Fritz · Schulze (Hrsg.)

Fertigungstechnik

10., neu bearbeitete Auflage

Springer Vieweg

Springer-Lehrbuch

Alfred Herbert Fritz • Günter Schulze
(Hrsg.)

Fertigungstechnik

10., neu bearbeitete Auflage

Springer Vieweg

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. A. Herbert Fritz
Berlin
Germany

Prof. Dr.-Ing. Günter Schulze

ISSN 0937-7433
ISBN 978-3-642-29785-4 ISBN 978-3-642-29786-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-29786-1

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

Springer Vieweg
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1994, 1997, 2001, 2003, 2006, 2008, 2010, 2012
Dieses 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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort zur 10. Auflage

Die Aktualität eines Fachbuches aufrecht zu erhalten, ist für Autoren, Herausgeber und Verlag eine Herausforderung und Verpflichtung. Die Bearbeitung dieser Auflage wurde erschwert durch den bedauerlichen Tod des Mitherausgebers, Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Schulze, im Frühjahr 2011. Herr Dr. Schulze hatte nicht nur die Inhalte weiter Teile des Buches zu verantworten, sondern auch Struktur, Grafiken und Layout zurückliegender Auflagen in mühevoller Detailarbeit geprägt. Wir werden ihn in dankbarer Erinnerung behalten. Ein besonderer Dank gebührt auch dem Kollegen Prof. Dipl.-Ing. Manfred Knipfelberg aus Wolfenbüttel. Er hat von der 1. bis zur 7. Auflage die Urformverfahren Gießen und Sintern bearbeitet und ständig aktualisiert. Seine Grundkonzeption wurde auch in der vorliegenden Auflage beibehalten.

Die Wirtschaftlichkeit der industriellen Produktion hängt u. a. von der richtigen Auswahl der Fertigungsverfahren ab. Neben der angestrebten Kostensenkung ist auch immer eine Steigerung der Produktivität erwünscht. Beide Ziele sind nur erreichbar, wenn Produktionsplaner, Fertigungstechniker und Konstrukteure ausreichende Kenntnisse über die neuesten technischen Entwicklungen zur Verfügung haben. Wegen der raschen Neuerungen auf mehreren Sachgebieten wurden in der vorliegenden Auflage einige Unterkapitel neu bearbeitet.

Der Abschnitt 2.9 „Generative Fertigungsverfahren (Rapid Technologien)“ wurde völlig neu erstellt, da sich die bisherige Prototypenfertigung in den letzten Jahren bis zur Herstellung von einbaufertigen Ersatzteilen und Werkzeugen fortentwickelt hat (Direct Manufacturing). Die neuen Praxisbeispiele reichen vom Turbinenbau bis zur Zahnmedizin. Die Qualifizierung von Werkstoffen für das Metall-Laser-Sintern umfasst Auswahl, Kennwertermittlung und Anpassung an die Fertigungsmaschinen. Auf diesem Sektor sind die deutschen Maschinenhersteller weltweit führend.
Der Abschnitt 4.7 „Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden“ (Schleifen, Honen, Läppen) wurde völlig neu gestaltet. Hier wurden neuere Aspekte zur prozessintegrierten Messung beim Schleifen eingebracht. Interessant sind auch die Ansätze zur Miniaturisierung bei Strukturabmessungen von wenigen Mikrometern. Die kleinsten eingesetzten Schleifstiftdurchmesser liegen bei 60 µm.
Der Abschnitt *Thixogießen* wurde um Angaben zum Thixo-Umformen von Aluminium- und Magnesiumlegierungen ergänzt. Diese stützen sich vorwiegend auf die Podcast-Quelle des Instituts für Umformtechnik (IFUM) der Universität Hannover, erstellt für die Bergische Universität Wuppertal.

Als Podcast werden Mediendateien bezeichnet, die direkt im Internetbrowser abgerufen werden können. Nach dem Herunterladen öffnet sich ein Movieplayer (z.B. Windows Media Player). Der Ablauf beginnt dann automatisch. Die Bergische Universität Wuppertal hat unter www.wissensfloater.de spezielle kurze Lehrfilme und PowerPoint-Bildschirm-Präsentationen erstellt, die mit vielen visuellen Elementen einen kleinen, abgeschlossenen Wissensbereich interessant darstellen. Sie können als Podcast oder PP-Datei kostenfrei und ohne Passwort heruntergeladen werden, auch auf mobile Telefone. Damit wird Schülern und Studierenden der sachgerechte Einblick in das technische Know-how und die Entstehung technischer Produkte gegeben.

In diesem Fachbuch wird erstmalig jeweils am Beginn eines Kapitels durch eine Fußnote auf einen vorhandenen Wissens-Floater hingewiesen. Dadurch kann der Studierende einen ersten Einblick in das Thema gewinnen und der Praktiker seine Kenntnisse vom Verfahrensablauf auffrischen. Im Einzelnen sind z.Zt. Podcasts in HD-Qualität oder für das Mobiltelefon sowie PP-Präsentationen zu folgenden Kapiteln dieses Buches unter www.wissensfloater.de (Rubrik Downloads und Produktions-/ Fertigungstechnik) abrufbar:
Kapitel 2: Das Prinzip Sandguss, Gießen in Dauerformen, Gießen von Großgussstücken, Stranggießen von Gusseisen, Pulverpressen und Sintern, Rapid Prototyping & Co – generative Verfahren, Thixoforming – zwischen Gießen und Schmieden.
Kapitel 3: Abbrennstumpfschweißen von Schienen, Buckelschweißen, Schienenschweißen mit dem Thermit-Prozess, Laserstrahlschweißen und -schneiden mit Industrierobotern, Kleben.
Kapitel 4: Drehen: eine Kurzeinführung, Metalle schneiden mit dem Laserstrahl.
Kapitel 5: Kaltwalzplattieren, Walzen von Schienen, Tiefziehen in der Kfz- und Metalltechnik, Streckziehen.
Mit dieser neuen Visualisierungsmöglichkeit einzelner Themen mit 5 bis 8 min dauernden Kurzfilmen hoffen die Herausgeber, den Benutzern dieses Fachbuches eine wertvolle Hilfe anbieten zu können.

Berlin, im Juli 2012 A. Herbert Fritz

Vorwort zur ersten Auflage

Das vorliegende Lehr- und Nachschlagewerk »Fertigungstechnik« soll die Lücke schließen zwischen den großen mehrbändigen, überwiegend theorieorientierten 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 gemäß 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 und
- spanlose Fertigungsverfahren (Umformverfahren)

wird in vielen Fachhochschulen und Universitäten bevorzugt.
Bei den Gießverfahren muss berücksichtigt werden, dass der Studienanfänger heute keinen gesicherten Bezug mehr zum Gießen hat. 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 Gussteilen ist mit 50 % der Fahrzeugbau.

Die Kenntnis noch so vieler verfahrenstechnischer Einzelheiten ist keine hinreichende Gewähr für den sinnvollen Einsatz der schweißtechnischen Fertigungsverfahren. Wesentlich ist die Erfahrung, dass die beim Schweißen ablaufenden Werkstoffänderungen einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Gütewerte der Schweißverbindung haben können. 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 gegliedert in solche mit geometrisch bestimmten und solche mit geometrisch unbestimmten Schneiden. Die Autoren haben die neuesten Begriffe der Zerspantechnik 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 Fertigungsmöglichkeiten, Werkzeuge 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 genaueren Ergebnisse für den praktischen Einsatz im Betrieb.

Zu jedem Abschnitt des Buches werden konstruktive Hinweise in Form der Gegenüberstellung »zweckmäßige und unzweckmäßige Gestaltung« gegeben. Somit hat der Anfänger die Möglichkeit, grobe Fehler in der Gestaltung der Teile zu vermeiden, und der Praktiker wird daran erinnert, wie er die Bearbeitung und das Spannen von Werkstücken bereits bei der Konstruktion berücksichtigen kann.

Berlin, März 1985 *A. Herbert Fritz, Günter Schulze*

Inhalt

1 Einführung 1

2 Urformen 5

2.1 Urformen durch Gießen 5
2.1.1 Grundbegriffe der Gießereitechnologie 5

2.2 Metallkundliche Grundlagen des Gießens 15
2.2.1 Entstehung der Gussgefüge 15
2.2.2 Stoffzustände 15
2.2.3 Keimbildung und Impfen 17
2.2.4 Kristallformen 19
2.2.5 Erstarrungstypen 22
2.2.6 Isotropes, anisotropes und quasi-isotropes Verhalten von Gusswerkstoffen 23

2.3 Gusswerkstoffe 24
2.3.1 Eisengusswerkstoffe 24
2.3.2 Nichteisen-Gusswerkstoffe 35

2.4 Gießbarkeit 40
2.4.1 Fließ- und Formfüllungsvermögen 41
2.4.2 Schwindung (Schrumpfung) 42
2.4.3 Warmrissneigung 45
2.4.4 Gasaufnahme 47
2.4.5 Penetrationen 48
2.4.6 Seigerungen 49
2.4.7 Fehlerzusammenstellung bei Sandguss 50

2.5 Form- und Gießverfahren 50
2.5.1 Formverfahren mit verlorenen Formen 50
2.5.2 Formverfahren mit verlorenen Formen nach verlorenen Modellen 65
2.5.3 Formverfahren mit Dauerformen 68
2.5.4 Thixoforming 77

2.6 Gestaltung von Gussteilen 78
2.6.1 Allgemeines 78
2.6.2 Gestaltungsregeln 78
2.6.3 Gießgerechte Gestaltung 79
2.6.4 Beanspruchungsgerechte Gestaltung 86
2.6.5 Fertigungsgerechte Gestaltung 88
2.6.6 Normung von Erzeugnissen aus Gusseisen 91
2.6.7 Normung von Erzeugnissen aus Stahlguss 91

2.7 Urformen durch Sintern (Pulvermetallurgie) 92
2.7.1 Pulvermetallurgische Grundbegriffe 92
2.7.2 Pulvererzeugung 93
2.7.3 Presstechnik 94
2.7.4 Sintern 96
2.7.5 Verfahren zum Verbessern der Werkstoffeigenschaften 97
2.7.6 Anwendungen 100

2.8 Gestaltung von Sinterteilen 100
2.8.1 Allgemeines 100
2.8.2 Gestaltungsregeln 100
2.8.3 Werkstoff- und werkzeuggerechte Gestaltung 101
2.8.4 Fertigungs- und fügegerechte Gestaltung 103

2.9 Generative Fertigungsverfahren (Rapid Technologien) 106
2.9.1 Stereolithografie 108
2.9.2 Laser-Sintern und Strahlschmelzen 109
2.9.3 Fused Layer Modeling/Manufacturing (oder Fused Deposition Modeling) 111
2.9.4 Multi-Jet Modeling 112
2.9.5 Poly-Jet Modeling 112
2.9.6 3D-Printing 112
2.9.7 Layer Laminated Manufacturing 113
2.9.8 Masken-Sintern 113
2.9.9 Digital Light Processing 114
2.9.10 Entwicklungen 114

3 Fügen 117

3.1 Das Fügeverfahren Schweißen 117
3.1.1 Bedeutung der Schweißtechnik 117
3.1.2 Das Fertigungsverfahren Schweißen; Abgrenzung und Definitionen 117
3.1.3 Einteilung der Schweißverfahren 118
3.1.4 Hinweise zur Wahl des Schweißverfahrens 121

3.2 Werkstoffliche Grundlagen für das Schweißen 123
3.2.1 Wirkung der Wärmequelle auf die Werkstoffeigenschaften 123
3.2.2 Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe 124
3.2.3 Einfluss des Temperaturfeldes 125
3.2.4 Werkstoffbedingte Besonderheiten und Schwierigkeiten beim Schweißen 127

3.3 Schmelzschweißverfahren 133
3.3.1 Gasschweißen (G) (Ordnungsnummer: 311) 133
3.3.2 Lichtbogenhandschweißen (E) (Ordnungsnummer: 111) – Metall-Lichtbogenschweißen 137
3.3.3 Schutzgasschweißen (SG) 160
3.3.4 Unterpulverschweißen (UP) (Ordnungsnummer: 12) 183
3.3.5 Elektronenstrahlschweißen (EB) (Ordnungsnummer: 51) 192
3.3.6 Laserstrahlschweißen (LA) (Ordnungsnummer: 52) 197

3.4 Widerstandsschweißen (Ordnungsnummer: 2) 199
3.4.1 Widerstandspressschweißen 200
3.4.2 Widerstandsschmelzschweißen 211

3.5 Gestaltung von Schweißverbindungen 212
3.5.1 Allgemeines 212
3.5.2 Gestaltungsregeln 212
3.5.3 Gestaltung von Schmelzschweißverbindungen 213
3.5.4 Gestaltung von Punktschweißverbindungen 218

3.6 Löten (Ordnungsnummer: 9) 220
3.6.1 Grundlagen des Lötens 220
3.6.2 Einteilung der Lötverfahren 223
3.6.3 Flussmittel; Vakuum; Schutzgas 226
3.6.4 Lote 228
3.6.5 Konstruktive Hinweise für Lötverbindungen 231

3.7 Gestaltung von Lötverbindungen 232
3.7.1 Allgemeines 232
3.7.2 Gestaltungsregeln 232
3.7.3 Gestaltung gelöteter Blechverbindungen 233
3.7.4 Gestaltung gelöteter Rundverbindungen 233
3.7.5 Gestaltung gelöteter Rohrverbindungen 235
3.7.6 Gestaltung gelöteter Bodenverbindungen 237

3.8 Kleben 238
3.8.1 Wirkprinzip des Klebens 238
3.8.2 Vorbehandlung zur Steigerung der Klebfestigkeit 239
3.8.3 Vorbereitung der Klebung 241
3.8.4 Eigenschaften polymerer Werkstoffe 242
3.8.5 Klebstoffarten 243
3.8.6 Herstellung der Klebung 245
3.8.7 Anwendungsbeispiele 246
3.9 Gestaltung von Klebverbindungen 251
3.9.1 Allgemeines 251
3.9.2 Gestaltung geklebter Blechverbindungen 251
3.9.3 Gestaltung geklebter Rohrverbindungen 253
3.9.4 Gestaltung geklebter Rundverbindungen 253

4 Trennen (Zerteilen; Spanen; Abtragen; thermisches Schneiden) 257
4.1 Allgemeines und Verfahrensübersicht 257
4.2 Scherschneiden 257
4.2.1 Beschreibung des Schneidvorgangs 259
4.2.2 Schneidkraft 261
4.2.3 Gestaltung von Schneidwerkzeugen 262
4.2.4 Vorschubbegrenzungen 263
4.3 Spanen 265
4.3.1 Einteilung nach DIN 8589 265
4.3.2 Technische und wirtschaftliche Bedeutung 266
4.4 Grundbegriffe der Zerspantechnik 266
4.4.1 Bewegungen und Geometrie von Zerspanvorgängen 266
4.4.2 Eingriffe von Werkzeugen 267
4.4.3 Spanungsgrößen 268
4.4.4 Geometrie am Schneidteil 268
4.4.5 Kräfte und Leistungen 270
4.4.6 Standzeit- und Verschleißbegriffe 270
4.5 Grundlagen zum Spanen 271
4.5.1 Spanbildung 271
4.5.2 Spanstauchung 272
4.5.3 Scherwinkelgleichungen 273
4.5.4 Spanarten 273
4.5.5 Spanformen 275
4.5.6 Energieumwandlung beim Spanen 276
4.5.7 Schneidstoffe 276
4.5.8 Werkzeugverschleiß 283
4.5.9 Kühlschmierstoffe 284
4.5.10 Hart-, Hochgeschwindigkeits- und Trockenbearbeitung 285
4.5.11 Mikrozerspanung 286
4.5.12 Standzeitberechnung und Standzeitoptimierung 286
4.5.13 Schnittkraftberechnung 289
4.6 Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden 290
4.6.1 Drehen 291
4.6.2 Bohren, Senken, Reiben 296
4.6.3 Fräsen 302
4.6.4 Hobeln und Stoßen 306

4.6.5 Räumen 308
4.6.6 Auswahl spanender Fertigungsverfahren 313

4.7 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden 317
4.7.1 Schleifen 318
4.7.2 Einsatz von Sensoren in Schleifmaschinen 340
4.7.3 Ansätze zur Miniaturisierung 340
4.7.4 Honen 343
4.7.5 Läppen und Feinschleifen mit Läppkinematik 352
4.7.6 Gleitschleifen 357

4.8 Abtragende Verfahren 358
4.8.1 Thermisches Abtragen 359
4.8.2 Chemisches Abtragen 362
4.8.3 Elektrochemisches Abtragen 364

4.9 Thermisches Schneiden 365
4.9.1 Autogenes Brennschneiden 365
4.9.2 Plasmaschneiden 376
4.9.3 Laserschneiden 378

4.10 Wasserstrahlschneiden 381
4.10.1 Einleitung 381
4.10.2 Verfahrensgrundlagen 382
4.10.3 Einsatz und Anwendung 385

4.11 Gestaltung von Schnittteilen 388

4.12 Gestaltung spanend herzustellender Werkstücke 392
4.12.1 Allgemeines 392
4.12.2 Gestaltung für das Drehen 393
4.12.3 Gestaltung für das Bohren, Senken, Reiben 395
4.12.4 Gestaltung für das Fräsen 398
4.12.5 Gestaltung für das Hobeln und Stoßen 399
4.12.6 Gestaltung für das Räumen 400
4.12.7 Gestaltung für das Schleifen 401

5 Umformen 407

5.1 Einteilung und Vorteile der Umformverfahren 407

5.2 Grundlagen der Umformtechnik 409

5.3 Druckumformen 415
5.3.1 Walzen 416
5.3.2 Schmieden 423
5.3.3 Eindrücken 431
5.3.4 Durchdrücken 433

5.4 Zug-Druck-Umformen 441
5.4.1 Draht- und Stabziehen 442
5.4.2 Gleitziehen von Rohren 445
5.4.3 Abstreckziehen von Hohlkörpern 445
5.4.4 Tiefziehen 447
5.4.5 Drücken 453
5.4.6 Kragenziehen (Bördeln von Öffnungen) 454

5.5 Zugumformen 454
5.5.1 Längen 455
5.5.2 Weiten 455

5.5.3	Tiefen (Streckziehen)	456
5.5.4	Blechprüfung zur Kennwertermittlung	456
5.6	**Biegen**	459
5.6.1	Einteilung der Biegeverfahren	460
5.6.2	Biegespannungen, Verformungen und Kräfte	461
5.7	**Innenhochdruckumformen (IHU)**	465
5.7.1	Allgemeines	465
5.7.2	Anwendungsgebiete	465
5.7.3	Bauteil- und Prozessauslegung	467
5.7.4	Anlagen- und Werkzeugtechnik	471
5.7.5	Fertigteilqualität	472
5.7.6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	476
5.7.7	Fertigungsbeispiele	477
5.8	**Gestaltung von Umformteilen**	478
5.8.1	Allgemeines	478
5.8.2	Gestaltung von Gesenkschmiedestücken	479
5.8.3	Gestaltung von Tiefziehteilen	484
6	**Sachwortverzeichnis**	489

Autorenverzeichnis

Prof. Dr.-Ing. Alfred Herbert **Fritz**, Berlin, fritz.herbert@t-online.de
Abschnitte 2.1–2.8, 3.8, 3.9, 4.2, 4.8, 4.11, Kapitel 5

Dr.-Ing. Hans-Werner **Hoffmeister**, Braunschweig, h.hoffmeister@tu-bs.de
Abschnitt 4.7

Dipl.-Ing. Klaus-Dieter **Kühn**, Braunschweig, k.kuehn@tu-bs.de
Kapitel 1, Abschnitte 4.1, 4.3–4.6

Prof. Dr.-Ing. Günter **Schulze**, Berlin,
Kapitel 3, Abschnitte 4.9, 4.10

Prof. Dr.-Ing. Burghilde **Wieneke-Toutaoui**, Berlin, wieneke@beuth-hochschule.de
Abschnitt 2.9

1 Einführung

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 nummerisch 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 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, Tabelle 1-1. Ein wesentliches Ordnungsprinzip ist das Ändern des Zusammenhalts. Es bezieht sich sowohl auf den Zusammenhalt der Teilchen 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, Tabelle 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)

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 spanendes 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. Technologi-

A. H. Fritz, G. Schulze (Hrsg.), *Fertigungstechnik,* Springer-Lehrbuch
DOI 10.1007/978-3-642-29786-1_1, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Tabelle 1-1. Einteilung der Fertigungsverfahren (nach DIN 8580). In Klammern: Beispiele.

