel.

- Bindung zwischen Lot und Grundwerkstoff als Folge wechselseitiger Diffusion von Lot- und Grundwerkstoffatomen.

Die Vorgänge der **Benetzung** und **Ausbreitung** des flüssigen Lottropfens auf der Oberfläche eines auf die *Arbeitstemperatur* $S = A \cdot L$ erwärmteten Werkstoffes lassen sich mithilfe der *Grenzflächen Spannungen* γ beschreiben, Abb. 5.135:

$$\begin{aligned}\gamma_{1,3} &= \gamma_{1,2} + \gamma_{2,3} \cos \varphi, \\ \gamma_{1,3} - \gamma_{1,2} &= \gamma_{2,3} \cos \varphi = \gamma_H\end{aligned}$$

(γ_H = „Haftspannung“).

Die Grenzflächenspannungen sind die den Benetzungsvorgang bestimmenden Größen. Die Größe des *Benetzungswinkels* φ wird nicht nur vom Grundwerkstoff und dem Lot, sondern auch von der Art des umgebenden Mediums (Atmosphäre, Flussmittel, Vakuum, Schutzgas) bestimmt. Er ist ein Maßstab für den Grad der Benetzung. Bei vollständiger Benetzung ist $\varphi = 0$, d. h., der Tropfen bedeckt (als einmolekulare) Schicht die Oberfläche. Dieser Zustand ist beim Löten nicht erreichbar, er liegt theoretisch vor, wenn $\gamma_{1,3} \geq \gamma_{1,2} + \gamma_{2,3}$ wird. Brauchbare Lötverbindungen ergeben sich noch für $\varphi \leq 30^\circ$. Nimmt das flüssige Lot die Gestalt einer Kugel an (das Lot „entnetzt“ auf der Werkstückoberfläche), dann ist die Lötstelle unbrauchbar, weil das Lot den vorgegebenen Spalt nicht ausfüllen kann. Diese Vorgänge laufen nur dann ab, wenn zwischen flüssigem Lot und Werkstück keine sperrenden Schichten (Oxide, Farb-, Ölschichten bzw. andere Oberflächenbeläge) vorhanden sind.

Das Lot kann die Oberfläche benetzen, sich ausbreiten und am Grundwerkstoff binden, wenn die Oberflächentemperatur an der Lötstelle die *Arbeitstemperatur* T_A erreicht hat²⁸. Die tatsächliche Löttemperatur ist i. Allg. höher

²⁸ Die für die gesamte Löttechnik außerordentlich wichtige Arbeitstemperatur ist die niedrigste Oberflächentemperatur an der Lötstelle, bei der das Lot benetzt oder sich mithilfe von Grenzflächenreaktionen eine flüssige Phase bildet (nach DIN ISO 857-2).

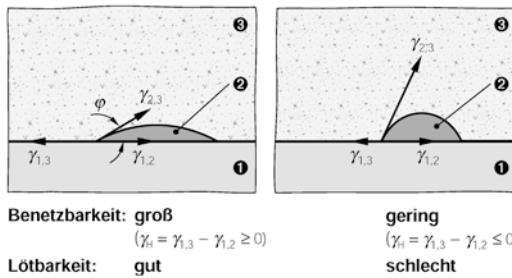


Abb. 5.135 Beziehungen zwischen Grenzflächenspannungen an den Oberflächen Grundwerkstoff – flüssiges Lot – Lötmedium. ①: Grundwerkstoff ②: flüssiges Lot ③: Lötmedium: Flussmittel, Schutzgas oder Vakuum

als die Arbeitstemperatur, sie darf aber eine höchste Temperatur nicht überschreiten, weil dann Schädigungen des Flussmittels, des Lotes oder des Grundwerkstoffes möglich sind.

Eine ausreichende Benetzungsfähigkeit ist die wohl wichtigste Forderung an die Eigenschaft **Löteignung** (DIN 8514). Benetzen erfolgt, wenn Lot und Grundwerkstoff Mischkristalle oder intermediäre Verbindungen bilden können, wobei die Löslichkeit sehr gering sein kann. Nur bei völliger Unlöslichkeit der Metalle (Lot/Grundwerkstoff) werden deren Oberflächen nicht benetzt oder das Lot „entnetzt“²⁹. Die meisten Metalle sind wenigstens in geringem Umfang ineinander löslich, die werkstofflichen Anforderungen an eine gute Löteignung sind daher wesentlich geringer als die an eine gute Schweißeignung. Technisch wichtige Ausnahmen sind z. B. Silber in Eisen und Blei in Eisen. In diesen Fällen kann also Eisen mit Silber- bzw. Bleiloten nicht verbunden werden.

Die Haftspannung γ_H ist ein Maßstab für die Fähigkeit der Schmelze, Oberflächen zu benetzen und sich auf ihnen ausbreiten zu können. Die Benetzungsfähigkeit lässt sich damit mit den Merkmalen Ausbreiten des flüssigen Lotes und des Flussmittels und Ausfüllen der i. Allg.

²⁹Unter „Entnetzen“ versteht man die Erscheinung, dass sich ein bei höheren Temperaturen vorhandener Lottropfen nach dem Abkühlen kugelförmig zusammenzieht. Flüssiges Silber entnetzt z. B. auf Stahloberflächen. Eine Lötverbindung kann daher bei derartigen Werkstoffpaarungen nicht hergestellt werden.

engen Lötspalte („Verschießen“) entgegen der Schwerkraft beschreiben. Diese Eigenschaft wird durch den *kapillaren Fülldruck* p_k oder anschaulicher durch die *Steighöhe* h des flüssigen Lotes in engen Spalten beschrieben. Für Spalte (bis etwa 0,3 mm Breite) gilt für h angenähert:

$$h = p_k \sim \frac{\gamma_H}{b}.$$

Es bedeuten:

γ_H = Haftspannung,

b = Spaltbreite.

Die Steighöhe hängt also nicht nur ab von der Art des Lotes, der Oberflächenbeschaffenheit der Lötteile und der Art der Lötatmosphäre (γ_H), sondern auch ganz erheblich von der Breite b des *Lötspaltes*. Abb. 5.136 zeigt diesen Zusammenhang. Bei Spaltbreiten $b > 0,5$ mm ist der Kapillardruck so gering, dass der Lötspalt nicht mehr ausgefüllt wird. In diesem Bereich ist eine besondere Löttechnik erforderlich, die in ihrer Handhabung dem Gassschweißen ähnelt und als *Fugenlöten* bezeichnet wird. Für das *Handlöten* ergeben sich günstige Verhältnisse bei Spaltbreiten zwischen 0,2 mm und 0,5 mm. Die immer noch geringe Steighöhe erfordert aber handwerkliches Geschick und Können, weil Wärme- und Lotzufuhr richtig dosiert werden müssen.

Für die *Massenfertigung* in Lötvorrichtungen und Lötmaschinen ist oft eine sehr große Steighöhe des Lotes erforderlich. Diese Forderung lässt sich mit Spaltbreiten von 0,05 bis 0,2 mm sicher erfüllen. Das flüssige Lot wird weit in den Spalt hineingetrieben; die Verwendung teurer Lotformteile ist nicht erforderlich. Ein preiswerter *außerhalb* der Spalten angeordneter Drahtring ist ausreichend. Diese Überlegungen sind für den Entwurf lötgerechter Konstruktionen sehr wichtig, Abb. 5.137. Bemerkenswert ist die zum Abfluss des Flussmittels erforderliche Bohrung. Andernfalls entstehen Flussmitteleinschlüsse, d. h., die vorgegebene Spaltfläche kann nicht vollständig mit Lot ausgefüllt werden. Unzureichende Festigkeitswerte sind dann nicht vermeidbar.

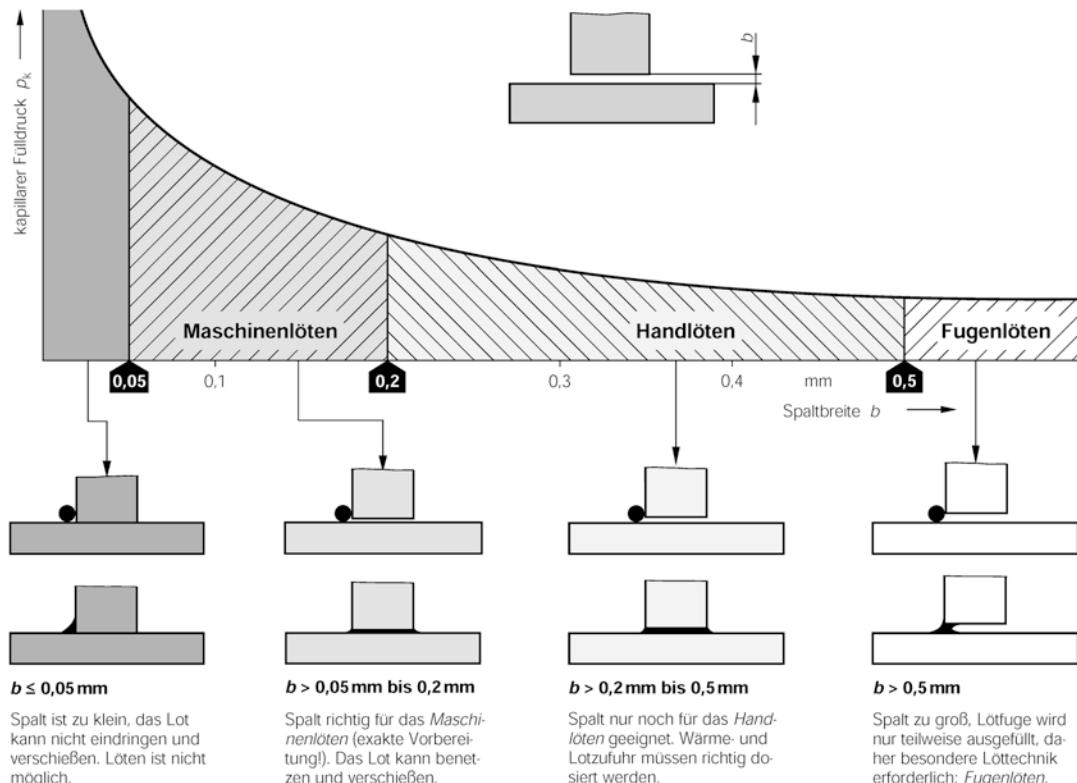


Abb. 5.136 Abhängigkeit des kapillaren Fülldrucks p_k beim Löten von der Spaltbreite b (schematisch)

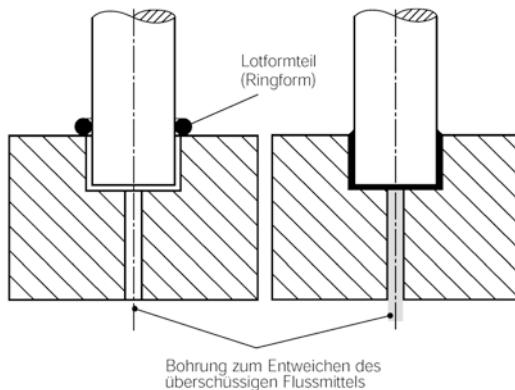


Abb. 5.137 „Verschießen“ eines außerhalb des Lötspalts angebrachten Lotformteils (auch entgegen der Schwerkraft)

Der Bereich, in dem die Bindung Lot/Grundwerkstoff erzeugt wird, ist eine extrem dünne (einige μm dicke) *Diffusions-*

zone $D = D_L + D_{GW}$ (Abb. 5.138), weil Platzwechselvorgänge der Atome in einem festen Grundwerkstoff nur sehr begrenzt möglich sind. Dieser Vorgang ist abhängig von den Diffusionseigenschaften der beteiligten Atomsorten, der Breite der Legierungszone, der Arbeitstemperatur des Lotes und der Dauer der Einwirkung. Erfahrungsgemäß wird daher die Sicherheit von Lötverbindungen selbst in Anwesenheit intermediärer Verbindungen kaum beeinträchtigt. Damit sind im Gegensatz zum Schweißen, metallurgische oder werkstoffliche Überlegungen bei der Auswahl „geeigneter“ Lote von untergeordneter Bedeutung. Benutzt das Lot den Werkstoff, dann ist eine Lötfung prinzipiell möglich. Die geringen werkstofflichen Schwierigkeiten erleichtern das Verbinden metallurgisch „unverträglicher“ Werkstoffe außerordentlich. Im Gegensatz dazu bilden sich beim „metallurgischen“ Prozess

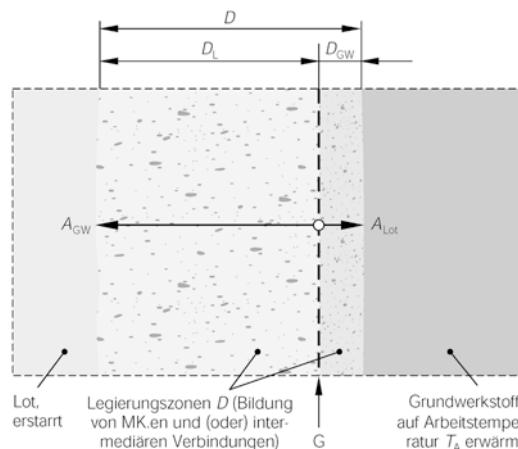


Abb. 5.138 Diffusionszone $D = D_L + D_{GW}$ an der Phasengrenze Grundwerkstoff – erstarrtes Lot (G) bei einer Hartlötvverbindung. D_L Diffusionszone im Lot D_{GW} Diffusionszone im Grundwerkstoff A_{LOT} Grundwerkstoffatome A_{LOT} Lotatome

Schweißen größer Mengen flüssiger Phasen, aus denen sich leicht Versprödungen ergeben können. Ein typisches Beispiel ist das wirtschaftliche (und relativ einfache) Verbinden von Formteilen aus Schnellarbeitsstahl mit Schäften aus unlegiertem Stahl durch Löten. Schweißen ist in diesem Fall wegen der entstehenden extrem spröden Gefüge und der damit verbundenen Rissneigung absolut unmöglich.

In einer sehr begrenzten Anzahl von Fällen können beim Löten einiger Werkstoffe metallurgische Probleme entstehen, die in erster Linie auf die Verwendung „falscher“ Lote zurückzuführen sind. Die erwähnten Schwierigkeiten beruhen ausnahmslos auf den Eigenschaften der Legierungszone D , die trotz ihrer geringen Ausdehnung bei bestimmten Kombinationen von Lot und Grundwerkstoff zum Versagen der Lötverbindung führen kann. Unabhängig von der Ursache des Problems wird die Versagenswahrscheinlichkeit umso geringer, je niedriger die Arbeitstemperatur des verwendeten Lotes ist. Die Wirksamkeit dieser durch die Praxis vielfach bestätigten Empfehlung beruht darauf, dass mit abnehmender Temperatur die Platzwechselvorgänge zunehmend langsamer verlaufen, d. h., die Breite der Legierungszone (und damit auch ihre Gefährlichkeit) nimmt ab.

In Abb. 5.139 sind einige charakteristische Formen der Diffusions- bzw. Legierungszone dargestellt. Je nach Arbeitstemperatur der Lote entstehen Diffusionszonen mit Breiten zwischen $0,5 \mu\text{m}$ und ca. $20 \mu\text{m}$. Die größte Bau-teilsicherheit der Lötverbindung existiert dann, wenn die Legierungszone aus Primärkristallen oder aus Mischkristallen besteht. Lötverbindungen aus kaltverformten Stahlteilen, hergestellt mit kupfer- oder zinkhaltigen Loten, ne-

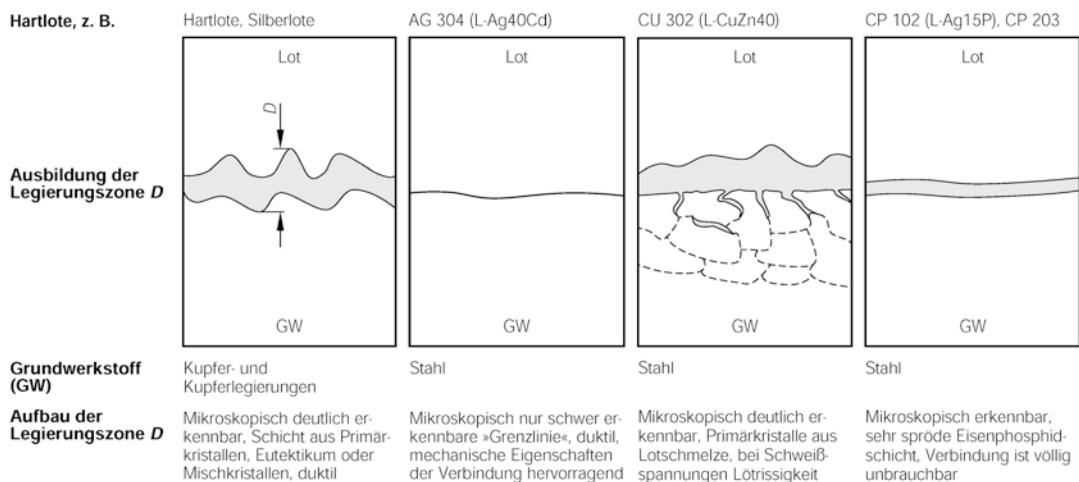


Abb. 5.139 Ausbildung der Legierungszone D bei verschiedenen Lot-Grundwerkstoff-Kombinationen. (nach Degussa)

gen bei Temperaturen oberhalb 900 °C zu der gefährlichen Lötbrüchigkeit. Dabei diffundiert bevorzugt Kupfer oder Zink sehr schnell entlang den Korngrenzen in den Stahl ein. Interkristalline Werkstofftrennungen treten dann so lange in dem unter Zugspannungen stehenden Werkstoff auf, wie das Lot flüssig ist. Diese beim Verbindungsschweißen von Kupfer mit Stahl ebenfalls auftretende Schadensform lässt sich mit Loten vermeiden, die eine möglichst niedrige Arbeitstemperatur (verringerte Diffusionsfähigkeit) besitzen. Beim Löten von Stahl mit phosphorhaltigen Loten entsteht eine nur einige μm dicke Schicht aus Kupferphosphid, die extrem stoß- und rissempfindlich ist. Phosphorhaltige Lote dürfen daher nicht zum Löten von Eisenwerkstoffen verwendet werden.

5.6.2 Einteilung der Lötverfahren

In DIN ISO 857-2 wird als Ordnungsmerkmal für die Einteilung der Lötverfahren die Art des *Energieträgers* gewählt. Im Folgenden werden nur die wichtigsten Lötverfahren besprochen, geordnet nach der Art der Wärmequelle.

Fester Körper

Beim *Kolbenweichlöten* erfolgt das Erwärmen der Lötstelle und das Abschmelzen des Lotes i. Allg. mit einem von Hand geführten Lötkolben. Das Flussmittel kann getrennt oder in Form von Röhrenlot mit Flussmittelfüllung zugegeben werden.

Flüssigkeit

Beim *Lötbadweichlöten* (korrekter wäre die Bezeichnung *Lotbadweichlöten*) werden die zu lögenden Teile mit Flussmittel benetzt und in ein Bad mit flüssigem Lot getaut, Abb. 5.140. Selektives Löten wird durch Aufbringen von Pasten, Lacken oder Papiermasken erreicht. Durch das senkrechte Eintauchen in das *nicht* bewegte Bad können sich leicht Gasblasen und Flussmitteleinschlüsse bilden. Die Eintauchgeschwindigkeit muss so eingestellt werden, dass die Arbeitstemperatur zu jedem Zeitpunkt am Werkstück erreicht wird. Sichtbares Zeichen

dafür ist ein *positiver Meniskus* an der Grenzfläche Lotoberfläche/Bauteil, Abb. 5.140. Diese Nachteile sind beim *Wellenweichlöten* nicht vorhanden. Die das Werkstück berührenden Stellen der „*Lötwelle*“ sind oxidfrei, wenn mit Stickstoff als Schutzgas gearbeitet wird, Abb. 5.141. Eine Stickstoffsatztumgebung ist zwar nicht zwingend erforderlich, kann sich aus den folgenden Gründen jedoch als vorteilhaft erweisen:

- Stickstoff unterbindet weitgehend die Krätzebildung (Oberflächenoxidation).
- Stickstoff verbessert das Benetzungs- und Verteilungsverhalten des Lotes auf dem Werkstück.
- Stickstoff lässt glänzendere Lötstellen und kleinere Kontaktwinkel entstehen. Es wird in den meisten Fällen mit einem Flussmittelbad und einer Trockenstrecke (trocknet das Flussmittel) zum Löten bestückter Platinen verwendet.

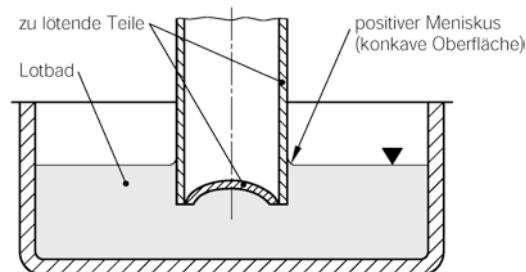


Abb. 5.140 Einrichtung zum Lötbadweichlöten. (nach DIN ISO 857-2)

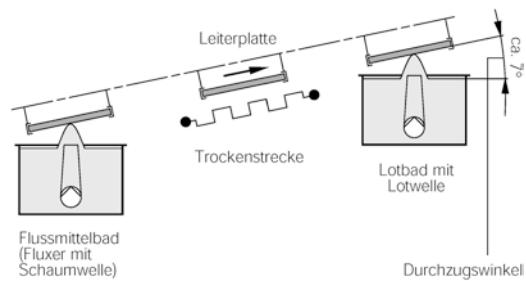


Abb. 5.141 Einrichtung zum Wellenweichlöten. (nach DIN ISO 857-2)

- Die Lötqualität wird verbessert und die Häufigkeit von Lötfehlern sowie die damit verbundene Nacharbeit verringert sich. Es wird eine deutliche Kostenreduzierung erreicht.

Zum Wellenweichlöten werden Sn96.5Ag3.0-Cu0.5 und Sn99.3Cu0.7 empfohlen. Dabei zeichnet sich das Lot SnAgCu im Vergleich zu SnCu durch eine höhere Benetzungs geschwindigkeit und bessere Löteignung aus.

Reflowlöten (Wiederaufschmelzlöten)

Bei diesem Verfahren wird das Weichlot in Form von Lotpaste (die Lotpaste hält und fixiert die Bauteile während des Löt vorgangs!) vor der Bestückung auf die Platine aufgetragen, und in einem Aufschmelzöl auf die erforderliche Löttemperatur gebracht und so miteinander verbunden. Das ist auch der Hauptunterschied zu anderen Lötverfahren, wie Lötkolbenlöten, Tauchlöten oder Wellenweichlöten. Es gibt verschiedene Möglichkeiten des Lotauftrags, z. B. mittels Schablonendruck (Siebdruck), Dispenser (= Ausgabevorrichtung), mithilfe von Lotform teilen oder auch galvanisch.

Die Wärmeübertragung kann durch Kon densation, Strahlung oder Konvektion erfolgen. Das Verfahren lässt sich demnach dadurch kennzeichnen, dass die Vorgänge Lotauftrag und Wärmezufuhr zu unterschiedlichen Zeiten erfolgen. Das in den USA tätige NEMI-Konsortium empfiehlt für das Reflowlöten Lote auf der Basis SnAg3.9Cu0.6.

Die aufwendige und damit teure maschinelle Einrichtung macht das Löten etwa zwei bis vier mal teurer als das Wellenweichlöten.

Das **Dampfphasenlöten**, auch **VP-Löten** oder **Vapour Phase Reflowlöten** genannt, ist das zzt. universellste, einfachste und zuverlässigste Lötverfahren. Es ist für jede Art von SMD-Kom ponenten (surface mounted devices) geeignet. Alle Bauteile lassen sich ohne kompliziertes Ermitteln oder Halten von Temperaturprofilen verarbeiten. Zur Wärmeübertragung wird eine chemisch inerte Flüssigkeit eingesetzt, z. B. perflouriertes Polyether. Diese unschädliche und sehr stabile

Flüssigkeit, die sich nicht mit anderen Stoffen verbindet, hat einen Siedepunkt typischerweise bei 200 °C oder 215 °C. Taucht das Löt gut in die Dampfzone ein, kondensiert der Dampf auf dem Löt gut und überträgt seine Wärme. Gleich gültig wie lange das Löt gut im Dampf bleibt, seine Temperatur kann nie höher sein als die des Dampfes. Die maximale Löttemperatur ist dabei durch die Temperatur des Dampfs sehr genau definiert. Die Wärmeübertragung ist schnell und unabhängig von der Baugruppengeometrie. Als Folge der definierten Löttemperatur und der gleichförmigen Erwärmung sind keine Überhitzungen der Bauteile möglich. Wegen der iner ten Gasatmosphäre können keine Oxidationsvorgänge entstehen, und ein Löten ohne Flussmittel ist ebenfalls möglich.

Gas

Die Wärmequelle beim *Flammlöten* ist ein gas betriebener Brenner, dessen Flamme neutral oder leicht reduzierend eingestellt wird. Bei mechanisierten Lötanlagen werden meistens Flammfeldbrenner verwendet, die im Werkstück ein sehr konstantes Temperaturfeld erzeugen. Anlagen, die mit Flammerwärmung arbeiten, sind verhältnismäßig kostengünstig und leicht umrüstbar. Sie werden häufig eingesetzt, wenn zum Zusammenbau der Teile Halterungen erforderlich sind, oder wenn große, sperrige Bau teile gelötet werden.

Das *Ofenlöten* kann mit Flussmitteln, mit inerten Schutzgasen oder im Vakuum durch geführt werden. Die Wärmequelle sind elek trische Heizelemente, die die Teile vorwiegend durch Wärmestrahlung sowie durch Konvektion der heißen Ofengase erwärmen. Die Vorteile dieser Erwärmungsart sind:

- Durch gleichmäßiges Aufheizen und Abkühlen sind die Lötteile nahezu spannungs und verzugsfrei.
- Löten komplizierter Werkstücke mit vielen Lötstellen ist wirtschaftlich möglich.
- Durch Anwenden geeigneter (reduzierender auch inerter) Schutzgase bleiben die Ober flächen der Lötteile metallisch blank.

Elektrischer Strom

Die Arbeitstemperatur beim *Induktionshartlöten* wird durch einen in den zu lötenden Teilen induzierten, hochfrequenten Wechselstrom erzeugt, Abb. 5.142. Die Wärme entsteht bei diesem Verfahren durch einen Induktor am Werkstück, der sehr genau an die Werkstückform angepasst werden muss, um Energieverluste zu vermeiden. Die Temperatur wird rasch (5 bis 10 s) erreicht. Der erwärmte Bereich ist dadurch sehr genau begrenzt. Der Induktor muss wegen der hohen Erwärmung wassergekühlt werden. Das Ergebnis sind sehr saubere, verzugsarme und hochwertige Lötverbindungen. Man kann mit Flussmitteln oder schutzgasdurchströmten Abdeckhauben arbeiten. Das Flussmittel wird vor dem Fixieren der Teile als Paste aufgetragen oder aufgespritzt. Bedingt durch die hohen Kosten, wird dieses Verfahren nur für die Serienfertigung angewendet. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist der geringe Wartungs- und Instandhaltungsaufwand.

Ein wichtiger technischer und wirtschaftlicher Vorteil ist die leichte Mechanisierbarkeit der meisten Lötverfahren. Der Lötvorgang ist bei richtiger Wahl des Lotes und Flussmittels nur sehr wenig störanfällig. Der Einsatz qualifizierter Fachkräfte ist daher kaum erforderlich. Allerdings sind einige löttechnische Besonderheiten der Serien- bzw. Massenfertigung zu beachten. Der Konstrukteur muss die zu verbindenden Teile so gestalten, dass sich *gleichmäßig* enge, in Fließrichtung des Lotes *äquidistante* Spalten bilden. Diese Forderung ist besonders wichtig, weil die Korrektur des Lötvorganges durch einen fachkundigen Handlöter bei der großen Stückzahl nicht möglich

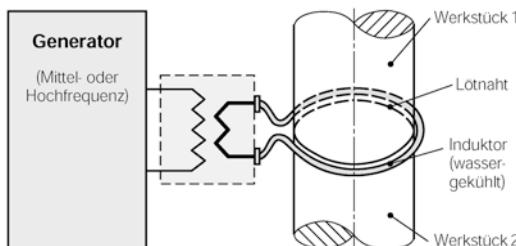


Abb. 5.142 Einrichtung zum Induktionshartlöten. (nach DIN ISO 857-2)

und auch aus wirtschaftlichen Gründen nicht erwünscht ist. Die Teile müssen in der richtigen Lage zueinander fixiert und so lange gehalten werden, bis das in den Spalt eingedrungene Lot erstarrt ist. Das Lot (und auch das Flussmittel) lassen sich auf verschiedene Weise aufbringen. Vielfach werden von Hand oder aus Magazinen zugeführte Lotformteile (Draht oder Lotblech) verwendet.