1. Stelle der ON		**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		
2. Stelle der ON		**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 (Spritzgießen)	**2.2** Zugdruckumformen (Drahtziehen, Tiefziehen)	Spanen mit geometrisch Schneiden: **3.2** bestimmten (Drehen, Bohren, Fräsen)	**4.2** Füllen (Einfüllen)	**5.2** aus dem plastischen Zustand (Spachteln)	**6.2** Wärmebehandeln (Glühen, Härten)
1.3 aus dem breiigen Zustand (Gießen von Keramik)	**2.3** Zugumformen (Längen, Weiten, Tiefen)	Spanen mit geometrisch Schneiden: **3.3** unbestimmten (Schleifen, Honen, Läppen)	**4.3** An- und Einpressen (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 (Ausgießen, 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)		**6.5** Magnetisieren
		3.6 Reinigen (Reinigungsstrahlen)	**4.6** Fügen durch Schweißen (Schmelzverbindungsschweißen)	**5.6** durch Schweißen (Schmelzauftragschweißen)	**6.6** Bestrahlen
			4.7 Fügen durch Löten (Weichlöten, Hartlöten)	**5.7** durch Löten (Auftragweichlöten)	**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)	
Kombinationen zwischen den Gruppen sind möglich					

Bild 1-1
Erreichbare Genauigkeiten bei verschiedenen Fertigungsverfahren.

sche Prozesse lassen sich deshalb nicht mehr isoliert betrachten, sondern müssen als Kette von vor- und nachgelagerten Teilvorgängen beurteilt werden. Eine zentrale Forderung in der Produktion ist die Reduzierung der Anzahl notwendiger Fertigungsschritte. Unter Ausnutzung der größer werdenden Anwendungsbreite und Formgebungsmöglichkeiten 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.

Bild 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 Kühlschmierstoffen, 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, Bild 1-2.

Bild 1-2
Gewichtung der Zielsetzungen zur Entwicklung von wettbewerbsfähigen Produktionskonzepten (nach Westkämper).

2 Urformen

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 Reaktionsharzbeton,
- Gläser und
- Kunststoffe.

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

Durch Gießen lassen sich metallische Werkstücke dann besonders wirtschaftlich fertigen, wenn mit Gießverfahren wie
- Sandformguss[1],
- 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, wie Bild 1-1 zeigt. Die Zuordnung ist von einer Reihe unterschiedlicher Faktoren abhängig:
- Maßgenauigkeit, z. B. IT-Qualitäten,
- Oberflächengüte, z. B. Rautiefe,
- Wanddicke,
- Stückzahl,
- Stückmasse (Stückgewicht),
- Abmessungen u. a.

Im Vergleich verschiedener Verfahren der Teilefertigung nach Bild 1-1 lassen sich durch Gießen folglich nur *Rohteile* herstellen. *Fertigteile* mit hohen Genauigkeiten werden durch spanende oder umformende Fertigungsverfahren erzeugt.

Um zu erkennen, welche Verfahren der Teilefertigung zu Kostenvorteilen führen, sind neben der betriebswirtschaftlichen Kostenanalyse volkswirtschaftliche Überlegungen notwendig, die alle Teilschritte der *Produktion* und des *Recyclings* erfassen müssen.

Dazu werden wichtige Verfahren der Teilefertigung in Bild 2-1 verglichen, nachdem zuvor für jedes Fertigungsverfahren *Material*- und *Energiebilanzen* aufgestellt wurden. Die Verwendung von Gussstücken nutzt das Werkstoffvolumen besser aus und senkt den Energieaufwand erheblich.

Bei vergleichbaren Werkstücken kommt Gießen dem Bestreben am nächsten, diese in einem Arbeitsgang in ihre endgültige Form zu bringen und dabei verlustarm herzustellen.

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,

Bild 2-1
Werkstoffausnutzung und Energieaufwand verschiedener Fertigungsverfahren (nach Lange).

[1] Das Prinzip Sandguss. www.wissensfloater.de

A. H. Fritz, G. Schulze (Hrsg.), *Fertigungstechnik,* Springer-Lehrbuch
DOI 10.1007/978-3-642-29786-1_2, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

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* – teilweise sogar die Lage der *Anschnitte* (Bild 2-4) – eingezeichnet.

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

2.1.1.1 Formen 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.

Die *Formteilung* ist diejenige gedachte Fläche, die am Gussstück – sie ist außen und innen als Teilungsgrat sichtbar – die Formhälften anzeigt. 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 mit Hilfe einer formtechnischen Analyse zu ermitteln.

Am Beispiel eines einfachen Lagerdeckels gemäß Bild 2-2 sollen verschiedene *mögliche Lagen* der Formteilung erläutert werden.

Bild 2-2
Zum Begriff der Formteilung an einem Lagerdeckel für einen Pkw.

Der Deckel wird spanend bearbeitet. Es sollen der Wälzlagersitz feingedreht und die Deckelfläche als Dichtfläche plangefräst oder planüberdreht 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 Bild 2-3 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* 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

Bild 2-3
Lagerdeckel, Schnitt C – D in Bild 2-2, kernlos geformt in der unteren Formhälfte mit Formteilung X – X, die in der Deckelhälfte beginnt.

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 Bild 2-4 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 mittels Anschnittflächen, mit dem Gussstück verbunden werden. Vom *Eingusstrichter* aus lassen sie sich über *Stangen,* die sich in der Teilung überlappen, mit Schmelze füllen.

Bild 2-4
Kernlos geformter Lagerdeckel mit Anschnittsystem und Formteilung X – X auf Flanschmitte beginnend.

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. Soll auch der rohrseitige Sicherungsbund gleich angegossen werden, wie in Bild 2-2 dargestellt, so muss der hängende Ballen bis zum Beginn des Sicherungsbundes verlängert werden, darf aber nicht höher als 40 bis 60 mm sein. Diese elegante Möglichkeit der Trennung des Anschnittsystems vom Gussstück kann bei *duktilen,* d. h. zähen Gusswerkstoffen, nicht angewandt werden. Es entstehen dann erhebliche Putzkosten. Der in Bild 2-4 in Flanschmitte auftretende *Teilungsgrat* kann mit Putzmaschinen vollständig entfernt werden.

Aus formtechnischer Sicht ist die Lage der Formteilung in Bild 2-4 noch unbefriedigend, da die *Formfläche* – dies ist die Projektion der durch die Formteilung erzeugten Ebene des Gussstücks in die Teilungsebene –

Bild 2-5
Zum Begriff der Formfläche: Lagerdeckel als Doppelmodell mit Kern und Formteilung X – X in der Kernteilung.

durch den flachen Lagerdeckel nach der Tiefe hin nur ungenügend ausgenutzt ist. In Bild 2-5 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. Falls es erforderlich ist, können am Rechteckflansch bis zu vier Doppelspeiser angeschnitten werden.

Bild 2-6
Lagerdeckel mit Diagonalteilung gemäß Schnittebene CD in Bild 2-2, mit Hohlkern geformt.

Weitere Variationen der Formteilung, dargestellt z. B. in Bild 2-6, als *Mitten-* oder *Diagonalteilung* nach Bild 2-2, 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 Rohteilzeichnung wird in der Gießerei über das wirtschaftliche Herstellverfahren (Form- und Gießverfahren s. Abschn. 2.5) entschieden. Je nach
- Kompliziertheit,
- Maßtoleranzen,
- Stückmasse,
- Losgröße,
- Werkstoff

und verschiedenen anderen Faktoren 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* gemäß DIN EN 12890 mit auf Nennmaßbereiche bezogenen Maßabweichungen angefertigt. Für die drei Nennmaßbereiche zwischen 50 mm und 180 mm sind als Beispiel in Tabelle 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 Tabelle 2-1 sind etwa 1° Formschräge für Metallmodelle M1 erforderlich. Auch Formschrägen erhöhen das Stückgewicht und sollten deshalb möglichst an den zu bearbeitenden Flächen liegen.

2.1.1.2 Formverfahren mit verlorenen Formen

Die verlorenen Formen oder Kerne werden aus Gießereisanden, siehe Abschn. 2.5.1.1, 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,
- Kunstharze 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.

Tabelle 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
Nennmaß-bereich	50 mm bis 80 mm	0,3	0,6	0,15	0,25	0,25	0,3
	80 mm bis 120 mm	0,4	0,7	0,2	0,3	0,3	0,45
	120 mm bis 180 mm	0,5	0,8	0,2	0,3	0,3	0,5

Tabelle 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

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 verlorener 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 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 Tabelle 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. aufwändige Vorrichtungen.

Bei den Verfahren mit verlorenen Formen gemäß Tabelle 2-2 lassen sich mit Dauermodellen auch Kerne für alle 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 Tabelle 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

Bild 2-7
Heißwindkupolofen im Duplexbetrieb mit einem Netzfrequenz-Induktionstiegelofen, schematisch.

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. Bild 2-7 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 Zuschläge mit der Beschickung eingesetzt. Formstoffreste, die sog. Knollen, werden durch 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.

Bild 2-8
Draufsicht in der Teilungsebene auf eine für das steigende Schwerkraftgießen vorbereitete Nockenwellenformhälfte.

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* (Bild 2-8),
- *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. *Schleuderguss* als Formguss (Abschn. 2.5.3.3) gewinnt an Bedeutung. Bisher sind hier Rohre und ringförmige Gussstücke aus allen Gusswerkstoffen vorherrschend.

Bild 2-9
Pkw-Schwungscheibe als kernloser Kastenguss mit Anschnittsystem zur überschlägigen Berechnung der Abhebekraft F_A.

Beim *Schwerkraftgießen* werden oben offene Sand- oder Dauerformen mit Schmelze gefüllt. In Bild 2-8 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: *Einfalllunk*er. Diese Art der Gießtechnik lässt sich nur mit *aufgesetzten* Speisern verwirklichen, da anderenfalls der oben erwähnte Einfalllunker im Gussstück auftreten würde.

Die Formfüllung ist 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 Dauerformen für Leichtmetalle können auch Oxidhäute zurückhalten. Beim fallenden Guss entstehen 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* gemäß Bild 2-9 bei steigendem Guss beträgt

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

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

Bild 2-10
Büchse, liegend geformt, mit Hohlkern zur Bestimmung der Auftriebskraft F_K des Kerns.

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.

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

Die *Kernauftriebskraft* F_K soll nach Bild 2-10 für eine Büchse berechnet werden. Das für den Auftrieb wirksame Kernvolumen V_K ist

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

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

$$F_K = V_K \cdot g \cdot \rho_S$$

Bild 2-11
Maschinenformkästen unterschiedlicher Tiefe, links verklammert und rechts im Schnitt beschwert.

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

Die Kernlager in Bild 2-10 sind in ihrer Länge auf die *Kernfestigkeit* abgestimmt worden. 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 gemäß Bild 2-11 abgefangen wird. In senkrecht geteilten Sandformen muss der seitlich wirksame Gießdruck, wie Bild 2-12 zeigt, durch
– Verkleben oder
– Verklammern
und mit Hilfe von zusätzlichem *Hinterfüllen,* d. h. Stützen der Formhälften mit Formstoff, Drahtkorn

Bild 2-12
Nockenwellenmaske im Blechrahmen nach Bild 2-8, Schnitt A-B, zum Abgießen aufgestellt und mit Gusskies hinterfüllt.

oder Gusskies, abgefangen werden (siehe auch Abschn. 2.5.1.3). Bei den Dauerformverfahren sind die *Zuhaltekräfte* der Kokillenhälften so groß, dass diese Maßnahmen nicht erforderlich sind.
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 als vorteilhaft erkannten, engen Temperaturbereich zu halten. Auch wird versucht, beim Entformen Teile des Anschnittsystems, wie z. B. Speiser, Stangen und Eingusstrichter, gleich mit zu entfernen.

Bild 2-13
Schleuderstrahlen zum Gussputzen und Festigkeitsstrahlen (Peenen) in Trommeln, Drehtischen und Kabinen.

2.1.1.6 Putzen

Nach dem Entformen folgt als nächster Fertigungsschritt im Gießereibetrieb das Putzen. *Putzarbeiten* sind nur selten vollständig mechanisierbar und deshalb teuer. Nach Untersuchungen der Verbände VDI und VDG können die Putzarbeiten für mittelschweren Maschinenguss 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 durch
- Formteilung,
- Zahl und Lage der Anschnitte,
- Kerne,
- Formstoffe

und andere Faktoren beeinflusst.

Für die Lagerdeckel in Bild 2-4 und 2-5 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 Bild 2-13 zeigt, mit Gusskies 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 Bild 2-9 erfordert größere Putzarbeit. Der Gusswerkstoff Gusseisen mit Kugelgrafit 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 *Hängebahnputzmaschine*. Gegenüber dem Lagerdeckel (Bild 2-4) ist diese Form- und Gießtechnik der Schwungscheibe nicht besonders putzgerecht.

Tabelle 2-3. Qualitätsmanagement für Pkw-Pleuel (nach *Gut* und *Trapp*).

Wareneingang	Metallischer Einsatz: Stahlschrott, Roheisen, Ferrolegierungen und Form- und Hilfsstoffe	
Schmelzen	Gattierung, Analyse, Temperatur Ofendaten, Probestäbe	
Formen **Gießen**	Formsandkontrolle Gießtemperatur	
Hartguss	Versatzprüfung Sichtkontrolle Rissprüfung Dichtheit Modellverschleiß	(Stichprobenprüfung) (Stichprobenprüfung) (Stichprobenprüfung) (Stichprobenprüfung) (Stichprobenprüfung)
Glühen **Werkstoffprüfung**	Ofentemperaturen, Glühatmosphären Ölbadtemperaturen, Gefüge	
Rohguss	Maßprüfung Prüfung des Festigkeitsverhaltens	(Stichprobenprüfung) (Stichprobenprüfung)
Endkontrolle	Sichtkontrolle Maßkontrolle (Durchbiegung, Verdrehung, Dicke) Härteprüfung Magnetische Rissprüfung Rissprüfung mittels Ultraschall Versandkontrolle	(Vollprüfung) (Vollprüfung) (Vollprüfung) (Vollprüfung) (Vollprüfung) (Stichprobenprüfung)

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 Lamellengrafit, der mengenmäßig bedeutendste Eisengusswerkstoff, wird nur in Ausnahmefällen geglüht. Zum Beispiel werden

- Temperguss und Gusseisen mit Kugelgrafit grafitisierend 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 einer Fertigung hoch beanspruchter Serienteile aus dem Fahrzeugbau wie z. B.

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

Tabelle 2-4. Fertigungsschritte im Gießereibetrieb mit geschlossenem Formstoff- und Werkstoffkreislauf.

muss z. B. durch eine zwei- bis dreifache *Einzelprüfung* das Ausfallrisiko auf ein Verhältnis vermindert werden, das kleiner ist als 1:100 000. Die dazu notwendigen Maßnahmen und Prüfgrößen sind produktbezogen und werden mit dem Oberbegriff *Qualitätsmanagement* bezeichnet.

In Tabelle 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,
- teil- und vollautomatische Rissprüfungen.

Die einzelnen Fertigungsschritte von der Zeichnung bis zum fertigen Gussstück im Gießereibetrieb zeigt Tabelle 2-4. 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 allgemeinen gießtechnischen Gestaltungsrichtlinien (Abschn. 2.6) 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 meist sicherer die Entscheidung für verlorene Formen oder für ein Dauerformverfahren getroffen werden, wobei Überlegungen zum Recycling schon bei der Entwicklung des Gussstücks beginnen müssen. Für Serienguss-stücke sollten z. B. möglichst nur genormte Standardlegierungen ausgewählt werden. In der Einzelfertigung oder der Kleinserie können legierte Sonderwerkstoffe zweckmäßig sein.

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 und nur in Teilbereichen bis heute erforscht. Auch entzieht sich das Geschehen nach dem Abguss, z. B. das Kristallwachstum oder das *Formstoffverhalten,* einer direkten Beobachtung, so dass bisher nur Modellvorstellungen zur Erklärung der beobachteten Phänomene bekannt sind.

In diesem Hauptabschnitt werden nur die wichtigsten metallkundlichen Begriffe des Gießens erläutert. Der Einfluss der Gusswerkstoffe auf die gießtechnischen Fertigungsverfahren kann so deutlich gemacht werden.

2.2.1 Entstehung der Gussgefüge

Die Entstehung des Gussgefüges bei der Herstellung von Gussstücken ist ein der »Geburt« vergleichbarer Vorgang. Wesentliche Werkstück- und Werkstoffeigenschaften des Gussstücks werden hier festgelegt. Nur wenige Eigenschaften können nachträglich und nur unter erheblichen Kosten geändert werden.

Deshalb sollte der Konstrukteur von Gussteilen durch die Formgebung gestaltenden Einfluss auf diesen *»Lebensbeginn«* 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
- *Mischkristallen:* Eisen, Messing, Bronze,
- *intermediären Verbindungen:* Fe_3C, Al_3Mg_2,
- *nichtmetallischen Phasen:* Grafit, Schwefel.

Bild 2-14
Abkühlschaubild für Aluminium von Gießtemperatur ϑ_G bis auf Raumtemperatur ϑ_R.

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

flüssig *(amorph)* $\xrightarrow[\text{Kristallisieren}]{\text{Erstarren oder}}$ **fest** *(kristallin)*

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 gemäß Bild 2-14 und 2-15 wiedergibt, unterscheidet man nichteutektische Legierungen und eutektische Legierungen (letztere erstarren wie reine Metalle). In Bild 2-14 ist die Abkühlung einer Aluminiumschmelze dargestellt. Eine typische Gießtemperatur ist z. B. $\vartheta_G = 730\,°C$. Zum Zeitpunkt t_1 beginnt die Kristallisation bei dem Schmelzpunkt $\vartheta_L = 660\,°C$, 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* vermieden bzw. klein gehalten. Das Gussstück kühlt dann auf dem Weg zur Putzmaschine von der Auspacktemperatur ϑ_A bis auf Raumtemperatur ϑ_R ab.