Für das mechanisierte Löten werden häufig die mechanisch wenig aufwendigen Lötvorrichtungen oder Lötmaschinen verwendet, die Einrichtungen zum automatischen Werkstücktransport besitzen. Abb. 5.143 zeigt schematisch die zwei wichtigsten, relativ preiswerten Lötmaschinenbauarten mit den Fördereinrichtungen Drehtisch und Förderband, die die Werkstücke intermittierend oder kontinuierlich durch die Erwärmungszone führen, in der der Lötvorgang abläuft.

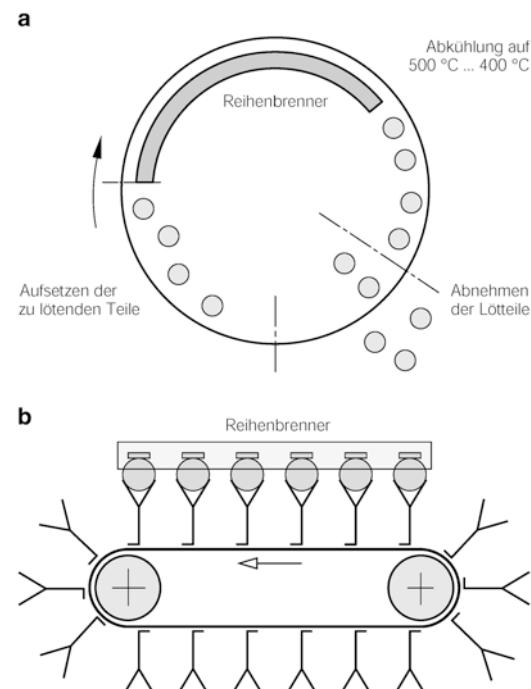


Abb. 5.143 Lötmaschinenbauarten für das mechanisierte und automatische Löten. (nach Degussa). **a** Karussell-Lötmaschine (intermittierende Bewegung) **b** Förderband-Lötmaschine (kontinuierliche Bewegung)

5.6.3 Flussmittel; Vakuum; Schutzgas

Die Benetzung und Ausbreitung des flüssigen Lotes sowie die Legierungsbildung zwischen Lot und Grundwerkstoff erfordert metallisch blanke Werkstückoberflächen. Oxide, Fremdstoffschichten (Farben, Fette, Schlacken, Beläge aller Art) sind daher vor dem Löten durch eine mechanische (z. B. Bürsten) oder chemische Behandlung (z. B. Beizen) sorgfältig zu beseitigen. Die während des Löten neu gebildeten Oxide werden mit auf die Lötflächen aufgetragenen **Flussmitteln** oder mithilfe reduzierender Lötatmosphären (Schutzgase, „Vakuum“) gelöst. Die chemisch sehr beständigen Oxide z. B. der Metalle Aluminium, Chrom und Titan müssen mit sehr aggressiven Sonderflussmitteln gelöst werden. Ein vollständiges Beseitigen der Flussmittelrückstände nach dem Löten ist daher zwingend erforderlich, anderenfalls sind Korrosionserscheinungen am Werkstück unvermeidlich.

Flussmittel sind hauptsächlich *Salzgemische*, die in Pulver-, Pasten-, Gasform oder flüssiger Form verwendet werden.

Der Temperaturbereich, in dem die Flussmittel und die gewählten Lötatmosphären wirksam sind, ist der *Wirktemperaturbereich*. Die Arbeitstemperatur des verwendeten Lotes muss im Wirktemperaturbereich des Flussmittels liegen. Flussmittel und Lot müssen daher aufeinander abgestimmt sein, eine Forderung, die auch von erfahrenen Praktikern manchmal nicht genügend beachtet wird.

Flussmittel können ihre Aufgaben nur dann erfüllen, wenn ihre Schmelztemperatur unter der des verwendeten Lotes liegt, da die Lösung der Oxide beginnt, bevor die Arbeitstemperatur (etwa gleich der Schmelztemperatur des Lotes) erreicht ist. Das Flussmittel muss außerdem einen gleichmäßigen, dichten Überzug bilden, dessen Wirksamkeit bei der Löttemperatur über die Dauer der Lötzeit erhalten bleibt. Ein möglichst tief liegender Wirktemperaturbereich und eine hohe Lösungsgeschwindigkeit der Oxide verhindern ein Verzundern des Werkstücks beim Erwärmen. Damit wird die praxiserprobte Regel verständlich, nach der *schnell* erwärmt

(ausreichend rasche und intensive Energiezufuhr) und möglichst *schnell* gelötet werden soll. Die maximale Lötzeit wird durch die Erschöpfung des Lösungsvermögens des Flussmittels für Metalloxide begrenzt. Die Wirkzeit des Flussmittels bei der Löttemperatur beträgt nur etwa 4 bis 5 min.

Die Lötspalte sind so zu dimensionieren, dass die eindringende Flussmittelmenge zum Lösen der Oxide ausreicht. Sehr enge Spalte werden daher oft nicht vollständig mit Flussmittel (und Lot) ausgefüllt, nicht gelöste Oxidreste, d. h., die Gefahr von Fehllösungen, sind dann unvermeidlich. Grundsätzlich muss mit höherer Arbeitstemperatur die Spaltbreite größer werden, weil die Oxidfilmdicke dann zunimmt.

Die Flussmittel sind in DIN EN 1045 (Hartlöten), DIN EN 29454-1 bzw. DIN EN ISO 9454-1 (Weichlöten der Schwer- und Leichtmetalle) genormt. Tab. 5.16 zeigt Einzelheiten und Eigenschaften der Flussmittel zum Weich- und Hartlöten. Es werden im Einzelnen unterschieden:

- **Flussmittel** zum **Hartlöten** von **Schwermetallen** werden mit den Buchstaben **FH** für die Klasse und zwei Ziffern (DIN EN 1045) gekennzeichnet:

FH10, FH20, FH30 und FH40

für Stähle, rostfreie Stähle, Kupfer und Kupferlegierungen, Nickel und Nickellegierungen, Edelmetalle, Molybdän und Wolfram,

- **Flussmittel** zum **Hartlöten** von **Leichtmetallen** (Aluminium, Magnesium) werden mit den Buchstaben **FL** für die Klasse und zwei darauf folgenden Ziffern (DIN EN 1045) bezeichnet:

FL10, FL20

Diese Flussmittel wirken oberhalb 550 °C. Die Ziffern kennzeichnen den Wirktemperaturbereich und geben Hinweise auf die Zusammensetzung des Flussmittels. Die Auswahl erfolgt in erster Linie nach der Arbeitstemperatur des verwendeten Lotes. Es werden *Universal-* und *Sonderflussmittel* unterschieden, die besondere Eigenschaften besitzen (z. B. können sie sehr dünnflüssig oder sehr dickflüssig sein).

Tab. 5.16 Flussmittel zum Weich- (DIN EN 29454-1) und Hartlöten (DIN EN 1045) metallischer Werkstoffe, Auszug. Die bisher gültigen Bezeichnungen sind in Klammern angegeben

Flussmittelgruppe	Typ	Zusammensetzung (Verhalten der Flussmittellückstände)	Anwendungsbereich
Hartlöten Schwermetalle (DIN EN 1045)	FH10	Borverbindungen und Fluoride (korrodierend)	Silberhartlöte mit Arbeitstemperaturen bis max. 800 °C, Vielzweckflussmittel, Rückstände müssen entfernt werden
	FH20	Borverbindungen und Fluoride (korrodierend)	Hartlote mit Arbeitstemperaturen zwischen 700 °C und 1000 °C, Rückstände müssen entfernt werden
	FH30	Borverbindungen, Phosphate, Silicate (i. Allg. nicht korrodierend)	Hartlote mit Arbeitstemperaturen über 1000 °C, Rückstände müssen entfernt werden
	FH40	Chloride und Fluoride (i. Allg. korrodierend)	Hartlote mit Arbeitstemperaturen zwischen 600 °C und 1000 °C im Reaktorbau (borfrei!), Rückstände müssen entfernt werden
Hartlöten Leichtmetalle (DIN EN 1045)	FL10	Hygrokopische Chloride und Fluoride (korrodierend)	Für Werkstoffe, die gewaschen (auch gebeizt, neutralisiert) werden können
	FL20	Nicht hygrokopische Fluoride (nicht korrodierend)	Für Werkstoffe, die nicht mit Feuchtigkeit in Berührung kommen dürfen
Weichlöten Schwermetalle (DIN EN 29454)	3.2.2 (F-SW-11)	Zink- und (oder) Ammoniumchlorid und freie Säuren (korrodierend)	Chromhaltige Stähle, stark oxidierte Werkstücke
	3.1.1 (F-SW-12)	Zink- und (oder) Ammoniumchlorid (korrodierend)	Chromfreie Stähle, NE-Metalle, wenn Abwaschen der Rückstände möglich, Kühlerbau, Klempnerarbeiten
	2.1.1 (F-SW-24)	Amine, Diamine, Harnstoff (bedingt korrodierend)	Chromfreie Stähle und NE-Metalle, wenn Abwaschen der Rückstände <i>nicht</i> möglich, Feinlösungen, Elektrotechnik
	1.1.3 (F-SW-32)	Harze mit halogenfreien Zusätzen (nicht korrodierend)	Kupfer, Elektrotechnik, Elektronik, gedruckte Schaltungen
Weichlöten Leichtmetalle (DIN EN 29454)	3.1.1 (F-LW-1)	Lotbildende Zink- und (oder) Zinnchloride (»Reaktionslot«)	Für Werkstücke, die gewaschen werden können
	2.1.3 (F-LW-2)	Rein organische Verbindungen, z. B. Amine (korrodierend)	
	2.1.2 (F-LW-3)	Organische Halogenverbindungen (korrodierend)	

Beispiel für die Bezeichnung eines Flussmittels zum Weichlöten nach DIN EN 29454-1 (s. Tabelle 3-16):

Lot 3.2.2 (F-SW-11):

3: anorganischer Flussmitteltyp,

2: saure Flussmittelbasis,

2: Flussmittelaktivator ist nicht die Phosphorsäure, sondern eine andere Säure.

- Flussmittel zum Weichlöten von Schwer- und Leichtmetallen** (DIN EN 29454-1) werden nicht mehr nach der Wirkung der *Flussmittellückstände*, sondern nach ihrem Gruppenaufbau gekennzeichnet, Tab. 5.17. Sie werden mit drei Ziffern bezeichnet (z. B. **2.1.3**). Die Kennziffern geben Hinweise auf den *Typ* des *Flussmittels* (**2:** organischer Flussmitteltyp), die *Flussmittelbasis* (**1:** wasserlösliches Flussmittel) und den *Flussmittelaktivator* (**3:** Flussmittel wird ohne Halogene aktiviert). Die Wirktemperaturen lie-

gen etwa zwischen 200 °C und 400 °C. Ein Beseitigen der Flussmittellückstände wird mit zunehmender Oxidlöslichkeit wegen ihrer korrosiven Wirkung immer dringlicher.

In Tab. 5.16 werden für ausgewählte Flussmittel einige wichtige Hinweise auf die Zusammensetzung und Beispiele für die Anwendung gegeben.

Das Entfernen der Oxide mit Flussmitteln ist mit einer Reihe von Nachteilen verbunden:

Tab. 5.17 Flussmittel zum Weichlöten metallischer Werkstoffe, nach DIN EN 29454

Flussmitteltyp	Flussmittelbasis	Flussmittelaktivator	Flussmittelart	
1 Harz	1 Kolophonium (Harz)	1 ohne Aktivator 2 mit Aktivator ¹⁾	A flüssig B fest C Paste	
	2 ohne Kolophonium (Harz)			
2 organisch	1 wasserlöslich	3 ohne Halogene aktivieren		
	2 nicht wasserlöslich			
3 anorganisch	1 Salze	1 mit Ammoniumchlorid 2 ohne Ammoniumchlorid		
	2 sauer	1 Phosphorsäure 2 andere Säuren		
	3 alkalisch	1 Amine und (oder) Ammoniak		

- Flussmittel muss auf die Oberflächen aufgebracht werden. Oft ist auch das Beseitigen der Reaktionsprodukte erforderlich. Die zusätzlichen Arbeitsgänge verringern die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.
- Flussmitteleinschlüsse sind kaum vermeidbar, Füllgrade von etwa 80 bis 90 % sind schon als gut anzusehen.
- Die Wirksamkeit geht nach verhältnismäßig kurzer Zeit (4 bis 5 min) verloren.

Die genannten Nachteile werden weitestgehend vermieden, wenn das Beseitigen der Oxidschichten mit (reduzierendem oder inertem) **Schutzgas** oder im **Vakuum** erfolgt. Das Löten mit diesen oxidlösenden „Medien“ geschieht ausschließlich in teuren Ofenlötanlagen, d. h., es wird überwiegend für Massenartikel verwendet.

Die reduzierende Wirkung der Schutzgase ist abhängig von der Stabilität der Oxide und der Menge und Art der im Schutzgas enthaltenen reduzierenden (z. B. H₂, CO) und nicht reduzierenden Komponenten (z. B. H₂O, CO₂). Mit zunehmender Menge an Feuchtigkeit und zunehmender Bildungsenthalpie der zu lösenden Oxide steigt die Löttemperatur. Sie ist damit nicht nur von der Art des Lotes, sondern auch wesentlich von der Art (chemische Zusammensetzung) und Güte des verwendeten Schutzgases abhängig. Die Oxide z. B. des Titans und Aluminiums lassen sich nicht in reduzierenden Schutzgasatmosphären

bei noch beherrschbaren Temperaturen lösen, diese Metalle sind also auch nicht lötbar.

Inerte Schutzgase, wie z. B. Argon, werden zum Löten hochlegierter Stähle verwendet. Diese Gase sind im Gegensatz zu den wasserstoffhaltigen Schutzgasen explosionssicher, besitzen aber keine reduzierende Wirkung.

Die Verwendung von Vakuum als „Oxidlöser“ bietet den großen Vorteil, dass die Zugabe von Flussmittel entfällt. Das Verfahren erfordert sehr hohe Investitionskosten (Ofenanlage, Vakuumpumpe). Die mechanischen Gütwerte werden aber von keinem anderen Lötverfahren erreicht. Es wird bei Temperaturen über 600 °C und Drücken zwischen 10⁻¹ hPa und 10⁻⁶ hPa gelötet. Das Verfahren wird bei der Fertigung von Elektronen- und Senderöhren sowie im Turbinenbau mit großem Erfolg angewendet.

Der Wirkmechanismus des „Schutzgases“ Vakuum ist nicht genügend genau bekannt. Die Zersetzung des Oxids als Folge des niedrigen Sauerstoffpartialdrucks ist sicher nicht der entscheidende Mechanismus. Wahrscheinlicher ist das Aufbrechen der Oxide beim Erwärmen und ihre anschließende Unterwanderung durch das flüssige Lot. Diese Vorgänge sind mit einiger Sicherheit auch für die oxidlösende Wirkung der inertnen Schutzgase verantwortlich. Die Qualität des Vakuums wird entscheidend von der Menge der unerwünschten Gasbestandteile Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid bestimmt.

5.6.4 Lotwerkstoffe

Die thermische Beanspruchung des Werkstücks beim Löten ist gering, der Umfang und die Art werkstofflicher Veränderungen sind im Allgemeinen vernachlässigbar. Sie sind abhängig von der Art des Lotes, d. h., im Wesentlichen von der Arbeitstemperatur. Die Lötdauer liegt zwischen einigen Sekunden (Induktionslöten) und wenigen Minuten.

Lote sind meistens Legierungen, z. T. werden auch reine Metalle benutzt. Sie werden in Form von z. B. Drähten, Stäben, Blechen, Pulvern, Pasten und Formteilen verwendet. Je nach der Höhe der Liquidustemperatur T_L der Lotwerkstoffe unterscheidet man die Lötverfahren **Weichlöten** ($T_L < 450$ Grad C) und **Hartlöten** ($T_L > 450$ °C). Das **Hochtemperaturlöten** ist ein *flussmittelloses* Löten unter Luftabschluss (Schutzgas, Vakuum) mit Loten, deren Liquidustemperatur über 900 °C liegt. Die wichtigsten Lote sind Edelmetalle, Nickel-Basis-Lote und andere. Die Festigkeiten dieser Verbindungen erreichen oft die Festigkeiten der zu verbindenden Grundwerkstoffe.

Weichlöten ist ein thermisches Füge- und Beschichtungsverfahren mit Loten, die nach der neuen **RoHS** überwiegend auf Zinnbasis aufgebaut sind. In den meisten Fällen werden Flussmittel verwendet. Das Verfahren bietet dann Vorteile, wenn dichte und (oder) elektrisch leitende Verbindungen erforderlich sind. Höhere Festigkeiten erfordern bestimmte konstruktive Maßnahmen. Durch die niedrigen Arbeitstemperaturen sind die Bauteilverzüge gering, die Erwärmungsvorgänge sind unkritisch, gut steuerbar und mechanisierbar (nach DIN ISO 857-2).

Weichlote (DIN 1707-100, DIN EN ISO 9453, DIN EN 61190-1-2-3)

Das Verhalten und einige Eigenschaften der technisch wichtigsten Weichlote auf der Basis Blei-Zinn können dem Zustandsschaubild, Abb. 5.144, entnommen werden. Schnellfließende, dünnflüssige für die Elektroindustrie geeignete Lote sind eutektische oder naheutektische Legierungen. Wegen des bei ihnen fast fehlenden

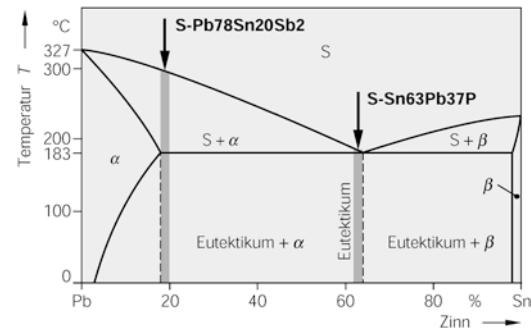


Abb. 5.144 Zustandsschaubild Blei-Zinn (Weichlote), s. Tab. 5.18

Erstarrungsbereichs bleibt die Schmelze bis zum Erstarren flüssig und wird nicht durch primär ausgeschiedene Kristalle „teigig“. Die Schmelztemperatur des eutektischen Weichlotes S-Sn63Pb37P liegt bei 183 °C. Lotformteile für Massenlösungen müssen grundsätzlich aus eutektischen Legierungen bestehen. Bei Löten mit größeren Erstarrungsintervallen kann nur die sich zuerst bildende Schmelze in den Lötpalt eindringen, die noch festen Kristalle (Kristallite) machen ein Verschießen des Lotes unmöglich.

Zum Handlöten (Kabellöten, Klempnerarbeiten) ist dagegen eine bestimmte Teigigkeit des flüssigen Lotes zweckmäßig, die die Modellierfähigkeit verbessert und damit das Weglaufen des flüssigen Lotes erschwert. In diesen Fällen werden Legierungen mit einem deutlich größerem Erstarrungsbereich verwendet, wie z. B. das als *Schmierlot* oder auch als *Wischlot* bezeichnete und in der Praxis noch häufiger verwendete Lot S-Pb78Sn20Sb2 oder S-Pb60Sn40E (mit Schmelzbereichen zwischen 183 °C und 270 °C, bzw. 183 °C und 238 °C). In Tab. 5.18 sind die Einteilung der Lote, ihr Anwendungsbereich und einige für den Lötprozess wichtige löttechnische bzw. physikalische Eigenschaften zusammengestellt.

Der geforderte Verzicht auf Blei [sowie Hg, Cd, Cr⁺⁶, polybromierte Biphenyle (PBB) als Flammhemmer und polybromierte Diphenylether (PBDE)] in Elektronikprodukten ist in den zwei Richtlinien der EU RL 2002/96/EG über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment) und der RL

2002/95/EG zur Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten enthalten. Die Umsetzung in nationales Recht erfolgte zum 13. August 2004 in einer RoHS genannten Richtlinie: *Directive on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*. Sie bestimmt, dass ab dem 1. Juli 2006 nur noch Geräte in den Verkehr gebracht werden dürfen, die die Anforderungen nach RoHS erfüllen. Nach diesen Vorgaben dürfen dann für diese Geräte nur noch bleifreie Lote verwendet werden. Der Einsatz bleifreier Lotlegierungen hat eine höhere Lötte-temperatur (Umrüsten der Lötanlagen ist erforderlich!) und einen bis zu vierfach höheren Preis der überwiegend zinnhaltigen und damit wesentlich teureren Lote zur Folge. Einige bleifreie Lote sind in DIN EN ISO 9453 und DIN EN 61190-1-2-3 genormt, Tab. 5.18.

Hartlote (DIN EN ISO 3677, DIN EN ISO 17672)

Nach DIN EN ISO 17672 werden Hartlote nach dem sog. ersten Bezeichnungssystem in acht Gruppen eingeteilt (Tab. 5.18). Das Kurzzeichen für jeden Lotzusatz besteht aus zwei Buchstaben für die Gruppe. Es folgen drei Ziffern, die fortlaufend zugeordnet sind und mit 101 beginnen. Einige Gruppen bestehen aus Untergruppen, bei denen die erste Untergruppe mit 101 beginnt, die zweite mit 201 usw. Acht Gruppen von Lotzusätzen sind zzt. genormt. In Klammern sind die älteren, in der Praxis noch häufiger verwendeten Bezeichnungen angegeben.

Im Folgenden werden einige wichtige Hartlote nach DIN EN ISO 17672 vorgestellt.

AL: Aluminiumbasislote

Da Aluminium nur mit sehr wenigen Elementen Legierungen bildet, existiert eine sehr geringe Anzahl geeigneter Al-Hartlote. Das wichtigste Lot ist die sehr korrosionsbeständige eutektische Legierung AL 104 (L-AlSi12). Rein-aluminium lässt sich gut hartlöten. Mg- und Si-Zusätze erschweren die Benetzbarkeit und senken die Solidustemperatur bis in die Nähe der Arbeitstemperatur der Lote

AG: Silberhaltige Hartlote

Die Arbeitstemperaturen liegen zwischen 800 °C und 860 °C. Diese Lote werden u. a. für Stähle, Temperguss, Nickel, Kupfer und deren Legierungen verwendet. Lote mit > 20 % Massengehalt Ag sind die technisch wichtigsten Hartlote. Die cadmium-haltigen Universalhartlote sind niedrigschmelzend und erlauben ein werkstoff- und werkstückschonendes Löten bei sehr kurzen Lötzzeiten. Das niedrigstschmelzende Hartlot AG 302 (L-Ag40Cd), mit einer Arbeitstemperatur von nur 610 °C, wird wegen seines geringen Erstarrungsintervalls bevorzugt zum Handlöten, aber auch zum Löten mit Lotformteilen auf Lötanlagen eingesetzt

CP: Kupferbasislote mit Phosphorzu-sätzen

Die Arbeitstemperaturen liegen zwischen 845 °C und 1040 °C. Sie werden vorzugsweise zum Hartlöten von Eisen- und Nickelwerkstoffen sowie von Kupfer verwendet. Die phosphorhaltigen Lote sind wegen der Bildung spröder Eisenphosphidschichten zum Löten der Eisenwerkstoffe nicht geeignet

NI: Nickelbasislote

Diese auch korrosionsbeständigen Lote werden zum Hochtemperaturlöten z. B. von Eisen- und Nickelwerkstoffen im Kern- und Reaktorbau verwendet

PD: Palladiumlote Typische Vakuumlote

AU: Goldlote

Zum Löten im Vakuum bzw. bestimmter hochreaktiver Werkstoffe, wie z. B. Titan, Zirkonium und Beryllium sind Sonderhartlote erforderlich, die aus Edelmetallen (Ag, Au, Pd) und Kupfer bestehen. Die Arbeitstemperaturen dieser auch *Vakuumhartlote* genannter Sonderlote liegen zwischen etwa 800 °C und 1300 °C. Einige Vakuumhartlote, wie AG 401, PD 201, AU 101 bis 106, werden mit geringeren Verunreinigungen benötigt.

Die Vorteile der sehr teuren Vakuumhartlote (8000 bis 10.000 €/kg!) sind die im Vergleich mit anderen Hartloden erzielbaren deutlich besseren mechanischen Gütekriterien. Die Verwendung von Flussmitteln ist nicht erforderlich, daher ist der Füllgrad der metallisch blank bleibenden Lötstellen sehr groß. Die wichtigste Anforderung an diese Lote (und an die zu lögenden Grundwerkstoffe) ist ein möglichst hoher Dampfdruck der beteiligten Elemente.

Tab. 5.18 Die Lotgruppen nach DIN 1707-100 (Weichlote), DIN EN ISO 9453 (Weichlote), DIN EN 61190-1-2-3 (Elektronik-Weichlote), DIN EN ISO 17672 (Hartlote) und DIN EN ISO 3677 (Hartlote), Auswahl

Gruppenbezeichnung	Typische Lote nach DIN bzw. DIN EN	Erstarrungsbereich °C	Anwendungsbereich
Schwermetallweichlote (DIN 1707-100)	S-Pb60Sn40E	183 bis 238	Elektroindustrie
	S-Sn70Pb30	183 bis 192	Elektrogerätebau, Miniaturtechnik, Elektronik
	S-Pb78Sn20Sb2	183 bis 270	Klempnerarbeiten
	S-Sn63Pb37P	183	Kupferinstallation für Warm- und Kaltwasser
	S-Sn90Pb10	183 bis 215	Elektroindustrie, für hohe Betriebstemperatur
	S-Pb95Sn3Ag2	304 bis 310	Klempnerarbeiten
	S-Cd95Ag5	340 bis 395	Elektroindustrie, für hohe Betriebstemperatur
	S-Sn99Cu1	227	
	S-Sn91Zn9	199	
	S-Sn52In48	118	
Schwermetallweichlote (DIN EN ISO 9453) Bleifreie Sn-Cu-Lote, Bleifreie Sn-Cu-Ag-Lote	S-Sn96Ag4	221	Elektronik, Leiterplatten (SMD-Technik)
	S-Sn97Ag3	221 bis 230	
	S-Sn96Ag3Cu1	221 bis 224	
	Sn99Cu.7C	227	
	Sn96Ag04E	221	Elektronik, Leiterplatten
Schwermetallweichlote (DIN EN 61190-1-3) Bleifreie Elektroniklote	Sn96Ag03Cu04E	217	
	Sn99	232	
Aluminiumweichlote (DIN 1707-100)	In52Sn48C	118	
	S-Zn95Al5	380 bis 390	Ultraschall- und Ofenlöten
AI Aluminiumhartlote (DIN EN 1044)	AL 102 (L-AlSi7,5)	575 bis 615	Elektrotechnik, Elektronik, lochplattierte Bleche
	AL 103 (L-AlSi10)	575 bis 590	Elektrotechnik, Elektronik, lochplattierte Bleche
	AL 104 (L-AlSi12)	575 bis 585	Elektrotechnik, Elektronik
AG Silberhartlote (DIN EN 1044)	AG 101 (L-Ag60Sn)	620 bis 685	Gas- und Wasserinstallation
	AG 106 (L-Ag34Sn)	630 bis 730	Gas- und Wasserinstallation
	AG 304 (L-Ag40Cd)	595 bis 630	Elektrotechnik, Kältetechnik, Kfz-Zulieferindustrie
Silberhartlote (DIN EN ISO 3677)	B-Ag60CuSn-600/730	600 bis 730	Löten von CrNi-Stählen, Titan
	B-Ag44CuZn-675/735	675 bis 735	Für Lötzstellen mit Betriebstemperaturen bis 200 °C
	B-Cu36AgZnSn-630/730	630 bis 730	Für Lötzstellen mit Betriebstemperaturen bis 200 °C
CP Kupfer-Phosphorhartlote (DIN EN 1044)	B-Ag40ZnCdCu-595/630	595 bis 630	Stähle, Cu, Cu-Legierung, Ni, Ni-Legierung
	CP 201 (L-CuP8)	710 bis 770	Kupfer, Rotguss, Kupfer-Zink-Legierungen
	CP 202 (L-CuP7)	710 bis 820	Hartmetallwerkzeuge
Kupfer-Phosphorhartlote (DIN EN ISO 3677)	CP 203 (L-CuP6)	710 bis 890	
	B-Cu80AgP-645/800	645 bis 800	Verbindungen, die mit Trinkwasser in Berührung kommen. Cu mit Cu ohne Flussmittel, mit Flussmittel für Messing, Bronze
	B-Cu89PAg-645/815	645 bis 815	
CU Kupferhartlote (DIN EN 1044)	B-Cu93P-710/820	710 bis 820	
	CU 101 (L-Cu)	1085 bis 1085	Stähle
	CU 103 (-)	1085 bis 1085	Stähle
NI und CO Nickel- und Kobalthartlote (DIN EN 1044)	CU 202 (L-CuSn12)	825 bis 990	Eisen- und Nickelwerkstoffe
	NI 102 (L-Ni2)	970 bis 1000	
	NI 106 (L-Ni6)	875 bis 875	
PD Palladiumhartlote (DIN EN 1044)	NI 108 (L-Ni8)	980 bis 1010	Nickel, Kobalt und ihre Legierungen, legierte Stähle
	CO 101 (-)	1120 bis 1150	
	PD 101 (-)	900 bis 950	
AU Goldhartlote (DIN EN 1044)	PD 102 (-)	875 bis 900	Typische Vakuumhartlote
	PD 201 (-)	1235 bis 1235	Turbinen- und Reaktorbau
	PD 203 (-)	1080 bis 1090	Radio- und Elektronenröhren
	AU 101 (-)	905 bis 910	
	AU 102 (-)	930 bis 940	
	AU 104 (-)	995 bis 1020	

5.7 Gestaltung von Lötverbindungen

5.7.1 Allgemeines

Die konstruktive Gestaltung der Lötverbindungen muss eine Reihe von löt- und fertigungs-technischen Bedingungen sicherstellen, sodass

- die für den Lötprozess erforderlichen physikalischen und chemischen Vorgänge (Bennetzen, Lot-Ausbreitung) stattfinden können,
- eine wirtschaftliche Fertigung möglich ist,
- auftretende Kräfte sicher übertragbar sind.

Voraussetzungen hierfür sind die

- richtige Wahl der Lötspaltbreite und die
- lötgerechte Gestaltung der Lötverbindung.

5.7.2 Gestaltungsregeln

Die Wahl der Lötspaltbreite ist abhängig von der

- verwendeten Lotart,
- Art der Lotzufuhr bzw. der Fertigung,
- Art des verwendeten Schutzmediums,
- Spaltbreitenänderung bei Erwärmung.

Die Form der Lötstelle soll gewährleisten, dass

- der Lötspalt gleichmäßig die gesamte Lötfläche umschließt,
- ein Unterbrechen des Lötspalts vermieden wird,
- das Flussmittel entweichen kann,
- keine Spannungskonzentration auftritt.

Wahl und Form der Spaltbreite

Die Spaltbreite ist abhängig von dem angewandten Lötverfahren (Abb. 5.136) und der Art des Lotes. Die dünnflüssigen eutektischen Lote erfordern enge Lötspalte. Da ihr kapillarer Fülldruck hoch ist, können sie großflächige Lötfügen hervorragend ausfüllen. Lote mit großem Erstarrungsintervall sind dickflüssiger, daher

müssen die Spaltbreiten größer sein. Die Spaltbreite muss außerdem möglichst konstant bleiben. Eine Breitenzunahme in der Fließrichtung des Lotes führt zu einer starken Abnahme des kapillaren Fülldrucks p_k , d. h., die weitere Ausbreitung des Lotes im Spalt ist unmöglich. Ein sich in Fließrichtung verengender Spalt saugt dagegen das Lot in den Spalt. Die Lage der Lotformteile bei Massenlötungen ist daher in Abhängigkeit von der Fließrichtung des Lotes festzulegen, Abb. 5.145. Plötzliche Querschnittsänderungen des Spaltes sind ebenso nachteilig wie z. B. keil- oder trichterförmige Spalterweiterungen. Der Lotverbrauch ist groß und die Bildung von Schwindungslunkern wahrscheinlich. Sind Anordnungen wie in Abb. 5.145 konstruktiv oder fertigungstechnisch nicht möglich, dann müssen geeignete Lotformteile vorgesehen werden.

Die notwendigen Platzwechselvorgänge innerhalb der Flussmittel-Lot-Kombination laufen umso unvollständiger ab, je größer die Lötfläche und je länger die Lotflusswege sind. Die damit verbundenen Probleme der Flussmitteleinschlüsse und einer nicht ausreichenden Formfüllung der Lötfläche lassen sich konstruktiv durch Verkürzen der Lotflusswege und (oder) mittels Abflussöffnungen für das Flussmittel beheben.

Oberflächenfeingestalt der Lötstellen

Die (mittlere) Rautiefe R_z ist wesentlich für das Vermögen des Lotes, Oberflächen zu benetzen und sich auf ihnen auszubreiten. Die Rautiefen sollten nicht größer als 80 bis 100 μm

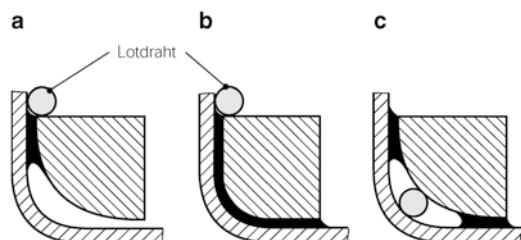


Abb. 5.145 Spaltquerschnitte, die sich in Fließrichtung des Lots **a erweitern**: sehr ungünstig (Lotfluss bleibt im Spalt „stecken“) **b nicht verändern**, d. h. die gleich breit sind: günstig **c verengen**: sehr günstig, das Lot verschiebt bei einem eingelegten Lotdraht in beide Richtungen. (nach Degussa)

sein, optimal im Bereich zwischen $1,6 \mu\text{m}$ und $25 \mu\text{m}$ liegen. Die Riefen bei geschruppten Oberflächen (Rautiefen $25 \mu\text{m}$ bis $> 100 \mu\text{m}$) müssen in Fließrichtung des Lotes angeordnet sein. Andernfalls wird das Verschießen des Lotes sehr behindert, die Füllung des Lötpaltes bleibt unvollständig.

5.7.3 Gestaltung gelöteter Blechverbindungen

In den folgenden Beispielen sind immer links die ungünstigen und rechts die zweckmäßigen Lösungen dargestellt. (Siehe Abb. 5.146 bis 5.149)



Abb. 5.146 Eine keil- oder trichterförmige Ausbildung des Lötpaltes sollte vermieden werden, da sie eine Verminderung der Festigkeit, Erhöhung des Lotverbrauchs (d. h. unwirtschaftlich) und Bildung von Fehlstellen (Lunker) zur Folge hat

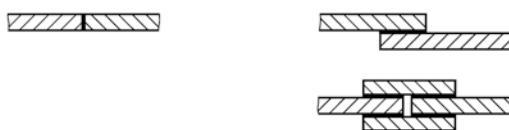


Abb. 5.147 Bei Stumpf lötungen wird die Festigkeit des Grundwerkstoffs nicht ausgenutzt (Lotfestigkeit geringer als Werkstofffestigkeit). Überlapp- und Laschenverbindungen ermöglichen eine größere Lötfläche



Abb. 5.148 Eckverbindungen sollten stets überlappt ausgeführt werden. Mit dieser Maßnahme lässt sich die Lötfläche vergrößern, um die zu übertragende Kraft aufzunehmen

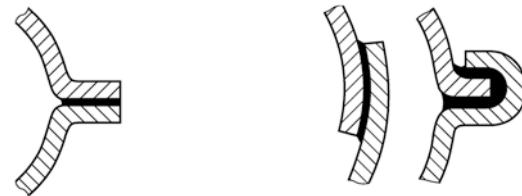


Abb. 5.149 Bei Dünblechbehältern neigt die Querüberlappung zum Abheben. Bei der Falznaht ist die Lötverbindung teilweise mechanisch entlastet und übernimmt vorwiegend Dichtfunktionen (aber teuer)

5.7.4 Gestaltung gelöteter Rundverbindungen

(Siehe Abb. 5.150 und 5.157)

Abb. 5.150 Beim Verbinden eines Bolzens mit einer Platte ist die Stumpflötung zu vermeiden. Steckverbindungen verringern die Beanspruchung und sind wegen der größeren Nahtfläche höher beanspruchbar

Abb. 5.151 Beim Einlöten von Bolzen in Grundlöcher muss für eine Entlüftung gesorgt werden, damit das Flussmittel entweichen kann. Andernfalls sind Flussmittel einschlüsse die Folge

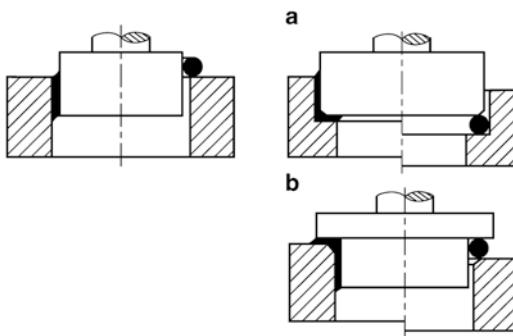


Abb. 5.152 Eine einwandfreie Lötverbindung zwischen einer Buchse und einem Bolzen kann durch einen Absatz in der Buchse (a) bzw. im Bolzen (b) sichergestellt werden. In den Absatz wird das Lotdepot in Form eines Lotringes eingelegt

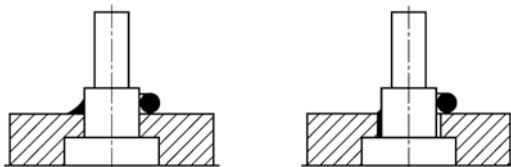


Abb. 5.153 Die Lötfügen müssen so gestaltet sein, dass das Lot gut einfließen und sich möglichst ungehindert ausbreiten kann. Eine *ausreichende Spaltbreite b* ist erforderlich

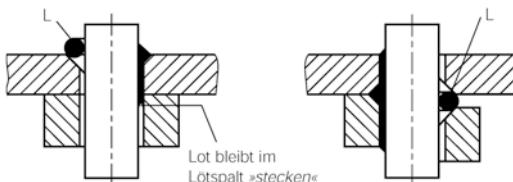


Abb. 5.154 Ein Lotdepot L soll so eingelegt werden, dass möglichst *kurze* Wege für den Lotfluss im parallelen Spalt gewährleistet sind. Dadurch wird das Ausfüllen längerer Fließwege im Lotspalt erleichtert

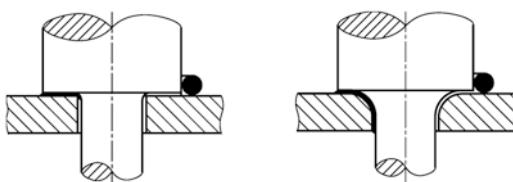


Abb. 5.155 Verengungen im Lötspalt beeinträchtigen den Durchfluss des mit Oxiden angereicherten Flussmittels. In Spalten und in Rundungen muss die Spaltbreite äquidistant bleiben



Abb. 5.156 Ein allmäßlicher Übergang der Nabe zur Welle erzeugt eine geringere Kerbwirkung. Das ist besonders wichtig bei dynamisch beanspruchten Verbindungen

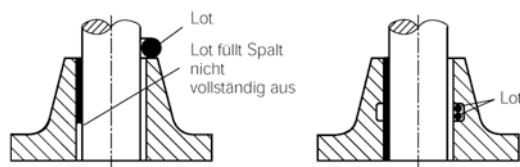


Abb. 5.157 Durch zweckmäßige Anordnung des Lotes kann der Fließweg verkleinert und die Lagesicherung des Lotes besser gewährleistet werden

5.7.5 Gestaltung gelöteter Rohrverbindungen

(Siehe Abb. 5.158 bis 5.163)

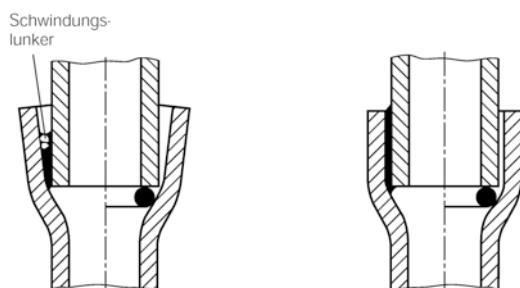


Abb. 5.158 Bei der Lötverbindung der beiden Rohre muss das aufnehmende Rohrende möglichst zylindrisch aufgeweitet werden, damit sich äquidistant verlaufende Lötspalte ergeben

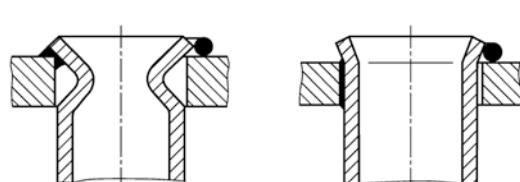


Abb. 5.159 Der Lötspalt darf nicht unterbrochen werden, da das Lot die Aufweitung des Spalts nicht überbrücken kann. Als Folge der unzureichenden Kapillarwirkung kann das Lot nicht mehr „verschießen“

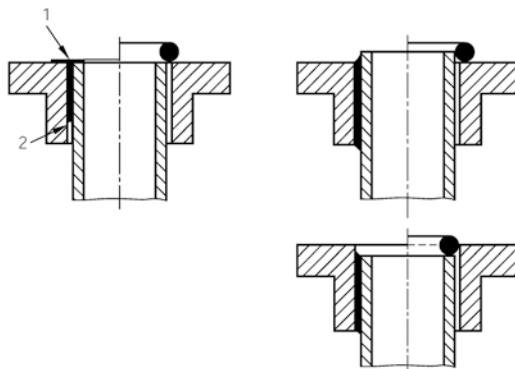


Abb. 5.160 Zum Anlöten von Flanschen an Rohre ist ein Absatz zwischen Flansch und Rohr zur Lotaufnahme zweckmäßig. Sonst verteilt sich das Lot großflächig über die Oberfläche (1). Dann kommt es nicht zu der gewünschten Bindung zwischen Rohr und Flansch. Außerdem wird der vorgegebene Lötspalt nicht vollständig ausgefüllt (2)

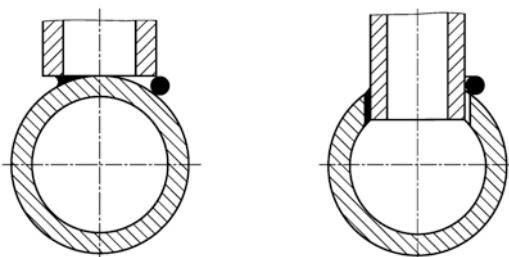


Abb. 5.162 Lotanhäufungen vermeiden, denn Lot ist relativ teuer. Zudem hat es eine deutlich geringere Festigkeit als der Grundwerkstoff. Das Einarbeiten bzw. Anpassen des Rohres ergibt eine einwandfreie Verbindung

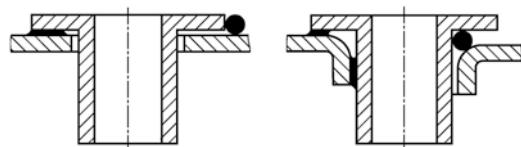
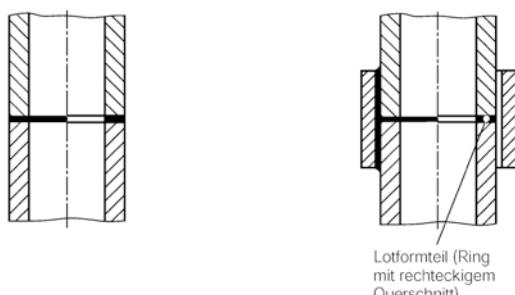


Abb. 5.163 Der Lotring muss so eingelegt werden, dass das Lot durch Kapillarwirkung in den Lötspalt gesaugt werden kann



Lotformteil (Ring mit rechteckigem Querschnitt)

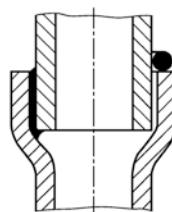


Abb. 5.161 Rohre mit Wanddicken $> 1 \text{ mm}$ lassen sich stumpf aneinander löten. Aber genaues Ausrichten ist erforderlich (zeitaufwändig und teuer!). Muffen- und Steckverbindungen bieten ausreichend große Lötflächen

5.7.6 Gestaltung gelöteter Bodenverbindungen

(Siehe Abb. 5.164 und 5.165)

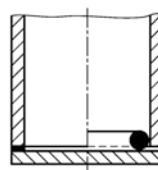


Abb. 5.164 Stumpflötungen von Böden sind zu vermeiden, weil die Lötfläche bei einer überwiegenden Zugbeanspruchung (Innendruck!) zu gering ist. Zweckmäßig ist ein Absatz zwischen Boden und Rohr zur Lotaufnahme

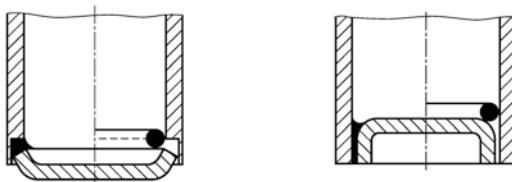


Abb. 5.165 Keinen keilförmigen Spalt vorsehen. Die zu fügenden Teile müssen zylindrisch sein, damit sich äquidistante Lötpalte ergeben. Eine andere zweckmäßige Maßnahme besteht darin, das Lot in Richtung eines sich verengenden Spaltes fließen zu lassen (s. auch Abb. 5.147)

5.8 Kleben

Das Verbinden von Fügeteilen wird beim Kleben durch eine dünne Klebstoffsicht erreicht. Die Festigkeit der geklebten Verbindung hängt von der Eigenfestigkeit (Kohäsion) und den Verformungseigenschaften des Klebstoffs sowie von den Bindekräften zwischen Klebstoffsicht und der Fügeteiloberfläche (Adhäsion) ab. Diese Grenzschichten sind von besonderer Bedeutung, Abb. 5.166.

Weitere Einflussgrößen sind die Eigenschaften der Fügeteilwerkstoffe und die Abmessungen. Die Wirksamkeit der Bindekräfte in der Grenzschicht kann durch Vorbehandlung der Klebflächen beeinflusst werden.

Die Festigkeit der Klebstoffe ist im Vergleich zu den Metallen verhältnismäßig gering. Damit die Tragfähigkeit einer Metallklebung und die

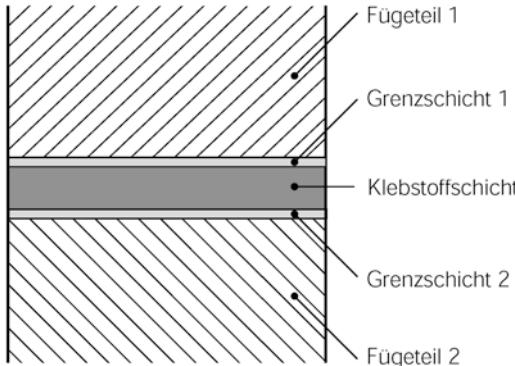


Abb. 5.166 Aufbau einer Kleverbindung

der geklebten Werkstoffe annähernd gleich sind, müssen genügend große Klebflächen vorgesehen werden.

Die Konstruktion der Klebfuge sollte so ausgebildet werden, dass die zu übertragenden Kräfte möglichst in Richtung der Klebebene angreifen, also als Scherkräfte. Für die Aufnahme von Biege- und Schälkräften sind Klebungen weniger geeignet.

Eine Übersicht über die in der Klebstoff verarbeitenden Industrie verwendeten Begriffe, Benennungen und Definitionen enthält DIN EN 923.

5.8.1 Wirkprinzip des Klebens

Die Kraftübertragung in einer Kleverbindung ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Adhäsions- und Kohäsionskräften³⁰. Dabei werden die Kräfte zwischen den Klebstoff- und Fügeteilmolekülen als Adhäsion zusammengefasst und jene Kräfte, die zwischen den einzelnen Klebstoffmolekülen wirken als Kohäsion definiert, Abb. 5.167.

Die **Adhäsion** kann nur wirksam werden, wenn der Klebstoff die Fügeteile vollständig

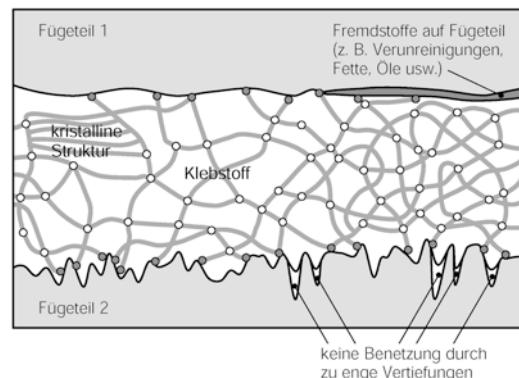


Abb. 5.167 Adhäsionskräfte (●) und Kohäsionskräfte (○) im Klebspalt. (nach Fa. DELO Industrie Klebstoffe)

³⁰ Kleben. Podcast des IFAM Bremen. Fertigungstechnik: Youtube wissensfloater.

benetzt. Deshalb müssen die Oberflächen vor dem Kleberauftrag gereinigt werden, damit Verunreinigungen oder Trennmittel, Lötstopp-lacke, Silicone oder Fettreste die Benetzung durch den Klebstoff nicht behindern. Da sämtliche adhäsiven Kräfte in einem Abstand zwischen 0,1 und 1 nm wirken, können geeignete Vorbehandlungen der Oberflächen eine wesentliche Festigkeitssteigerung von Klebverbindungen bewirken. Im Gegensatz zu diesen in den Grenzschichten wirkenden chemischen Wechselwirkungen spielt die mechanische Verklammerung in Hinterschneidungen nur bei sehr porösen Werkstoffen eine Rolle, wie z. B. bei Holz oder offenporigen Schäumen.

Unter dem Begriff **Kohäsion** fasst man die Kräfte zusammen, die den Zusammenhalt des Klebstoffs bestimmen. Das gilt zum einen für die Zähigkeit eines unausgehärteten Klebstoffs bei der Verarbeitung und zum anderen auch für seine Festigkeit nach der Aushärtung. Bei der Kohäsion spielen sowohl chemische Bindungen im Molekül, als auch physikalische (*Van-der-Waals-Kräfte*) eine Rolle. Außerdem führt die Verknäulung fadenförmiger Moleküle oder faseriger Stoffbestandteile zu einem Formschluss.

Die **Oberflächenspannung** von Fügeteilen und Klebstoffen spielt eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Klebfähigkeit. Sie wird als die Spannung definiert, die die Oberfläche eines Stoffes bei gegebenem Volumen zu verkleinern sucht, also die Kugelform anstrebt. Sie tritt am auffälligsten an der Oberfläche von Flüssigkeiten auf, da diese der Oberflächenspannung nachgeben können. Der Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung, Oberflächenenergie und Benetzungswinkel ergibt sich aus der *Young'schen Gleichung*:

$$\sigma_{FG} = \gamma_{KF} + \sigma_{KG} \cdot \cos \alpha.$$

Diese Zusammenhänge zeigt Abb. 5.168.

In der Praxis lässt sich die Oberflächenspannung eines Werkstoffs als Schnelltest mit Prüftinten ermitteln. Diese weisen jeweils eine

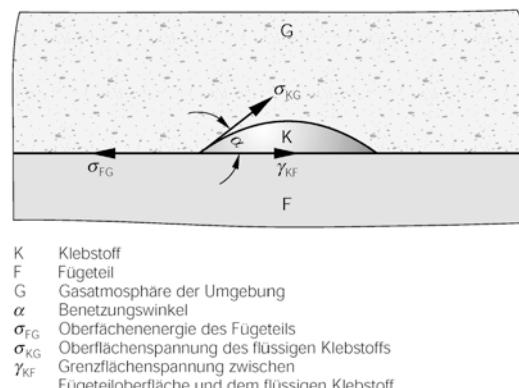


Abb. 5.168 Einfluss der Oberflächenspannungsverhältnisse auf den Benetzungswinkel α

definierte Oberflächenspannung auf und werden einzeln auf den Prüfling aufgetragen. Nach etwa 2 s sieht man, ob die Prüftinte verläuft oder sich zusammenzieht. Als Oberflächenspannung gilt näherungsweise der Wert der Prüftinte, die sich auf der Oberfläche gerade noch nicht zusammenzieht.

Die **Benetzung** des Fügeteils durch den Klebstoff ist also eine wichtige Voraussetzung für die Ausbildung hoher Bindungskräfte. Beim Kleben gilt der Benetzungsgrundsatz: Die Oberflächenspannung des Klebstoffs muss kleiner als die Oberflächenenergie des Fügeteils sein. Tab. 5.19 zeigt Beispiele für die Oberflächenenergien verschiedener Werkstoffe. Zum Vergleich sei aufgeführt, dass der Wert für destilliertes Wasser bei 73 mN/m und für einen typischen Klebstoff bei ca. 35 mN/m liegt.

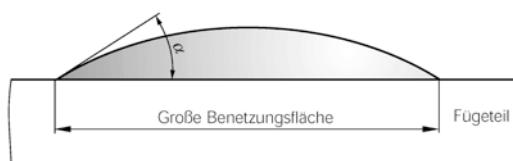
Ein kleiner Benetzungswinkel α ist das Maß für die gute Benetzungsfähigkeit eines Klebstoffs auf einem festen Fügeteil, ein großer Winkel α wird ein schlechtes Klebergebnis zur Folge haben, Abb. 5.169.

Wenn der Klebstoff auf dem Substrat kein ausreichend gutes Benetzungsverhalten zeigt, könnte eine Verunreinigung vorliegen. Falls auch nach einer Reinigung mit einem rückstandslosen Reiniger keine Verbesserung der Oberflächenspannung eintritt,

Tab. 5.19 Oberflächenenergie einiger Werkstoffe (nach Fa. DELO Industrie Klebstoffe)

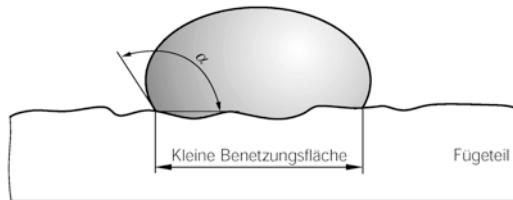
Oberflächenenergie in mN/m							
Teflon	PP	PE	PS	PMMA	PVC	Epoxid	PA
19	29	31	34	33 – 44	40	47	49 – 57
Silber	Gold	Kupfer	Titann		Eisen		
1250	1550	1850	2050		2550		

Gute Benetzung:



- Benetzungswinkel α ist klein
- Oberflächenspannung $\sigma_{\text{Substrat}} > \sigma_{\text{Klebstoff}}$
- Adhäsionsarbeit > Kohäsionsarbeit

Schlechte Benetzung:



- Benetzungswinkel α ist groß
- Oberflächenspannung $\sigma_{\text{Substrat}} < \sigma_{\text{Klebstoff}}$
- Adhäsionsarbeit < Kohäsionsarbeit

Abb. 5.169 Benetzungswinkel α als Kennzeichen der Klebfähigkeit

sollte eine geeignete Vorbehandlung der Oberflächen durchgeführt werden.

5.8.2 Vorbehandlung zur Steigerung der Klebfestigkeit

Die **Oberflächenbehandlung** der Fügeflächen ist maßgebend für die Festigkeit und vor allem für die Beständigkeit der Klebung gegen schädliche Umwelteinflüsse (speziell das Einwirken von Feuchtigkeit).

Die Haftfähigkeit der Klebeflächen lässt sich gegenüber dem alleinigen Entfetten in fast allen

Fällen mithilfe nachfolgender mechanische oder chemische Behandlungen verbessern. Dadurch erreicht man nicht nur erhöhte Festigkeitswerte mit geringerer Streuung, sondern auch fast immer eine Erhöhung der *Alterungsbeständigkeit* der Klebung.

Zur mechanischen Behandlung eignen sich ausreichend harte Bürsten, das Schmirgeln oder Schleifen (ohne Schmiermittel) und das Strahlen mit fettfreiem Strahlmittel und fettfreier Druckluft. Für Schleif- und Strahlmittel werden nach DIN ISO 525 Korngrößen von 100 bis 150 empfohlen. Nach dem mechanischen Behandeln sind Staubreste sorgfältig zu entfernen.

Chemische Oberflächen-Vorbehandlungsverfahren eignen sich im Wesentlichen für Aluminium- und Titanlegierungen. Hier erbringen sie (gegenüber mechanischer Behandlung) vorzugsweise verbesserte Beständigkeit der Klebungen. Beim Beizen unter erhöhter Temperatur (z. B. Pickling, Chemoxal) verdunstet Wasser. Daher muss über einen Niveauregler die verdunstete Wassermenge fortlaufend ergänzt werden. Die Zusammensetzung der Beizlösungen ändert sich durch reaktive Vorgänge an den Metalloberflächen und ist insbesondere bei längerem Gebrauch der Bäder zu kontrollieren und zu regulieren (Arbeitsanwendungen der Beizmittelhersteller beachten).

Hinweise über die *Vorschriften des Umweltschutzes* geben die Gewerbeaufsichtsämter. Verbrauchte Beizlösungen und das Spülwasser dürfen entsprechend den gesetzlichen Vorschriften erst nach durchgeföhrter Reduktion, Neutralisation und Abtrennung des Chroms (im Falle der Pickling-Beize) in Abwasserleitungen oder Gewässer abgelassen werden.

Als **Nachbehandlung** müssen die Fügeteile nach jedem chemischen Behandlungsschritt der Nassverfahren mit voll entsalztem Wasser gespült und getrocknet werden. Auf diese Trocknung (z. B. mit erwärmer Luft) kann nur verzichtet werden, wenn der einen Nassbehandlung unmittelbar eine weitere folgt. Die Art der Nassbehandlung ist für die Güte der Klebung von wesentlichem Einfluss. Durch unsachgemäßes oder unvollständiges Nachbehandeln kann

die Wirksamkeit chemischer Oberflächenbehandlungsverfahren wieder aufgehoben oder sogar ins Gegenteil verkehrt werden.