Bild 2-15
Abkühlschaubild einer Gusseisenschmelze mit dem Erstarrungsintervall $\Delta\vartheta = \vartheta_L - \vartheta_E$.

Bild 2-15 zeigt das Abkühlverhalten der Eisen-Kohlenstoff-Legierung *Gusseisen* GJL. Untereutektisches 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 zur Zeit t_3 beendet. Die Temperaturdifferenz zwischen der Liquidustemperatur ϑ_L und der

Bild 2-16
Zum Begriff der Unterkühlung ($\Delta\vartheta_U$) von Schmelzen.
Abkühlschaubilder: ❶: Schmelze sehr langsam abgekühlt,
❷: Schmelze schnell abgekühlt.

eutektischen Temperatur ϑ_E wird *Erstarrungsintervall* $\Delta\vartheta$ genannt.

In Bild 2-15 beträgt das Erstarrungsintervall

$\Delta\vartheta = \vartheta_L - \vartheta_E = 1270\,°C - 1200\,°C = 70\,°C.$

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*.

Auch in Bild 2-14 liegt der teigige Zustand während der Erstarrungszeit t_1 bis t_2; die Kristallisation findet in diesem Fall bei konstanter Temperatur statt.

Kennzeichnender Unterschied im *Erstarrungsverhalten* sind die Temperaturen:
- *Konstante Temperatur* bei eutektischen und peritektischen Legierungen und Reinmetallen,
- *Temperaturintervall* bei Legierungen.

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 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 Bild 2-16 ist der Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf die Unterkühlung $\Delta\vartheta_U$ metallischer Schmelzen dargestellt. Kurve ❶ 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 ❷ beginnt die Kristallisation an *arteigenen Keimen* erst bei der Temperatur ϑ_O unterhalb von ϑ_S. Die Erstarrungszentren werden in der Schmelze in um so größerer Anzahl gebildet, je stärker sie unterkühlt ist. Die Unterkühlung $\Delta\vartheta_U$ einer Schmelze ist gemäß Bild 2-16 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.

Bild 2-17
Keimzahl N_{KZ} und Kristallisationsgeschwindigkeit v_{KG} in Abhängigkeit von der Unterkühlung $\Delta\vartheta_U$.

Die Abkühlung einer Schmelze in einer dickwandigen, getrockneten Sandform kommt der Kurve ❶ nahe. Die Abkühlung der Schmelze in einer dünnwandigen, gekühlten, metallischen Dauerform, *Kokille* genannt, entspricht der Kurve ❷, Bild 2-16.

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 arteigener Keime.

Nach der *kinetischen Keimtheorie* müssen Schmelzen, die kurzzeitig überhitzt wurden, unterhalb ihres Schmelzpunktes ϑ_S ein Maximum für die sich in ihnen bildenden Keime besitzen. Die Kristallisationsgeschwindigkeit v_{KG} nimmt mit steigender Abkühlgeschwindigkeit zu und nähert sich einem Grenzwert. Keimzahl N_{KZ} und Kristallisationsgeschwindigkeit v_{KG} sind also abhängig von der Unterkühlung $\Delta\vartheta_U$. Dieser Zusammenhang ist in Bild 2-17 dargestellt.

Mit der Wahl des Form- und Gießverfahrens wird in der Gießereipraxis die Abkühlungsgeschwindigkeit festgelegt und damit die erzielbare Unterküh-

lung 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 Bild 2-18 sind die Gefüge für die Abkühlbedingungen ❶ und ❷ aus Bild 2-17 schematisch dargestellt. Geringe Keimzahlen und kleine bis mittlere Kristallisationsgeschwindigkeiten führen zu einem groben Gussgefüge, einem Grobkorngefüge.

Bild 2-18
Unterschiedliche Primärkristallisation durch Formen mit geringer (❶) und hoher Unterkühlung (❷).

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

Die Abkühlung von dickwandigem Guss in gebrannten, vorgeheizten Formstoffen entspricht der Bedingung ❶. *Kokillenguss* und das Gießen in wasserhaltige Formstoffe, *Nassguss* genannt, sind Beispiele für die Abkühlbedingung ❷. Zwischen diesen Extremwerten sind viele Zwischenstufen möglich, die auch beobachtet werden. Sie entstehen durch die unterschiedlichen Wanddicken, Versteifungen und Durchdringungen der Gusskonstruktionen.

Bild 2-19
Einfluss einer geringeren (❶) und einer höheren Abkühlgeschwindigkeit (❷) auf die Korngröße im Gussstück.

In Bild 2-19 sind die den Bedingungen ❶ und ❷ aus Bild 2-17 entsprechenden Gefüge in ein Gussstück eingezeichnet. Da die Abkühlgeschwindigkeit durch das Form- und Gießverfahren vorgegeben ist, entstehen im gleichen Gussstück zwischen ❶ und ❷ unterschiedliche Primärgefüge.

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 Einführen und Verteilen von *Impfmitteln* in Schmelzen. Das sind *artfremde, heterogene Keime,* da die Impfmittel nicht der Zusammensetzung des Gusswerkstoffs entsprechen. Man nennt sie deshalb auch *Fremdkeime.* 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 oder sogar direkt in der Form 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.

Über die *Theorie der Impfwirkung* selbst ist wenig bekannt, obwohl die verhältnismäßig teuren Impfmittel häufig eingesetzt werden.

Die Impfwirkung wird in den Gießereien mit Hilfe thermischer Analysen und Gefügeuntersuchungen überprüft, um die optimalen Bedingungen von

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

zu ermitteln. Handelsübliche Impfmittel können auch Gemenge sein, wie z. B. eine Mischung aus Ferrolegierung, Grafit und Leichtmetall.

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 $\vartheta_S = 98\,°C$,
- Magnesium $\vartheta_S = 650\,°C$,
- Aluminium $\vartheta_S = 660\,°C$,
- Cer $\vartheta_S = 797\,°C$.

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

Mit Magnesium oder Cer kann die Kristallisation von Grafit in hochkohlenstoffhaltigen Eisengusswerkstoffen (2,4 % C bis 4,3 % C) beeinflusst werden. Soweit bisher bekannt ist, kommt dies durch Verbindungsbildung dieser Elemente mit Schwefel und Sauerstoff zustande. Als Fremdkeim für den Grafit wirkt Kieselsäure, deren Ausscheidung aus der Schmelze aber ebenfalls nicht ohne Fremdkeime möglich zu sein scheint. 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 $\xrightarrow{\text{durch Wachstum}}$ **Gussgefüge**

entstehen, ist für das Gießen von besonderem Interesse, weil hierbei die Möglichkeit zum Beeinflussen der Erstarrung, die sog. *gerichtete Erstarrung*, besteht. Untersuchungen an verschiedenen Gusswerkstoffen haben gezeigt, dass die *Kristallformen,* die zu einem Gussgefüge zusammenwachsen, von mehreren Einflussgrößen abhängen. 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 Bild 2-20 ist schematisch eine geteilte Form mit der Schmelze in drei Phasen der Erstarrung dargestellt. Die geteilte, dünne Gussform wird Formmas-

Bild 2-20
Formmasken mit radial gleicher Abkühlgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t_1 der Keimbildung, t_2 des Kristallwachstums und t_3 des gerade erstarrten Primärgefüges.

Bild 2-21
Temperaturgefälle in einer gefüllten Form: Das Volumenelement der Schmelze ΔV kann abhängig von seiner Lage nach Kurve ❷ langsam oder nach Kurve ❶ schneller erstarren.

ke genannt, weil sie sich ähnlich einer Maske der Kontur des Gussstücks anschmiegt.

Der Wärmefluss während der Erstarrung in einer Maske ist in Bild 2-20 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.

Dazu ist in Bild 2-21 der Einfluss der Wärmeableitung durch den *Formstoff* skizziert. Das Volumenelement ΔV der Schmelze kann nach Kurve ❷ bei flachem oder nach Kurve ❶ bei steilem Temperaturgefälle erstarren.

Bild 2-22
Gusswerkstoffe mit
a) kubisch-raumzentrierter Matrix
b) kubisch-flächenzentrierter Matrix und
c) mit hexagonal dichtester Packung.

Bild 2-23
Globulares Gefüge mit Keim, Kristalliten und Korngrenzen, schematisch.

Die Kristallformen der Gusswerkstoffe werden nicht durch die kristallinen *Hauptachsensysteme* vorbestimmt, die als
– trikline,
– monokline,
– rhombische,
– hexagonale,
– tetragonale und
– kubische

Elementarzellen oder *Gitter* aus der Werkstoffkunde bekannt sind, sondern sie hängen hauptsächlich vom Werkstofftyp und dem Temperaturgefälle bei der Primärkristallisation ab.

Die Kristallbasis der Hauptatomsorte 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).

In der Bildfolge 2-22 sind die Elementarzellen dargestellt und einigen häufig verwendeten Gusswerkstoffen zugeordnet.

Diese wenigen Beispiele zeigen, dass die wichtigsten Eisengusswerkstoffe und Kupfer-Zink-Legierungen im Wesentlichen aus der gleichen Kristallbasis entwickelt werden können. Außerdem ist zu beachten,

Bild 2-24
Globulitische Eisenkristalle mit eingelagerten Grafit-Sphärolithen, schematisch.

dass man aus Werkstoffen mit gleicher Matrix unterschiedliche Gussgefüge (Primärgefüge) entwickeln kann. Die für die Qualität des Gussteils entscheidende Art der Erstarrung (Abschn. 2.2.5) 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. Im Schema gemäß Bild 2-23 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.

Bild 2-24 zeigt zwei globulare Kristallformen, die sich nebeneinander gebildet haben. In einer globulitischen Matrix sind rundliche Sphärolithe eingelagert.

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.

Bild 2-25
Randzone mit Säulenkristallen und globulitisch erstarrter Restschmelze in der Mitte.

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, aber beide annähernd gleichmäßig.

Bild 2-26
Primärgefüge von Temperrohguss GTS, bestehend aus Dendriten (dunkel) und globularen, zum Teil fein verästelten Kristallen, entstanden aus der Restschmelze (hell).

Bild 2-25 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, so dass diese mit hoher Keimzahl globular erstarrt.

Nadelstrukturen werden an Gussstücken bei mittleren Abkühlgeschwindigkeiten beobachtet und haben bei einer Beanspruchung quer zu den Nadeln wegen der konzentrierten Anhäufung der Verunreinigungen an den Nadelkorngrenzen geringere Festigkeits- und Verformungseigenschaften.

Bild 2-27
Gießtechnisch nachteilige Flanschkonstruktion mit
a) exogener (Schnitt A – B, siehe Bild 2-30) sowie mit
b) endogener Erstarrung bei vergrößertem Radius.

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. Bild 2-26 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

Untersuchungen an Gussstücken zeigen, dass die beschriebenen Kristallformen teilweise gleichzeitig auftreten und auch unterschiedlich im Werkstückquerschnitt verteilt sein können. In Bild 2-27 soll der Einfluss der Kristallform an einem bei Gussstücken häufig vorkommenden Detail gezeigt werden. 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.*

Bild 2-28
Ebene oder unebene Erstarrungsfronten beeinflussen das Nachfließen der Restschmelze.

Die *Erstarrungsfronten,* die sich beim Hineinwachsen der Kristalle in die Schmelze ausbilden, sind in Bild 2-28 dargestellt. Das Nachfließen der Schmelze wird durch glattwandige oder ebene Erstarrungsfronten im Gussstück erleichtert.

Bei der exogenen Erstarrung am Flansch (Bild 2-27, linkes Teilbild) 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 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.*

Bild 2-29
Exogen-endogene Kristallisation bei Kokillenguss.

Ein *exogen-endogener* Mischtyp, wie er häufig bei *Kokillenguss* entsteht, ist in Bild 2-29 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 ermittelt werden können, ist in Bild 2-30 angegeben. Die ungünstige

Art des Zusammenwachsens gerichteter Kristalle in der *thermischen Mitte* in Bild 2-30, in diesem Fall gleichzeitig auch Werkstückmitte, ist durch Härtemessungen über dem Werkstoffquerschnitt (Schnitt A – B in Bild 2-27) 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* (Abschn. 2.3.2.1). Deshalb versucht man, die Erstarrung von Schmelzen so zu beeinflussen, dass feinkörnige, ungerichtete Gussgefüge entstehen. Diese weisen 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 (Abschn. 2.2.3 und 2.2.4) zeigten, dass Gussstücke von Natur aus *anisotrop* sind, also richtungsabhängige 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,

Bild 2-30
Nachweis von Mikrolunkern durch Härtemessungen.

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. Bild 2-31 zeigt, wie die Flanschkonstruktion gemäß Bild 2-27 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 (Bild 2-31, rechts) zeigt, dass der Anteil der unerwünschten Stängelkristalle besonders gering ist.

Bild 2-31
Gießgerechter Flansch: Die Art der Formgebung drängt den Anteil prismatischer Kristalle zurück.

Eine Reihe von Gusswerkstoffen weist ein von der Wanddicke abhängiges Festigkeitsverhalten auf, wie Bild 2-32 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.

Der Sinn dieser Konstruktionsregel wird an Hand von Bild 2-32 verständlich: Das anisotrope Festigkeitsverhalten tritt dann nicht in Erscheinung.

Bild 2-32
Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Wanddicke bei Kokillengrauguss GGK nach VDG-Merkblatt W 43.

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 N/mm² und 1000 N/mm² erreicht.

2.3 Gusswerkstoffe

Das gießgerechte Gestalten von Gussstücken ist ohne Beachtung der *Gießeigenschaften* der Gusswerkstoffe (Abschn. 2.4) 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. Tabelle 2-5 zeigt einige wichtige metallische Gusswerkstoffe. Man unterscheidet *Eisengusswerkstoffe* und *Nichteisen-Gusswerkstoffe*. Von den Eisengusswerkstoffen sind besonders 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. Magnesiumlegierungen 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 wesentlichen Ländern der Welt wird vom *Deutschen Gießereiverband* im März eines jeden Jahres berichtet. Die Statistik für das Jahr 2011 ergab für die Bundesrepublik Deutschland folgende Aufteilung:

- Gusseisen mit Lamellengrafit 56 %,
- Duktiles Gusseisen 38 %,
- Temperguss 1 %,
- Stahlguss 5 %.

Für die Eisengusswerkstoffe wird nur beim duktilen Gusseisen ein Zuwachs vorausgesagt. Die prozentuale Verteilung der Eisengusswerkstoffe ist auf die Produktion von 4,5 Mio. t (2011) bezogen.

66 % aller Gussstücke werden im Fahrzeugbau und 24 % im Maschinenbau verwendet. Die zukünftige Entwicklung wird hier mit + 4 % vorhergesagt.

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

GJL : GJS : GJM : GS = 1 : 1,3 : 2,3 : 3.

Tabelle 2-5. Metallische Gusswerkstoffe.

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 die drei genormten Sorten
- Gusseisen mit Lamellengrafit,
- Gusseisen mit Vermiculargrafit und
- Gusseisen mit Kugelgrafit

unterschieden. Das in ISO 16112 genormte Gusseisen mit *Vermiculargrafit (»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 Lamellengrafit. Seine Bedeutung beruht auf den für das Gießen von Formguss wichtigen
- Gießeigenschaften und
- Gebrauchseigenschaften

der Gussstücke aus lamellarem Gusseisen. Durch das Legieren von Eisen mit Kohlenstoff und Silicium wird die Schmelztemperatur bei *naheutektischer 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,
- geringe Lunker- und Rissneigung,
- hohe Wärmeableitung.

Bild 2-33
Gusseisendiagramm nach Greiner-Klingenstein mit dem für Formguss üblichen Bereich.

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

größte Bedeutung.

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 untereutektische, $S_C > 1$ eine übereutektische Erstarrung, d. h. die zunehmende Neigung zur *Grauerstarrung* infolge Primärausscheidung von Grafit und zur Austenitumwandlung nach dem stabilen System.

Die neuere EURO-Norm EN 1561 folgt in allen wesentlichen Punkten, vor allem was die Zahlenwerte angeht, der 7. und letzten Ausgabe der DIN 1691 (Mai 1985). Die Werkstoffkurzzeichen und -nummern sind gewöhnungsbedürftig. Die Norm 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 Werkstoffkurzzeichen nach DIN EN 1561 für die Zugfestigkeit, Tabelle 2-6, entsprechen einer maßgebenden Wanddicke von 15 mm. Sie werden ermittelt mit Proben, die aus

- getrennt gegossenen Probestücken,
- angegossenen Probestücken oder aus
- Gussstücken entnommen wurden.

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. Das Bild 2-33 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 Mischgefüge gemäß Fläche IIb ist in Bild 2-34 als Mikrogefüge 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.

Tabelle 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 angegossenen Probestück	Erwartungswerte im Gussstück
		mm	mm	N/mm²	N/mm², min.	N/mm², min.
EN-GJL-100	EN-JL 1010	5	40	100 bis 200	–	–
EN-GJL-150	EN-JL 1020	2,5	5	150 bis 250	–	180
		5	10		–	155
		10	20		–	130
		20	40		120	110
		40	80		110	95
		80	150		100	80
		150	300		90	–
EN-GJL-200	EN-JL 1030	2,5	5	200 bis 300	–	230
		5	10		–	205
		10	20		–	180
		20	40		170	155
		40	80		150	130
		80	150		140	115
		150	300		130	–
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
		150	300		160	–
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	–

Bild 2-34
Gusseisengefüge mit Lamellengrafit: Grundmasse überwiegend perlitisch (grau gestreift, mit einigen Ferritkörnern (hell)).

Nach DIN 1561 ist in Tabelle 2-7 der Zusammenhang zwischen Sorte, maßgebender Wanddicke und Härte für eine vereinbarte Prüfstelle des Gussstücks festgelegt.

Die Sorten EN-GJL-HB155 bis EN-GJL-HB255 stimmen annähernd mit den Sorten EN-GJL-100 bis EN-GJL-350 überein. Die Wanddickenabhängigkeit und der Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Härte ist nicht linear und kein mathematischer, sondern wird aus Streuungsanalyse und Regressionsrechnung ermittelt. Eine direkte Zuordnung der Zugfestigkeit zur Härte wird deshalb in DIN 1561 strikt vermieden, was im Anhang B dieser Norm ausführlich begründet wird. Nach Tabelle 2-7 kann aus dem jeweiligen Härtebereich ein eingegrenzter Toleranzbereich abgeleitet werden, der nicht kleiner als 40 HB 30 sein sollte.

Im Kundenguss für den Fahrzeugbau werden häufig noch engere Härtetoleranzen vereinbart.

Ein besonders interessantes Serienteil ist die als Verbundguss ausgeführte und seit Jahrzehnten bewährte Bremstrommel der Adam Opel GmbH, Bild 2-35. Ein umgeformter und mit allen Montagebohrungen einbaufertiger Trommelboden aus Stahlblech von 2 mm Wanddicke wird in die Unterkastenform eingelegt und mit einem Reibring aus Gusseisen mit Lamellengrafit durch Abgießen verbunden. Die Verbundgusstrommel hat einen Durchmesser von 242 mm und wird in der Teilungsebene am Bund mittels vier Speiser angeschnitten, die nach dem Guss abgeschlagen werden.