Spülen mit Wasser dient dazu, Chemikalienreste zu entfernen. Das Nachspülen mit vollentsalztem oder destilliertem Wasser verhindert, dass sich Salze auf der Klebefläche ablagern können. Die einzelnen Spülvorgänge beeinflussen die Oberflächen bezüglich der Wirksamkeit des Haftgrundes in einer sehr unterschiedlichen Weise.

Zum Trocknen unmittelbar nach dem Spülen wird oft ein Warmluftofen mit Luftumwälzung benutzt. Hierbei ist auf Sauberkeit und Staubfreiheit zu achten. Bei Aluminiumfügeteilen soll die Temperatur im Ofen nicht über 65 °C betragen. Die Teile müssen vollständig trocken sein, wenn der Klebstoff aufgetragen wird. Andernfalls kommt es zu beträchtlichen Festigkeitseinbußen der Klebverbindung.

Art und Umfang der jeweils notwendigen Vorbehandlung der Klebeflächen hängen auch von den geforderten Beanspruchungen ab. Als Beispiel für die mechanische Beanspruchbarkeit wird hier die Zugscherfestigkeit nach DIN 54455 gewählt, Tab. 5.20.

Bei der Berechnung von Klebverbindungen sind die Scherfestigkeit τ_{kl} und $R_{p0,2}$ grundsätzlich nur für den Fall einer statischen und rein mechanischen Beanspruchung gültig. Liegt

dagegen eine Dauerbeanspruchung vor und kommen weitere die Festigkeit mindernde Einflüsse hinzu, müssen entsprechend reduzierte Werte eingesetzt werden. Durch die Deformationsmechanik treten an den Überlappungsenden erhebliche Spannungsspitzen auf, Abb. 5.170.

Diese müssen bei den Berechnungen durch einen Sicherheitsfaktor 2 bis 3 berücksichtigt werden. Als praktische Maßnahme gegen das Ablösen der Fügeteilenden können sog. Schälsicherungen vorgesehen werden, z. B. Nieten, Umfalten oder Vergrößern der Steifigkeit durch aufgeklebte Laschen.

5.8.3 Vorbereitung der Klebung

Klebungen sollten in staubfreien, gut belüfteten Räumen mit einer Raumtemperatur zwischen 18 °C und 25 °C ausgeführt werden. Die relative Luftfeuchtigkeit sollte im Allgemeinen nicht mehr als 65 % betragen.

Das Reinigen und Entfetten muss grundsätzlich für alle Klebeflächen vorgesehen werden. Nur bei Plastisol-Klebstoffen kann mitunter auf das Entfetten verzichtet werden. Auch blank erscheinende Metalloberflächen sind meist nicht frei von Öl oder Fett (Schmiermittel von der Bearbeitung, Korrosionsschutzmittel). Dadurch wird die Benetzung durch den Klebstoff beein-

Tab. 5.20 Beanspruchbarkeit von Klebverbindungen (nach Brockmann)

Beanspruchung	Eigenschaften, Anwendbarkeit
Niedrig	
Zugscherfestigkeit Umgebung Einsatzgebiete	bis 5 N/mm ² Klima in geschlossenen Räumen, kein Kontakt mit Wasser Feinmechanik, Elektrotechnik, Modellbau, Schmuckindustrie, Möbelbau, einfache Reparaturen
Mittel	
Zugscherfestigkeit Umgebung Einsatzgebiete	bis 10 N/mm ² gemäßiges Klima, Öl, Treibstoffe Maschinenbau, Fahrzeugbau, Reparatur
Hoch	
Zugscherfestigkeit Umgebung Einsatzgebiete	über 10 N/mm ² beliebiges Klima, direkte Berührung mit wässrigen Lösungen, Ölen, Treibstoffen, Lösungsmitteln (Beständigkeit der Klebstoffe beachten) Fahrzeugbau, Schiffbau, Behälterbau

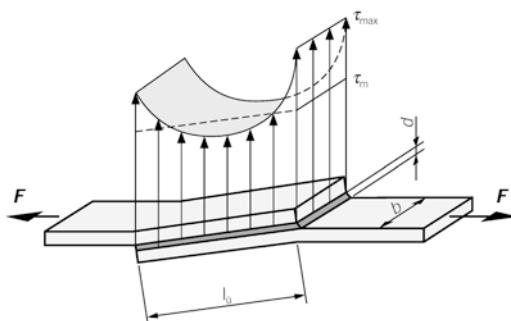


Abb. 5.170 Verlauf der Scherspannungen bei Belastung einer einfach überlappten Klebverbindung

trägt, was eine ungenügende Adhäsion zur Folge hat.

Das Entfetten kann mit organischen Lösungsmitteln im Lösungsmitteldampfbad, im Tauchbad oder behelfsmäßig durch Abspülen vorgenommen werden. Ein Lösungsmitteldampfbad besteht aus einem Behälter (z. B. aus verzinktem Eisenblech), auf dessen Boden eine Heizung angebracht ist oder der von außen beheizt wird. Dieser Behälter soll möglichst schmal gebaut und mit einem Deckel abgeschlossen sein. Im Behälter wird Lösungsmittel beim Beheizen verdampft, Tab. 5.21, und unterhalb des Behälterrandes in einer Kühzone kondensiert.

Die zu entfettenden Teile werden in die Entfettungszone eingebracht. Der an ihnen kondensierende Dampf tropft als Kondensat mit dem gelösten Fett in den Lösungsmittelsumpf zurück. Die Lösungsmittel sind im Dampfzustand fettfrei, sodass eine gute Entfettung erzielt wird. Der Entfettungsvorgang ist beendet, wenn die zu entfettenden Teile die Temperatur des Dampfes erreicht haben.

Tab. 5.21 Siedepunkt von Lösungsmitteln für Reinigungszwecke

Lösungsmittel	Siedepunkt in °C
Aceton	+ 56
Methylenchlorid	+ 42
Perchlorethylen	+ 121
Trichlorethylen	+ 87
1,1,1-Trichlorehthan	+ 74

Die Entfettung kann auch im Lösungsmittelbad durchgeführt werden, dessen Wirksamkeit sich durch zusätzliches Einwirken von Ultraschall wesentlich steigern lässt. Hierbei ist zu beachten, dass sich der Badinhalt mit Fett anreichert, sodass die Teile beim Herausnehmen nicht völlig fettfrei sind. Der Badinhalt muss daher kontrolliert und öfter erneuert werden. Erhöhte Sicherheit beim Tauchbad-entfetten bietet ein zusätzliches kurzes Abspülen der Fügeflächen mit reinem Lösungsmittel nach der Entnahme aus dem Bad.

Zum Entfetten mit wässrigen Reinigungsmitteln werden alkalische, neutrale oder saure Lösungen (z. B. Grisiron oder P3) verwendet. Entfettet wird bei höheren Temperaturen oder in einem Elektrolysebad (je nach den verbindlichen Verfahrensvorschriften der Lieferfirmen).

Alkalische Entfettungsmittel sind zum Entfernen von Walzölresten auf Blechen besser geeignet als organische Lösungsmittel. Nach dem Entfetten müssen die Fügeteile mit vollentsalztem oder destilliertem Wasser gespült und sofort getrocknet werden.

Nach der Vorbehandlung darf man die Klebeflächen nicht mehr mit bloßen Händen berühren. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass sich auf der behandelten Oberfläche vor dem Klebstoffauftrag kein Staub oder Öldampf ablagern kann. Eine Möglichkeit dazu besteht darin, die frisch behandelten Oberflächen durch Primer zu schützen.

5.8.4 Eigenschaften polymerer Werkstoffe

Ausgehärtete Klebstoffe und viele der zu verklebenden Materialien gehören zur Gruppe der hochpolymeren Werkstoffe. Diese werden synthetisch aus dem Rohstoff Erdöl hergestellt. Die Einteilung der Polymer-Werkstoffe in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere basiert auf dem strukturellen Aufbau der Moleküle. Dieser bestimmt das Verhalten der Kunststoffe in Abhängigkeit von der Temperatur.

Thermoplaste sind aus unvernetzten linearen oder verzweigten Kettenmolekülen aufgebaut, die bei Erwärmung bis zur Fließfähigkeit erweichen und beim Abkühlen wieder verfestigen. Diese reversiblen Zustandsänderungen werden ohne chemische Reaktionen durchlaufen. Das Polymersystem ist schmelzbar, schweißbar, aufquellbar und löslich. Je nach Kettenaufbau können diese Kunststoffe in amorphem oder teilkristallinem Zustand vorliegen. Bei ersterem wird der nutzbare Bereich durch den Glasübergangsbereich begrenzt, bei dem zweiten durch den Kristallit-Schmelzbereich, Abb. 5.171.

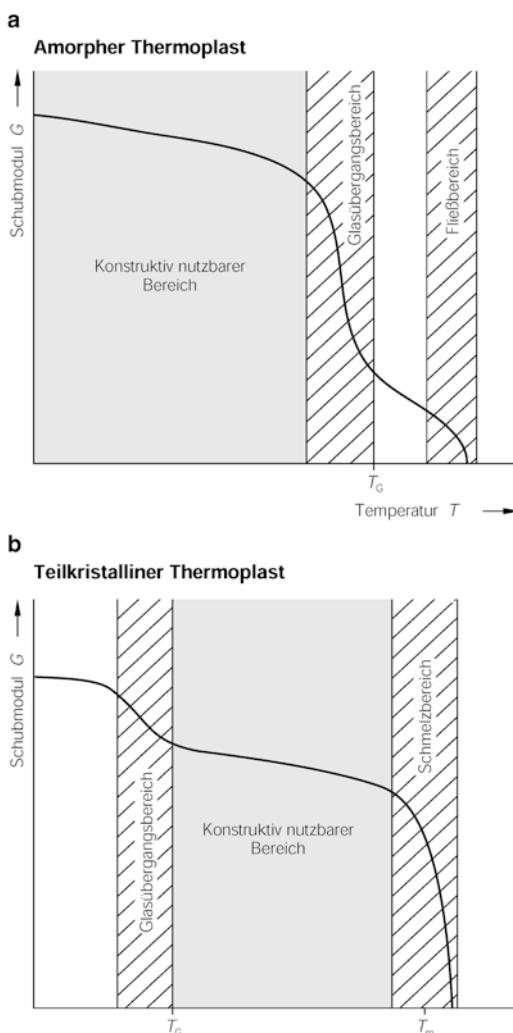


Abb. 5.171 Zustandsschaubilder typischer Thermoplaste. **a** Amorpher Thermoplast **b** teilkristalliner Thermoplast

Als Werkstoffbeispiele aus der Gruppe der Thermoplaste können aufgeführt werden:

- Polyamid für Gehäuse, Lager, Schrauben, Zahnräder;
- Polycarbonat für Displays, Gehäuse, CDs;
- Polyethylen für Schläuche, Folien, Behälter;
- PMMA für Schutzglas und Dachverglasung;
- Polystyrol für Telefongehäuse, Dämmplatten und Rückleuchten.

Beispiele für thermoplastische Klebstoffe sind die Schmelzklebstoffe („Hotmelts“). Thermoplaste selbst können bei richtiger Auswahl mit allen Reaktionsklebstoffen verklebt werden.

Duroplaste sind räumlich eng vernetzte Makromoleküle, die nach dem irreversiblen Aushärteprozess in einem starren bis spröden Zustand vorliegen. Sie verändern sich kaum mit steigender Temperatur, ihr nutzbarer Bereich endet beim Beginn des Zersetzungsbereichs, Abb. 5.172a.

Das Polymersystem ist temperaturstandfest, nicht schmelz- und schweißbar, unlöslich sowie nur schwach quellbar.

Als Werkstoffbeispiele aus der Gruppe der Duroplaste können aufgeführt werden:

- Polyester für Bootskörper;
- Polyurethan für Skistiefel und Schuhsohlen.

Beispiele für duromere Klebstoffe sind:

- Epoxidklebstoffe;
- Polyurethanklebstoffe;
- Acrylat-Klebstoffe.

Duroplaste können ebenfalls mit allen Reaktionsklebstoffen verklebt werden, wobei die Auswahl anwendungsspezifisch erfolgen muss.

Elastomere sind weitmaschig vernetzte Makromoleküle, die bis zum Zersetzungsbereich nicht flüssig werden, Abb. 5.172b. Eine typische Eigenschaft besteht in der z. T. von der Temperatur unabhängigen gummi-elastischen Verformbarkeit, da sich die verknäuelten Molekülketten zwischen den Vernetzungspunkten relativ weit dehnen können. Beim Nachlassen der äu-

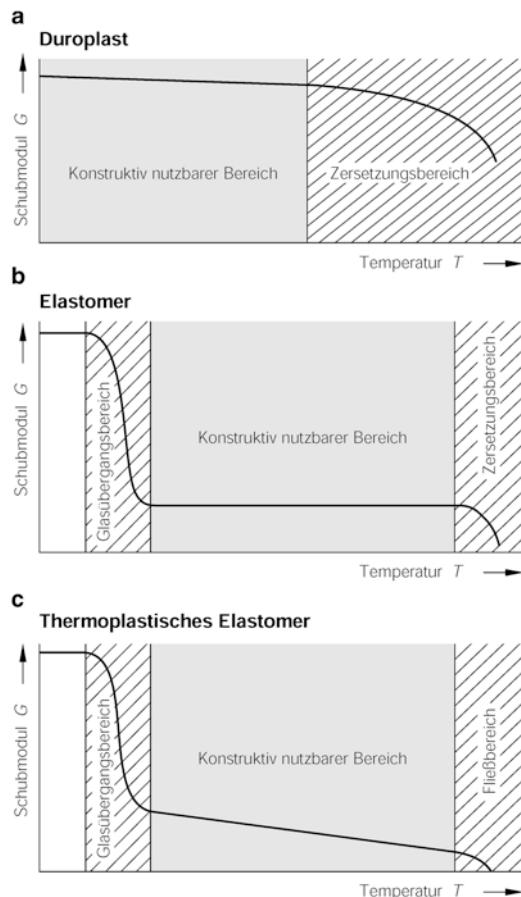


Abb. 5.172 Zustandsschaubilder verschiedener polymerer Werkstoffe. **a** Duroplast **b** Elastomer **c** thermoplastisches Elastomer

ßeren Kräfte nimmt das System wieder die ursprüngliche Lage ein. Das Polymersystem ist nicht schmelzbar und nicht löslich, aber durch die weitmaschige Vernetzung quellbar.

Als Werkstoffbeispiele aus der Gruppe der Elastomere können aufgeführt werden:

- Butadien-Kautschuk für Fahrzeugreifen;
- Silicone für Dichtungen aller Art.

Beispiele für elastomere Klebstoffe sind:

- Silicone;
- Acrylate.

Elastomere werden vorzugsweise mit Siliconen, Cyanacrylaten und Epoxidharzen verklebt.

Thermoplastische Elastomere nehmen eine Zwischenstellung ein. Sie sind meist löslich und zeigen ein mechanisches Verhalten wie die Elastomere. Oberhalb des nutzbaren Temperaturbereiches haben sie wie die Thermoplaste einen Fließbereich, sind also wiederholt verarbeitbar, Abb. 5.172c.

5.8.5 Klebstoffarten

Für das konstruktive Kleben von Metallen untereinander und mit anderen Werkstoffen können unterschiedliche Klebsysteme verwendet werden. Die Auswahl von Klebstoffen sollte nach anwendungstechnischen Kriterien vorgenommen werden, wie z. B.

- Auftragverfahren,
- Abbindebedingungen,
- Anforderungen an die Klebung.

Das folgende System der Klebstoffeinteilung nach dem Abbindemechanismus entspricht inhaltlich der VDI-Richtlinie 2229 hinsichtlich der Klebstoffauswahl unter konstruktiven, verfahrens- und kle 技术ischen Gesichtspunkten.

5.8.5.1 Physikalisch abbindende Klebstoffe

Bei diesen Klebstoffen ist die Entstehung der Klebschicht, das Abbinden, im Wesentlichen auf physikalische Prozesse zurückzuführen, wie z. B.

- Ablüften von Lösungsmitteln vor dem Fügen,
- Erstarren einer Schmelze oder
- Gelierung eines zweiphasigen Systems.

Die Klebstoffschichten sind thermoplastisch und haben somit eine stärkere Kriechneigung unter Belastung als chemisch vernetzte Systeme. Mit physikalisch abbindenden Klebstoffen werden zumeist gut verformbare Klebfugen mit

mittlerer Scherfestigkeit erreicht. Ein Zusatz von reaktiven Substanzen zur Verstärkung der Haftvermittlung bedeutet noch nicht, dass solche Systeme zu den chemisch reagierenden Klebstoffen gezählt werden.

Physikalisch abbindende Klebstoffe besitzen im Vergleich zu den Reaktionsklebstoffen im Allgemeinen nur eine geringe Wärme- und Lösungsmittelbeständigkeit.

Kontaktklebstoffe basieren auf gelösten Kautschuken, die durch Harze und Füllstoffe modifiziert sind. Man trägt sie beidseitig auf die Fügeteiloberflächen auf. Nach dem Ablüften der Lösungsmittel werden die Fügeteile unter kurzem, starkem Druck zusammengefügt und erreichen sofort eine relativ hohe Anfangsfestigkeit.

Schmelzklebstoffe trägt man in geschmolzenem Zustand auf. Die Mehrzahl der Produkte wird etwa zwischen 25 °C und 190 °C verarbeitet. Unmittelbar nach dem Auftrag müssen die zu verklebenden Teile vor dem Erstarren des Klebstoffs zusammengefügt werden. Die Klebwirkung wird erreicht durch die großen Kohäsionskräfte unterhalb des Erweichungspunktes und die Adhäsion auf unterschiedlichen Substraten.

Kleoplastisole sind lösungsmittelfreie Klebstoffe, die zum Abbinden eine Wärmeeinwirkung zwischen 140 °C und 200 °C benötigen. Sie bestehen aus einer Dispersion von PVC in Weichmachern mit Füllstoffen und Haftvermittlern. Eine besondere Eigenschaft von PVC-Plastisolen ist das Öl- und Fettaufnahmevermögen des Klebstoffs.

5.8.5.2 Reaktionsklebstoffe

Als Reaktionsklebstoffe werden solche Klebstoffsysteme bezeichnet, die vorher aus noch reaktionsfähigen niedermolekularen Verbindungen bestehen und während der chemischen Härtung in der Klebfuge in hochmolekulare, vernetzte Polymere überführt werden. Man unterscheidet je nach Reaktionstyp zwischen

- Polymerisations-,
- Polyadditions- und
- Polykondensationsklebstoffen.

In den meisten Fällen handelt es sich bei diesen Klebstoffen um flüssige bis pastenförmige oder filmförmige, lösungsmittelfreie Systeme. Die chemische Reaktion wird durch einen Härteter oder Katalysator ausgelöst, kann aber auch durch Einwirken erhöhter Temperaturen, von Luftfeuchtigkeit oder durch Entzug von Sauerstoff herbeigeführt werden.

Polymerisationsklebstoffe sind als Ein- oder Zweikomponentensysteme verfügbar. In jedem Fall wird die Polymerisation katalytisch ausgelöst. Zweikomponenten-Klebstoffe basieren auf Polymethylenacrylaten, ungesättigten Polyester oder anderen Vinylverbindungen.

Die Geschwindigkeit der Reaktion kann durch die Menge des zugesetzten Katalysators oder durch die Temperaturführung gesteuert werden. Neben den vor dem Auftrag zu mischenden Systemen gibt es solche, bei denen Komponente „A“ auf eine Seite des Fügeteils und Komponente „B“ auf die andere Seite aufgetragen werden müssen (Nomix-Verfahren). Das Abbinden bei diesen Systemen setzt erst nach dem Zusammenfügen der zu klebenden Teile ein. Dieses Verfahren wird u. a. zum **Aufkleben von Dehnungsmessstreifen (DMS) auf zu prüfende Bauteile** eingesetzt.

Bei den Einkomponenten-Polymerisationsklebstoffen auf der Basis von Cyanacrylaten wird die Reaktion durch die auf den Fügeteiloberflächen vorhandenen polaren Substanzen ausgelöst (Feuchtigkeit). Klebstoffe, die durch Luft stabilisiert werden und erst in der Klebfuge unter Ausschluss von Luft polymerisieren, nennt man anaerob abbindend. Dies sind Acrylverbindungen, deren chemischer Aufbau dem des Kunstglases ähnelt.

Polyadditionsklebstoffe sind dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei chemisch unterschiedliche Stoffe in einem stöchiometrischen Verhältnis gemischt werden und miteinander reagieren. Die Reaktion beginnt, wenn beide Komponenten in reaktionsfähigem Zustand aufeinandertreffen. Polyadditionsklebstoffe sind sowohl ein- als auch mehrkomponentig verfügbar. Die wesentlichen Eigenschaften solcher Systeme sind die sehr geringen Volumenänderungen

und die im Vergleich zu Polymerisationsklebstoffen geringe Reaktionsgeschwindigkeit. Als Basis dienen in den meisten Fällen Epoxidharz oder reaktives Polyurethan. Während die zweikomponentigen Systeme flüssig bis pastös eingestellt sind und schon bei Raumtemperatur abbinden, benötigen die einkomponentigen Klebstoffe (sowohl flüssig, pastenförmig, in fester Form und als Klebefilm lieferbar) erhöhte Temperaturen zum Abbinden.

Polykondensationsklebstoffe reagieren unter Abspaltung flüchtiger Stoffe. Daher ist zu ihrem Abbinden mindestens ein Pressdruck von 40 N/cm^2 erforderlich. Für konstruktive Metallklebungen kommen im Wesentlichen Klebstoffe auf der Basis eines flüssigen Phenol-Formaldehyd-Harzes oder eines festen Polyvinylformaldehyds zum Einsatz, die bei einer Temperatur von 120°C bis 160°C abbinden. Auf gleicher Basis sind auch filmförmige Klebstoffe erhältlich.

Eine weitere relativ neue Gruppe von Polykondensationsklebstoffen mit besonders hoher Temperaturbeständigkeit basiert auf Polyamid oder Polybenzimidazol. Für die Verarbeitung dieser Klebstoffsysteme sind Temperaturen oberhalb von 230°C bei einem Druck von 80 bis 100 N/cm^2 zum Abbinden erforderlich.

Klebstoffe und ihre Komponenten lassen sich nur begrenzt lagern. Die zulässige Lagerzeit ist von den Lagerungsbedingungen, vor allem von der Temperatur abhängig. Als Richtwert für die Lagerzeit können 3 bis 12 Monate gelten. Die Vorschriften der Hersteller sind genau einzuhalten.

5.8.6 Herstellung der Klebung

Mischen der Mehrkomponenten-Klebstoffe

Mehrkomponenten-Klebstoffe werden in der Regel vor dem Auftragen gemischt. Die Zeit zwischen dem Mischen und dem Gelieren des Klebstoffs ist die sog. *Topfzeit*, während der die Mischung verarbeitet werden muss (Angaben der Hersteller beachten). Die Topfzeit ist von der Größe des Klebstoffansatzes, von der Menge des Härters und von der Temperatur abhängig.

Das Abbinden läuft als exotherme Reaktion, daher erwärmt sich der Klebstoffansatz. Diese Erwärmung beschleunigt den Vernetzungsprozess und verkürzt damit die Topfzeit. Bei großen Klebstoffansätzen ist die Wärmeableitung schlechter und damit die Topfzeit kürzer als bei kleineren Mengen. Durch die entstehende Wärme wird die Viskosität der Mischung herabgesetzt, wodurch eine zu lange Topfzeit vorgetäuscht wird. Eine Verlängerung der Topfzeit ist in der Regel durch Kühlen der Mischung möglich. Die Probleme einer zu kurzen Topfzeit lassen sich durch Einsatz automatischer Mischanlagen umgehen.

Auftragen des Klebstoffs

Der Klebstoff soll möglichst unmittelbar nach der Oberflächenbehandlung auf die Klebeflächen aufgetragen werden. Je frühzeitiger dies geschieht, desto größer sind die Sicherheit und die Festigkeit der Klebung. Viskoze Klebstoffe können mittels Pinsel, Spachtel oder Spritzen von Hand aufgebracht werden, Abb. 5.173. Die Menge richtet sich hauptsächlich nach der Fugendicke. Wichtig ist, dass die Fuge vollständig mit Klebstoff gefüllt ist. Die optimale Klebstoffdicke d ist den Angaben der Hersteller zu entnehmen.

Größere Mengen von Klebstoffen werden meist mit automatisch arbeitenden Geräten auf-



Abb. 5.173 Dosierung kleiner Klebstoffmengen von Hand

getragen, die eine genaue Dosierung gewährleisten. Als Dosierventile sind dabei Schlauchquetsch-, Membranosier- oder Nadelventile üblich. Die Steuerung von Dosierdruck und Dosierzeit erfolgt meist über Dosiergeräte, die sowohl manuell bedient als auch vollautomatisch betrieben werden können. Ein solches Gerät zeigt Abb. 5.174.

Einkomponenten-Klebstoffe in fester Form werden auf den Fügeteiloberflächen aufgeschmolzen. Eine Sondergruppe der Einkomponenten-Klebstoffe sind Klebefilme. Sie werden entsprechend den Fügeflächen zugeschnitten und zwischen die zu klebenden Teile gelegt. Sind Klebefilme durch Folien gegen Verunreinigungen geschützt, so sollte man diese erst kurz vor dem Aufbringen abziehen.

Eine Anzahl von Klebstoffen enthält flüchtige Lösungsmittel. Für diese Klebstoffe ist zwischen dem Auftragen und Zusammenfügen der Teile die sog. Abluftzeit erforderlich, während der das

Lösungsmittel verdunstet. Diese vom Hersteller vorgeschriebene Zeitspanne ist genau einzuhalten.

Fügen und Fixieren

Nach dem Auftragen des Klebstoffs werden die Fügeteile mit den Klebflächen zusammengelegt (Fügen). Die Fügeteile sind gegen ein Verschieben zu sichern (Fixieren). Das kann durch Zwingen, Klammern, Klemmleisten, Spannbänder oder sonstige Vorrichtungen geschehen. Die Auswahl der Vorrichtungen hängt vom Klebstoff ab, vor allem wenn beim Abbinden Wärme erforderlich ist oder Druck auf die Klebflächen aufgebracht werden muss.

Bei Wärmezufuhr muss die Masse der Spannvorrichtung klein gehalten und die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Fügeteilen und Vorrichtungen berücksichtigt werden. Ist während des Abbindens ein Druck auf die Klebflächen notwendig, muss die Spannvorrichtung den erforderlichen Druck auch in der Wärme auf die gesamte Fläche aufbringen und aufrecht erhalten können. Ausnahmen von der Regel sind in erster Linie die Kontaktklebstoffe, für die im Allgemeinen einfachere Verarbeitungsbedingungen gelten.

Abbinden unter Druckanwendung

Klebstofftyp, Form und Abmessung des Bauteils bestimmen, ob und wie während des Abbindens Druck anzuwenden ist. Gleichmäßiges Anliegen muss ggf. durch örtliche oder auch über die ganze Fläche verteilte Druckkräfte erzwungen werden. Dies gilt besonders für Klebflächen mit größeren Abmessungen und für dünnwandige, zum Beulen neigende Fügeteile, z. B. für Bleche. Ein Beispiel mit lösungsmittelhaltigen Klebstoffen, die unter der Einwirkung von Druckspannungen verklebt werden müssen, zeigt Abb. 5.175.

Klebstoffe, die während des Abbindens einen definierten Druck erfordern, sind in Vorrichtungen zu verarbeiten. Diese müssen den Druck gleichmäßig und zeitlich konstant auf die Klebflächen aufbringen. Dafür kommen hydraulische Pressen, Druckautoklaven, aufblasbare Schläuche, Vakuumvorrichtungen usw. in Frage.



Abb. 5.174 Dosiergerät Delomat 100 mit Drucktank und Dosierventil. (Quelle: DELO Industrieklebstoffe)

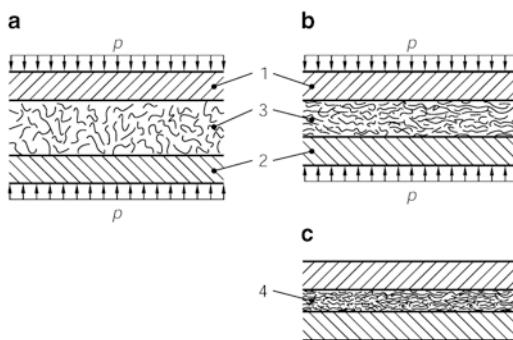


Abb. 5.175 Verfestigungsprinzip bei lösungsmittelhaltigen Klebstoffen. **a** Beginn des Klebprozesses, im Spalt verteilt Kleblösung **b** Zwischenstadium, teilweise verdunstetes Lösungsmittel **c** Ende des Klebvorgangs, lösungsmittelfreier Klebspalt Es bedeuten: 1,2 Fügeteile 3 Makromoleküle im Lösungsmittel verteilt 4 verengter Klebspalt p Druckspannungen

Beim Abbinden unter erhöhter Temperatur darf man erst entlasten, wenn unter die zulässige Temperatur für den verwendeten Klebstoff abgekühlt worden ist.

Abbindetemperatur und Abbindezeit

Bei allen Klebstoffen ergibt sich eine gewisse Abhängigkeit zwischen Abbindetemperatur und -zeit. In bestimmten Grenzen lässt sich die Abbindezeit durch erhöhte Temperatur verringern. Die Abbindezeit beginnt, sobald in der Klebfuge die vorgeschriebene Temperatur erreicht ist. Die Wahl der Temperatur-Zeit-Beziehung richtet sich nach den Eigenschaften der Klebstoffe, den betrieblichen Möglichkeiten und nach dem Verhalten der zu klebenden Werkstoffe. Über die gesamte Klebefläche ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung einzuhalten bzw. anzustreben. Dies muss z. B. mit Thermoelementen kontrolliert werden. Um nach dem Abbinden ein Verwerfen zu vermeiden (besonders bei dünnwandigen zum Beulen neigenden Teilen), ist langsam und gleichmäßig abzukühlen.

Kalthärtende Klebstoffe binden in der Regel bei einer Bauteiltemperatur von +18 °C ab. Die zur Weiterbearbeitung der Teile benötigte Festigkeit wird meist nach ein bis zwei Tagen, teilweise schon nach wenigen Stunden erreicht. Das vollständige Abbinden kann aber wesentlich längere Zeiten in Anspruch nehmen.

5.8.7 Anwendungsbeispiele

Das Kleben ist eine sehr alte Verbindungs-technik, die schon in grauer Vorzeit benutzt wurde, z. B. zum Verkleben von Pfeilspitzen. Anfang des 19. Jahrhunderts wurden erstmalig Klebstoffe auf Kunstharzbasis angewendet. Die ersten Patenterteilungen zum Kleben von Metallen mit konventionellen Klebstoffen erfolgten 1918/1919 nahezu gleichzeitig in Deutschland und England. In England fanden im 2. Weltkrieg auch erstmalig Spezialklebstoffe im Flugzeugbau ihren Einsatz. Nach Kriegsende begann eine rasante Entwicklung von Klebstoffen für Metalle, Kunststoffe und Mischverbindungen. Unterdessen hat sich die Klebtechnik zu einer Hochtechnologie entwickelt. Im Jahre 2020 wurden allein in Deutschland 1 Mio. t Klebstoff im Wert von 2 Mrd. € produziert. Die Hersteller bieten über 25.000 unterschiedliche Produkte an (Quelle: Industrieverband Klebstoffe e. V.).

Die besonderen Vorteile und Möglichkeiten der Klebtechnik werden durch viele erfolgreiche Anwendungen belegt. Folgende Tatsachen stehen für den Ausbau des Klebens als Schlüsseltechnologie in der Industrie:

- Klebstoffe verbinden viele unterschiedliche Werkstoffe in beliebigen Kombinationen,
- Kleben bietet die Basis für die fortschreitende Miniaturisierung elektronischer Bauteile,
- Klebstoffe ermöglichen schnellstes Fixieren und Positionieren kleinster Bauteile,
- Kleben erlaubt kreative Gestaltungsmöglichkeiten im Glas-, Kunststoff- und Möbeldesign,
- Klebstoffe können sowohl isolierend als auch elektrisch leitfähig eingesetzt werden.

Nachfolgend sollen einige bemerkenswerte Anwendungen aufgeführt werden, die von der Fa. DELO Industrie Klebstoffe zur Verfügung gestellt wurden.

Aus dem Bereich **Maschinenbau** zeigt Abb. 5.176 Kupplungselemente, die mit Reibbelägen verklebt werden. Hierbei kommen wegen der geforderten Temperaturbeständigkeit



Abb. 5.176 Kleben eines Reibbelages bei einem Kupplungselement



Abb. 5.177 Verklebung von Magnesiumteilen/Saugrohrmodul für Kfz-Motore. (Quelle: DELO Industrie Klebstoffe)

bis 140 °C *Epoxidharze* zur Anwendung. Diese aus zwei Komponenten aufgebauten Strukturklebstoffe härten nach dem Vermischen von Harz und Härter bereits bei Raumtemperatur aus. Weitere Vorteile sind die geringe Schrumpfung und die hohe Festigkeit sowie Beständigkeit gegenüber Chemikalien. Deshalb werden diese Klebstoffe vorwiegend in Maschinenbau und Konstruktion, der Automobilzulieferindustrie und allgemein bei der Metallverarbeitung eingesetzt.

Abb. 5.177 zeigt eine hochfeste Verklebung von Saugrohrmodulen aus Magnesium für Kfz-Motoren. Hier wurden mit dem Ziel des konsequenten Leichtbaus die Ober- und Unterschalen sowie Seitenblenden mit *einkomponentigem Epoxidharz* verklebt. Diese Klebstoffe härten bei Temperaturen zwischen 100 °C und 180 °C aus, sind langzeitbeständig bis 200 °C und erreichen hohe Festigkeiten, sodass sie häufig konventionelle Fügeverfahren wie Nieten, Hartlöten oder Schweißen ersetzen können.

In der Automobilindustrie ist Kleben zu einer Schlüsseltechnologie geworden. Ein Auto enthält heute rd. 18 kg Klebstoff, von der gesamten jährlichen Klebstoffproduktion entfallen ca. 12 % auf die Fahrzeugbranche. Autos mit geklebten Karosserieteilen schneiden beim Crashtest besser ab als geschweißte, weil die Fügeteile nicht beeinträchtigt werden. Beim Schweißen können durch die Erwärmung die spezifischen Eigenschaften des Werkstoffs verändert werden

und beim Nieten oder Verschrauben führen Löcher zur Schwächung der Fügeteile. Moderne Klebstoffsysteme sind somit zu einem Sicherheitsfaktor in der Automobilindustrie geworden.

Auch direkt eingeklebte Front- und Heck scheiben erhöhen die Steifigkeit von Karosserien und erlauben die Konstruktion von Fahrzeugen, die mit niedrigen c_w -Werten zu einer erheblichen Energieeinsparung beitragen. Klebstoffe auf der Basis von Polyurethan halten die Karosserie eines Autos auch bei hohen Geschwindigkeiten und unebenen Straßen sicher zusammen. Diesen Schwingungsbela stungen halten auch geklebte (und wegen der Beständigkeit gegen Salzwasser beschichtete) Steckkontakte an beheizten Kfz-Spiegeln stand, Abb. 5.178.

Zur Befestigung von Innenverkleidungen an Autotüren benötigt man Klebstoffe, die unter Druck abbinden. Die Werkstücke können so in rationeller Arbeitsweise zunächst mit dem Klebstoff beschichtet und erst später zusammen gefügt werden. Beim Pressen wird der Haftklebstoff fest und verbindet den Kunststoff sicher mit dem Metall. Dadurch werden Zeit und Geld bei der Montage eingespart.

Eine völlig andere Klebstoffart wird für Schraubensicherungen, Gewindeabdichtungen bei Luft- und Gasleitungen sowie Flächen dichtungen an Flanschen eingesetzt, Abb. 5.179. Es handelt sich um anaerob (d. h. unter Sauerstoffabschluss) härtende *Methacrylate*. Diese



Abb. 5.178 Geklebte und beschichtete Steckkontakte an Kfz-Spiegelheizungen. (Quelle: DELO Industrie Klebstoffe)



Abb. 5.179 Abdichtung von Flanschen gegen Medienaustritt, niedrigfest und leicht lösbar

Klebstoffe sind einkomponentig, lösungsmittelfrei und härten bei Raumtemperatur unter Einfluss katalytischer Metallionen aus. Diese radikalische Polymerisationsreaktion kann durch Wärmezufuhr beschleunigt werden. Die Klebung zeigt hohe Druck- und Scherfestigkeit, gute Temperaturbeständigkeit von -60 bis $+200$ °C, Beständigkeit gegen Vibratoren und dynamische Dauerbelastung. Von Wichtigkeit ist auch die DVGW-Zulassung dieser Klebstoffart für Gasverbrauchsanlagen.

Abb. 5.180 zeigt die hochfeste Verklebung eines Rotorpakets auf der Welle eines Elektromotors. Bei einer Spaltdicke von $d = 0,1$ mm



Abb. 5.180 Verkleben eines Rotorpakets auf der Welle



Abb. 5.181 Einkleben von Magneten in Statorgehäuse eines Elektromotors

sind die Bauteile nach 2 min handfest und nach 1 bis 3 h endfest. Die Einsatztemperatur beträgt bis 200 °C, die Druckfestigkeit erreicht 33 MPa.

Auch bei der Herstellung von Statorgehäusen für Elektromotoren lassen sich Kosten einsparen, wenn statt der klassischen Befestigung mit Mitteln des Maschinenbaus geklebt wird, Abb. 5.181. Hier muss die Klebefuge $< 0,5$ mm sein, die Aushärtungszeit beträgt 15 min bei 180 °C.

Im Bereich **Elektronik** hat das Kleben eine noch größere Bedeutung erlangt, z. B. bei der fortschreitenden Tendenz zur Miniaturisierung von Bauteilen. Hier werden häufig *fotoinitiert*

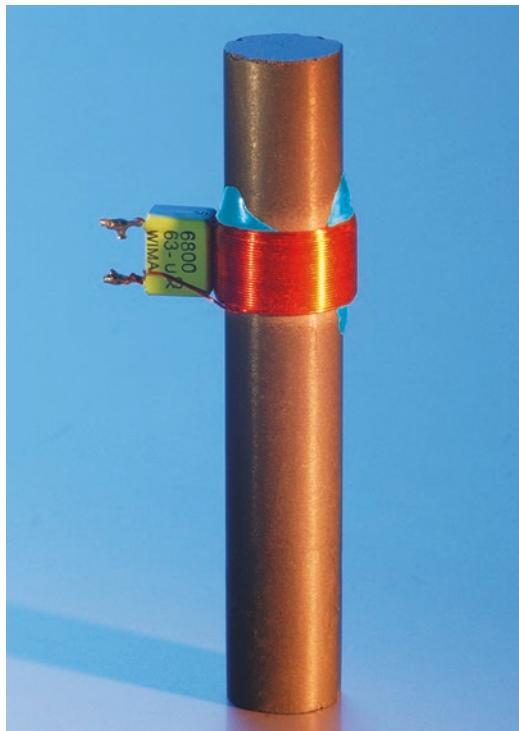


Abb. 5.182 Fixieren einer Spule auf einem Ferritkern – Klebstoff extra blau eingefärbt – (Quelle: DELO Industrie Klebstoffe)

härtende Acrylate eingesetzt. Das sind Einkomponenten-Reaktionsharze, die bei Raumtemperatur unter UV- oder sichtbarem Licht aushärten. Sie werden immer dann eingesetzt, wenn ein Fügeteil aus durchstrahlbarem Werkstoff besteht. In kurzen Taktzeiten können so Elektrospulen auf Ferritkerne geklebt werden, Abb. 5.182. Nach dem gleichen Prinzip werden auch die Einzelteile von Handys (Glas- oder Plasticscheiben, Lautsprecher, Kameragehäuse) verklebt, Abb. 5.183.

Es bedeuten: ①: Fixieren von Designelementen der Oberschale ②: Einkleben von Glas- oder Plasticscheiben in die Oberschale ③: Einkleben von Rahmen in die Abdeckung ④: Verkleben verschiedenster Komponenten und Werkstoffe des Lautsprechers ⑤: Einkleben des Kameragehäuses in die Unterschale ⑥: Verkleben der einzelnen Unterschalenelemente.

Nicht durchscheinende Werkstoffe werden besser mit *fotoinitiert härtenden Epoxidharzen* verklebt. Sie können aufgrund der Voraaktivierung (DELO-Patent) durch Licht ausgehärtet werden. Typische Anwendungen sind die Sicherung von Lötkontakten bei elektronischen Bauteilen, die Leiterplattenbeschichtung,



Abb. 5.183 Verkleben verschiedener Handy-Komponenten. (Quelle: DELO Industrie Klebstoffe)

das Einkleben von Leiterplatten in Gehäuse und die zuverlässige Gehäuseabdichtung bei Airbag-Sensoren, Abb. 5.184.

Bei der neuesten Entwicklung von Prozessor-Chips können aufgrund der Größe von 1 bis 4 mm² die Verbundmassen zum Schutz von Chip und Bonddrähten (elektrische Zuleitungen) nicht mehr einfach von oben aufgebracht werden. Daher wird der Chip ohne Gehäuse direkt auf die Leiterplatte geklebt. Diese sog. *Chip-on-Board-Technologie* (COB) wird in Abb. 5.185 erläutert.

Nach dem Aufkleben werden zunächst die Bonddrähte (aus Gold oder Aluminium) kontak-

tiert. Damit die feinen Drähte nicht beschädigt werden, wird ein ringförmiger Wall (Dam) aus Klebstoff um den Chip gesetzt und anschließend mit einer Vergussmasse (Fill) aufgefüllt (sog. Dam&Fill-Verfahren).

Dualhärrende Klebstoffe sind eine chemische Modifikation strahlungshärtender Klebstoffe mit der Möglichkeit einer kombinierten Licht-/Wärmehärtung. Das hat Vorteile bei Bauteilen mit größeren Schattenzonen. Einen mit diesem Klebstoff gesicherten Spulenträger, der beim nachfolgenden Lötprozess nicht verrutschen darf, zeigt Abb. 5.186.

Zunächst wird die Klebekehlnaht (blau auf der linken Seite der Spule) in 10 s durch Licht fixiert. Nach dem Löten erfolgt dann die eigentliche Aushärtung des Klebstoffs unter dem Spulenkörper bei 130 °C in 2 min. Der Klebstoff wirkt stark spannungsausgleichend und vermindert die Beanspruchung der Lötverbindung durch Vibratoren.

Elektronische Bauteile im Automotivbereich und in anderen hochwertigen Industrieprodukten (z. B. Steuerungen) sind extremen Belastungen ausgesetzt, Abb. 5.187. Sie werden in einem weiten Temperaturbereich (−40 bis +150 °C) betrieben, sind starken Vibratoren und Kräften ausgesetzt und haben häufig Kontakt mit aggressiven Medien. Hierzu sind ausgewählte Vergussmassen entwickelt worden mit.

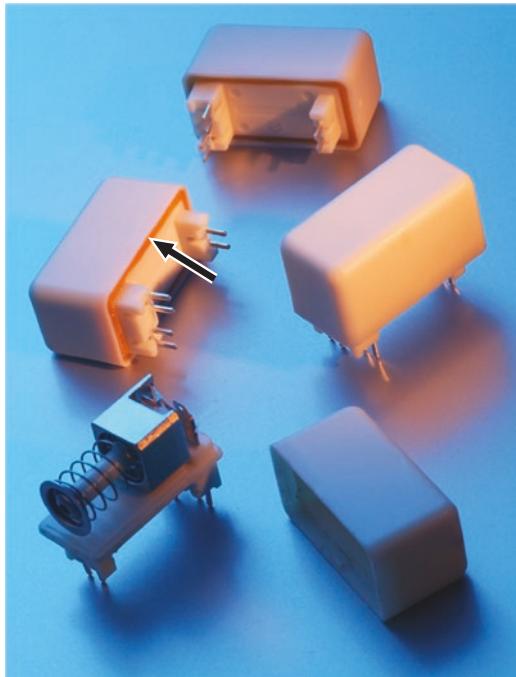


Abb. 5.184 Gehäuseabdichtung bei Airbag-Sensoren. Der Pfeil kennzeichnet die Dichtfuge

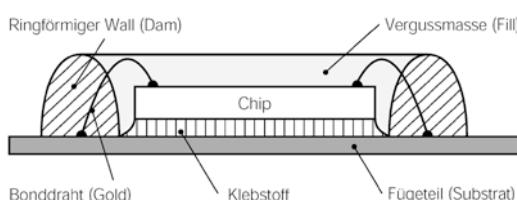


Abb. 5.185 Chip-on-Board-Technologie (COB)

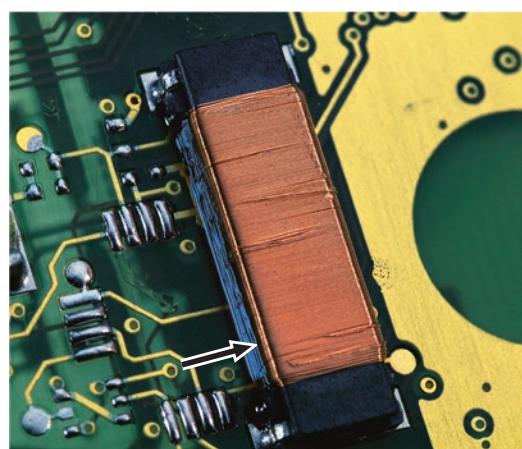


Abb. 5.186 Fixierung einer Spule durch Kleben vor dem Verlöten (Klebstoff blau eingefärbt)



Abb. 5.187 Chip-Verguss bei elektronischen Bauteilen im Automotivbereich und in hochwertigen Industrieprodukten. (Quelle: DELO Industrie Klebstoffe)

- niedrigem Ausdehnungskoeffizienten (17 ppm/K),
- hoher Glasübergangstemperatur (180 °C),
- geringer Polymerisationsschrumpfung (0,5 %) sowie
- sehr guter Haftung und chemischer Beständigkeit.

Bei der Anwendung der sog. **Smart Label** ist die Flip-Chip-Kontaktierung von besonderer Bedeutung. Mit Smart Label werden intelligente Etiketten bezeichnet, die aus dem öffentlichen Leben nicht mehr wegzudenken sind. Produkte im Supermarkt, Eintrittskarten ins Fußballstadion, Gepäckanhänger im Flugverkehr usw. benutzen diese Datenträger. Mit diesem Etikett aus Halbleiterchip und Antenne werden verschlüsselte Daten im HF- oder UHF-Bereich übertragen. Abb. 5.188 zeigt schematisch eine Herstellungsanlage mit dem Flip-Chip-Prozess.

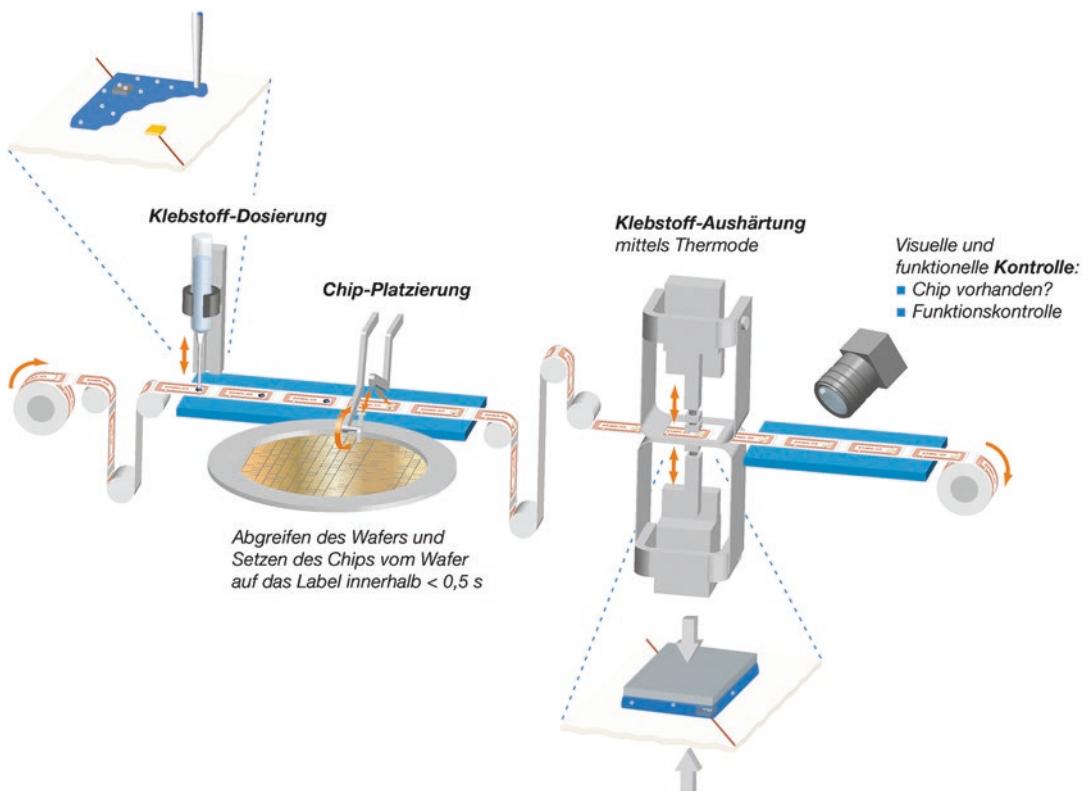


Abb. 5.188 Anlage zur Herstellung von Smart Label mit Flip-Chip-Kontaktierung. (Quelle: DELO Industrie Klebstoffe)

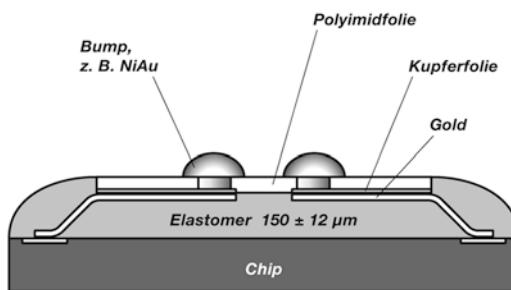


Abb. 5.189 Bumps als erhöhte Flächen zur Kontaktierung von Chips

Dabei werden die Smart Label im sog. Rolle-zu-Rolle-Verfahren gefertigt. Da die Prozessschritte nacheinander ablaufen, müssen sie optimal aufeinander abgestimmt werden. Der 1 mm^2 große Chip wird vom Wafer in weniger als 0,5 s auf das Label gesetzt und mittels Klebstoff fixiert, der im Durchlaufverfahren bei 140°C aushärtet. Unmittelbar danach erfolgt die optische und funktionelle Kontrolle.

Die Kontaktierung von Flip-Chips kann durch mechanisches Verpressen von kleinen erhöhten Kontaktflächen (sog. *Bumps*) erfolgen, Abb. 5.189. Oder über elektrisch leitfähige Partikel im Klebstoff, die zwischen den Bumps und der Substratmetallisierung eingeschlossen sind.

5.9 Gestaltung von Klebverbindungen

5.9.1 Allgemeines

Für die Haltbarkeit einer Klebverbindung ist deren konstruktive Gestaltung von besonderer Bedeutung. Es ist vor allem auf die „klebgerechte“ Krafteinleitung in den Fügebereich und die sich daraus ergebende Beanspruchung der Klebschicht zu achten. Die Festigkeit einer geklebten Verbindung hängt im Wesentlichen ab von

- den erreichbaren Haftkräften zwischen Klebstoffschicht und Fügefläche (Adhäsion),

- den Werkstoffeigenschaften der Fügeteile und deren Gestaltung,
- der wählbaren Eigenfestigkeit (Kohäsion) sowie
- den Verformungseigenschaften des Klebstoffs.

Je nach Krafteinleitung in die Klebflächen wird unterschieden zwischen

- Zug-, Druck- oder Schälkräften, die senkrecht zur Klebfläche wirken,
- Scherkräften, die parallel zur Klebfläche wirken, und
- Kombinationen oben genannter Kräfte.

Klebverbindungen sollten möglichst nur durch Scherkräfte beansprucht werden.

5.9.2 Gestaltung geklebter Blechverbindungen

In den folgenden Beispielen sind immer links die ungünstigen und rechts die zweckmäßigen Lösungen dargestellt. (Siehe Abb. 5.190, 5.191, 5.192 und 5.193)

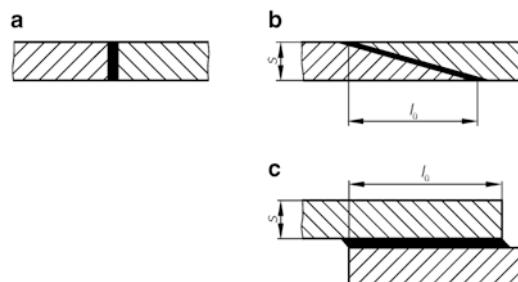


Abb. 5.190 Der stumpfe Stoß a ist zu vermeiden, da die Klebfläche zu klein ist und der Klebstoff auf Zug beansprucht wird. b Geschäftete Verbindungen erreichen höhere Festigkeitswerte, können aber nur bei dickeren Fügeteilen ausgeführt werden (günstige Überlappungslänge: $l_u \approx (10 \text{ bis } 15) \cdot s$). c Mit größerer Überlappungslänge l_u lässt sich die Klebfläche kostengünstig vergrößern

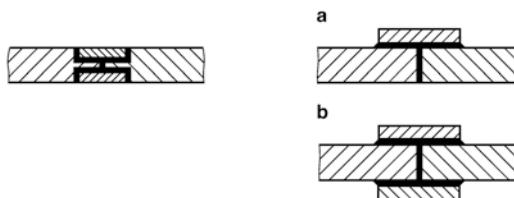


Abb. 5.191 Bei abgesetzten Doppellaschenverbindungen ist der Fertigungsaufwand zu hoch und die Tragfähigkeit sinkt durch die Querschnittsverminderung. **a** Einfache Laschenverbindung nur dort anwenden, wo eine Seite der Klebung glatt sein soll. **b** Doppellaschenverbindungen haben eine höhere Festigkeit, da der Kraftfluss symmetrisch ist

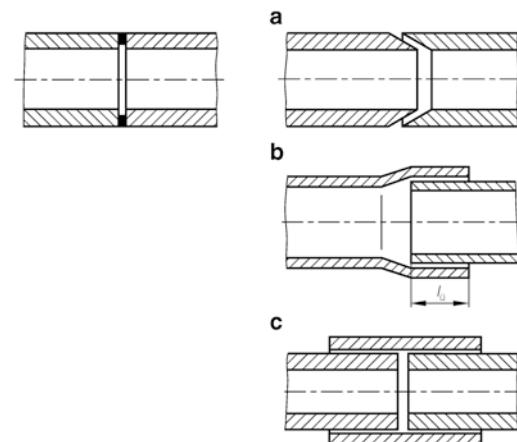


Abb. 5.194 Bei Rohrleitungen kann die Klebefläche vergrößert werden durch **a** Schäften, **b** Stecken oder **c** Muffen. Bei den konstruktiven Lösungen **b** und **c** liegt eine rotationssymmetrische Überlappung vor, bei der eine ausreichende Klebefläche durch Verändern der Überlappungslänge l_u einzustellen ist

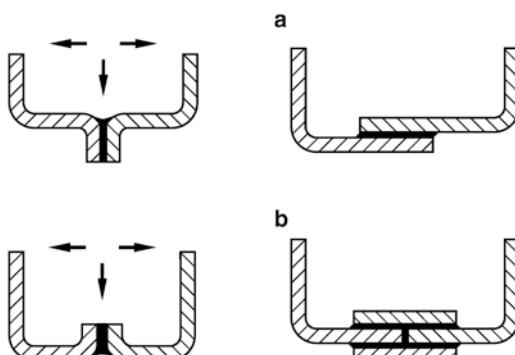


Abb. 5.192 Schälbeanspruchungen können vermieden werden durch Überlappen (**a**) oder Doppellaschen (**b**)



Abb. 5.195 Geklebte Bolzen sind zu zentrieren, um ein Verschieben bei der Montage zu vermeiden

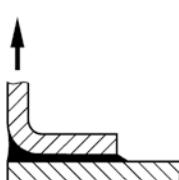


Abb. 5.193 Bei Winkelverbindungen kann das Abschälen vermieden werden durch Abbiegen

5.9.3 Gestaltung geklebter Rohrverbindungen

(Siehe Abb. 5.194, 5.195, 5.196 und 5.197)

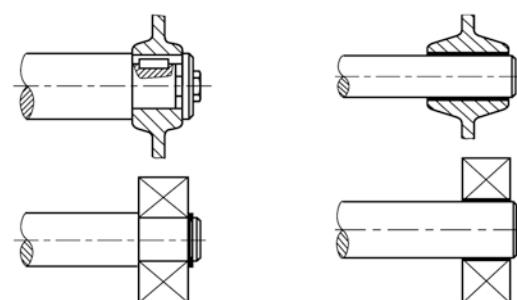


Abb. 5.196 Aufwendige Welle-Nabe-Verbindungen können häufig kostengünstiger geklebt hergestellt werden; außerdem ist bei Rundverbindungen die erwünschte Scherung vorhanden

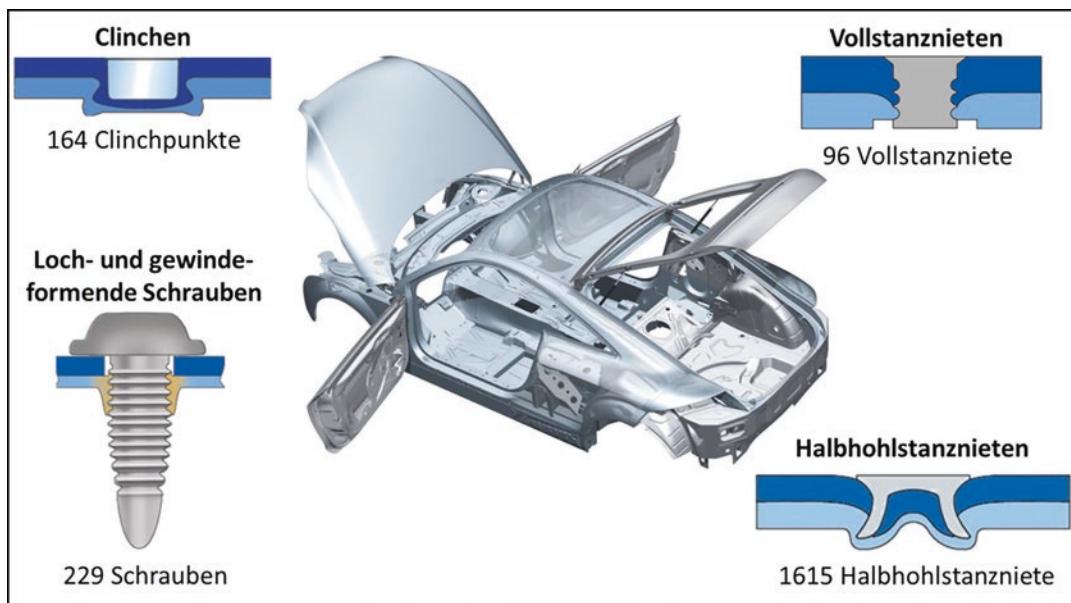


Abb. 5.197 Einsatz ausgewählter mechanischer Fügetechniken am Beispiel des Audi TT. (Quelle: TT Coupé '07, AUDI AG Ingolstadt)

5.10 Fügen durch Umformen

5.10.1 Allgemeines

Das mechanische Fügen hat in den letzten Jahren einen großen Entwicklungsschub erfahren, ausgelöst durch den Zwang zum Leichtbau in der Automobilindustrie. Dabei müssen oft auch unterschiedliche Werkstoffe in einem sog. Materialmix (auch als Mischbau bezeichnet) miteinander verbunden werden. Die mechanischen Fügeverfahren werden sowohl elementar als auch in Ergänzung zum Kleben eingesetzt. Das Kleben führt zu einer extremen Steigerung der Bauteilfestigkeiten und der Steifigkeit, was insbesondere im Fahrzeugbau gewünscht ist. Da die Verarbeitung und das Aushärteten des Klebstoffes Zeit benötigen, wird für diesen Zeitraum das mechanische Fügen zur Erreichung einer ausreichenden Handlings-Festigkeit genutzt, um die gefügte Baugruppe weiter

bearbeiten zu können. Die Kombination des Klebens mit einem punktuellen Fügeverfahren wird als Hybridfügen bezeichnet. Ausgehend von der Automobil- bzw. Flugzeugindustrie haben die mechanischen Fügeverfahren durch ständige Weiterentwicklungen ein hohes Anwendungspotenzial auch in anderen Industriezweigen erreicht. Sie werden immer häufiger als Alternative zum Widerstandspunktschweißen eingesetzt, da eine thermische Schädigung des Bauteiles oder eine Oberflächenbeschichtung vermieden wird. Außerdem zeigte sich, dass die Schwingfestigkeitseigenschaften der mechanischen Verbindungen den thermisch stoffschlüssigen Verbindungen überlegen sind, weil sich die Gefügeveränderungen dort negativ auswirken.