Tabelle 2-7. *Brinell*härte von Gussstücken aus Gusseisen mit Lamellengrafit nach DIN EN 1561.

Werkstoffbezeichnung		Maßgebende Wanddicke mm		Härte HB 30	
Kurzzeichen	Nummer	über	bis	min.	max.
EN-GJL-HB155	EN-JL 2010	40	80	–	155
		20	40	–	160
		10	20	–	170
		5	10	–	185
		2,5	5	–	210
EN-GJL-HB175	EN-JL 2020	40	80	100	175
		20	40	110	185
		10	20	125	205
		5	10	140	225
		2,5	5	170	260
EN-GJL-HB195	EN-JL 2030	40	80	120	195
		20	40	135	210
		10	20	150	230
		5	10	170	260
		4	5	190	275
EN-GJL-HB215	EN-JL 2040	40	80	145	215
		20	40	160	235
		10	20	180	255
		5	10	200	275
EN-GJL-HB235	EN-JL 2050	40	80	165	235
		20	40	180	255
		10	20	200	275
EN-GJL-HB255	EN-JL 2060	40	80	185	255
		20	40	200	275

Die Reibfläche für den Bremsbelag wird von dem hängenden Ballen abgebildet und muss auf Fertigmaß gedreht werden. Die Außenkontur bleibt bis auf die Anschnittquerschnitte unbearbeitet. Die metallurgische Qualität der Verbundgusszone kann durch Härtemessungen in der Messebene dokumentiert und mit der EURO-Norm 1561 verglichen werden, siehe Einzelheit »Z«, Bild 2-35.

Der Messpunkt »1« oberhalb des Stahlblechs liegt in einer maßgebenden Wanddicke von über 10 mm bis 20 mm und weist eine *Vickers*härte von 235 HV 10 auf, die für die Sorte EN-GJL-HB215 nach Tabelle 2-7 kennzeichnend ist. Messungen nach *Brinell* mit der Messbedingung HB 30, wie in der Norm gefordert, sind wegen der einzuhaltenden Abstände zwischen diesen Messpunkten nicht möglich.

Der Messpunkt »2« mittig im Stahlblech ergibt einen Wert von 100 HV 10, der typisch für weichen Baustahl ist. Dem Messpunkt »3« unterhalb des Stahlblechbodens lässt sich keine maßgebende Wanddicke zuordnen. Mit 300 HV 10 ist das Werkstoffgefüge an dieser Stelle härter als Tabelle 2-7 erlaubt. Dies ist auf die Kühlwirkung des Blechbodens zurückzuführen. Die relativ hohe Härte an dieser Stelle ist für die ordnungsgemäße Funktion der Bremstrommel unkritisch, solange keine Ledeburitbildung auftritt – das ist die sog. *Weißeinstrahlung* nach Bild 2-33, Flächen I und IIa – und eine spanende Bearbeitung nicht erfolgt.

Gusseisen mit Kugelgrafit

Nach dem Auslaufen der Schutzrechte stieg ab 1970 der Anteil von Gusseisen mit Kugelgrafit bis heute auf über 30 % der Gesamtgusseisenerzeugung. Davon entfallen 57 % Gussstücke für den Maschinen- und Fahrzeugbau.

Sphäroguss ist eine geschützte Bezeichnung der Firma *Metallgesellschaft AG* für Gusseisen mit Kugelgrafit. *Meehanite-Gusseisen* ist eine geschützte Bezeichnung der Firma *Int. Meehanite Co.* für Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgrafit sowie legiertes Gusseisen mit einem sehr gleichmäßigen Gefüge, selbst bei unterschiedlichen Wanddicken.

Tabelle 2-8. Mindestwerte für die mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgrafit, gemessen an mechanisch bearbeiteten, getrennt gegossenen Probestäben.

Werkstoffbezeichnung		Zugfestigkeit R_m	0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$	Bruchdehnung A
Kurzzeichen	Nummer	N/mm²	N/mm²	%
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

Tabelle 2-9. Mindestwerte für die Kerbschlagarbeit von Gusseisen mit Kugelgrafit, gemessen an ISO-V-Proben, die aus getrennt gegossenen Probestücken durch mechanische Bearbeitung hergestellt wurden.

Werkstoffbezeichnung		Kerbschlagarbeit in J					
		bei Raumtemperatur 23 ± 5 °C		bei – 20 ± 2 °C		bei – 40 ± 2 °C	
Kurzzeichen	Nummer	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	–	–	–	–

Bild 2-35
Verbundguss-Bremstrommel (Fa. Opel), bestehend aus Stahlblechboden und Gusskörper als Reibring.

Gusseisen mit Kugelgrafit 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 °C bis 1180 °C positiv beeinflusst. Im Vergleich zum Gusseisen mit Lamellengrafit ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der
- Wärmeleitfähigkeit und des
- Speisungsverhaltens (Abschn. 2.4.2).

Infolge der Kugelform des Grafits wird die Wärmeleitfähigkeit herabgesetzt und das Speisungsverhalten merklich verbessert. Gusseisen mit Kugelgrafit gilt als *nicht rissempfindlicher* Eisengusswerkstoff. Weiterhin werden höhere Festigkeits-, Dehnungs- und Zähigkeitswerte erreicht als bei Gusseisen mit Lamellengrafit.

Gemäß Tabelle 2-8 nach DIN EN 1563 unterscheidet man 13 Gusseisensorten mit Kugelgrafit, deren mechanische Eigenschaften an getrennten oder angegossenen, bearbeiteten Probestäben ermittelt werden. Wegen seiner stahlähnlichen Eigenschaften wird das Gusseisen mit Kugelgrafit zu den *duktilen* Gusswerkstoffen gezählt.

Die sehr große Zähigkeit des Gusseisens mit Kugelgrafit 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 Tabelle 2-9. Die Werte für die Bruchdehnung *A* erreichen praktisch die Werte üblicher Massenbaustähle.

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

$$\textit{Brinell}\text{härte HB} = \frac{R_m\left(\mathrm{N/mm^2}\right)}{3{,}2}$$

als Mittelwert gebildet. 90 % aller Werte liegen hierbei zwischen den Faktoren 2,64 und 3,4. Besondere Bedeutung haben *Guss-Schweiß-Verbundkonstruktionen* als Vorder- oder Hinterachsbrücken für den Sonderfahrzeugbau erlangt, wenn sie etwa länger als 2400 mm sein müssen, Bild 2-36. (Kleinere Achsbrücken werden einteilig aus Sphäroguss für Nutzfahrzeuge gegossen.)

Das flanschlose Achsgehäuse (EN-GJS-400-18-LT) wird beidseitig mit Rohrabschnitten aus S355J2+N (St 52-3) durch Reibschweißen verbunden. Die Verfahrensparameter werden so eingestellt (Schmelze muss aus Spalt herausgedrückt werden), dass in der Fügezone weder Martensit noch Ledeburit entstehen kann und die Grafitkugeln erhalten bleiben.

Auch bei Gusseisen mit Kugelgrafit muss bei schweren, dickwandigen Gussstücken der *Wanddicken-*

Bild 2-36
Hinterachsbrücke aus Gehäuse, Rohrabschnitten und Achszapfen, Länge > 2400 mm (nach von Hirsch).

einfluss beim Entwerfen berücksichtigt werden. Nach DIN EN 1563 werden drei Bereiche der maßgebenden Wanddicke t unterschieden:
- $t = 30$ mm,
- $t = 30$ mm bis 60 mm,
- $t = 60$ mm bis 200 mm.

Die Vielseitigkeit der Werkstoffgruppe Gusseisen soll noch am Beispiel eines *legierten Gusseisens* mit Kugelgrafit 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 Kugelgrafit in einer ferritischen Grundmasse enthält 5 % Silicium und 1 % Molybdän. Dieser Gusswerkstoff ist
- *hitzebeständig* bis 820 °C,
- *warmfest* ($R_{p0,2}$ = 120 N/mm² bei 600 °C),
- *korrosionsbeständig* und
- *zerspanbar* bei Härten von 200 bis 240 HB.

Bild 2-37
Auspuffkrümmer verschiedener Pkw-Motoren aus warmfestem Gusseisen mit Kugelgrafit. Werkfoto Georg Fischer AG.

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 Auspuffkrümmern etwa gemäß Bild 2-37, und bei Turboladern für Motoren.

Die Möglichkeiten der Werkstoffgruppe Gusseisen sollen auch am Beispiel einer wärmebehandelten Sorte erläutert werden. Die DIN EN 1564 *»Bainitisches Gusseisen mit Kugelgrafit«* ist eine neue Norm, die vier hochfeste Sorten mit gleichzeitig hohen Kennwerten für die Festigkeit und Zähigkeit enthält, Tabelle 2-10. Die bisherige Bezeichnung: *Zwischenstufenvergütetes Gusseisen mit Kugelgrafit* sollte nicht mehr verwendet werden. Im angelsächsischen Sprachgebiet ist die Bezeichnung **ADI** – **A**ustempered **D**uctile **I**ron – gebräuchlich. Die chemische Zusammensetzung der Gusseisenschmelze und die Einstellung der Wärmebehandlungsparameter müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Radnaben und Kettenräder für Lkw und Baumaschinen sind bekannte Anwendungen im Fahrzeugbau.

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 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.

Durch eine unvollständige Schmelzenbehandlung, ähnlich wie bei der Herstellung von Gusseisen 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 Gusseisen 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 Gewichtsersparnis 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 beträgt bei allen Gusseisensorten einheitlich 50 N/mm², mit einer Streubreite von 75 N/mm², die durch den Einfluss der Wanddicke und den thermischen Modul, vgl. Bild 2-54, verursacht wird.

Aus den geringen Bruchdehnungswerten (d. h. der geringen plastischen Verformbarkeit) ist der nichtduktile 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*.

Tabelle 2-10. 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/mm²**	**N/mm²**	**%**	**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

Tabelle 2-11. Mechanische Eigenschaften (ermittelt an getrennt gegossenen Probestücken, Kennzeichen »S«) von Gusseisen mit Vermiculargrafit, nach ISO 16112.

Werkstoffbezeichnung (Kurzzeichen) nach		Zugfestigkeit [1] R_m, min.	0,2%-Dehngrenze $R_{p0.2}$, min.	Bruchdehnung A, min.	*Brinell*härte, Richtwerte HBW 30
ISO/TR 15931	**W50**	**N/mm²**	**N/mm²**	**%**	**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 separatly casting sample (getrennt gegossene Proben), z. B. ISO/JV/450/S.
U: for cast on (angegossen), z. B. ISO/JV/300/U.

Bild 2-38
Primärgefüge von Temperhartguss mit dunkleren Dendriten aus zerfallenen Austenitkristallen (Perlit) und Zementit (hell), entstanden aus Restschmelze.

Aus dem spröden *Temperhartguss* wird durch eine Wärmebehandlung in neutraler oder entkohlender Atmosphäre *duktiler Temperrohguss* hergestellt, der gut mechanisch bearbeitbar ist. Um eine grafitfreie Primärerstarrung zu erreichen, wird mittels Bismutimpfung und bestimmter Gehalte an
- Kohlenstoff (2,3 % bis 3,4 %) und
- Silicium (1,5 % bis 0,4 %)

eine Zusammensetzung des Hartgusses nach Bild 2-33 als
- Ledeburit/Perlit, Bereich IIa oder
- Ledeburit, Bereich I

eingestellt. Das Mikrogefüge des Temperhartgusses besteht gemäß Bild 2-38 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 mittels einer höheren Gießtemperatur möglich;
- die grafitfreie Primärerstarrung ist auf Wanddicken kleiner als 45 mm beschränkt;
- Dichtspeisung und Schwindung sowie die Rissanfälligkeit werden durch das breite Erstarrungsintervall größer und schwieriger.

Die werkstofflichen Eigenschaften von Temperguss sind in DIN EN 1562 genormt. Je nach Bruchaussehen des duktilen Rohgusses unterscheidet man den
- entkohlend geglühten *weißen Temperguss* (**M**alleable **W**hite = GJ**MW**) und den
- nicht entkohlend geglühten *schwarzen Temperguss* (**M**alleable **B**lack = GJ**MB**).

Der ältere *weiße* Temperguss wird auch *europäischer* Temperguss genannt. Der *schwarze* oder auch *amerikanische* Temperguss hatte erst ab etwa 1960 mit den Serienteilen für die Autoindustrie den weißen Temperguss mengenmäßig überholt. Seine Bedeutung ist aber seit Jahrzehnten stark rückläufig, weil das Eigenschaftsspektrum durch Gusseisen mit Kugelgrafit preiswerter erfüllt wird.

Weißer Temperguss

Bei einer Wärmebehandlung in *entkohlenden Gasgemischen,* wie z. B. in
- Kohlenmonoxid/Kohlendioxid oder
- Wasserdampf/Wasserstoff

entsteht aus Temperhartguss ein sehr anisotropes Gefüge. Dies ist in Bild 2-39 als Gießkeil dargestellt, um den Wanddickeneinfluss zu betonen. Die rein ferritische Randzone wird bei einer Wanddicke unter 8 mm erreicht, wobei die Kernzone aus aufgelockertem Perlit mit Temperkohleknoten besteht, Bild 2-40.

Bild 2-39
Weißer Temperguss GJMW (GTW) wegen der Wanddickenabhängigkeit als Keil dargestellt (nach EN 1562).

Bild 2-40
Kernzone von weißem Temperguss (entspricht etwa der Sorte EN-GJMW-350-4) mit Perlit und Knotengrafit.

Weißer Temperguss 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.

Bild 2-41
Rohrgelenkwelle in Gussverbund-Schweißkonstruktion.

Die Sorte EN-GJMW-360-12W wird mit besonders großer *Entkohlungstiefe* hergestellt und ist für Festigkeitsschweißungen ohne thermische Nachbehandlung vorgesehen. Bei Wanddicken < 8 mm beträgt der Restkohlenstoffgehalt ≤ 0,30 %.

Eine Anwendung der gut schweißgeeigneten Sorte EN-GJMW-360-12W bei der Fertigung von Kardan- oder Gelenkwellen ist in Bild 2-41 skizziert. Die

Bild 2-42
Einbaufertiges Kardangelenk, bestehend aus Gabelflansch, Gabelkopf und Stahlrohr in Gussverbund-Schweißkonstruktion. Werkfoto Georg Fischer AG.

Wanddicke des Gabelkopfes, der mit einem Stahlrohr durch eine umlaufende Schutzgasschweißnaht verbunden ist, muss kleiner als 8 mm sein. Bild 2-42 zeigt ein einbaufertiges Kardangelenk, bestehend aus einem Gabelflansch (EN-GJMW-450-7), einem Gabelkopf (EN-GJMW-360-12W) und dem angeschweißten Stahlrohr (P235G1TH). Auch gegossene Radträger für Hinterachsen von Pkws werden zusammen mit Stahlpressteilen zu kompletten Achsschwingen geschweißt (Näheres s. DIN EN 1011-8).

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.

Tabelle 2-12. Mechanische Eigenschaften der Stahlgusssorten für allgemeine Verwendung nach DIN EN 10293, Auszug.

Stahlgusssorte	Streck-grenze	Zug-festigkeit	Bruchdehnung ($L_0 = 5\ d_0$)	Kerbschlagarbeit (ISO-V-Proben)	Beispiele für Anwendung
Kurzname	N/mm²	N/mm²	Prozent, min.	Mittelwert J, min.	
GE200	200	380 bis 530	25	27 (bei RT)	Maschinenbau, Bautechnik, Hochbau, Tiefbau für geringer belastete Bauteile
GS200	200	380 bis 530	25	35 (bei RT)	
GS240	240	450 bis 600	22	27 (bei RT)	
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

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.[2]

Ein besonders schwieriges Problem bei Stahlguss ist die geforderte *warmrissfreie* Primärerstarrung in der Randschale. Ursache der Warmrisse sind meistens metallurgische Vorgänge in der Schmelze (niedrigschmelzende Verunreinigungen). Risse können sowohl bei glattwandiger, als auch bei großen und kleinen Wanddicken und Abkühlungsgeschwindigkeiten auftreten. Nur mit Hilfe 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 °C bis 1680 °C),
- Oberflächenanbrennungen am Formstoff,
- große Speiser zur Formfüllung erforderlich,
- Gefahr der Warmrissbildung,
- großer Aufwand beim Trennen der Angüsse,
- große flüssige und feste Schwindung und
- Treiben der Formen.

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

DIN EN 10213 vom Januar 2008 z. B. enthält die technischen Lieferbedingungen für *Druckbehälter aus Stahlguss* mit den Stahlgusssorten für den Einsatz bei Raumtemperatur und die austenitischen und ferritischen kaltzähen (warmfesten) Sorten für den Einsatz bei tieferen (höheren) Temperaturen.

[2] Gießen Großgussstücke. www.wissensfloater.de

Nach DIN EN 10293 unterscheidet man drei Festigkeitsklassen von Stahlguss für allgemeine Verwendung. Dies sind die unlegierten *Normalsorten* GE200 bis GE300, Tabelle 2-12. Sie werden durch Legieren mit Kohlenstoff eingestellt, die Sorten GS200 und GS300 (≤ 0,23 % C) sind gut schmelzschweißgeeignet. Diese Sorten eignen sich für Fertigungs- und Konstruktionsschweißungen. Zum Verbessern der Schweißeignung wird der Kohlenstoffgehalt etwas abgesenkt 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 Vorwärmen und ohne Wärmenachbehandlung rissfrei schweißen lässt. Die Anwendung der unlegierten Stahlgusssorten für allgemeine Verwendung nach DIN EN 10293 ist wegen der ungünstigen Gießeigenschaften seit Jahren rückläufig.

Die Schweißeignung ist bei Stahlguss von großer praktischer Bedeutung. Nach der Fehlerortung in den *Stahlgussstücken* werden durch Reparaturschweißungen – man spricht in diesem Fall vom *Fertigungsschweißen* – Lunker, Risse und Oberflächenfehler beseitigt. Das Stahlgussstück wird zunächst *normalgeglüht* und im Anschluss an das Fertigungsschweißen *spannungsarm* geglüht.

Nicht nur die Schweißeignung von Stahlguss wird hauptsächlich vom Kohlenstoffgehalt beeinflusst. In Bild 2-43 sind die einstellbaren Festigkeits- und Verformungskennwerte in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt aufgetragen. Der durch *Widmannstätten-*

Bild 2-43
Festigkeitswerte von unlegiertem, normalgeglühtem Stahlguss in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt (nach Roesch). Durch Widmannstättensches Gefüge gefährdeter Bereich.

Bild 2-44
Pumpengehäuse als Gussverbund-Schweißkonstruktion während der Ultraschallprüfung. Werkfoto Georg Fischer AG.

sches Gefüge stark gefährdete Bereich zwischen etwa 0,25 % C und 0,35 % C ist hervorgehoben. Für höhere Festigkeiten verwendet man niedriglegierte Stahlgusssorten mit geringen Kohlenstoffgehalten verbunden mit guter Schweißeignung, Tabelle 2-12.