Der intensive Einsatz von verschiedenen mechanischen Fügeverfahren an einer Kfz-Karosserie resultiert aus der Aufgabenstellung: der Verbindung vieler unterschiedlicher Werkstoffe. Abb. 5.197 zeigt die Verwendung unterschiedlicher Fügeverfahren an einer Karosse des Audi TT.

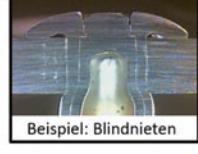
Fügen durch Umformen		
Ohne Hilfsfügeteil	Mit Hilfsfügeteil	
<p>- Clinchen</p>  <p>Beispiel: Clinchen</p>	<p>- Nieten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Voll- und Hohlnieten • Blindnieten • Stanznieten • Sonderverfahren: Schließringbolzen  <p>Beispiel: Blindnieten</p>	<p>- Funktionselemente</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einpresselemente • Nietelemente • Stanzelemente • Blindnietelemente • Loch- und gewinde-formende Schrauben

Abb. 5.198 Einteilung der umformtechnischen Fügetechniken nach dem Gesichtspunkt der Verwendung eines Hilfsfügeteils

Unter den mechanischen Fügeverfahren werden Fügetechniken verstanden, die auf den Funktionsprinzipien des Kraft- oder/und Formschlusses basieren. Zu diesen Fügetechniken gehören nicht nur die in diesem Kapitel vorgestellten Technologien, sondern darüber hinaus noch viele weitere, wie zum Beispiel das Verschrauben. Abb. 5.198 zeigt eine Übersicht der mechanischen Fügetechnik, eingeteilt nach dem Gesichtspunkt der Verwendung eines Hilfsfügeteils.

Die Einteilung der hier beschriebenen Fügeverfahren orientiert sich an dem aktuell verfügbaren Regelwerk, welches durch Arbeitsgemeinschaften aus Forschung und Industrie unter der Führung des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS) erarbeitet wurden. Entsprechend sind im Literaturverweis die erarbeiteten Merkblätter angeführt. Normungsaktivitäten im Bereich der Mechanischen Fügetechnik befinden sich erst in den Anfängen. Außer im Nietbereich, wo diverse Produktnormen und einige wenige Prüfnormen vorliegen, sind für die anderen mechanischen Fügeverfahren noch keine Normungsdokumente existent.

5.10.2 Clinchen

Für das bisher als Durchsetzfügen bekannte Verfahren hat sich die internationale Bezeichnung Clinchen durchgesetzt. Es ist ein Fügen von meist zwei überlappt angeordneten Blech-, Rohr- oder Profilteilen durch Kaltumformen mit Stempel und Matrize. Dabei findet ein gemeinsames partielles Durchsetzen der Fügepartner und ein nachfolgendes Stauchen statt. Durch Breiten bzw. Fließpressen kommt es zu einer form- und kraftschlüssigen Verbindung ohne Verwendung von Zusatzelementen. Clinchen wird vorwiegend bei der Dünnblechverarbeitung in der Automobilindustrie, zur Herstellung von Klima- und Haushaltsgeräten sowie beim Gehäusebau eingesetzt, z. B. für Waschmaschinen und Trockner.

Grundsätzlich wird zwischen runden und balkenförmigen Verbindungen sowie zwischen schneidend und nicht schneidenden Verfahren unterschieden. Die Abb. 5.199 zeigt das Prinzip beim einstufigen Clinchen runder Verbindungen ohne Schneidanteil. Hierbei handelt es sich um die häufigste Verfahrensvariante. Das Prinzip

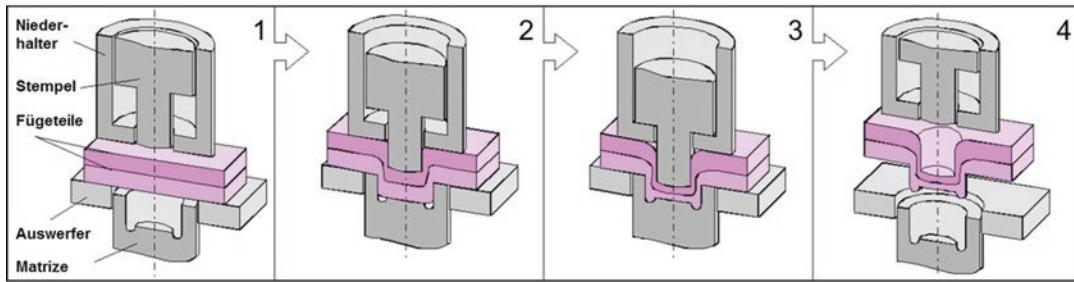


Abb. 5.199 Prozessablauf beim einstufigen Clinchen ohne Schneidanteil. (Quelle: Hahn, O.; Klemens, U.: Fügen durch Umformen, Nieten und Durchsetzfügen – Innovative Verbindungsverfahren für die Praxis. Dokumentation 707 der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 1996)

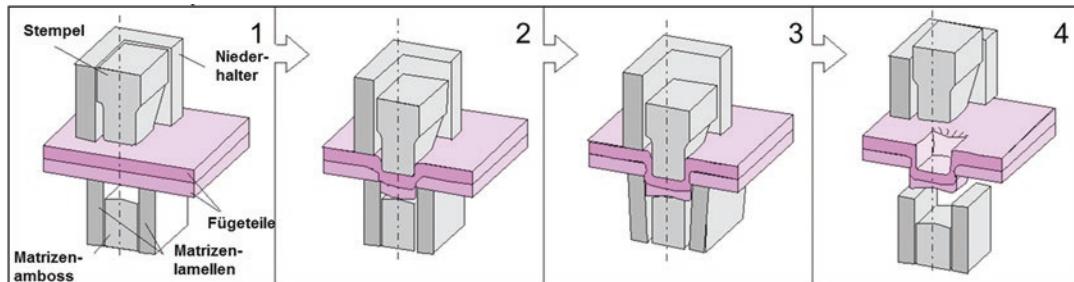


Abb. 5.200 Prozessablauf beim einstufigen Clinchen mit Schneidanteil. (Quelle: Hahn, O.; Klemens, U.: Fügen durch Umformen, Nieten und Durchsetzfügen. Dokumentation 707 der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 1996)

beim einschneidigen Clinchen rechteckiger Verbindungen mit partiellem Schneidanteil geht aus Abb. 5.200 hervor. Bei dynamischer Belastung sind hier die eingebrachten Kerben sowie die Korrosionsgefahr bei beschichteten Blechen kritisch. Daher bleibt diese Anwendung vorwiegend auf das Handwerk und den Baubereich beschränkt.

Qualitätskontrolle bei Clinch-Verbindungen

Die maßgebenden Kenngrößen von Clinch-Verbindungen zeigt die Abb. 5.201.

Der Hinterschnitt f beschreibt den Formschluss zwischen den beiden Fügeteilen, er hat bei Kopfzugbelastung den größten Einfluss auf die Festigkeit der vorliegenden Verbindung. Unter Scherzugbelastung hängt die Verbindungsfestigkeit wesentlich von der Halsdicke t_n ab, die den tragenden Querschnitt im Halsbereich bestimmt. Die Bodendicke t_b beider Bleche zusammen kann zerstörungsfrei mit einem Taster bestimmt werden, sie korreliert mit Hinterschnitt und Halsdicke. Diese beiden

Größen können nicht direkt zerstörungsfrei bestimmt werden, daher werden entsprechende Schliffbilder erstellt.

Im modernen Fahrzeugbau ist heutzutage eine zerstörungsfreie 100 %-Prüfung der Verbindungsqualität Standard. Hierfür werden moderne Prozess-Überwachungssysteme zur Aufzeichnung und Auswertung des Fügekraft-Fügeweg-Verlaufes eingesetzt.

5.10.3 Fügen mit Hilfsfügeteil

Für eine Differenzierung und Abgrenzung der verschiedenen Fügeverfahren mit Hilfsfügeteil bietet sich ein Ordnungsschema an, das einerseits das „Verbinden mit Nietelementen und Schrauben“ und das „Verbinden mit Funktions-elementen“ gegen-einander abgrenzt und das zum anderen bei der weiteren Unterteilung die notwendigen Voraussetzungen, wie beispielsweise eine Verarbeitung ohne Vorlochen bzw.

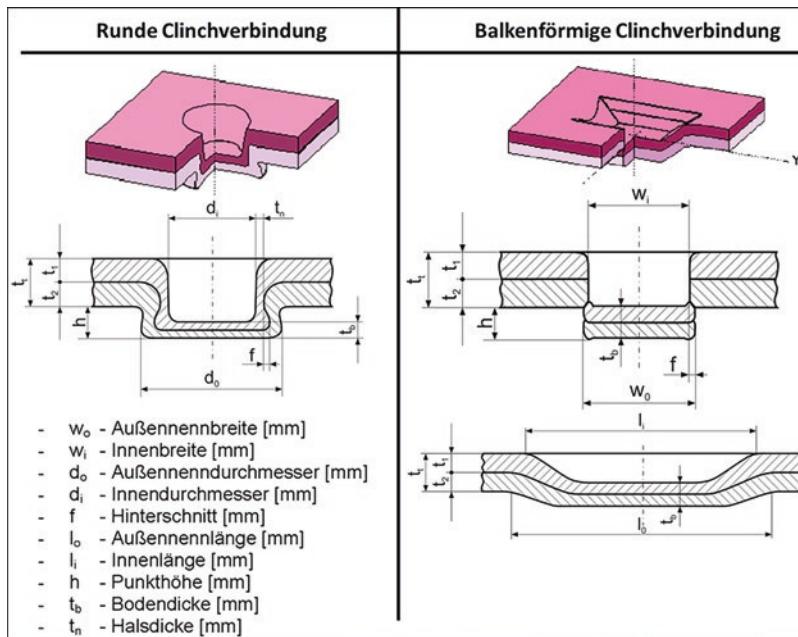


Abb. 5.201 Qualitätsrelevante Kenngrößen an Clinchverbindungen. (Quelle: nach DVS/EFB-Merkblatt 3420, Clinchen. DVS Verlag, Düsseldorf)

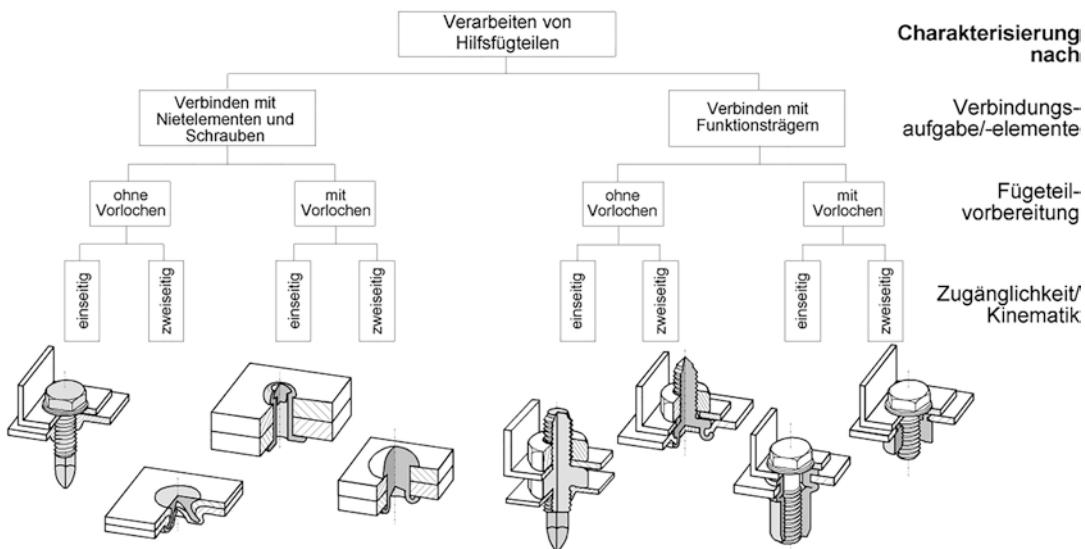


Abb. 5.202 Einteilung der Verarbeitung von Hilfsfügeteilen nach den Gesichtspunkten Verbindungsaufgabe, Fügeteilvorbereitung und Zugänglichkeit

mit Vorlochen der zu verbindenden Fügeteile sowie die fertigungstechnische Zugänglichkeit, einseitig oder zweiseitig, zum Verbindungs-bereich berücksichtigt, Abb. 5.202.

5.10.3.1 Stanznieten

Beim Stanznieten werden die zu verbindenden Bauteile ohne Vorlochen mit Nieten verbunden, d. h. das Vorlochen wird durch einen Stanzvor-

gang während der Verarbeitung des Nieten ersetzt. Das automatisierte Fügeverfahren Stanznieten mit Halbhohlstanzniet wird vorwiegend im Fahrzeugbau angewendet. Die wesentlichen Vorteile des Verfahrens sind die hohen Verbindungsfestigkeiten unter statischer und dynamischer Last, die Einsparung der Vorlochoperation sowie die Erreichung eines hohen Automatisierungsgrades beim Verarbeiten, auch in Verbindung mit dem Kleben (s. Abb. 5.203).

Qualitätskontrolle bei Stanzniet-Verbindungen

Auch hier lassen sich die wesentlichen qualitätsrelevanten Kenngrößen nur zerstörend erfassen, z. B. durch ein Schliffbild. Das gut messbare Stauchmaß t_c kann beim Stanznieten mit Halbhohl Niet als korrelierende Qualitäts-Kenngröße verwendet werden, da es Auskunft über den Hinterschnitt gibt. Einzelheiten gehen aus Abb. 5.204 hervor.

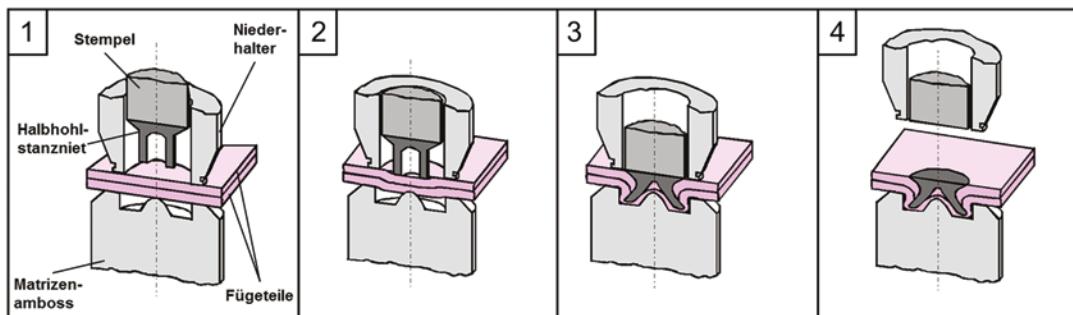
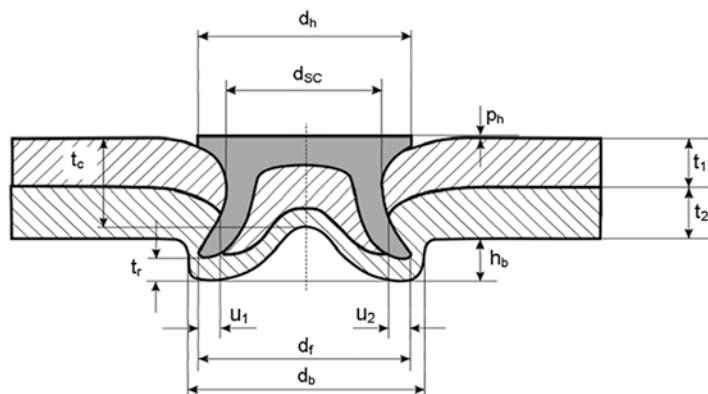


Abb. 5.203 Prozessablauf beim Stanznieten mit Halbhohlstanzniet. (Quelle: Hahn, O.; Klemens, U.: Fügen durch Umformen usw., Dok. 707 der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 1996)



- | | | | |
|--------------|--|---------|------------------------|
| - d_h | - Kopfdurchmesser | - t_r | - Restdicke am Nietfuß |
| - d_{sc} | - kleinster Nietdurchmesser am Schliff | - p_h | - Nietkopfendlage |
| - d_f | - Fußdurchmesser | - t_c | - Stauchmaß |
| - d_b | - Schließkopfdurchmesser | - l | - Gesamtlänge |
| - u_1, u_2 | - Hinterschnitt | - t_h | - Kopfdicke |
| - h_b | - Schließkopfhöhe | - d_h | - Kopfdurchmesser |
| - t_1 | - stempelseitige Materialdicke | - d_g | - Schaftnutdurchmesser |
| - t_2/t_x | - matrizenseitige Materialdicke | - d_n | - Nenndurchmesser |

Abb. 5.204 Qualitätsrelevante Kenngrößen an Halbhohlstanzniet-Verbindungen. (Quelle: nach DVS/EFB-Merkblatt 3410, Stanznieten. DVS Verlag, Düsseldorf)

In der Serienfertigung wird, wie beim Clinchen, eine Online-Prozessüberwachung durch Kraft- und Wegsensoren in den Setzwerkzeugen sichergestellt. Die Vorteile der Stanzniettechnologie gegenüber den Schweißverfahren im Fahrzeug- und Karosseriebau sind die Wärme- und Verzugsfreiheit, keine Gefüge-Beeinflussung und die Möglichkeit, auch artfremde und beschichtete Werkstoffe zu verbinden.

5.10.3.2 Blindnieten

Das häufigste Einsatzgebiet der Blindniettechnik war ab etwa 1955 der Einsatz in Leichtbaukonstruktionen im Flugzeugbau. Blindniete sind mechanische Verbindungselemente, bestehend aus dem Nietdorn und der Blindniethülse. Nur die Blindniethülse wird beim Fügevorgang umgeformt, das Bauteil bleibt unverändert. Dorn und Hülse können aus artgleichen oder verschiedenen Werkstoffen bestehen. Häufig werden Stähle (auch rost- und säurebeständige) und Aluminium-Legierungen als Hülsen- und Nietdornwerkstoffe eingesetzt. Der größte Vorteil beim Blindnieten ist das Herstellen der Verbindung bei nur einseitiger Zugänglichkeit zur Fügestelle. Der Teil, an dem die Verbindung erfolgt, kann blind bleiben, woraus sich die Namensgebung des Verfahrens ableitet. Das Herstellungsprinzip einer Blindnietverbindung geht aus der Abb. 5.205 hervor.

Qualitätskontrolle bei Blindnietverbindungen

Die Einhaltung einer hohen Prozess-Stabilität lässt sich nur durch vorgeschaltete Maßnahmen bei der Blindnietfertigung einhalten. Die korrekten Bohrloch-Toleranzen, eine richtige Abstimmung des Klemmbereiches eines Blindnietes in Abhängigkeit von der zu verbindenden Bauteildicke, die plane Auflage des Setzkopfes und die Vermeidung von Fügespalten beim Verarbeiten müssen sichergestellt werden. Die Anwendungen haben sich vom Leichtbau in der Luftfahrt- und Kraftfahrzeugindustrie über den Schienenfahrzeugbau zu weiteren Bereichen ausgedehnt. Hochfeste Blindnietssysteme finden sich im Behälter- und Rahmenbau, wo oft unterschiedliche Werkstoffe wärmefrei unlösbar verbunden werden müssen.

5.10.3.3 Fügen mit Funktionselementen

Wie in Abb. 5.202 aufgeführt, gehören die Funktionselemente zu den Fügeverfahren mit Hilfsfügeteil. Sie sind überwiegend Gewindesträger, die die Funktion einer Mutter bzw. eines Bolzens (einer Schraube) erfüllen. Funktionselemente dienen dem Einbringen eines tragfähigen Gewindes in meist dünne Bauteile. Die Auswahl der Funktionselemente ergibt sich aus der Bauteilkonfiguration. In Abb. 5.206 ist eine Übersicht zu den verfügbaren Funktionselementen dargestellt. Die Einteilung erfolgt

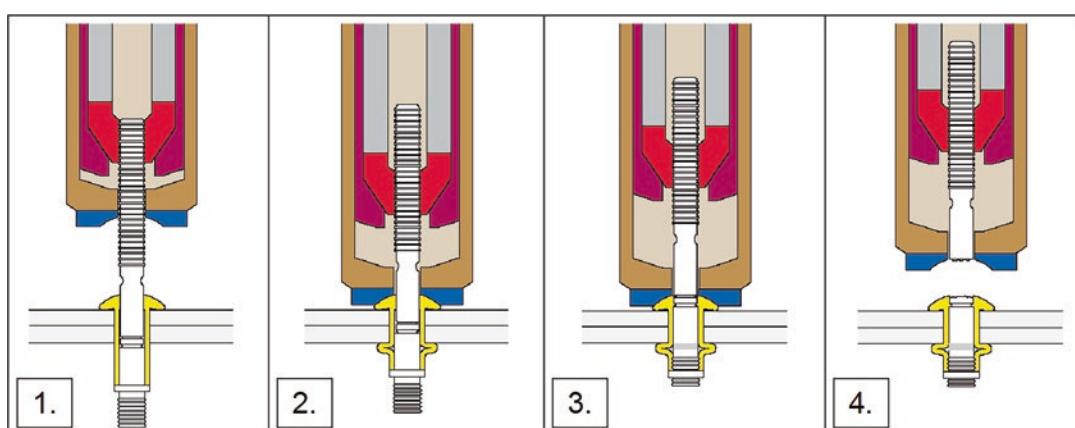


Abb. 5.205 Prozessablauf beim Blindnieten. (Quelle: Alcoa Fastening System, AFS)

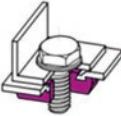
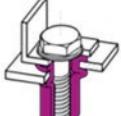
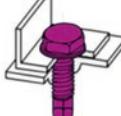
Selbststanzende Funktionselemente	Einnietbare Funktionselemente	Funktionselemente mit Pressformabschnitt	Blindnietmuttern und -gewindegewindebolzen	Loch- und gewindeformende Schrauben	
					
- Eckige Stanzmuttern - Runde Stanzmuttern - Rundschultermuttern - Stanzbolzen	- Kerbverzahnte Nietmuttern - Klemmloch-Nietmuttern - Nietbolzen	- Einpressmuttern - Einpressbolzen	- Standard-Blindnietmuttern - Geschlossene Blindnietmuttern - Blindnietgewindegewindebolzen	- Loch- und gewindeformende Schrauben	Beispiele
zweiseitig			einseitig		
nein	ja			nein	Zugänglichkeit
Bauteilwerkstoff und Verbindungselement	Primär das Verbindungselement	Bauteilwerkstoff	Verbindungselement	Bauteilwerkstoff	Vorlochen
					Umformung

Abb. 5.206 Einteilung der Funktionselemente. (Quelle: nach DVS/EFB-Merkblatt 3440-1, Funktionselemente. DVS Verlag, Düsseldorf)

unter Fertigungsgesichtspunkten nach der Zugänglichkeit, der notwendigen Einbringung eines Vorloches und der Umformung von Bauteilwerkstoff oder Funktionselement.

Aufgrund ihrer Vorteile haben die Funktionselemente einen festen Platz als Fügetechnologie eingenommen und finden in vielen Bereichen Anwendung. In Abb. 5.207 sind beispielsweise einmal die Einsatzfelder der Funktionselemente im Bereich der Automobilindustrie dargestellt. Darüber hinaus werden Funktionselemente im Bereich Schienenfahrzeugbau, Last- und Nutzfahrzeugindustrie, Weiße Ware, Luftfahrtindustrie sowie im Stahlbau eingesetzt.

5.10.3.3.1 Nietelemente

Beim Verarbeiten eines Nietelementes wird dieses zunächst für den Fügevorgang entsprechend

positioniert. Anschließend wird der Nietschaft der Nietmutter in das dafür vorbereitete Loch des Fügeteils eingebracht. Im dritten Schritt wird das überstehende Schaftende unter Druckeinwirkung mittels eines Formwerkzeugs umgeformt. Danach erfolgt der Rückhub des Werkzeuges und das gesetzte Nietelement ermöglicht die Verbindung mit weiteren Bauteilen, Abb. 5.208.

Insbesondere im Bereich des modernen Leichtbaus werden häufig hoch- bzw. höchstfeste Stahlwerkstoffe eingesetzt. Das Einbringen von Schweißmuttern oder -bolzen würde den Bauteilwerkstoff erweichen, entsprechend gilt es hier Funktionselemente einzusetzen. Je nach Einsatzfall ist eine Umformung des Blechwerkstoffes zum Einbringen von Funktionselementen nicht mehr (oder nur sehr eingeschränkt) mög-



Abb. 5.207 Einsatz von Funktionselementen im Automobilbereich. (Quelle: Profil Verbindungstechnik)

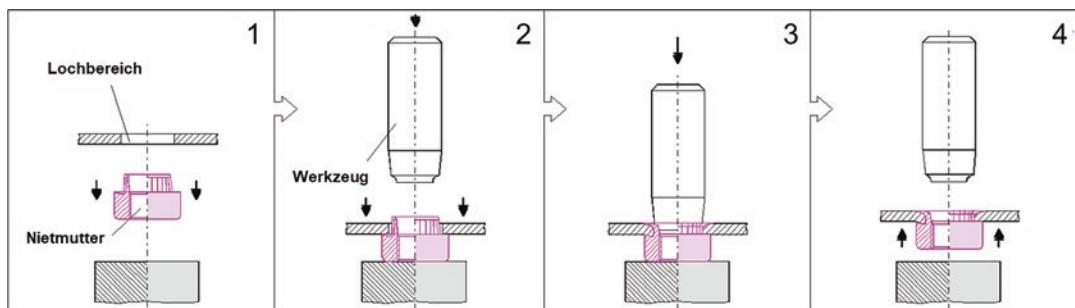


Abb. 5.208 Prozessablauf beim Setzen von Nietmuttern. (Quelle: Hahn, O.; Klemens, U.: Fügen durch Umformen usw., Dok. 707 der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 1996)

lich. In diesem Fall werden Nietelemente eingesetzt.

5.10.3.3.2 Einpresselemente

Liegt hingegen der Einsatz eines hochfesten Verbindungselementes vor, welches nur eingeschränkt umformbar ist, können Einpresselemente verwendet werden. Beim Einbringen eines Einpresselementes wird zunächst das Einpresselement oberhalb des vorgelochten Bauteils positioniert, bevor das Hilfsfügeteil in das vorgelochte Fügeteil eingebracht wird. Im dritten Schritt findet der eigentliche Fügevorgang statt, bei dem unter Druckeinwirkung mittels eines Formwerkzeuges das Einpresselement – durch plastische Verformung des Bauteilwerkstoffes

– im Bauteil fixiert wird. Die hergestellte Verbindung ermöglicht hierdurch die Befestigung von anderen Bauteilen, Abb. 5.209.

Qualitätskontrolle bei Niet- und Einpresselementen

Die Festigkeit der Gesamtverbindung ist im Wesentlichen vom Werkstoff und der Größe des Fügeelementes sowie vom Werkstoff und der Materialdicke der zu fügenden Bleche abhängig.

Eine Sichtkontrolle kann im Allgemeinen keine ausreichende Aussage über die Qualität einer Fügeverbindung liefern. Somit ist eine derartige Prüfung lediglich für die Einzelfertigung und als Zusatzkontrolle geeignet. Auch beim

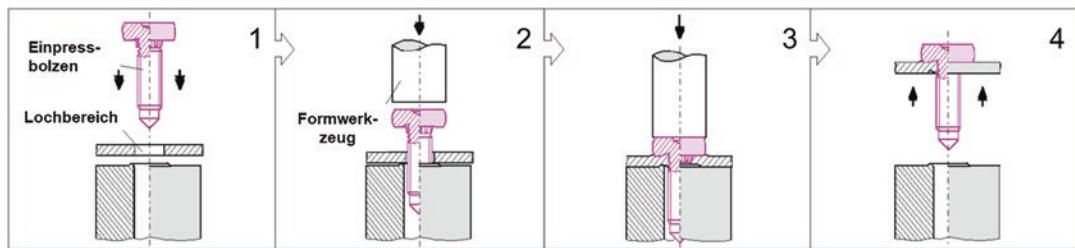


Abb. 5.209 Prozessablauf beim Setzen von Einpressbolzen. (Quelle: Hahn, O.; Klemens, U.: Fügen durch Umformen usw., Dok. 707 der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 1996)

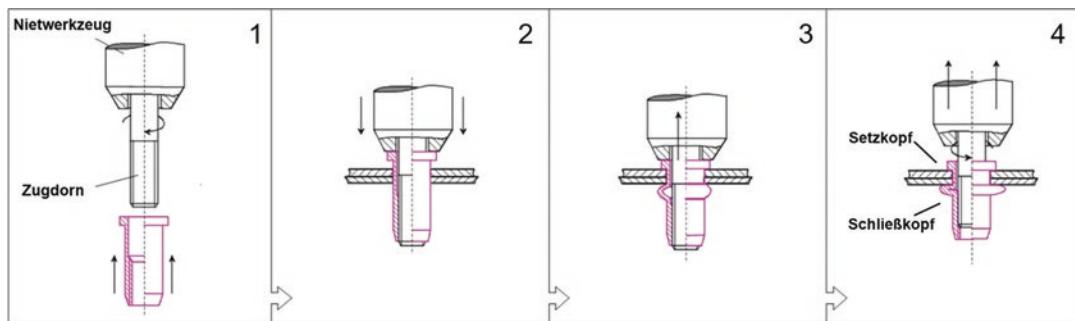


Abb. 5.210 Prozessablauf beim Setzen von Blindnietmuttern. (Quelle: Hahn, O.; Klemens, U.: Fügen durch Umformen usw., Dok. 707 der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 1996)

Einbringen von Funktionselementen kann der Einbringvorgang mittels Prozessüberwachungssystemen erfolgen, wie sie im Abschn. 5.10.4 erläutert werden.

5.10.3.3 Blindnietelemente

Bei diesen Funktionselementen handelt es sich um Gewindeträger, die über die Möglichkeit zwei Bleche zu verbinden (Blindnietfunktion), auch ein tragfähiges Gewinde für weitere Anbauteile in dünne Bleche einbringen können. Eine weitere Besonderheit des Verarbeitens von Blindnietelementen ist die einseitige Zugänglichkeit zur Fügestelle. So können weitestgehend problemlos Gewindeträger in Rohre und geschlossene Profile (Beispiel Zaunpfosten) eingebracht werden.

Diese Systeme sind in der Ausführung mit einem Innengewinde (Blindnietmutter) als auch mit einem Außengewinde (Blindnietgewindegewindebolzen) erhältlich. In Abb. 5.210 ist der Verfahrens-

ablauf beim Verarbeiten einer Blindnietmutter dargestellt.

Blindnietmuttern sind in unterschiedlichen Gewindegrößen bis zur Gewindegröße M16 auf dem Markt erhältlich und werden in der Regel in Bauteildicken von 0,25 bis ca. 8 mm eingesetzt. Sie werden überall dort eingesetzt, wo aufgrund der Bauteildicke oder des Bauteilwerkstoffes kein ausreichend tragendes Gewinde spanend oder furchend eingebracht werden kann. Blindnietmuttern und -gewindegewindebolzen sind gerade auch im Reparaturfall sehr interessant. Durch das Einbringen eines Vorloches können mit einfachen Handgeräten bei einseitiger Zugänglichkeit zur Fügestelle tragfähige Gewinde in die zu reparierenden Bauteile eingebracht und weitere Bauteile angeschraubt werden.

Qualitätskontrolle bei Blindnietelementverbindungen

Die Qualität der Gesamtverbindung ist im Wesentlichen vom Werkstoff und der Größe

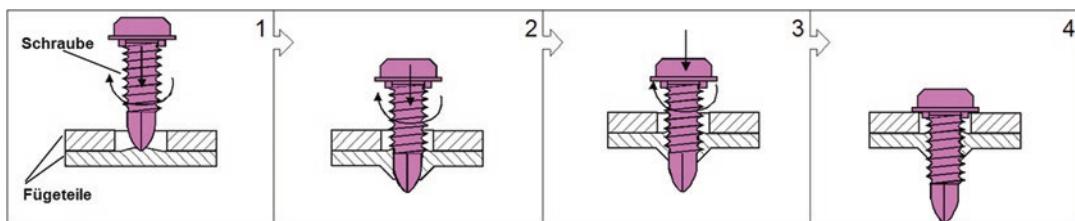


Abb. 5.211 Prozessablauf beim Verarbeiten von Loch- und Gewinde formenden Schrauben. (Quelle: DVS/EFB-Merkblatt 3440-1, Funktionselemente – Überblick. DVS Verlag, Düsseldorf)

des Fügeelementes sowie vom Werkstoff und der Materialdicke der zu fügenden Bleche abhängig. Eine einfache zerstörungsfreie Prüfung kann durch die Sichtkontrolle erfolgen, prozessbegleitend können auch entsprechende Prozessüberwachungssysteme eingesetzt werden.

5.10.3.3.4 Loch- und gewindeformende Schrauben

Loch- und gewindeformende Dünnblechschrauben sind eine Weiterentwicklung der Bohrschrauben und der gewindeformenden Dünnblechschrauben. Bei diesen Schrauben werden die Vorteile der Kernlochherstellung und des Gewindeformens kombiniert. Im Gegensatz zu den Bohrschrauben wird das Vorloch nicht spanend sondern spanlos eingebracht. Der während des Verschraubens durch Reibwärme zu einem Durchzug umgeformte Bauteilwerkstoff dient der Einbringung von tragenden Gewindengängen. Loch- und gewindeformende Schrauben können (wie das Blindnieten) bei einseitiger Zugänglichkeit zur Fügestelle verarbeitet werden, Abb. 5.211.

Qualitätskontrolle beim Verarbeiten von loch- und gewindeformenden Schrauben

Das Verschrauben von loch- und gewindeformenden Schrauben erfolgt in erster Linie automatisiert und mittels Robotertechnik. Die aus der Schraubtechnik bekannte Prozessüberwachung von Drehmomenten und Drehwinkeln wird auch hier eingesetzt.

Loch- und gewindeformende Schrauben werden sowohl im Automobilbau als auch im Bereich der weißen Ware (Gehäuse für Wasch- und Spülmaschinen) sowie im allgemeinen Bereich der Verbindung dünner Bleche eingesetzt.

Der Vorteil liegt in der hohen Festigkeit der Verbindung und der einfachen Herstellung, auch bei nur einseitiger Zugänglichkeit ohne Vorlochoperation und der zerstörungsfreien Lösbarkeit der Verbindung.

5.10.3.4 Schließringbolzen

Schließringbolzensysteme kommen aus der Anwendung in der Luftfahrtindustrie. Der große Vorteil dieser Systeme liegt im Vergleich zu Schraubenverbindungen darin, dass kein Schutz gegen ungewolltes Lösen aufgebracht werden muss, da Schließringbolzenverbindungen nicht zerstörungsfrei zu lösen sind. Aufgrund der hohen Vorspannkraft haben sie auch in weiteren Bereichen des Fahrzeugbaus Einzug gehalten und werden häufig im Baubereich, als Alternative zu Schraub- oder Vollnietverbindungen eingesetzt. Der Schließringbolzen ist meist mit parallelen Schließrillen versehen, in die der Werkstoff des Schließringes plastisch eingeförm wird, Abb. 5.212.

Schließringbolzen sind mit verschiedenen Kopfformen lieferbar, z. B. Flachrund- und

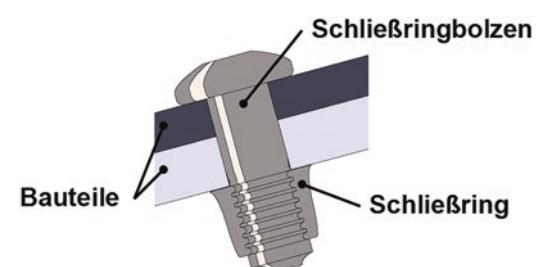


Abb. 5.212 Das System Schließringbolzen. (Quelle: DVS/EFB-Merkblatt 3435 Schließringbolzensysteme. DVS Verlag, Düsseldorf)

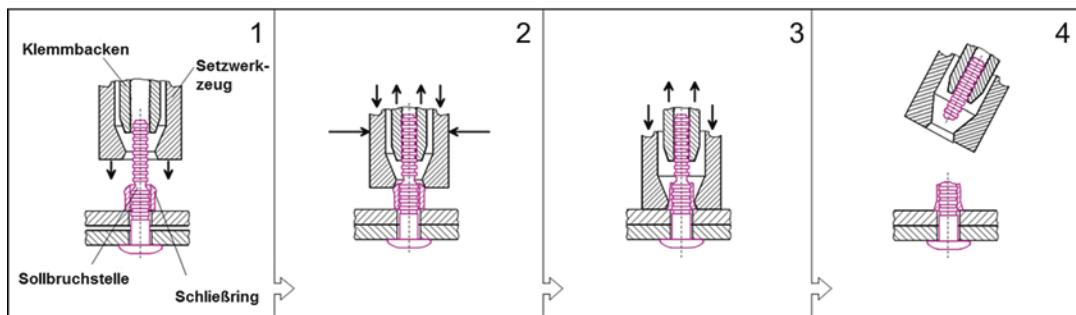


Abb. 5.213 Prozessablauf zum Herstellen einer Schließringbolzenverbindung. (Quelle: Hahn, O.; Klemens, U.: Fügen durch Umformen usw., Dok. 707 der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 1996)

90°-Senkkopf. Der Werkstoff des umzuformenden Schließringes muss immer weicher sein als der Bolzen. Standardmäßig wird Stahl (verzinkt und passiviert), aber auch rostfreier Stahl sowie Titan und Aluminium verwendet. Der Verfahrensablauf zum Herstellen einer Schließringbolzenverbindung ist in Abb. 5.213 dargestellt.

Qualitätskontrolle bei Schließringbolzenverbindungen

Die Qualität der Verbindung hängt vom Zusammenspiel der zwei Komponenten Bolzen und Ring und von dem Zugkopf als Setzwerkzeug ab. Er verformt den Schließring beim Setzvorgang, wobei der Werkstofffluss in die planparallelen Rillen des Bolzens erzwungen wird. Der Schließringbolzen darf an seiner Sollbruchstelle erst nach vollständiger Einformung des Schließrings abreissen. Zur Einhaltung einer ausreichenden Qualität müssen die Bohrlochtoleranzen und der vorgeschriebene Klemmbereich korrekt eingehalten werden. Darüber hinaus muss die plane Auflage des Setzkopfes kontrolliert werden.

5.10.3.5 Hybridfügen

Unter Hybridfügen wird die Kombination von zwei Fügeverfahren verstanden, bei dem eines der beiden Verfahren die Defizite des zweiten ausgleicht. Im Fahrzeugbau ist unter dem Hybridfügen meist die Kombination des Klebens mit einem weiteren Fügeverfahren gemeint. Das zweite Fügeverfahren unterstützt die Ver-

bindungeigenschaften während des Aushärtens des Klebstoffes, da hier noch keine Tragfähigkeit der Fügeverbindung vorliegt.

Als Ziele beim Hybridfügen sind zu nennen:

- Verbesserung der mechanischen Eigenschaften,
- Verlängerung der Lebensdauer,
- Erweiterung funktionaler Eigenschaften (Nahtabdichtung u. Isolation),
- Vermeidung von Kontaktkorrosion.

Allgemeine Fertigungshinweise zum Kleben sind dem Merkblatt DVS/EFB 3310 zu entnehmen. Im Hinblick auf die klebtechnischen Begriffe wird auf die Richtlinie VDI 2229 Metallkleben und die Norm DIN EN 923 Klebstoffe – Benennungen und Definitionen – verwiesen.

5.10.4 Qualitätssicherung

Die verfahrensspezifischen Besonderheiten der Qualitätssicherung wurden im Rahmen der Vorstellung der einzelnen Fügeverfahren erläutert. Hier soll einmal zusammengefasst die grundätzliche Thematik der Qualitätssicherung beim Herstellen einer Fügeverbindung dargestellt werden. Für die Sicherung der Verbindungsqualität gibt es eine Reihe unterschiedlicher Verfahren, die in die zerstörungsfreien und in die zerstörenden Verfahren eingeteilt werden. Zerstörungsfreie Qualitätskontrollen können in der

Produktion kontinuierlich erfolgen, zerstörende Kontrollen hingegen nur stichprobenartig, da das Bauteil nach der Prüfung nicht mehr seine Funktion erfüllt.

5.10.4.1 Zerstörungsfreie Qualitätskontrolle

Zerstörungsfreie Qualitätskontrollen im Rahmen der Verwendung der mechanischen Fügeverfahren sind insbesondere die:

- Sichtkontrolle,
- Vermessung geometrischer Größen,
- Prozessüberwachung.

Sichtkontrolle

Bei der Sichtkontrolle werden durch den Worker subjektiv Verbindungseigenschaften wie die Rissfreiheit der Verbindungsstelle, die Symmetrie/Axialität des Verbindungselementes und ähnliche Dinge überprüft. Aufgrund der Subjektivität kann die Sichtkontrolle Tendenzen aufzeigen, aber als kontinuierliche prozessbegleitende Qualitätssicherungsmaßnahme ist sie in der Regel nicht ausreichend. Die Sichtkontrolle ist unter anderem auch als zerstörungsfreie Qualitätskontrolle vom Einsatz von Schweißprozessen bekannt.

Vermessung geometrischer Größen

Hier können durch entsprechende Messmittel die geometrischen Größen der Verbindungsstelle vermessen werden. Insbesondere beim Clinchen

und Halbhohlstanzen kann die Vermessung der Bodendicke, bzw. des Stauchmaßes sehr aussagekräftig sein.

Online-Prozessüberwachung

Für eine kontinuierliche Überprüfung der Verbindungsqualität werden beim Einsatz der mechanischen Fügetechniken häufig sog. Setzprozessüberwachungssysteme eingesetzt. Für die Setzprozessüberwachung werden in der Regel die Fügekraft und der Fügeweg (Fügezeit) während des Herstellvorgangs der Verbindung mittels geeigneter Messsensorik ermittelt und anschließend in einem Kraft-Weg-Diagramm (Kraft-Zeit-Diagramm) dargestellt.

Die Möglichkeiten zur Auswertung der ermittelten Daten basieren auf dem Vergleich der aufgenommenen Ist-Werte mit vorgegebenen Soll-Werten, einer sog. Referenzkurve. Diese wird unter Berücksichtigung der vorliegenden Fertigungsrandbedingungen durch die Aufnahme mehrerer Einzelkurven, der Referenzkurvenschar, erzeugt. Die Bewertung der auszuwertenden Prozessverläufe kann dann über die Verwendung eines Toleranzbandes oder von Toleranzfenstern erfolgen.

Bei der Bewertung über ein Toleranzband muss der Prozessverlauf aus der Anwendung vollständig innerhalb vorgegebener Toleranzwerte verlaufen. Bei der Auswertung mittels Toleranzfenster muss nur ein ausgewählter Bereich der auszuwertenden Prozesskurve innerhalb vorgegebener Toleranzwerte verlaufen, Abb. 5.214.

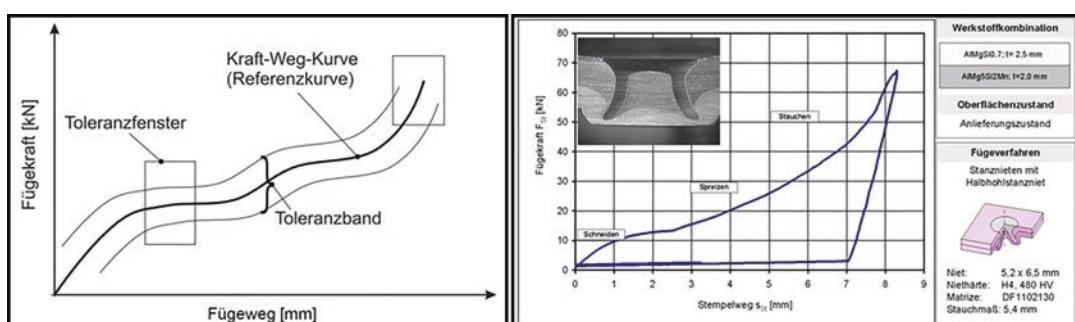


Abb. 5.214 Moderne Prozessüberwachungssysteme zur Qualitätssicherung beim Mechanischen Fügen (links: Allgemeines Funktionsprinzip, rechts: Am Beispiel Stanznieten mit Halbhohlstanzniet)

Ergeben sich nun im Prozess Veränderungen der Ausgangsbedingungen, z. B. eine Veränderung der Bauteildicken, führt das zu einer Abweichung der aufgezeichneten Prozesskurve von den vorgegebenen Toleranzwerten und es wird ein optisches oder akustisches Signal ausgelöst und bei entsprechender Verknüpfung der Geräte das Verarbeitungswerkzeug stillgelegt.

Mit modernen Prozessüberwachungssystemen werden Verarbeitungsvorgänge transparenter und die immer häufiger gestellte Forderung nach

überwachbaren und dokumentierbaren Prozessen erfüllt. Prozessüberwachungssysteme geben dem Anwender die Sicherheit, dass jede erstellte Verbindung den erforderlichen Qualitätsvorgaben genügt. Mit der Ermittlung und Dokumentation der Prozessdaten wird die Prozessstabilität aufgezeigt und die Prozessqualität darstellbar – für den Kunden und für das eigene Qualitätsmanagement. Diese Daten dienen damit als Basis der Digitalisierung von Produktionsprozessen.

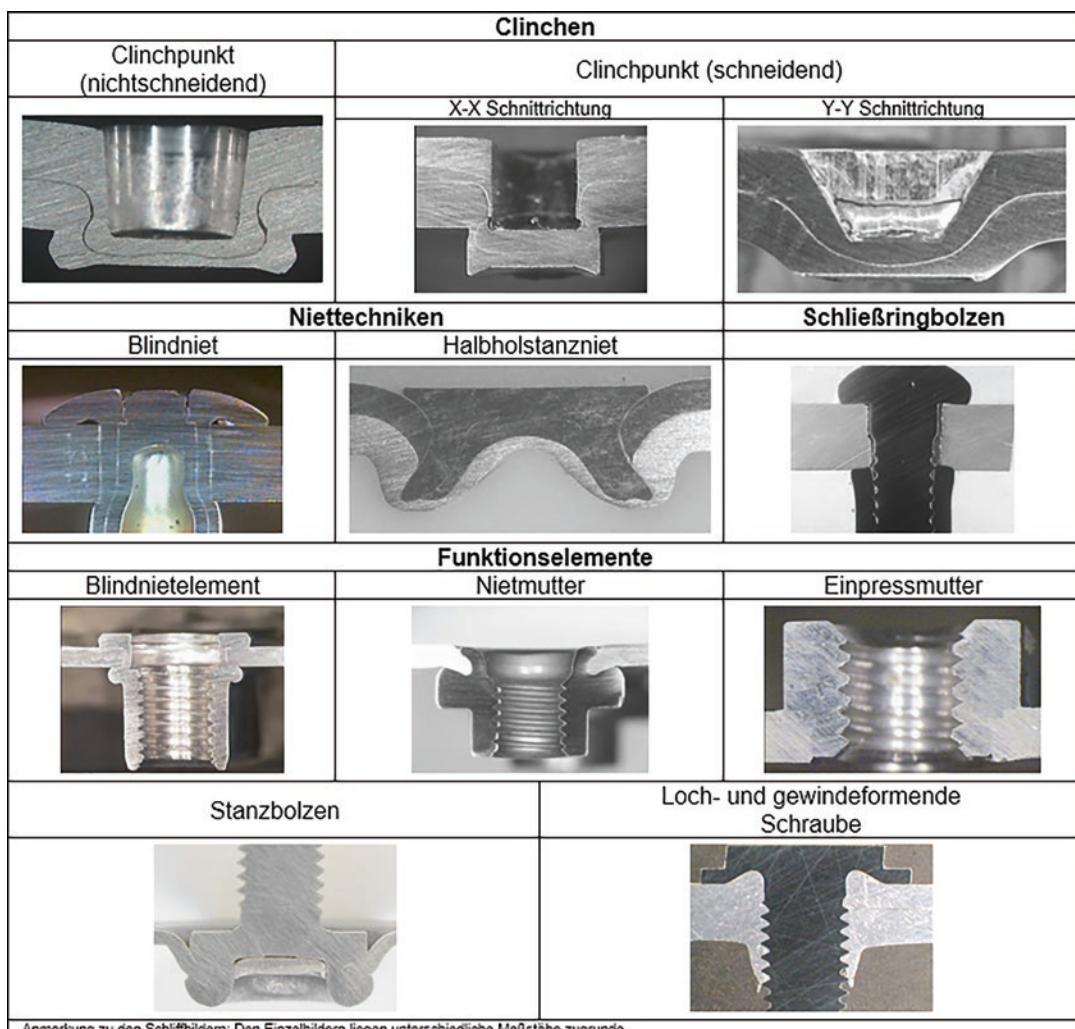


Abb. 5.215 Schliffbilder von Verbindungen, die mittels umformender Fügeverfahren hergestellt wurden, zerstörende Qualitätskontrolle

5.10.4.2 Zerstörende Qualitätskontrolle

Festigkeitsprüfung

Im Rahmen der Festigkeitsuntersuchung wird üblicherweise zwischen der quasistatischen und dynamischen Prüfung unterschieden. Ermittelt werden für beide Beanspruchungsarten i. d. R. die maximale Belastbarkeit der Fügeverbindung. Für weitere Informationen sei auf das Merkblatt DVS/EFB-Merkblatt 3480, Prüfung von Verbindungseigenschaften – Prüfung der Eigenschaften mechanisch und kombiniert mittels Kleben gefertigter Verbindungen, hingewiesen.

Schliffbilder

Im Rahmen der Verarbeitung von mechanischen Fügeverfahren ist die Erstellung von Schliffbildern ein wichtiges Instrument zur Beurteilung der Fügepunktqualität. Die bei der Beschreibung der Fügeverfahren dargestellten qualitätsrelevanten Größen an den Fügeverbindungen können über die Schliffbilder ermittelt und dokumentiert werden. Schliffbilder werden in der Anwendung nicht zur Bemusterung einer Fügeaufgabe herangezogen, sondern auch produktionsbegleitend zur Kontrolle ermittelt. Die in der Abb. 5.215 dargestellten Schliffbilder repräsentieren die im Rahmen dieses Kapitels vorgestellten Fügeverfahren.

Ergänzendes und weiterführendes Schrifttum

- *Aichele, G.:* 140 Arbeitsregeln für das Schutzgasschweißen. DVS-Verlag, Düsseldorf 2007.
- *Bargel, H.-J. (Hrsg.):* Werkstoffkunde, 13. Aufl., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2022.
- *Beckert, M., A. Neumann, S. Böhme, W. Kliemand, u. D. Kluge:* Grundlagen der Schweißtechnik, Anwendungsbeispiele der Verfahren und der Gestaltung, 7. Aufl., DVS-Verlag, Düsseldorf 1991.
- *Boese, U., D. Werner, u. H. Wirtz:* Das Verhalten der Stähle beim Schweißen. Teil 1: Grundlagen, DVS-Verlag, Düsseldorf 1995, Teil 2: Anwendung, DVS-Verlag, Düsseldorf 2007.
- *Brockmann, W., L. Dorn, u. H. Käufner:* Kleben von Kunststoff mit Metall. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1989.
- Bye, C.: Erweiterung des Einsatzfeldes von loch- und gewindeformenden Dünbblechschrauben zum Verbinden von Aluminiumhalbzeugen, Dissertation – Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik der Universität Paderborn, Paderborn 2006
- Bye, C.: Schließringbolzensysteme – zuverlässige und kosteneffiziente Verbindungs-technik. Beitrag in der Fachzeitschrift für Konstrukteure – MOBILES, 2006
- DELO Industrie Klebstoffe (Hrsg.): Bond it – Nachschlagewerk zur Klebtechnik, 5. Aufl., Windach 2015.
- DIN 1707-100: Weichlote – Chemische Zusammensetzung und Lieferformen, 2011-09.
- DIN 54455: Prüfung von Klebstoffen und Metallklebungen; Torsionsscherversuch, 1984-05.
- DIN 8541-3: Sicherheit bei Sauerstoff-schläuchen, 1995-01.
- DIN EN 923: Klebstoffe – Benennungen u. Definitionen, 2008-6.
- DIN EN 1011-2: Lichtbogenschweißen für ferritische Stähle, 2001-05.
- DIN EN 1011-7: Empfehlungen zum Elektro-nenstrahlschweißen, 2004-10.
- DIN EN 12536: Stäbe zum Gasschweißen von unlegierten u. warmfesten Stählen, 2000-08.
- DIN EN 4632-6: Schweiß- und Lötabilität im Luft- und Raumfahrzeugbau, 2013-11.
- DIN EN 60974: Lichtbogenschweißeinrich-tungen. Teil 1: Schweißstromquellen, 2014-09.
- DIN EN 1045: Hartlöten – Flußmittel zum Hartlöten – Einteilung, Lieferbedingungen, 1997-08.
- DIN EN ISO 17659: Mehrsprachige Be-nennung für Schweißverbindungen, 2005-09.
- DIN EN 29454-1: Flussmittel zum Weich-löten; Einteilung und Anforderungen, 1994-02.
- DIN EN ISO 2560: Umhüllte Stabelektronen zum LB-Schweißen, 2010-03.