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 Stahleisen-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.

Die Gebrauchseigenschaften dieser Sorten zeigen, dass der verhältnismäßig teure Stahlguss ein mengenmäßig begrenztes, aber genau bestimmtes Einsatzgebiet bei Großguss- und Seriengussstücken mit besonderen Eigenschaften hat.

Da sich die Gießeigenschaften bei steigenden Gehalten an Legierungselementen i. Allg. zunehmend verschlechtern, werden häufig Verbundkonstruktionen hergestellt, d. h. Gießen und Schweißen mit
- Walzprofilen, z. B. Rohren,
- Schmiedestücken, z. B. Ringen, Flanschen, und
- umgeformten Grobblechen, z. B. Kümpelböden

kombiniert. Die Gussstücke bzw. die Schweißkonstruktionen kann man auf diese Weise einfacher oder billiger fertigen, außerdem wird die *Bauteilsicherheit* oft erhöht. Ein Beispiel zeigt Bild 2-44. Die Herstellung eines Pumpengehäuses für den Sekundärkreislauf eines Wärmekraftwerks wurde durch eine Gussverbund-Schweißkonstruktion sehr vereinfacht. Der Gusswerkstoff GX12Cr14 ist an beiden Vorschuhenden mit artgleichen nahtlosen Rohren und geschmiedeten Ringen durch Schmelzschweißen zu Flanschen verbunden.

2.3.2 Nichteisen-Gusswerkstoffe

Nur für den Leichtmetallguss werden Zuwachsraten prognostiziert. Die insgesamt erzeugten Mengen von 977 000 t im Jahr 2011 verteilen sich auf 88 % Leichtmetall- und 12 % Schwermetallguss.

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 Rahmen nur begrenzt möglich. Die wichtigsten Legierungstypen seien nach den erzeugten Mengen den Gießverfahren an Hand weniger Beispiele zugeordnet. Von den Leichtmetall-Gusswerkstoffen Al, Mg, Ti hat der schwieriger zu gießende Werkstoff Titan noch keinen größeren Anteil erreichen können. Der Magnesium-Leichtmetallguss betrug im Jahre 2011 rund 15 000 t. Das Mengenverhältnis Al- zu Mg-Guss beträgt etwa 98 % zu 2 %. 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 bei etwa 1,50 €/kg preisgleich, kosteten aber Mitte 2012 2,55 €/kg bei eingeschränkter Verfügbarkeit durch den großen Bedarf an Mobiltelefonen. Ein Schrottrücklauf, wie bei den Eisen- und NE-Metallen üblich, ist bei Mg erst im Aufbau. Bei den Schwermetallen Cu, Zn, Pb, Sn sollen die in geringeren Mengen hergestellten Cu-Ni-Legierungen – relativ teure, korrosionsbeständige und warmfeste Gusswerkstoffe – in diesem Buch nicht näher betrachtet werden.

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.

Bild 2-45
Zustandsschaubild Aluminium-Silicium mit dem für Formguss bevorzugten Konzentrationsbereich.

Wegen der besonders vorteilhaften Kombination der Gieß- und Gebrauchseigenschaften kommt den naheutektischen *Aluminium-Silicium-Legierungen* die größte Bedeutung zu. Bild 2-45 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. Mit größer werdendem Erstarrungsintervall sind einige Gießeigenschaften beeinträchtigt, so dass für Formguss nur Siliciumgehalte zwischen 6 % und 17 % verwendet werden. Eine Ausnahme bilden die Kolbenlegierungen, die eine minimale Wärmedehnung bei 25 % Silicium aufweisen. Zwecks Erhöhung der Warmfestigkeit werden Legierungselemente wie Kupfer und Nickel zugesetzt.

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 Wanddickeneinfluss, bei Sandguss größer.

Eine feinkörnige Erstarrung durch Impfen mit Titan und Bor abgebenden Salzgemischen oder Titan und Bor enthaltenden Vorlegierungen 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,** s. Tabelle 2-17),
- ❒ **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.**

Tabelle 2-13 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 **A**luminium **C**asting. 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« kennzeichnet den Gusszustand, der meist durch Kaltauslagern nach Lösungsglühen und Ab-

Tabelle 2-13. Mechanische Eigenschaften von Aluminium-Druckgusslegierungen (F = Gusszustand).

DIN EN 1706	alt: DIN 1725-2	Werkstoff-zustand	Zugfestigkeit	Dehngrenze	Bruch-dehnung	*Brinell*-härte
Legierungsbezeichnung chemisches Symbol	Werkstoff-Kurzzeichen		R_m, min.	$R_{p0,2}$, min.	A_{50}, min.	HBW, min.
			N/mm²	N/mm²	%	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

Bild 2-46
Zustandsschaubild Aluminium-Magnesium mit der Druckgusslegierung GD-AlMg9 (L_1).

schrecken, Kurzzeichen »T4«, oder Warmauslagern 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** (ρ = 2,75 kg/dm³) 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, Tabelle 2-15. 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, auch bei Getriebegehäusen und Getriebedeckeln für Pkw.

Die Al-Mg-Legierung EN AC-Al Mg9 ist bei geringen Cu-Gehalten (< 0,05 %) beständig gegen Seewasser und ausgezeichnet polierbar. Bild 2-46 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 durch eine Wärmebehandlung – wie z. B. bei Halbzeug – nicht möglich, eine feindisperse Verteilung der β-Phase zu erreichen.

Tabelle 2-14. Mechanische Eigenschaften von Magnesium-Druckgusslegierungen (F = Gusszustand).

DIN EN 1706	alt: DIN 1729-2	Allgemeine Bezeichnung	Werkstoffzustand	Zugfestigkeit	Dehngrenze	Bruchdehnung	*Brinell*-härte
Legierungsbezeichnung chemisches Symbol	Werkstoff-Kurzzeichen			R_m	$R_{p0.2}$	A_{50}	HBW
				N/mm²	N/mm²	%	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

Tabelle 2-15. Mechanische Eigenschaften von Aluminium-Kokillen- und Sandgusslegierungen (F = Gusszustand, T6 = lösungsgeglüht und warmausgelagert).

DIN EN 1706	alt: DIN 1725-2	Werkstoffzustand	Zugfestigkeit	Dehngrenze	Bruchdehnung	*Brinell*-härte
Legierungsbezeichnung chemisches Symbol	Werkstoff-Kurzzeichen		R_m, min.	$R_{p0.2}$, min.	A_{50}, min.	HBW, min.
			N/mm²	N/mm²	%	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

Die Druckgusslegierungen des Magnesiums, Tabelle 2-14 und Bild 2-84, enthalten als Hauptlegierungselement Aluminium. Je nachdem, ob zusätzlich noch Zink, Mangan oder Silicium legiert werden, unterscheidet man die handelsüblichen Bezeichnungen AZ-, AM- und AS-Standardgusslegierungen. In der neuen EN 1753 werden die Legierungen sieben Legierungsgruppen zugeordnet, was noch gewöhnungsbedürftig ist.

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/mm² 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, Kettensägen und Mobiltelefonen, in der Elektro- und Apparateindustrie bei Gehäusen, Verschalungen und Haltern geführt. Die Magnesiumlegierungen mit Aluminium und Mangan besitzen im Vergleich zu den AZ- und AS-Legierungsvarianten die besten Zähigkeitseigenschaften. 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 Motorenraum für Kurbelgehäuse, Ölwannen 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 (**H**igh **P**urity) 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. 45 000 N/mm² wird im *Leichtbau* durch örtliche Versteifungen und Rippen ausgeglichen.

Kokillengusslegierungen

Die Kokillengusslegierungen des Aluminiums unterscheiden sich in ihren Gießeigenschaften und in der chemischen Zusammensetzung nur wenig von den Druck- und Sandgusslegierungen, wie Tabelle 2-15 zeigt. Die naheutektischen Legierungen mit Silicium und Kupfer sind überwiegend wie die Druckgusslegierungen in Tabelle 2-13 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 den unterschiedlichsten Farbtönen.

Der *Aushärtungseffekt* beruht auf der Ausscheidung von Vorstufen der intermediären Verbindung Mg_2Si 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 (Tabelle 2-13 bis 2-15). Bei *Sandguss* existieren jedoch zahlreiche nicht genormte Legierungen mit speziellen Gebrauchsei-

Tabelle 2-16. 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	Werkstoff-Kurzzeichen		R_m	$R_{p0.2}$	A_{50}	HBW
				N/mm²	N/mm²	%	Einheiten
ZP3	Z400	GD-ZnAl4	weiß/gelb	280	200	10	83
ZP5	Z410	GD-ZnAl4Cu1	weiß/schwarz	330	250	5	92

genschaften, z. B. die *Kolbenlegierungen*. Leichtmetallsandguss aus Aluminiumlegierungen kann wie Kokillenguss oberflächlich oder vollständig nachbehandelt werden mit Hilfe der
– galvanischen Verfahren und der
– 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 wurden im Jahre 2011 folgende Mengen Gusswerkstoffe erzeugt:

– Kupferlegierungen	79 000 t
– Zinklegierungen	40 000 t
– z. Vgl. Aluminiumlegierungen	844 000 t

Zinklegierungen werden praktisch nur als Druckguss vergossen.

Messing, Rotguss und Zinnbronze sind die wichtigsten Kupfergusswerkstoffe, die nach allen Gießverfahren vergossen werden. Auf die Dauerformverfahren
❒ **Kokillenguss (GM)**
(bei Leichtmetall-Gusswerkstoffen: **GK**),
❒ **Schleuderguss (GZ),**
❒ **Strangguss (GC)**
entfallen mehr als zwei Drittel der Erzeugung. 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 Gütewerte der beiden Hauptlegierungen der neuen Norm EN 12844, die auch mit den Schlagzeichen Z400 oder GD-ZnAl4 und Z410 oder GD-ZnAl4Cu1 bezeichnet wurden, zeigt Tabelle 2-16. 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 für hochwertige, maßbeständige *Genaugussstücke* bevorzugt eingesetzt. Die kupferhaltige Legierung aus Schrott- und Umschmelzzink (GD-ZnAl4Cu1) dagegen ist billiger und besitzt höhere Festigkeits- und Härtewerte. 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 Kadmium machen die Legierung auch bei hoher Luftfeuchtigkeit unempfindlich gegen interkristalline Korrosion.

Zum Ermitteln der Wanddicke von ständig statisch oder wechselnd beanspruchten Gussstücken wird nicht die Zug- oder Dauerfestigkeit verwendet. Die Verwendung der *10 000-Stunden-Zeitdehngrenze* für eine maximale 0,2%-Dehnung bei 30 N/mm² bis 50 N/mm² vermeidet das Kriechen und Abweichungen der eng tolerierten Gussmaße durch Beanspruchung.

Die mechanischen Eigenschaften der in Tabelle 2-16 aufgeführten Zinklegierungen (ZP3, ZP5) wurden an getrennt gegossenen Probestäben mit einer Dichte ρ von 6,7 kg/dm³ ermittelt. Die Werte streuen in Abhängigkeit von der Wanddicke, der Gestalt und der Gießtechnik z. T. erheblich.

Tabelle 2-17. Mechanische Eigenschaften der Kupferwerkstoffe Gussmessing, Gussbronze und Rotguss.

DIN EN 1982	alt: DIN 1709	Gießverfahren	Zug-festigkeit	Dehn-grenze	Bruch-dehnung	*Brinell*-härte
Werkstoff-Kurzzeichen	Werkstoff-Kurzzeichen		R_m, min.	$R_{p0.2}$, min.	A_{50}, min.	HBW, min.
			N/mm²	N/mm²	%	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

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 meist 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. Eine Zusammenstellung der mechanischen Eigenschaften dieser drei wichtigsten Kupfer-Gusswerkstoffe
– Gussmessing,
– Gussbronze und
– Rotguss
zeigt Tabelle 2-17. Die Streuung der mechanischen Gütewerte 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.

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 Gussstücke 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 Tabelle 2-18 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 erkaltenden Gussstücken bewirken, werden mit den Begriffen *Schwindung* (flüssig/fest) oder *Schrumpfung* (fest/fest) beschrieben.

Bild 2-47
Profil der Gießspirale zur Messung des Formfüllungsvermögens (nach Patterson und Brand).

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).

Tabelle 2-18. 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

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 durch

- konstante Laufquerschnitte oder
- variable Laufquerschnitte wie Keil oder Meniskusspitzen, Gitter-, Bogen- oder Harfenprofile

unterscheiden. Formen mit konstantem Laufquerschnitt sind als *Gießspirale* aufgerollt mit Mitteleinguss oder mit Außeneinguss als Maskenform hergestellt worden. Genauere Messungen sind in *Stabkokillen* möglich. Der konstante Laufquerschnitt in Gießspiralen oder Stabkokillen kann nach Bild 2-47 so gestaltet werden, dass man auch die Wiedergabe von Konturen und Kanten, also die fehlerfreie Formfüllung prüfen und messen kann. Bei komplizierten Gussstücken ist die Schmelzeneigenschaft *»Formfüllungsvermögen«* oft wichtiger als das Fließvermögen. Die Gießspirale mit Mitteleinguss nach *Sipp* zeigt Bild 2-48. Die Schmelze wird über einen Siebkern ❶ mit konstanter Druckhöhe eingegossen. Die *Auslauflänge* ist ein Maß für das Fließvermögen. Die Anzahl der konturenscharf abgebildeten *Warzen* ❷ 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,
- Zusammensetzung der Schmelze,
- Erstarrungstyp und -intervall,
- Strömungsverhältnisse,

Bild 2-48
Spiralprobe nach Sipp zur Bestimmung des Formfüllungsvermögens; ❶: Einlaufsieb aus Kernsand mit drei Öffnungen von 6 mm Durchmesser; ❷: 30 Warzen im Abstand von 50 mm.

– Druckhöhe,
– Wärmeleitfähigkeit der Form und
– Benetzbarkeit der Form.

Untersuchungen über den Einfluss von Temperatur und Legierungselementen auf das Formfüllungsvermögen von Gusseisen mit Lamellengrafit zeigen, dass diese Eigenschaft verbessert wird mit
– steigender Überhitzung,
– zunehmendem Kohlenstoffgehalt,
– zunehmendem Phosphorgehalt und
– kleinerem Erstarrungsintervall.

Untersuchungen an *Al-Si-Legierungen* mit dem scharfkantigen Spezialprofil nach Bild 2-47 sind in Bild 2-49 zusammengestellt. Für das Zweistoffsystem Al-Si sind die Spirallänge als Maß des Fließvermögens und das Formfüllungsvermögen für Siliciumgehalte bis 25 % gemessen worden. Das gute Gießverhalten der naheutektischen Legierungen ist sehr deutlich erkennbar. Das geringere Fließ- und Formfüllungsvermögen im größer werdenden Erstarrungsintervall wird durch dendritische Kristallisation verursacht, die das ungehinderte Nachfließen der Schmelze stört. Messungen an mit Natrium veredelten Legierungen zeigen bis 14 % Silicium ein wesentlich schlechteres Fließvermögen gegenüber den unbehandelten Schmelzen (s. a. Abschn. 2.2.3.2 und 2.3.2.1).

In den Gießereibetrieben werden Fließ- und Formfüllungsvermögen nicht an Proben ermittelt. Man benutzt dazu bei Seriengießverfahren zweckmäßiger die Erfahrungen aus der laufenden Gussproduktion. Durch Ändern der
– *Gießtemperatur,* der
– *Formtemperatur,* des
– *Formstoffsystems* und des
– *Anschnittsystems*
lässt sich erfahrungsmäßig ein optimales Formfüllungsvermögen einstellen. *Kaltgusszonen* und *Kaltschweißstellen* an Gussteilen führen zu Ausschuss. Eine Beeinflussung des Fließvermögens durch Legierungselemente ist in der Regel nicht möglich, da die Gebrauchseigenschaften der Gussstücke und die Zusammensetzung mit der Rohteilzeichnung vorgegeben sind.

Bild 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, Bild 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, wie Messungen an stark schwindungsbehinderten Gussstücken, z. B. Nocken- oder Kurbelwellen, nach unterschiedlich hohen Auspacktemperaturen gezeigt haben. Es bedeuten:
V_{fl} flüssige Schwindung,
V_E Erstarrungsschwindung,
V_K kubische Schwindung oder Schrumpfung,
$V_G = V_{fl} + V_E + V_K$ gesamte Volumenkontraktion.

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

Tabelle 2-19. *Heuvers*faktoren k_H von Eisengusswerkstoffen für Nass- und Sandguss.

Eisengusswerkstoff	*Heuvers*faktor 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

Bild 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.

- 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 gemäß Bild 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

Bild 2-51
Lunkerarten an Quaderproben: 1 Außenlunker, 2 Innenlunker, 3 Mikrolunker, 4 kubische Schwindung und 5 Einfallstellen.

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, ebene Flächen, konvex 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_{fl} 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 Bild 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.

Bild 2-52
Gelenkte Erstarrung am Keil: Der Speiser gleicht das Volumendefizit durch einen Außenlunker aus und stellt die Druckhöhe Δh zum Nachspeisen zur Verfügung.

Eine einfache Wanddicken- und Speiserbemessung ist als *Heuverssche Kreismethode* bekannt. Ausgehend von der geringsten Wanddicke bei A_1 (Bild 2-52) werden sich berührende Kreise in den

Wandquerschnitt eingezeichnet, deren Kreisflächen sich um einen konstanten Faktor k_H bis zum Speiser A_6 vergrößern. Tabelle 2-19 gibt die für Nass- und Sandguss zum Dichtspeisen bewährten *Heuversfaktoren* k_H für Eisengusswerkstoffe an. Man erkennt, dass mit größer werdendem *Heuvers*faktor 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. Bild 2-53 fasst die Elemente des Anschnittsystems für Sandguss in Formkästen zusammen. Da Gießzapfen und Stangen nur 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 Gussstücks in der Form proportional dem Quadrat seines Erstarrungsmoduls M:

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

Der *Erstarrungsmodul M* in cm ist das Verhältnis von Gussstückvolumen in cm^3 zu wärmeabführender Gussoberfläche in cm^2. Bild 2-54 zeigt die Berechnung des Erstarrungsmoduls am Würfel mit der Kantenlänge 1 cm. Zum Dichtspeisen dieses Würfels wird ein Speiservolumen mit einer größeren Erstarrungszeit t benötigt. Die *Chvorinovsche Konstante* k_{Ch} ist werkstoff-, temperatur- und formstoffabhängig.

Bild 2-53
Anschnittsystem, bestehend aus Einguss mit Siebkern und Gießzapfen, Stangen und exothermem Speiser für eine horizontal geteilte Sandgussform.

Somit ist die einfache *Heuvers*sche Kreismethode eine grobe Näherung der *Chvorinov*schen Formel für ebene Erstarrungsprobleme. Die *Modultheorie* erlaubt eine verfeinerte mathematische Berechnung des Erstarrungsverhaltens und der Speiserbemessung von Gussstücken. Sie wurde besonders von *Wlodawer* an Stahlguss entwickelt.