- DIN EN ISO 14171: Massivdrahtelektroden zum UP-Schweißen, 2011-01.
- DIN EN ISO 13919: Schweißen – Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen; Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten. 1: Stahl, 1996-09. 2: Alu, 2001-12.
- DIN EN ISO 13920: Schweißen – Allgemeintoleranzen für Schweißkonstruktionen – Längen- und Winkelmaße; Form und Lage, 1996-11.
- DIN EN ISO 14175: Schweißzusätze – Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse, 2008-06.
- DIN EN ISO 14372: Schweißzusätze – Bestimmung der Feuchteresistenz von Elektroden für das Lichtbogenhandschweißen durch Messung des diffusiblen Wasserstoffs, 2011-10.
- DIN EN ISO 17632: Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogen-schweißen mit und ohne Schutzgas von unlegierten Stählen und Feinkornstählen, 2013-11.
- DIN EN ISO 17659: Schweißen – Mehrsprachige Benennungen für Schweißverbindungen mit bildlichen Darstellungen, 2005-09.
- DIN EN ISO 17672: Hartlöten – Lote, 2010-11.
- DIN EN ISO 2560: Schweißzusätze – Umhüllte Stabelektronen zum Lichtbogenhandschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung, 2010-03.
- DIN EN ISO 3690: Schweißen und verwandte Prozesse – Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes im Lichtbogen-Schweißgut, 2012-07.
- DIN EN ISO 4063: Schweißen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern 2011-03.
- DIN EN ISO 6848: Lichtbogenschweißen und -schneiden – Wolframelektrode –, 2014-06.
- DIN EN ISO 6947: Schweißen und verwandte Prozesse – Schweißpositionen, 2011-08.
- DIN EN ISO 9013: Thermisches Schneiden – Einteilung thermischer Schnitte – Geometrische Produktspezifikation und Qualität, 2014-12.
- DIN EN ISO 9453: Weichlöten – Chemische Zusammensetzung und Lieferformen, 2014-12.
- DIN EN ISO 9692: Schweißen und verwandte Verfahren – Schweißnahtvorbereitung. Teil 1: Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen, Gasschweißen, WIG-Schweißen und Strahlschweißen von Stählen, 2005-04. Teil 2: Unterpulverschweißen von Stahl, 1999-09. Teil 3: Metall- und Wolfram-Inertgasschweißen von Al und Al-Legierungen, 2014-11.
- DIN EN 14610: Begriffe für Metallschweißprozesse, 2005-02.
- DIN ISO 857-2: Weichlöten, Hartlöten und verwandte Begriffe, 2007-03.
- DIN-Fachbericht ISO/TR 581 Technische Regel: Schweißbarkeit – Metallische Werkstoffe – Allgemeine Grundlagen, 2007-04.
- DVS (Hrsg.): Kunststoffe – Schweißen und Kleben. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 68/4. DVS-Verlag, Düsseldorf 2001.
- DVS (Hrsg.): Taschenbuch Mechanisches Fügen. DVS-Merkblätter und -Richtlinien. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 153. DVS-Verlag, Düsseldorf 2009.
- DVS 0950 Technische Regel: Mechanisiertes WIG- und Plamaschweißen – Anforderungen an Stromquellen und Geräte-technik, 2006-01.
- DVS 0957 Technische Regel: Umgang mit umhüllten Stabelektronen – Transport, Lagerung und Rücktrocknung, 2005-07.
- DVS 2707: Technische Regel: Plamaschweißen – Verfahrensübersicht, Gaseauswahl und Kennwerte zum Schweißen, s. DVS 0950, 2001-06.
- DVS 2902 Technische Regel: Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke. Teil 1: Übersicht, 2001-09. Teil 2: Punktschweißeignung, 2001-09.

- DVS 3201 Technische Regel: Grundsätze für das Konstruieren von Bauteilen für das Elektronenstrahlschweißen im Fein- und Hochvakuum, 2001-05.
- DVS 3204 Technische Regel: Elektronenstrahl-Schweißeignung von metallischen Werkstoffen, 2013-09.
- DVS 3311: Klebaufsicht. Aufgaben u. Verantwortlichkeiten. Düsseldorf 2012-05.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3420, Clinchen – Überblick. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3410, Stanznieten – Überblick. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3430, Blindnieten. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3435-1, Schließringbolzensysteme. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3435-2, Schließringbolzensysteme – Berechnung von Verbindungen nach Eurocode 3 und VDI 2230 Blatt 1. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3440-1, Funktionselemente – Überblick. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3440-3, Funktionselemente – Blindnietelemente. DVS Verlag, Ddf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3440-2, Funktionselemente – Einstanz-, Einniet-, Einpresselemente. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3440-4, Funktionselemente – Loch- und gewindeformende Schrauben. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3470, Mechanisches Fügen – Konstruktion und Auslegung – Grundlagen/Überblick. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3450-1, Hybridfügen – Clinchkleben – Stanznietkleben – Überblick. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3460, Nacharbeit und Reparatur von unlösbar mechanisch gefügten Verbindungen. DVS Verlag, Düsseldorf.
- DVS®/EFB- Merkblatt 3480-1, Prüfung von Verbindungseigenschaften – Prüfung der Eigenschaften mechanisch und kombiniert mittels Kleben gefertigter Verbindungen. DVS Verlag, Düsseldorf.
- *Dilthey, U.:* Schweißtechnische Fertigungsverfahren, Bd. 1, Schweiß- und Schneidtechnologien, 3. Aufl., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2006.
- *Dorn, L.:* Hartlöten u. Hochtemperaturlöten. Expert-Verlag 2007.
- *Enke, K., u. St. Gölde:* Anwendungsmöglichkeiten der Kle 技术 im Montagebereich von Baumaschinen. Dipl.-Arbeit an der TFH Berlin 1996, Betr.: Prof. Dr. A. H. Fritz.
- *Fauner, G., u. W. Brockmann:* Fügen durch Kleben. In: Handbuch der Fertigungstechnik, Bd. 5: Fügen, Handhaben, Montieren. Hrsg. G. Spur u. Th. Stöferle. Hanser-Verlag, München, 1986.
- Fraunhofer-Institut IFAM, Bremen: Kleben. Podcast unter Produktionstechnik, [youtube wisconsinfloaters](https://www.youtube.com/wisconsinfloaters).
- *Habenicht, G.:* Kleben – erfolgreich und fehlerfrei. 7. Aufl., Springer 2016.
- Hahn, O.; Bye, C.; Ruther, M.; Küting, J.: Fügen von faserverstärkten Kunststoffen im strukturellen Leichtbau. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben, Paderborn, 2004
- *Hennemann, O.-D., W. Brockmann, u. H. G. Kollek:* Handbuch Fertigungstechnologie Kleben. Hanser-Verlag, München 1992.
- *Hermann, F.-D.:* Handbuch der Schweißverfahren, Teil 2, Autogentechnik, Thermisches Schneiden, Elektronenstrahlschweißen, Lasersstrahlschweißen, Reibschiessen, Ultraschallschweißen. DVS-Verlag, Düsseldorf 1992.
- *Hofmann, H.-G., Mortell, J.-W., P. Sahmel u. H.-J. Veit:* Grundlagen der Gestaltung geschweißter Stahlkonstruktionen (10. Aufl., DVS-Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 12). DVS-Verlag, Düsseldorf 2005.
- *Killing, R. (Hrsg.):* Handbuch der Schweißverfahren 1. Lichtbogenschweißverfahren. DVS-Verlag, Düsseldorf 1999.
- *Kuo, S.:* Welding Metallurgy. Verlag Wiley-Interscience 2002.
- *Lippold, J. C., u. D. J. Kotek:* Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2005.
- *Matthes, K.-J., u. F. Riedel (Hrsg.):* Fügetechnik – Löten, Kleben, Fügen durch Um-

- formen. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Wien 2003.
- *Neumann, A.*: Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure, Teil 1. DVS-Verlag, Düsseldorf 1996.
 - *Ruge, J.*: Handbuch der Schweißtechnik, Bd. II: Verfahren und Fertigung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 3. Aufl. 2014.
 - *Schuler, V. u. J. Twrdek*: Praxiswissen Schweißtechnik. 6. Aufl. Springer Vieweg 2019)
 - *Schulze, G.*: Die Metallurgie des Schweißens, 4. Aufl., Springer-Verlag, Berlin 2010.
 - Technische Regel für Gefahrstoffe (Hautkontakt), TRGS 401, Änd. 2009-12.
- *Walker, J. R.*: Arc Welding. Verlag Goodheart-Wilcox Publisher 2000.
 - Podcasts unter Produktion-/Fertigungstechnik bei: [Youtube wissensfloater](#)
 - Abbrennstumpfschweißen von Schienen,
 - Bolzenschweißen,
 - Buckelschweißen,
 - Kleben,
 - Laserstrahlschweißen und -schneiden mit Industrierobotern,
 - Schienenschweißen mit dem Thermit-Prozess.

Stichwortverzeichnis

A

Abbrennstumpfschweißen, 482, 483, 547, 550

Abgasbauteil (IHU), 210

Abkantpresse, 203

Abkühlungsschaubild, 19

Abschrägung

Sintern, 115

Abstreckziehen

Getränkedosenfertigung, 188

Abtragen

elektrochemisches, 345, 352

funkenerosives, 346

thermisches, 345

Aluminiumlegierung, 40

Anisotropie, senkrechte, 200

Anschnittquerschnitt, 49

Anschnittsystem, 76

Apfelsinenhaut, 194

Arbeitsbedarf

Walzen, 159, 162

Ätzen, 351

elektrochemisches, 353

Auftragschweißen, 497

Auftrieb, 14

Gießen, 14, 100

Aufweiten durch Innen-Hochdruck-Umformen (IHU),

224

Ausbringen (Gießen), 82

Außenlunker, 48

Auswerferstift, 76

B

Ballen, 63

Bearbeitungszugaben, 497

Bentonit, 59

Biegegesenk, 203

Biegen

Biegeumformen, 203

Einteilung der Biegeverfahren, 203

Rundbiegen, 204

Schwenkbiegen, 204

Biegeumformen, 203

Bindemittel, 57

kalt-/heißhärtende, 57

Bindeton, 57

Blockseigerung, 55

Bodenreißer, 187

Bolzenschweißen, 497

Bondern, 184

Bördeln, 204

Börsenmetall, 44

Brandriss, 54

Breiten, 164

Brennschneiden, autogenes, 346, 354, 366

Buckelschweißen, 471, 475, 480, 481, 547, 550

C

CO₂-Verfahren (Gießen), 66

Cold-Box-Verfahren, 69

Croning=Verfahren, 57

D

Dauerform, 11, 13, 44, 45

Dauermodell, 11

Dendrit, 24

Diamant-Ziehstein, 184

DIN

01547, 184

01688-1, 64

06935, 206

07523-2, 168, 231

08582, 141

08583, 154, 172

08583-2, 196

08584-1, 183, 189

08586, 203

DIN EN

01562, 37

01563, 33

01564, 34

10002-1, 151

10243-1, 230

12890, 11

ISO 20482, 201

Drahterdieren, 350

- Drahtziehen
-1-, Kraftbedarf, 185
Diamant-Ziehstein, 184
- Drücken, 195
- Druckgießform, 75
- Druckgießverfahren, 74
- Druckguss, 13
einhalbare Toleranz, 79
Formhaltbarkeit, 79
Nachdrückverfahren, 78
Vakuumverfahren, 78
- Druckgusslegierung
Aluminium=Silicium-, 40
Magnesium=Aluminium-, 40
Schweißverhalten, 395
- Druckstelle, 55
- Druckumformen, 154
- Duplexbetrieb, 12
- Durchdrücken, 173
Fließpressen, 177
Kaltfließpresse, 177
Strangpressen, 173
- Durchziehbedingung, 161
- Durchziehen, 161
- E**
- Eigenspannung, 199
- Eindrückverfahren
Maßprägen, 170
Prägen, 170
Wärmeinsenken, 173
- Einfallunker, 13
- Einsenken, 170
- Eisengusswerkstoff, 16, 265
- Eisen-Kohlenstoff-Schaubild, 28
- Elektrostauchverfahren, 163
- Elementarzelle, 143
- Entformen, 15
- Entgraten, elektrochemisches, 353
- Entlastungslöch, 194
- Erstarrung
gelenkte, 49
gerichtete, 22, 64
- Erstarrungsintervall, 19
- Erstarrungsmodul (M), 49
- Erstarrungssimulation, 50
- Erstarrungszeit, 15
nach Chovrinow, 49
- Erstaufnahmefläche, 9
- F**
- Faltenbildung beim Tiefziehen, 190
- Feinguss, 70
- Feinkorngefüge, 20
- Feinschicht, 72
- Ferrit, 29
- Festigkeitshypothese, 149
- Feuerverzinken, 79
- Flachwalze, 155
- Fließbedingung, 149
- Fließfigur, 200
- Fließgrenze, 149
- Fließkurve, 150
- Fließpressen
Umformarbeit, 180
- Fließscheide, 160
- Fließspannung, 150
- Fließvermögen (einer Schmelze), 46
- FMEA (Fehler-Möglichkeits- und Einflussanalyse), 17
- Form
Dauer-, 11, 13, 44, 45
verlorene, 11
- Formänderung, 149
- Formänderungsanalyse, 201
- Formänderungsverhältnis, 149
- Formen
kastenloses, 65
- Formfüllung, 89
- Formmaschine, 10
- Formschräge, 11
- Formstoff
Bentonit, 59
Feuerfestigkeit, 58
Formsand, 57
Gasdurchlässigkeit, 58
Maskenformverfahren, nach Croning, 67
tongebundene, 59
Zementsand, 61
- Formstoffballen, 65
- Formteilung, 9
- Form- und Gießanlage, vollautomatische, 63, 86
- Formverfahren
Feingießverfahren, 70
Handformen, 60
kastenloses, 65
mit Dauerform, 74
mit verlorener Form, 70
- Freiform, 154
- Freiformschmieden, 163
- Fremdkeim, 21
- Fügen durch Umformen, 204
- Funkenerosion, 184
- G**
- Gasaufnahme, 46
- Gasblase (Gaslunker), 53
- Gaslöslichkeit, 53
- Gaslunker, 53
- Gasschweißen, 354, 393, 403, 404, 407, 408
- Gefüge
anisotropes, 37
dendritisches, 24
dichtes, 64
Feinkorn-, 20
Grobkorn-, 20

- Guss-, 19, 23, 82
primäres, 20
Widmannstätten'sches, 39
- Genauguss, 56
Genaugussstück, 44
Genauschmieden, 168, 169
Gesenkform, 154
Gesenkschmieden, 167
Gestaltung
 Gesenkschmiedestücke, 228, 232
 Gussteil, 96, 102
 Sinterteil, 112, 114, 115
 Umformen, 228
Getränkedosenfertigung, 188
Gewindefurche, 158
Gewindewalzen, 156
Gießbarkeit, 45
Gießeigenschaft, 30
Gießen, 9
 Ausbringen, 82
 Ballen, 9
 Erstaufnahmefläche, 9
 Fehler=Möglichkeits- und Einflussanalyse, 17
 Formhälfte, 9
 Gasaufnahme, 46
 Grat, 10
 Kern, 10
 Putzarbeit, 16
 Rattenschwanz, 46
 Rheogießen, 84
 Rohteilzeichnung, 8
 Schü尔pe, 46
 Schwindung, 46
 Stichprobenprüfung, 16
 Thixogießen, 84
 umweltfreundlicher Betrieb, 17
 Warmriss, 46
Gießofen, 77
Gießschmelzschweißen von Kranschienen, 492
Gießspirale, 46
Gießverfahren, 56
Glattwalze, 158
Gleitsystem, 145
Gleitziehen, 183
Gratverhältnis, 168
Grau-Erstarrung, 31
Greifbedingung, 160
Grobkornbildung, 55
Grünling, 107
Gussbronze, 45
Gusseisen
 bainitisches, 34
 Brinellhärte, 33
 Gießeigenschaft, 27
 legiertes, 34
 mit Kugelgrafit, 31
 mit Lamellengrafit, 30
 mit Vermiculargrafit, 35
 Sättigungsgrad, 31
 selbstspeisendes, 51
 Weißeinstrahlung, 31
- Gussfehler, 46
Gusslegierung
 Aushärtungseffekt, 44
 Kokillen-, 43
 Sand-, 44
 Schwermetall-, 44
 Zinkdruck-, 44
Gussmessing, 45
Gussputzen, 9, 15, 372
Gussstück, druckdichtes, 26, 40
Gussteil
 Gestaltung, 96, 102
Gussversatz, 64, 98
Gusswerkstoff, 8
 austenitischer, 34
 Börsemetall, 44
 Entstehung des Gefüges, 29
 Gussbronze, 45
 Gusseisen mit Vermiculargrafit, 30
 Gussmessing, 45
 Keimbildung, 77
 Kristallformen, 22
 Kupfer-, 45
 Leichtmetall-, 39
 Nichteisen-, 27
 Warmstreckgrenze, 51
- H**
Hämatit (Gießen), 81
Hartguss, 51
Heißkokille, 82
Heißpressen (Pulver), 108
Herdguss
 gedeckter, 60
 offener, 60
Heuversfaktor, 49
Heuverssche Kreismethode, 49
Hinterschneidung, 70
Hohl-Gleitziehen, 186
Hohlkern, 67
Hohlprägen, 198
Hohl-Vorwärts-Fließpressen, 182
Hot-Box-Verfahren, 69
- I**
IHU, s. Innenhochdruckumformen, 209
Impfen (der Schmelze), 21
Innenhochdruckumformen (IHU), 209
 Bauteilauslegung, 213
 Fertigungsbeispiel, 222
 Machbarkeitsanalyse, 213
 Maschinenfähigkeit, 219
 Prototyping, 218
 Prozessfähigkeit, 220
 Qualitätssicherung, 217

- Rohteil-Geometrie, 214
 Simulation der Formgebung, 214
 Versagensfall, 215
 Werkstoffe, 214
 Wirtschaftlichkeit, 221
 Innenlunker, 48
- K**
 Kälken, 184
 Kalteinsenken, 173
 Kaltfließpresse, 177, 179
 Kaltharzsand, 61
 Kaltharzverfahren, 69
 Kaltkammerverfahren, 74, 75
 Kaltriss, 25, 51
 Kaltschweißstelle, 47
 Kaltumformen, 142
 Karosserieteil, 194, 201
 Kastenformerei, 61
 Kegelstauchversuch, 151
 Keim
 arteigner, 20
 artfremder, 21
 Kern, 10
 Kernauftriebskraft, 14
 Kerneisen, 60
 Kernfertigungsline, 86
 Kernlager, 14, 60, 100
 Kernpaketverfahren, 85
 Kernsand, 57
 Kernversatz, 55
 Kettenziehbank, 184
 Kipptiegelgießen, 81
 Kleben, 387, 472
 Klebstoffart, 522
 Klopfdichte, 105
 Kohlensäure-Erstarrungsverfahren, 66
 Kokille, 11, 20
 Kokillengießverfahren
 Kipptiegelgießen, 81
 Schwerkraftgießen, 81
 Kokillenguss, 21, 44, 85
 Kokillengusseisen, 51
 Kokillenträger, 83
 Kolbenlegierung, 44
 Korngrenzenfilm, 51
 Kraftwirkung, 152
 Kragenziehen, 183
 Kristallform
 dendritische, 24
 globulare, 23
 Kristallform, stängelartige, 24
 Kristallisation, 18
 gerichtete, 22
 naheutektische, 30
 warmrissfreie, 38
 Kupfergusswerkstoff, 45
 Kupolofen, 12
- L**
 Lamellengrafit, 30
 Längen, 197
 Längswalze, 155
 Langzeitveredlung, 21
 Lärmminderung beim Stanzen, 240
 Laserbogenschweißen, 409
 Laserschneiden, 363
 Laserstrahlschweißen, 388, 393, 467–470
 Ledeburit, 30
 Lochen, 165
 mit Hohldorn, 173
 Schmiedestück, 169
 Lost Foam Process, 74
 Löten, 499
 Lotwerkstoff, 509
 Lüders-Linie, 200
 Lunker, 25
 Außen-, 48
 Innen-, 48
 Mikro-, 48
 Schwamm-, 53
 Lunkerung, 48
- M**
 Magnetformverfahren, 57, 74
 MAK-Wert, 69
 Maschinenfähigkeit, 219
 Maschinenform
 Cold-Box-Verfahren, 69
 Hot-Box-Verfahren, 69
 Kaltharzverfahren, 68
 Maskenformverfahren
 Phenol=Kresol-Harz, 68
 Maskenschüttverfahren, 68
 Maßprägen, 170
 Matrizenabzugsverfahren, 108
 Meehanite=Gusseisen, s. Gusseisen mit Kugelgraffit, 32
 Messrastertechnik, 201
 Mikrolunker, 26, 48
 Mikroschleifen, 327
 Modell, verlorenes, 70
 Modellbau, 8
 Modellgüteklaasse, 11
 Modellsand, 57
 Modelltraube (Modellbaum), 72
 Modultheorie, 49
- N**
 Nassguss, 25
 Nassgussform, 60
 Nassgusssand, 64
 Nassputzverfahren, 16
 Natursand, 59
 Nichteisen=Gusswerkstoff, 27
 Niederdruck=Kokillengussverfahren, 82, 87
 Niederdruckkokillenguss, 87

- Novolake, 68
- Rüttel-Press=Abhebeformmaschine, 63
- Rüttel-Press=Formmaschine, 66
- P**
- Penetration, 46
- Perlit, 29
- Phenol=Kresol-Harz, 68
- Phosphatierverfahren (Bondern), 184
- Pilgerschrittwalzen, 155
- Planschleifen, 322
- Plastometer, 154
- Prägen, 170
- Formänderungswiderstand, 171
- Maß-, 170
- Präzisionsguss, 56, 70
- Presse
- hydraulische, 194, 195
- isostatische, 109
- Pressling, 106
- Presta-Fügeverfahren, 227
- Primärgefüge, 20
- Profilform, 174
- Profilwalze, 155
- Projizerstreckdrücken, 196
- Prozessfähigkeit, 220
- Pulvererzeugung (Sintern), 106
- Pulvermetallurgie, s. a. Sintern, 104
- Putzen, 15
- Putzöffnung, 100
- Q**
- Qualitätsregelkarte, 220
- Qualitätssicherung (Gießen), 544
- Quarzausdehnungsfehler, 54
- Querwalzen, 156
- R**
- Rändeln, 173
- Rattenschwanz, 54
- Raumerfüllung (Sintern), 105
- Räumnadel, 381
- Reaktion, eutektische, 19
- Reckwalze, 156
- Reibschweißen, 484
- Reißrippe (Feder), 52
- Rheogießen, 84
- Rillennachlauf, 359
- Rippe, 96, 98, 99, 101
- Rippenkreuz, 52
- Rollennahtschweißen, 478
- Rottguss, 44
- Rückfederung, 199
- Rückfederungsdiagramm, 205
- Rückfederungsfaktor (EMBED Equation.DSMT4), 205
- Rückwärts-Fließpressen, 178
- Rundbiegen, 204
- Rundschleifen, 322
- S
- Sandform (verlorene Form), 13, 20, 44, 64
- Sandgussfehler, 55
- Sandkernpaket, 86
- Sättigungsgrad, 31
- Schablonenform, 60
- Schaumstoffmodell, 73
- Schieneschweißen
- Schleifen, VI
- Schleudergießverfahren
- Lavaud=Kokille, 82
- Schleuderguss, 13
- Schlichte, 54, 56
- Schließkraft, 76
- Schmiedefehler (Stich), 231
- Schmiedehammer, 166
- Schmiedemanipulator, 167
- Schmieden
- Arbeitsbedarf, 169
- Freiform-, 163
- Streck-, 163
- Schmiedepresse, 166
- Schmiedetemperatur, 163
- Schmierstoff, 184
- Schore, 60
- Schrägwalze, 158
- Schroten, 165
- Schrumpfspannung
- Abkühlen Schmelze, 19
- Schrumpfung, 48
- Schülpe, 46, 54
- Schütsintern, 107
- Schwammlunker, 53
- Schweißeignung
- Stahlguss, 38
- Schweißen
- aluminothermisches, 490
- Bolzenschweißen, 487
- Einteilung der Verfahren, 210
- Elektronenstrahlschweißen, 462
- Widerstandsschweißen, 471
- Schwenkbiegen, 204
- Schwereseigerung, 55
- Schwerkraftgießen, 13
- Schwindung, 46
- Erstarrungs-, 49
- kubische, 48
- Laserstrahlschweißen, 388
- Seigerung
- Block-, 55
- Kristall-, 55
- Reibschweißen, 484
- Schwere-, 55
- Thermitschweißen, 490
- Unterpulverschweißen, 453

- Widerstandsschweißen, 471
- Senken
- funkenerosives, 347
- Sievertssches Gesetz, 53
- Simulation
- Gussteil, 88
 - Tiefziehteil, 191
- Sinterlegierung, 110
- Sintern (Pulvermetallurgie), 104
- Heißpressen, 108
 - Klopfichte, 105
 - Klopfvolumen, 105
 - Pressling (Grünling), 106
 - Presstechnik, 107
 - Pulver, 105
 - Tränkwerkstoff, 111
 - Zweiteilchenmodell, 110
- Sinterschmieden, 109
- Sinterstahl, 110
- Spannung-Dehnung-Schaubild, 150
- Spannungskreis, Mohr'scher, 149
- Spannungsverhältnis (Walzspalt), 160
- Speiser (Steiger), 9, 49
- Sphäroguss, s. Gusseisen mit Kugelgrait, 32
- Spitzenlossschleifen, 323
- Spreizwerkzeug, 198
- Spritzgießen, 12
- Stabziehen, 183
- Stahlguss
- austenitischer, 37
 - Fertigungsschweißen, 38
 - Schweißeignung, 38
- Stängelkristall, 24
- Stauchversuch, 151
- Steiger, 49
- Stichabnahme, 162
- Strangguss, 84
- Stranggussbramme, 159
- Strangpressen, 154, 173, 177
- Kraftbedarf, 177
 - Profilformen, 174
 - Ugine-Séjournet-Verfahren, 174
 - Voll-Vorwärts-, 175
 - von Stahl, 174
- Streckrichten, 199
- Streckschmieden, 163
- Streckziehen, 199
- Syphonabstich, 12
- T**
- Tangential-Streckziehen, 199
- Teilungsgrat, 10, 55
- Temperguss
- schwarzer, 37
 - weißer, 37
- Temperhartguss, 36, 51
- Textur, 200
- Thermit®-Schweißen, 490
- Thixoforming, 84
- Thixogießen, 84
- Thixotropie, 84
- Tiefen (Streckziehen), 198
- Hohlprägen, 198
 - Streckrichten, 199
 - Streckziehen, 199
 - Tangential-Streckziehen, 199
- Tiefschleifen, 326
- Tiefungsversuch nach Erichsen, 201
- Tiefziehen
- Apfelsinenhaut, 194
 - Faltenbildung, 190
 - im Erstzug, 189
 - im Weiterschlag, 189
 - Werkzeuggestaltung, 192
 - Zipfelbildung, 190
 - Zuschnittermittlung, 193
- Tränkwerkstoff, 111
- U**
- Überlaufbohne, 76
- Ugine-Séjournet-Verfahren, 174
- Umbördeln, 204
- Umformarbeit, 152, 180
- Umformen
- Grundlagen, 143
 - Kraftwirkung, 152
 - Plastometer, 154
- Umformgeschwindigkeit, 154
- Umformgrad, 149
- Umformtemperatur, 153
- Umformverfahren
- Einteilung (DIN 8582/87), 142
 - Vorteile, 142
- Umformwiderstand
- Schmieden, 169
- Umformwirkungsgrad, 152, 170, 177, 189
- Abstreckziehen, 188
 - Gesenkschmieden, 170
 - Tiefziehen, 189
 - Warmumformen, 177
- Unterkühlung, 21
- Urform
- Gießen, 8
- V**
- Vakuumgießen, 53
- Vakuumverfahren, 78
- Verbundgießen, 57
- Verbundkonstruktion (Guss-Schweiß-), 39
- Verbundwerkstoff, 104
- Veredeln (der Schmelze), 64
- Verfahren (Gießen), 66
- Verfestigungsexponent, 151
- Vermiculargrait, 30
- Versatz

- Gesenkschmiedestück, 229
Hohlfließpressen, 229
Versetzung, 149
Verzahnungsauslauf (Gießen), 115
Vielkristall, 145
Vollformgießverfahren, 73
Voll-Vorwärts-Strangpressen, 175
Vorwärts-Fließpressen, 178
- W**
Wachsaußschmelzverfahren, 70
Wachsmodell, 70
Walze, 155
 Definition und Einteilung, 155
 Kraft- und Arbeitsbedarf, 162
Walzspalt, 158
Walzstraße, 159
Walztheorie, 159
Warmbreitbandstraße, 159
Warmkammerverfahren, 74
Warmriss (Gießen), 46, 51
Warmrissneigung, 64
Warmumformen, 142
Wasserglas, 66
Wasserstrahlschneiden, 366
Wechselzeit (Werkzeug), 216
Weißeinstrahlung (Gießen), 31
Weißmetall, 70
Weiten, 198
Werkstoffeigenschaft
 Gusseisen (Lamellengrafit), 31
- Sinterwerkstoff, 108
Werkstückeigenschaft (Gießen), 8
Werkzeugauslauf, 96
Widmannstätten'sches Gefüge, 39
Wirkmedium, 198
Wirtschaftlichkeit (IHU), 221
- Z**
Zementit, 29
 Gleitziehen von Rohren, 186
 Zug-Druck-Umformen, 183
Zementsand, 61
Ziehbank, 184
Ziehstein, 184
Ziehverhältnis, 190
Zinkdruckguss=Legierung, 44
Zipfelbildung (Tiefziehen), 190
Zug-Druck-Umformen
 Abstreckziehen von Hohlkörpern, 187
 Diamant-Ziehstein, 184
Zugumformen
 Kennwertvermittlung, 200
 Längen, 202
 Näpfchen-Tiefziehprüfung nach Swift, 201
 Spreizwerkzeug, 198
 Tiefen (Streckziehen), 198
 Tiefungsversuch nach Erichsen, 201
 Weiten, 198
Zweiteilchenmodell, 110