Die Erstarrungszeit des Speisers in Bild 2-53 kann mit Hilfe exothermer, also wärmeabgebender Stoffe verlängert werden, ohne den Modul des Speisers und das Ausbringen zu verschlechtern. Mit der *Goldschmidt*schen Thermitreaktion

$$Fe_2O_3 + 2 \cdot Al \rightarrow 2 \cdot Fe + Al_2O_3 - Q$$

lässt sich ein kleinerer Speiser durch die Reaktionswärme Q (= 760 kJ) aufheizen, er kann so länger nachspeisen.

Die kubische Schwindung oder Schrumpfung an Gussstücken muss durch ein Aufmaß am Modell – dieses entspricht dem linearen *Schwindmaß* – ausgeglichen werden. In Tabelle 2-20 sind die Schwindmaße nach DIN EN 12890 für einige Gusswerkstoffe zusammengestellt. Sie können nur als Anhaltswerte dienen; denn Schwindmaße sind keine Werkstoffkonstanten, sondern sie sind abhängig von dem

- *Erstarrungsmodul M des Gussstücks,* der
- *Wärmeleitfähigkeit des Formstoffs,* dem
- *Wärmeinhalt des Gusswerkstoffs*

Tabelle 2-20. 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

Bild 2-54
Erstarrungsmodul M und Erstarrungszeit t am Würfel mit der Kantenlänge 1 cm (nach Wlodawer).

und vielen anderen Faktoren. Bei Serienguss werden Schwindmaße durch *Probeabgüsse* ermittelt. Anschließend wird danach das Modell geändert. Bei Großguss und Einzelfertigung müssen Erfahrungen mit ähnlichen Stücken berücksichtigt werden. Der Erstarrungsablauf und das Entstehen unzulässiger Eigenspannungen und Verformungen in Gusstücken lassen sich durch Computersimulation berechnen. Softwarepakete zur *Erstarrungssimulation* von Gussstücken nach verschiedenen Gießverfahren und mit üblichen Gusswerkstoffen sind einsatzbereit.

Bild 2-55
Freie lineare Schwindung von Gusseisen mit Lamellengrafit GJL und Gusseisen mit Kugelgrafit GJS in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad S_C (nach Vondrak).

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 Lamellen- oder Kugelgrafit ausgeschieden wird. Daher misst man bei diesen Legierungen je nach ausgeschiedener Grafitmenge keine oder nur eine geringe Schwindung. Manche Gusseisensorten dehnen sich beim Erstarren sogar aus. Man sagt, *Gusseisen ist selbstspeisend,* und bezeichnet damit die Fähigkeit, Gussstücke ohne Speiser mit hohem Ausbringen lunkerfrei zu gießen. In Bild 2-55 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 Kugelgrafit 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 grafitfreie *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 grafitfrei 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. Bild 2-56 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

Bild 2-56
Warmrisse und Lunker am Rippenkreuz: Schwindungskräfte beanspruchen geschwächte Knotenpunkte, die durch den Sandkanteneffekt langsamer als die Stege abkühlen.

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 Bild 2-57. Wenn die Rippendicke überdimensioniert ist und die Erstarrungsfront stängelförmig entgegen dem Wärmefluss zur thermischen Mitte hin wächst, können leicht Warmrisse durch den Schwindwiderstand des Formstoffs in den Rundungen entstehen. Durch Umgestaltung der Rippen nach Bild 2-58 unter Anwendung der *Heuversschen Kreismethode* kann man die Warmrissneigung vermindern.

Bild 2-57
Warmrissbildung bei Stängelkristallisation unter dem Einfluss von Schwindungskräften.

In Serienfertigungen werden zum Verhindern der Warmrissneigung *Kühleisen* als örtlich begrenzte Kokillen mit eingeformt, wie dies Bild 2-59 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.

Eine Kühlrippe ist eine dünne Platte mit sehr kurzer Erstarrungszeit. Sie ist am Gussstück angegossen oder kann, wie neuere Versuche an Aluminiumlegierungen zeigen, auch nur als Kokille angelegt werden.

Nach *Wlodawer* soll der Modul der Kühlrippe M_K kleiner als ein Viertel des Gussstückmoduls M_G sein:

$$M_K < 0{,}25 \cdot M_G.$$

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 Wasserstoffs, Chlors und Kohlenoxids (O_2, N_2, H_2, Cl_2, CO) ist sehr temperatur- und druckabhängig. Bild 2-60 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.

Bild 2-58
Gießgerechte Verrippung, von außen nachspeisbar.

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 (Bild 2-60). 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 Mikroporositäten 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.

Bild 2-59
Anordnung von Reißrippen (Federn) und Kühleisen.

Der Einfluss des Drucks p auf die im Metall gelöste Gasmenge V (= Gasvolumen) für zweiatomige Gase definiert *Sieverts* gemäß der Beziehung

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

Hierin bedeuten V die Gaslöslichkeit, p der 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 *vakuumentgast*. In welchem Verhältnis stehen die Gasvolumina V_{1Gas} und V_{2Gas} in den Schmelzen zu einander?

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

Die im Erstarrungsintervall freiwerdende Hauptgasmenge lässt sich mittels *Vakuumgießen* entfernen. Dieses Verfahren konnte sich 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 Nachbehandlungsver-

Bild 2-60
Gaslöslichkeit metallischer Werkstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur, schematisch. $\Delta\vartheta$ = Erstarrungsintervall.

fahren 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, Warmhaltens und Vergießens, wie z. B.
  - – Schutzabdeckungen durch Schlacken, Salze,
  - – Schutzgase,
  - – Vakuumschmelzen, Vakuumentgasen, Vakuumgießen.
- ❒ Maßnahmen zum Entfernen von Gasen aus der Schmelze vor dem Vergießen durch spezielle Vergießungsmaßnahmen und pfannenmetallurgische Reaktionen, wie z. B.
  - – Sauerstoffentzug durch Desoxidation mit Aluminium oder Silicium,
  - – Wasserstoffentzug durch Spülen mit chlorabspaltenden 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,
- Vererzungen, Anbrennungen,
- Rattenschwänze,
- Schülpen.

Da sich gute Formstoffe von metallischen Schmelzen nicht benetzen lassen, kann durch Bestimmen des *Randwinkels* Θ gemäß Bild 2-61 die Eignung eines Formstoffs für gießtechnische Zwecke ermittelt werden. Randwinkel von etwa 180 ° haben z. B. Sand, Quarz, Zirconiumsand, Lehm, Ton, Grafit.

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 benetzbaren 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 *Warzen* 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«.

Bild 2-61
Randwinkel Θ eines idealen Formstoffs.

2.4.6 Seigerungen

Seigerungen sind Entmischungen der Legierungselemente im Gussstück mit vom Gusswerkstoff und vom Gießverfahren abhängigen, typischen Konzentrationsunterschieden. Sie entstehen bei der Erstarrung durch beschleunigtes Abkühlen, d. h. beim Abweichen vom Gleichgewichtszustand.

Bild 2-62
Seigerungen als Folge der Schwerkraft bei dickwandigem Gusseisen mit Kugelgrafit.

Bild 2-63
Sandgussfehler an typischen Stellen einer Festsattelbremsklaue aus Gusseisen mit Kugelgrafit.

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 erstarrenden Kristallarten verursachen eine weitere Seigerungsform, die *Schwereseigerung*. Dieser Fehler tritt bei übereutektischem Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgrafit auf. Die primär erstarrenden Grafitkristalle (als Garschaumgrafit oder als Sphärolithen bezeichnet) schwimmen in der eutektischen Restschmelze z. T. auf. Das Bild 2-62 zeigt ein liegend gegossenes, geschnittenes Kurbelwellenhauptlager, das durch die aufgeschwommenen Sphärolithen bei der späteren spanenden Bearbeitung infolge schwankender Schnittkräfte – die als Folge unterschiedlicher Oberflächenhärten entstehen – nicht rund wird.

Tabelle 2-21. 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 Verdichtumgsarbeit	**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

2.4.7 Fehlerzusammenstellung bei Sandguss

Die bei Sandguss häufig vorkommenden und an der Oberfläche sichtbaren Gussfehler sind in Bild 2-63 lagerichtig gekennzeichnet. Loser *Sand* und *Schlacke* sind leichter als Gusseisen und befinden sich deshalb bevorzugt an dickeren Wänden in der Oberkastenformhälfte des Gussstücks. 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 Gussstücks mit heraus. An weit von den Angüssen entfernten Stellen können Metallströme soweit abgekühlt sein, dass sie beim Aufeinanderstoßen nicht mehr 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 Gussteils 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 Form- und *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, so dass auch bei den Dauerformverfahren Genauguss bisher nicht wirtschaftlich ist.

2.5.1 Formverfahren 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. Am Beispiel der tongebundenen Nassgussformstoffe ist in Abschn. 2.5.1.1 erläutert, warum der kostensparende Genauguss noch aussteht.

Für verlorene Form- und Gießverfahren verwendet man im Allgemeinen Formstoffe, die aus einer körnigen Grundmasse – diese ist meist 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.

Tabelle 2-21 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 Gießereialtsande hat das Interesse an billigen anorganischen, selbsthärtenden 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. Tabelle 2-22 zeigt, abgegrenzt gegenüber den Dauerformverfahren, die wichtigsten Form- und Gießverfahren mit verlorenen Formen. Sie werden in dieser Reihenfolge, beginnend mit dem Handformen, in Abschn. 2.5.1.1 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 (Bild 2-35) und die mit Stahl verstärkten Radnaben als Aluminium-Druckgussteile bei den Dauerformverfahren.

2.5.1.1 Tongebundene Formstoffe

Zum Abformen der Außenkonturen von Gussstücken haben sich *Formsande* bestens bewährt, die aus der feinkörnigen Grundmasse Quarzsand und

Tabelle 2-22. 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, *Croning*-Verfahren	Vollformgießen	Schleudergießen und Stranggießen horizontal
Verbundgießen		Verbundgießen

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 SiO_2.

Kornform, Korngröße und *Kornverteilung* des Sandes beeinflussen wichtige Eigenschaften des Formstoffsystems, wie z. B.
- 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, durch gleichmäßigen Abbau und eine Aufbereitung, die aus Mischen, Schlämmen und Sieben besteht, die Kornverteilung konstant zu halten. Aus dem Balkendiagramm der fünf Siebstufen gemäß Bild 2-64 kann als Kennwert des Sandes die mittlere Korngröße berechnet werden. Ein typischer Wert ist eine mittlere Korngröße von 0,22 mm.

Bei gleicher Verdichtungsarbeit lässt sich ein gröberer Sand stärker verdichten als ein feinerer. Durch die mit zunehmender Feinheit sich sehr vergrößernde spezifische Oberfläche wird der Reibungswiderstand

Bild 2-64
Kornverteilung von Quarzsand der Grube Haltern mit einer mittleren Korngröße von etwa 0,22 mm.

gegen das Verdichten erhöht. Gröbere Körner können in der Kastenformerei (Bild 2-69) zu so harten Formen verdichtet werden, dass sich die Quarzausdehnung nach dem Gießen nur durch *Warmrisse* im Gussstück ausgleichen lassen. Mit feineren Sanden verbessert man das konturenscharfe Abformen des Modells und damit die Wiedergabe feinster Oberflächen und Kanten. Für thermisch hoch beanspruchte *Kernsande* wählt man meist eine mittlere Korngröße über 0,27 mm.

In der betrieblichen Praxis ist die *Gasdurchlässigkeit* des bei formgerechtem Wassergehalt 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 Nassgusssanden.

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

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 [$Ca(OH)_2$] um und vermindert damit die Feuerbeständigkeit.

Für den mittleren und schweren Stahlguss reicht die Feuerbeständigkeit von Quarzsand (etwa 1760 °C bis 1790 °C nach DIN EN 993-12) 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 Aluminiumsilicaten nicht einheitlicher Zusammensetzung (etwa ein Teil Al_2O_3 auf vier Teile SiO_2), die als kolloidale, geschichtete Teilchen unter 2 µm Schichtdicke vorliegen. Die wichtigste Eigenschaft der Bentonite ist die Fähigkeit, im Kristallgitter Wasser unter 6- bis 8-facher Volumenvergrößerung sowie Metallionen einzulagern. Sie gehen aufgrund dessen in den plastisch formbaren, gequollenen Zustand über.

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

$$Ca^{2+} \rightleftharpoons 2 \cdot Na^{+}.$$

Weil die Wasseraufnahme im Kristallgitter und an der Oberfläche mit der Anzahl der eingelagerten Metallionen größer wird, ist ein Natriumbentonit hochquellfähig, ein Calciumbentonit 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 Aushärten der Formen oder der Kerne und beim Abguss ab.

In *Nassgussformen* aus tongebundenem, feuchtem Quarzsand werden bis auf den schweren Stahlguss 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 Bild 2-65. Ein Verändern der Körnung und des Bindemittels kann die lineare Ausdehnung nicht wesentlich verringern. Im Vergleich zu *Schamotte-* und *Zirconiumsand* dehnt sich Quarzsand mehr als dreimal stärker aus. Im tongebundenen Quarzsand tritt das Maximum bei etwa 630 °C auf. Sandausdehnungsfehler – die *Schülpen* gemäß Bild 2-63 und *Rattenschwänze* (s. Abschn. 2.4.5) – lassen sich darauf zurückführen.

Bild 2-65
Ausdehnungsverhalten verschiedener Formsande, die mit 5 % Bentonit gebunden sind (nach Hofmann).

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 dem Formstoff gefüllten Gießgruben, den Herden, abgeformt wird. Beim *offenen Herdguss,* z. B. von dekorativen Kamin- oder Ofenplatten, kann die Oberseite der Form in Bild 2-66 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.

Bild 2-66
Modellziehen beim offenen Herdguss.

Der *gedeckte Herdguss* ist mit ungeteilten oder geteilten Modellen möglich. Die Modelloberseite in Bild 2-67 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 verrippte *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, ähnlich wie in Bild 2-68 rechts der an Kerneisen und Schoren hängende Ballenkern.

Bild 2-67
Gedeckte Herdgussform mit aufgesetztem und beschwertem Formkasten vor dem Gießen.

Ein spezielles Verfahren zum Herstellen rotationssymmetrischer Gussstücke ist das *Schablonenformen* (Bild 2-68). Man arbeitet hierbei mit einfachen Dreh- oder Ziehschablonen. Die Modellkosten sind daher gering. Die Außenkontur der Schlackenpfanne formt man im Herd mit einer Holzschablone (links

Bild 2-68
Bildteil links: Schablonenformen einer Schlackenpfanne, Bildteil rechts: Zum Gießen fertige Form.

a) Modell links und Gusstraube 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.

Bild 2-69 (a – f)
Maschinenformen mit Kästen.

im Bild 2-68). 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 versteift sie mit Kerneisen, die an den *Schoren* im Kasten eingehängt sind. Nur drei Schablonen, je eine für die Außenkontur, die Innenkontur und für den Boden, sind außer der Drehvorrichtung, die auch für weitere Gussstücke eingesetzt werden kann, 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 Nassgusssand über die *Lehmform,* den *Zementsand* bis zu den schnellhärtenden, kunstharzgebundenen *Kaltharzsanden*. Durch Mischen von Sand mit Harz und Härtern in fahrbaren Durch-

g) Beschweren.

h) Gießen.

i) Auspacken.

Bild 2-69 (g – i)
Maschinenformen mit Kästen.

laufmischern wird der Formstoff meist direkt an der Gießgrube hergestellt und sofort in die Form oder den Kernkasten eingeleitet. Auf das Pressluftstampfen kann verzichtet werden, wenn sich das Formstoffsystem durch gutes Fließvermögen unter der Wirkung der Schwerkraft oder mit Vibratoren am Form- oder Kernkasten vor der chemischen Reaktion wie ein *Fließsand* selbst verdichtet.

Die Gusstoleranzen bei den Handformverfahren sind werkstoffabhängig den Nennmaßbereichen zugeordnet und werden zwischen dem Besteller und der Gießerei vereinbart.

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 Bild 2-69a) bis 69i) verdeutlichen das Verfahren. Die Arbeitsgänge in der Kastenformerei erfolgen in der Reihenfolge:

- Verdichten des Formstoffs im Unterkasten,
- Abheben und Wenden des Unterkastens,
- Verdichten des Formstoffs im Oberkasten,
- Abheben des Oberkastens,
- Kerneinlegen von Hand in den Unterkasten,
- Zulegen, Beschweren und Abgießen,
- Abkühlen der Gussstücke,
- Auspacken.

Das Verdichten des Formstoffs in den Kästen gemäß Bildfolge 2-69a) bis 69i) erfolgt gleichzeitig an verschiedenen Orten. Die glockenförmige Schwungscheibe ist kernlos mit hängendem Ballen geformt. Zum maschinellen Verdichten des Formstoffs wird die *Rüttel-Press-Abhebeformmaschine,* etwa wie in

Bild 2-70 dargestellt, verwendet. Auf dem massiven Formmaschinentisch wird die Modellplatte für den Oberkasten von dem Spannrahmen gehalten.

Bild 2-70
Rüttel-Press-Formmaschine in Position Ende Verdichten des Formstoffs im Oberkasten.

Mit elektrischen Heizplatten an der Unterseite werden die Modelle auf etwa 40 °C 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 ausgeschwenkter Pressplatte von oben aus dem Sandbunker mit einer Dosiervorrichtung (z. B. mittels *»Fischmaul«* oder *»Jalousie«*) locker in den Formkasten gefüllt.

Das Verdichten beginnt meist zweistufig zunächst mit dem *Vorrütteln* oder *Vibrieren* und endet bei eingeschwenkter Pressplatte mit dem *Pressen*. Weil bei unterschiedlichen Modellhöhen im Formkasten die Sanddichte nicht homogen ist, kann das Pressen mit *Vielfachstempeln,* die einzeln druckbeaufschlagt werden, zu einer annähernd homogen verdichteten Kastenform führen. 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. Nur das Kerneinlegen erfolgt noch von Hand, weil bei kernintensiven Formen mit wechselnden *Kassettenmodellplatten,* etwa gemäß Bild 2-71, ein Mechanisieren bisher zu aufwändig ist. Das Aufteilen der Modellplatte in Kassettenelemente erlaubt den Gießereien, Losgrößenschwankungen auszugleichen und die Anzahl der Platten im Modelllager zu verringern.

Zum 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 m^2; hierbei werden rechteckige Kastenformate gegenüber quadratischen bevorzugt. Durch die zunehmende Fertigung von Motorenblöcken und Kurbelwellen auf Kastenformanlagen hat 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.

Bild 2-71
Rechteckige Modellplatte mit verschiedenen Kassettenformaten.

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.

Bild 2-72 zeigt ein Sandgussstück aus dem Werkstoff EN AC-Al Si10Mg mit großen Außenabmessungen, mittlerer Masse, Innen- und Außenkernen sowie unterschiedlichen Wanddicken. Das Lagergehäuse ist für elektrische Bahnsysteme bestimmt.

Bild 2-72
Sandguss-Radlagergehäuse aus EN AC-Al Si10Mg, Werkfoto Georg Fischer AG.

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 *Nassgusssand*. 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 Nassgusssands 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 *Warmrissneigung* nicht nach den Dauerformverfahren vergossen werden können.

Mit automatisierten Formanlagen kann die in der Norm 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

Bild 2-73
Versatzmöglichkeiten zweier Formkästen, bezogen auf die Rundlochführung im Unterkasten.

zeigt Bild 2-73. 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 (Bild 2-69f) 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 (Bild 2-63).

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

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

Bild 2-74
Kastenlose Formmaschine mit dem Oberballen in der Position Ende Verdichten.

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 Luftschlitzen 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 Gussteile 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 Bild 2-74 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 Ausdrücken wird der Eingusstrichter vom Ausdrückrahmen im Oberballen geformt.

Die kastenlose Form kann waagerecht oder senkrecht geteilt hergestellt werden mit einer nutzbaren

Bild 2-75
Kastenlose, waagerecht geteilte Form für zwei Büchsen vor dem Abguss.

Formfläche von meist kleiner als 0,6 m². Für Formen mit vielen Kernen wird die waagerechte Formteilung entsprechend Bild 2-75 bevorzugt, da die Kerne von Hand sorgfältig eingelegt werden können.

Die senkrechte Formteilung gemäß Bild 2-76 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 Beschweren 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. Mit Hilfe von Unterdruck werden die Kerne festgehalten und durch Schwenken der Vorrichtung automatisch in die senkrechte Teilungsebene übertragen.

Bei den Seriengussstücken der Beschlagindustrie ist das kastenlose Formen mit senkrechter Formteilung weit verbreitet.

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 personalaufwändige 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.

Bild 2-76
Kastenlose, senkrecht geteilte Formen.

Als Bindemittel für den Quarzsand dient *Wasserglas* $Na_2O \cdot x\,SiO_2 \cdot y\,H_2O$ mit einem Massenverhältnis, (dem Modul $M = SiO_2/Na_2O$) 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 feinverteiltes *Kieselsäuregel* nach der Summenformel:

$$\underbrace{Na_2O \cdot x\,SiO_2 \cdot y\,H_2O}_{\text{flüssig}} + \underbrace{CO_2}_{\text{gasförmig}} \rightarrow$$

$$\underbrace{x\,SiO_2 \cdot y\,H_2O}_{\text{fest}} + \underbrace{Na_2CO_3}_{\text{fest}}.$$

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 Kurbelwellenmodell in Bild 2-77 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. In Frankreich wird der größere Teil der Pkw-Kurbelwellen nach diesem Verfahren in Kastenformen vergossen.

Bild 2-77
Kastenform mit verdichtetem, wasserglashaltigem Sand beim Begasen mit Kohlendioxid.

Für die Kernherstellung gemäß Bild 2-78 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* oder Anlegen einer *CO_2-Dusche* 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 Formstoffmischungen aus Quarzsand und feingemahlenen Phenol-Kresol-Kunstharzpulvern.

Das rieselfähige Formstoffgemisch wird entsprechend Bild 2-79a) 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 s bis 12 s eine Harz-Sandschicht von 5 mm bis 8 mm durch die höhere Modellplattentemperatur. Der überschüssige Formstoff wird durch Wenden um 180 ° und Abkippen zur Weiterverarbeitung entfernt, wie Bild 2-79b) zeigt.

Bild 2-78
Rundtischkernschießmaschine mit den Stationen Kernschießen links, Kern begasen und aushärten rechts (Kernbüchse öffnen ist nicht sichtbar; schematisch).

Bild 2-79
Maskenformverfahren:
a) Schütten und Aufbacken von Croningsand
b) Wenden der Modellplatte
c) Aushärten und Abheben
d) Fertige Form zum Gießen

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 Heizhau-

be, so dass der Formstoff bei Temperaturen von etwa 450 °C aushärtet. Diesen Vorgang verdeutlicht Bild 2-79c).

Die fertige, noch warme Maskenhälfte, wird nun durch Abhebestifte in der Modellplatte angehoben und mit der zweiten Hälfte von Hand nach dem Kerneinlegen gemäß Bild 2-79d) zugelegt und verklebt (s. a. Bild 2-8). 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 Tabelle 2-23 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 *Croning-sand*. 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 *Croning*sand 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 – dies sind wässrige Ammoniumsalze starker Säuren – und mit Kernsand gemischt. Das Verdichten in der 200 °C bis 250 °C warmen, geteilten Metallkernbüchse erfolgt mit Druckluft bis 7 bar. *Hot-Box-Sand* ist preisgünstiger als harzumhüllter *Croning*sand 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.

$$(NH_4)_2SO_4 \xrightarrow[200\,°C \text{ bis } 250\,°C]{\text{Zerfall bei}} H_2SO_4 + 2 \cdot NH_3 \uparrow$$

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

Tabelle 2-23. 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 Naben, Lagerdeckel, Differenzialgehäuse	Motorblöcke für den Lkw-Bereich

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

Bild 2-80
Fertigungsschritte für Feinguss nach dem Schalenformverfahren.

j) Beschleifen des Angusses

Bild 2-80 (Fortsetzung)
Fertigungsschritte für Feinguss nach dem Schalenformverfahren, Fachausschuss Feinguss im VDG und ZfG.
a) Modellherstellung
b) Montieren von Hand
c) Tauchen
d) Besanden
e) Schalenbildung durch mehrmaliges Tauchen und Besanden
f) Wachs ausschmelzen und Form brennen
g) Gießen
h) Ausklopfen
i) Trennen
j) Schleifen des Gussteils

zu erleichtern und die Putzarbeit zu verringern. Der stechende Ammoniakgeruch 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 CO_2-Verfahren (Abschn. 2.5.1.2, Bild 2-78). 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 **Kaltharzverfahren** 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 *Kaltharzsand* sind wegen der verhältnismäßig langen Aushärtzeit bisher nicht üblich.

Danach lässt sich die Maskenform mit Phenolharzbindern im Vergleich zur tongebundenen 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 größten Maskenformanlagen in Europa haben nutzbare Formflächen von etwa 1 m^2 und werden überwiegend zum stehenden Gießen von Pkw-Kurbelwellen aus Gusseisen mit Kugelgrafit eingesetzt.

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 polyzyklischen 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. Die Verträglichkeit der Bindersysteme im geschlossenen Formstoffkreislauf ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

2.5.2 Formverfahren 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, Bild 1-2.

2.5.2.1 Feingießverfahren

Das hochentwickelte Feingießverfahren gestattet die Herstellung von Gussteilen mit gegenüber anderen Gießverfahren höherer Maßgenauigkeit und geringerer Oberflächenrauheit. Die einteilige keramische Form und das Modell gehen dabei stets verloren. Alle Gusswerkstoffe sind nach diesem Verfahren gießbar. Die Feingussstücke haben keine Formteilung und sind gratfrei. Feinguss ist ein Seriengießverfahren mit Stückmassen zwischen etwa 2 g und 9 kg. Die große konstruktive Freizügigkeit wird durch den einteiligen 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 vervielfältigt. Das Urmodell wird mit der Acetylenflamme 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 ist der Spritzgießtechnik der Kunststoffe entlehnt. Die Beanspruchungen beim Füllen unter der Wachspresse sind so gering, dass Weißmetall ausreichend verschleißbeständig ist und die Wärme schnell genug ableitet.

Modellwachse sind Gemische aus verschiedenen natürlichen und synthetischen Wachsen 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. Bild 2-80a) und b) zeigen die ersten Verfahrensschritte. Modellwachs soll rückstandsfrei verdampfen und verbrennen. Die Schwindung im festen Zustand soll gering sein, ebenso die Volumenzunahme beim Übergang vom festen in den flüssigen Zustand, um die luftgetrocknete Formschale beim *Ausschmelzen* gemäß Bild 2-80f) nicht zum Reißen zu bringen.

Mischen und Verarbeiten der Kreislaufwachse und die Herstellung von Gussstücken mit wiederholbar gleicher Genauigkeit sind außer dem Aufbringen der Formschalen nach Bild 2-80e) die Präzisionsarbeiten in der Feingießerei.

Tabelle 2-24. Maßtoleranzen nach VDG-Merkblatt P 690 für Längen, Breiten, Höhen und Mittenabstände in Millimeter für Feinguss.

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	± 0,10	0,20	± 0,08	0,16	± 0,06	0,12	± 0,25	± 0,16
6	10	± 0,12	0,24	± 0,10	0,20				
10	14	± 0,15	0,30	± 0,12	0,24	± 0,09	0,18		
14	18	± 0,20	0,40	± 0,14	0,28				
18	24	± 0,25	0,50	± 0,17	0,34	± 0,12	0,23	± 0,32	± 0,20
24	30	± 0,30	0,60	± 0,20	0,40	± 0,14	0,27		
30	40	± 0,37	0,74	± 0,25	0,50	± 0,17	0,33	± 0,50	± 0,30
40	50	± 0,44	0,88	± 0,30	0,60	± 0,20	0,39		
50	65	± 0,52	1,04	± 0,38	0,76	± 0,23	0,46	± 0,71	± 0,45
65	80	± 0,60	1,20	± 0,46	0,92	± 0,27	0,53		
80	100	± 0,68	1,36	± 0,53	1,06	± 0,30	0,60	± 0,90	± 0,60
100	120	± 0,76	1,52	± 0,60	1,20	± 0,33	0,66		
120	140	± 0,84	1,68	± 0,65	1,30	± 0,36	0,71	± 1,15	± 0,85
140	160	± 0,92	1,84	± 0,72	1,44	± 0,38	0,76		
160	180	± 1,02	2,04	± 0,80	1,60	± 0,42	0,81		
180	200	± 1,12	2,24	± 0,88	1,76	± 0,43	0,86	± 1,80	± 1,00
200	225	± 1,28	2,56	± 0,95	1,90	± 0,47	0,93		
225	250	± 1,44	2,88	± 1,05	2,10	± 0,51	1,02		
250	280	± 1,64	3,28	± 1,15	2,30	± 0,56	1,12	± 2,20	± 1,25
280	315	± 1,84	3,68	± 1,25	2,50	± 0,63	1,26		
315	355	± 2,10	4,20	± 1,40	2,80	± 0,71	1,42	± 2,60	± 1,60
355	400	± 2,40	4,80	± 1,60	3,20	± 0,80	1,60		
400	450	± 2,70	5,40	± 1,80	3,60	± 0,90	1,80	± 3,10	± 2,00
450	500	± 3,00	6,00	± 2,00	4,00	± 1,00	2,00		
500		Sind bei Bedarf mit dem Feingießer abzustimmen							

In Handarbeit werden die Modelle mit dem Trichter, den Verteilerstangen und den Läufen zu *Modelltrauben* oder *Modellbäumen* montiert. Dazu wird das Modell am Anguss mit dem erwärmten Spatel örtlich angeschmolzen und gegen den Gießlauf gedrückt, wie es Bild 2-80b) verdeutlicht. Die Wachsmodelle werden so montiert, dass sie nach dem Gießen noch gut mit Hilfe von Trennscheiben oder Bandsägen vom Angusssystem entsprechend Bild 2-80i) abtrennbar sind.

Durch Tauchen in eine breiige, feinkeramische Masse gemäß Bild 2-80c) 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 Gussstücks beeinflussen.

Die Feinschicht besteht aus feingemahlenen feuerfesten Stoffen, wie z. B. Quarz, Zirconiumoxid, Korund oder Mullit mit Korngrößen kleiner 40 µm, sowie aus dem Bindemittel Tetraethylsilicat – $Si(OC_2H_5)_4$ – einem Ester der Orthokieselsäure.

Tetraethylsilicat ist unlöslich in Wasser, in Methanol-Ethanolgemischen aber gut löslich. Durch Hydrolyse in mit Wasser verdünnten Alkoholen wird das Bindemittel aufgespalten nach der Gleichung

$$Si(OC_2H_5)_4 + 4 \cdot H_2O \rightarrow Si(OH)_4 + 4 \cdot C_2H_5OH.$$

Tetraethylsilicat + Wasser → Kieselgel + Ethanol

Als Ergebnis der Reaktion entsteht das Bindemittel Kieselgel und der sehr leicht verdunstende Alkohol.

Die Modelltraube, dünn mit der Feinschicht überzogen, wird nach dem Abtropfen und Vortrocknen zunächst besandet. Durch sechs- bis zehnmaliges Tauchen und Besanden werden die Schichten aufgebacken, bis man bei einer Schalendicke von 5 mm bis 8 mm eine nach der Erfahrung ausreichende Festigkeit der Formschale erreicht.

Die Modelltraube wird danach für acht bis zehn Stunden zum Trocknen bei Raumtemperatur aufgehängt, hierbei verdunstet der durch Hydrolyse gebildete Alkohol.

Beim Brennen der Formen wird das Wachs bei Temperaturen um 120 °C flüssig und fließt aus der Form, wie in Bild 2-80f) angedeutet. Es kann zum größten Teil aufgefangen werden.

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

$$Si(OH)_4 + \text{Wärme} \rightarrow SiO_2 + 2 \cdot H_2O.$$

Die Formschale ist damit *keramisch* gebunden. Sie wird noch warm, freistehend ohne Hinterfüllen gemäß Bild 2-80g) abgegossen.

Die Genauigkeit beim Feingießen erreicht man durch die aufwändige Modell- und Formherstellung. Bei den Feingusstoleranzen werden die *Genauigkeitsgrade* D_1 bis D_3 unterschieden, Tabelle 2-24. 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 (gemittelte) *Rautiefe* $Rz = 5{,}9\,\mu m$ bis $32\,\mu m$.

Um komplizierte Werkstücke nach dem Feingießverfahren wirtschaftlich herstellen zu können, müssen mehrere der folgenden Voraussetzungen gleichzeitig erfüllt sein:

- Das Gussstück wird als Serienteil benötigt.
- Der Fertigungsaufwand muss gering sein, eine mechanische Bearbeitung sollte nicht mehr erfolgen. Der Werkstoff lässt sich nur unter hohem Aufwand bearbeiten.
- Nichtebene Funktionsflächen und Durchbrüche mit geforderter hoher Maßgenauigkeit erschweren oder verhindern eine spanende Bearbeitung.
- Für Bauteile aus Werkstoffen mit besonderen Eigenschaften, z. B. Werkstücke aus hochlegierten Stählen, die eine nur geringe Wanddicke aufweisen.

Das im Detail nicht einfach lösbare Kombinationsproblem zeigt der bisher geringe Feingussanteil in 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. Es handelt sich meist um Sonderwerkstoffe.

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

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 Angusssystem aus Schaumstoff werden nach dem Handformverfahren (Abschn. 2.5.1.1), 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 rückstandsfrei. Die Form muss zunächst so langsam gefüllt 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 gemäß Bild 2-81 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 zersetzt sich das Modell durch Depolymerisation. Dieses sog. Trockensand-Vollformgiessen wird auch als *Lost Foam Process* bezeichnet. Versuchsweise werden zzt. Zylinderköpfe, Saugrohre, Labyrinthgehäuse und sogar komplette Kurbelgehäuse aus Aluminiumlegierungen gegossen.

Bild 2-81
Schaumstoffmodell eines Käfigläufers; die Durchbrüche werden mit Kaltharzsand kernlos geformt.

Das im Jahr 1968 entwickelte *Magnetformverfahren* formt eine geschäumte Modelltraube mit Angusssystem in rieselfähigem, feinkörnigem Eisenpulver als Formstoff (Teilchendurchmesser betragen 0,1 mm bis etwa 0,5 mm) mit einem Magnetfeld von etwa 1000 Gauß in dem oben offenen Formkasten ein. 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 Kühlen 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* (Abschn. 2.5.1.1) behandelt.

Die Wirtschaftlichkeit der Verfahren lässt sich nur schwer beurteilen und muss im Einzelfall am Seriengussstück im Vergleich zu konkurrierenden Formverfahren nachgeprüft werden.

2.5.3 Formverfahren mit Dauerformen

Die wichtigsten Dauerformverfahren[3], besonders der Druckguss, aber auch der Kokillenguss sind *werkstoffspezifische* Form- und Gießverfahren für wenige ausgewählte Legierungen in größeren Serien. Die Verfahren lassen sich meist zweckmäßiger zusammen mit den speziellen Gusswerkstoffen darstellen (Abschn. 2.3.2.1 Druckgusslegierungen und Abschn. 2.3.2.2 Zink-Druckgusslegierungen). Allgemeine Angaben über *Kokillenwerkstoffe* und deren Beanspruchungen enthält Abschn. 2.1.1.3.

2.5.3.1 Druckgießverfahren

Man unterscheidet das Warm- und das Kaltkammerverfahren. Beim *Warmkammerverfahren (*Bild 2-82) ist der Warmhalteofen mit der Gießkammer und dem Saugrohr Bestandteil der *Druckgießmaschine*. Nur wenige Zinklegierungen (Abschn. 2.3.2.2) und Magnesiumlegierungen (Abschn. 2.3.2.1) können außer

[3] Gießen in Dauerformen. www.wissensfloater.de

Zinn- und Bleiwerkstoffen nach dem Warmkammerverfahren vergossen werden, denn einige Schmelzen jener Legierungen greifen die Eisenwerkstoffe der Pumpe und des Warmhalteofens an.

Nach dem *Kaltkammerverfahren* werden hauptsächlich Aluminium- und wenige Magnesiumlegierungen vergossen. Die Druckgießmaschine und der Warmhalteofen mit dem Schöpftiegel als Dosiergefäß sind stets getrennt, wie Bild 2-83 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 etwa 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, wie z. B.

- Feinschleifen und Läppen,
- Hartverchromen und
- Nitrieren

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

Bild 2-83
Waagerechte Kaltkammer-Druckgießmaschine, schematisch.

Bild 2-82
Warmkammergießmaschine Vacural (nach Ritter).

Für Aluminiumlegierungen und Magnesiumgusswerkstoffe ist die *Kaltkammer-Druckgießmaschine* (Bild 2-83) besonders geeignet, da der Gusswerkstoff während der kurzen Verweilzeit in der nicht beheizten Kammer am wenigsten Gelegenheit zur schädlichen, qualitätsmindernden Eisenaufnahme hat.

Bild 2-83 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, so dass 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 s bis 1/1000 s z. T. im teigigen Zustand mit Geschwindigkeiten bis zu 100 m/s im Anschnittquerschnitt in die Form gepresst. Dabei werden unter Wirbelbildung große Gasmengen aus den sich zersetzenden 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 porenfrei schweißbar. Die Poren werden vor allem von dem unter hohem Druck eingeschlossenen Wasserstoff verursacht. Die Erfahrung zeigt, dass mit schweißtechnischen Maßnahmen jeder Art keine porenfreien Schweißverbindungen herstellbar sind. Untersuchungen in den letzten Jahrzehnten führten aber 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 gehört eine möglichst effektive Entlüftung der Form, die relativ einfach realisierbar ist, sowie die Wahl geeigneter Formtrenn- und Kolbenschmierstoffe und eine effektive Spülgasbehandlung der Aluminiumschmelze. Aluminiumwerkstoffe mit Wasserstoffgehalten ≤ 3 ppm lassen sich erfahrungsgemäß praktisch porenfrei 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 Freizügigkeit der Gestaltung ist begrenzt, weil folgende Bedingungen einzuhalten sind:
- Stückmassen < 40 kg,
- mittlere Abmessungen: 100 cm² bis 1800 cm², Sprengfläche in der Teilungsebene,
- gleichmäßige Wanddicken von 1 bis 25 mm,
- geometrisch einfache Grundkörper,
- keine Hinterschneidungen oder Schieber.

Hinterschneidungen sind ausschließlich durch Ändern der Formteilung möglich, weil Sandkerne den hohen Gießdrücken nicht standhalten. Losteile und Kernschieber verteuern die Form und machen sie störanfälliger. Auch bei dünnwandigen Druckgussstücken ist in der Formteilung eine *Dichtfläche* von 20 mm bis etwa 25 mm Randabstand nötig.

Feinkörnige Gussgefüge entstehen durch Überhitzen der Schmelze auf etwa 900 °C und Wahl einer möglichst niedrigen Gießtemperatur (630 °C

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, d. h. in einem Schwefelhexafluorid-Kohlendioxid-Luftgemisch zu schmelzen und mit einer Genauigkeit von ± 7 °C zu vergießen.

Die Oberflächen der Gussstücke sind nicht korrosionsbeständig und oxidieren. Durch eine Nachbehandlung, wie z. B.
- Beizen mit Salpetersäure,
- Bichromatisieren mit Kaliumdichromat,
- Anstreichen mit Dispersionen oder
- Beschichten mit Kunststoffen

werden die Oberflächen chemisch beständiger. Viele Druckgussstücke neigen zur Selbstaushärtung. Darunter versteht man die meist unerwünschte Änderung der Bauteileigenschaften Festigkeit, Härte, Zähigkeit und Maßbeständigkeit 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 Gusshaut angeschnitten. Jedes Gehäuse wird mehrfach im Fertigungsprozess abgedrückt oder durch Vakuumimprägnierverfahren mit Reaktionsharzen nachgedichtet.

Die Gießeigenschaften der Magnesium-Aluminium-Legierungen lassen sich aus dem Zustandsschaubild Mg-Al, Bild 2-84, abschätzen. Die Schmelzen erstarren in einem breiten Temperaturintervall und bilden

Bild 2-84
Zustandsschaubild Magnesium-Aluminium mit dem für Druckguss vorteilhaften Konzentrationsbereich.

magnesiumreiche β-Mischkristalle. Wegen des auf das gleiche Volumen bezogenen und gegenüber 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 in Tabelle 2-13 und 2-14 werden bei mittleren, gleichmäßigen Wanddicken von 3 mm 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, aushärten 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 – in Verbindung mit Wanddickenänderungen – eine gerichtete Erstarrung bei gleichmäßigerem Gefüge.
- *Vakuumverfahren:* Sie ermöglichen eine Hybridtechnik (siehe Bild 2-82), d. h. Verdichten und Nachdrücken der erstarrenden Schmelze erfolgt wie beim Kaltkammerverfahren. Die Metalldosierung durch das mit dem Warmhalteofen verbundene Saugrohr ist ein typisches Element des Warmkammerverfahrens.

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 aushärtbar und schweißbar ist.

Besonders wirtschaftliche Druckgussserien mit bis zu 1 Mio. Abgüssen je Form lassen sich mit *Zinklegierungen* auf Warm- oder Kaltkammermaschinen herstellen (Abschn. 2.3.2.2). Etwa 50 % der Zinkdruckgussstücke werden in Fahrzeuge eingebaut.

Der Aluminiumgehalt der Legierungen ermöglicht das Vergießen auf *Warmkammergießmaschinen*. Denn abweichend von der Kaltkammertechnik (Bild 2-83) bilden beim Warmkammerverfahren (Bild 2-82) Gießvorratsgefäß und Druckkolben aus Eisenwerkstoffen mit der Zinkschmelze 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 Warmkammertechnik erlaubt ein feinfühliges Regeln der Gießtemperatur. Sie ist notwendig, weil durch eine Schmelzüberhitzung von etwa 30 °C bereits riss- und lunkerhaltige Gussstücke entstehen können. Günstige mechanische Eigenschaften erzielt man mit einer Schmelzüberhitzung von etwa 20 °C bei möglichst hohen Formtemperaturen.

Die Gießtemperaturen und Wärmeinhalte der Druckgusslegierungen GD-AlSi, GD-MgAl und Z410 sind in Tabelle 2-25 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 bestimmend. Es werden vier übliche Wanddickenbereiche unterschieden, die sich hauptsächlich aus Größe, Gestalt, Formschrägen und Radien des Gussstücks ergeben:

Gussstückgröße	Wanddickenbereich
Kleinstteile	0,3 mm bis 0,6 mm,
Kleinteile	0,6 mm bis 1,0 mm,
Mittelteile	1,0 mm bis 1,5 mm,
Großteile	1,5 mm bis 2,5 mm.

Für Druckgussteile wird im VDG-Merkblatt P 680 der Begriff der *einhaltbaren Toleranzen* definiert. Tabelle 2-26 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.

Bild 2-85
Einzuhaltende Toleranzen für Zinkdruckguss (nach VDG-Merkblatt P 680).

Die Zuordnung eines Nennmaßes zu den Toleranzgruppen kann aus Bild 2-85 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 Raumdiagonalen von 68 mm kann in der Gruppe »a« ein toleriertes Nennmaß von 25 ± 0,1 mm oder von 25 ± 0,26 mm in der Gruppe »b« besitzen.

Die Massen von Zinkdruckgussteilen betragen etwa zwischen 1 g und 3000 g. Auch dickwandige, kompakte Gussstücke können bei längeren Gießtakten hergestellt werden. Der Hauptvorteil des Zinkdruckgusses gegenüber dem Leichtmetalldruckguss sind die verschiedenen Möglichkeiten der *dekorativen Oberflächenbehandlung.* Zinkdruckguss kann nach einem *Entfetten* und *Beizen*
- glanzverkupfert und vermessingt,
- vernickelt und verchromt,
- versilbert und vergoldet werden.

Dekorative Effekte in abgestuften Brauntönen werden durch Phosphatieren, Patinieren und Teilbürsten erreicht. Farbanstriche, Hammerschlaglacke und Beschichtungen mit Kunststoffen lassen sich einbrennen. Die große Menge der dekorativen Massenteile, wie z. B.

– Bau- und Möbelbeschläge,
– Fahrzeug- und Haushaltsmaschinenteile und
– Spielzeug

werden vorzugsweise aus Zinkdruckguss hergestellt. 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 mm 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 Tabelle 2-26 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 relativ 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 vergossen. 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.

Tabelle 2-25. Mögliche Anzahl der Abgüsse von Druckgießformen für Al-, Mg- und Zn-Legierungen (nach *Schmidt*).

Druckgusslegierungen		EN AC-AlSi... alt: GD-AlSi...	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

Tabelle 2-26. Auszug aus dem VDG-Merkblatt P 680; Toleranzen in µm für Zink-Druckgusslegierungen.

Bereich der Raumdiagonalen mm	Toleranzgruppe	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

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, dessen Entwicklung zu

– höheren Stückmassen (< 100 kg),
– druckdichten Gussgefügen,
– glatten Oberflächen (Galvanik) und
– hohen Gießleistungen (Mechanisierung)

geführt hat. 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 Bild 2-86 kann auch als *Warmhalteofen* mit einer zeit-, massen- oder füllstandgesteuerten Gießvorrichtung ausgerüstet werden. Für jedes Kokillengussteil stimmt man durch sinnvolles Probieren *(»Einfahren«)* Gieß- und Kokillentemperatur sowie die Erstarrungszeit aufeinander ab.

Beim *Kipptiegelgießen* wird die Form durch Niveauverschiebung der Kokille gefüllt. Die Form ist mit dem Gießgefäß entsprechend Bild 2-87, das gleichzeitig Vorratsbehälter und *Gießofen* ist, fest verschraubt. In der Stellung »2« wird die Kokille mit Schmelze gefüllt. Der Einguss in die Kokille ist so bemessen, dass die gesamte Schmelze als Speiser

Bild 2-86
Mechanisiertes Schwerkraftkokillengießen auf dem Karussell.

wirksam wird. Während der Stellung »1« erstarrt das Gussstück. Die Schmelze im Anschnitt ist noch flüssig und fließt in den Gießofen zurück.

Das Kokillengießen nach dem Kipptiegelverfahren ermöglicht ein hohes *Ausbringen*. Darunter versteht man das Verhältnis von Gussstückmasse zur Gesamtmasse; diese ist die Gussstückmasse einschließlich der zum Gießen erforderlichen Speiser, Stangen, Grate und Aufmaße. Es gilt:

$$\text{Ausbringen} = \frac{\text{Gussstückmasse}}{\text{Gesamtgussmasse}} \cdot 100\,\%.$$

Das Ausbringen und der mögliche Grad der Mechanisierung bestimmen weitgehend die Wirtschaftlichkeit eines Gießverfahrens. Einfacher Aluminium-Kokillenguss kann ein Ausbringen bis zu 95 % erreichen, Gusseisen bei komplizierter Gestalt des Gussteils nur knapp 70 %.

Bild 2-87
Kipptiegelverfahren in Position »Entformen« (Stellung »1«) und in Position »Gießen« (Stellung »2«).

Beim *Niederdruck-Kokillengussverfahren* – Bild 2-88 zeigt schematisch das Gießen einer Pkw-Felge – erfolgt die Formfüllung mit Hilfe eines geringen Überdrucks von 0,2 bar bis 0,4 bar auf die Schmelze. 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 meistens über 95 %. Der Anguss wird mit einem Fräser entfernt. Die Bohrungen für die Radmuttern lassen sich gleich mitgießen. Bild 2-89 zeigt ein Beispiel für die Möglichkeit, das Werkstück durch *Verrippungen* dekorativ zu gestalten.

Bild 2-88
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 den folgenden Tatsachen:

- Turbulenzarmes Gießen,
- steigend oder fallend möglich,
- hohe Kokillentemperaturen 250 °C bis 350 °C,
- Wanddicken 1 mm 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 10 Mio. Felgen je Jahr gegossen. Etwa 5 % günstigere Herstellkosten entstehen, wenn die Gießerei im Flüssigverbund mit einem Elektrolysewerk arbeitet.

Bei den Eisengusswerkstoffen sind die Teile für die *Fahrzeughydraulik,* insbesondere Bremszylinder, Bremssattel oder -klaue, typische Kokillengussteile für das Schwerkraftgießen im Karussell. 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 *de-Lavaud-Kokillen*, aber auch in 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« (s. Bild 2-33).

Bild 2-89
Felgen mit dekorativer Verrippung aus dem dauerveredelten Niederdruck-Kokillenwerkstoff GK-AlSi12Mg dv.

Die möglichen Durchmesser liegen zwischen etwa 65 mm und 600 mm bei Wanddicken von etwa 5 mm bis 50 mm.

Bild 2-90
Kritische Drehzahl n_{kr} in Abhängigkeit vom Büchsendurchmesser D für verschiedene Werkstoffdichten ρ (nach Hurst).

Bei den horizontalen Schleudergießmaschinen ist zum Überwinden des Schwerefelds der Erde gegenüber anderen Winkellagen die geringste (kritische) Mindestdrehzahl n_{kr} erforderlich, Bild 2-90.

Beispiel:
Für einen Hohlzylinder aus dem Werkstoff Gusseisen mit der Dichte $\rho \approx 7$ g/cm3 und einem Außendurchmesser D = 100 mm ermittelt man aus Bild 2-90 eine theoretische kritische Drehzahl n_{kr} von etwa 1300 min^{-1}.

Bild 2-91
Kokillenanordnung zum Schleudergießen von Gussringen bzw. Gussrädern, schematisch.

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 Fliehkraft von besonderem Interesse. Diese spezifisch leichteren, sehr festigkeitsmindernden Bestandteile der Schmelze können sich unter der Wirkung der Zentrifugalkraft nur an der inneren Oberfläche des Hohlkörpers abscheiden und sind nicht wie bei allen anderen Gießverfahren im Gussstück regellos verteilt.

Eine Kokillenanordnung zum Schleudergießen für drei Räder zeigt Bild 2-91. 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 Kokillenan-

Bild 2-92
Prinzip einer horizontalen kontinuierlichen Stranggießanlage (nach Spur).

ordnung eingegossen. Sobald die erste Kokille gefüllt ist, wird die Schmelze durch das Gießhorn in Axialrichtung verschoben und füllt zunächst die 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 Massendreh-

teile herstellen. Halbzeuge aus Stahl dienen meist als Vorprodukte für die Umformverfahren. Gießereitechnisch unterscheidet sich das Verfahren deutlich von der Formgussherstellung. 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, Bild 2-92. 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 verarbeitet.[4]

Die in den Stahlwerken hergestellten Stranggussformate liegen bei Knüppelanlagen zwischen 100 mm und 550 mm Vierkant und bei Brammenanlagen zwischen 300 mm x 2500 mm. Auf horizontalen Stranggießanlagen lassen sich Rundstangen von 30 mm bis 350 mm Durchmesser, Hohlstangen bis 120 mm Außendurchmesser und 30 mm bis 60 mm Innendurchmesser sowie Sonderprofile aus Gusseisen mit Lamellen- oder Kugelgrafit gießen.

2.5.4 Thixoforming

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« 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 flüssigkeitsähnliches Verhalten des Materials (»Thixotropie«[5]). Voraussetzung für das Thixogießen (es wird gegenwärtig noch in einem geringen 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. Zt. 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 Thixoforming 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 industriell gefertigt (z. B. Anschlussrohre für den Luftspeicher im VW Phaeton und Türknoten für den

[4] Stranggießen von Gusseisen. www.wissensfloater.de

[5] Der Begriff der *Thixotropie* (griechisch: *thixis* »das Berühren« und *tropos* »Ändern durch Berühren« = Beanspruchen) bezeichnet bei Nicht-Newtonschen 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.

AUDI 4). 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.

(Quellenangabe: Thixoforming- zwischen Gießen und Schmieden. Podcast des IFUM der Universität Hannover. Autoren: B.-A. Behrens, Ph. Silberkuhl und F. Holz. Unter der Rubrik Produktionstechnik beim www.wissensfloater.de).

2.6 Gestaltung von Gussteilen

2.6.1 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.

Die von der Gießerei zu treffenden Entscheidungen über das Einformen werden weitgehend an Hand der Konstruktionsunterlagen vorgenommen. Daher muss der Konstrukteur wissen, welche Maßnahme diese oder jene Ausbildung eines Gussstücks erfordert, um das Werkstück für das einfachste Einformen und Abgießen gestalten zu können.

2.6.2 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.
- ❒ Man achte auf eine Spannmöglichkeit für die Bearbeitung.
- ❒ Zu bearbeitende Flächen müssen gut zugänglich sein (Werkzeugauslauf vorsehen).
- ❒ Man wähle die beste Form hinsichtlich der Beanspruchung (z. B. bei GJL Zugbeanspruchungen vermeiden, s. Abschn. 2.6.4).
- ❒ 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 (*Heuvers*sche Kreismethode, Bilder 2-52, 2-96 und 2-97).
- ❒ Scharfe Kanten, Kerbungen und Materialanhäufungen sollte man 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. Auf Abrundungen ($R \approx 1/4 \cdot s_W$ bis $R \approx 1/3 \cdot s_W$) und Formschrägen ist zu achten (Hinweise zu finden in DIN 250, DIN EN 12890).
- ❒ Eingezogene Formen (Unterschneidungen), Ansteckteile am Modell und geschlossene Hohlräume sollte man vermeiden.
- ❒ Abweichungen für Maße ohne Toleranzangabe (Allgemeintoleranzen) sind zu beachten. Für die folgenden Werkstoffe gelten die nachstehenden Normen:
  - Schwermetalle: DIN 1687,
  - Leichtmetalle: DIN 1688,
  - Stahlguss (GE, GS, GX): DIN EN 10293,
  - Temperguss (GJMW, GJMB): DIN 1684,
  - Gusseisen mit Kugelgrafit (GJS): DIN 1685,
  - Gusseisen mit Lamellengrafit (GJL): DIN 1686.
- ❒ Bei komplizierten Teilen wende man die Guss-Verbundschweißung an (Bild 2-41).

2.6.3 Gießgerechte Gestaltung

Bild 2-93
Infolge unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeit erstarrt der flüssige Werkstoff im Inneren einer örtlichen Materialanhäufung später als in den anschließenden dünneren Partien. Da das Volumen der Gusswerkstoffe im flüssigen Zustand größer ist als im festen, bilden sich in Werkstoffanhäufungen Hohlstellen, sog. Lunker. Gießtechnische Maßnahmen, wie z. B. das Anbringen geschlichteter Kühlplatten (Abschn. 2.4.3), zusätzlicher Steiger oder Kerne, verteuern das Gussstück.

Bild 2-93

Bild 2-94
Durch einfache konstruktive Änderungen lassen sich die im Text zu Bild 2-93 beschriebenen Materialanhäufungen in vielen Fällen ohne großen Mehraufwand schon bei der konstruktiven Gestaltung vermeiden.

Bild 2-94

Bild 2-95
Auch an Übergangsstellen, die zu große Abrundungen aufweisen, entstehen Werkstoffanhäufungen (Lunkergefahr). Außerdem verteuern große Abrundungen die Herstellung des Modells. Die Rundungshalbmesser *(R)* sollen ein Viertel bis ein Drittel der Wanddicke *(s)* betragen.

Bild 2-95

Bild 2-96
Ein einfaches Hilfsmittel zur Kontrolle von Materialanhäufungen ist die *Heuvers*sche Kreismethode. Bei einer gießgerechten Konstruktion soll das Verhältnis (A_1/A_2) jeweils benachbarter einbeschriebener Kreisquerschnitte nahe bei eins liegen (Tabelle 2-19).

Bild 2-96

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-97
Um Gussstücke aus Werkstoffen mit großer Erstarrungskontraktion (z. B. Stahlguss GS bzw. GE) dicht speisen zu können, sind die Wanddicken besonders sorgfältig auszulegen. Auch in diesen Fällen werden die *Heuvers*schen Kontrollkreise angewendet. Bei einer gießgerechten Konstruktion müssen die Flächen der Kreise zum Speiser hin größer werden *(gelenkte Erstarrung)*.

Bild 2-98
Bei Übergängen von einer dünnen Wand in eine dickere 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.

Bild 2-99
Bei Übergängen mit Rundungen zwischen ungleichen Wanddicken sollten folgende Werte angestrebt werden:
$R_i = (s_1 + s_2)/2$ und
$R_a = s_1 + s_2$.

Bild 2-100
Bei Übergängen mit Rundungen zwischen gleichen Wanddicken sollten sein:
$R_i = 0{,}5 \cdot s$ bis $1{,}0 \cdot s$ und
$R_a = R_i + s$,
anderenfalls besteht die Gefahr der Lunkerbildung.

Bild 2-101
Werkstoffanhäufungen (und damit Lunker) lassen sich häufig auch durch Aussparung und Verrippung vermeiden.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-102

Bild 2-102
Rippen zwischen Wand und Nabe vermindern die Rissgefahr.

Bild 2-103

Bild 2-103
Zum Vermeiden einer Luftblasenbildung – sie erzeugt eine unansehnliche Oberfläche – sollten Scheibenflächen schräg angeordnet werden.

Bild 2-104

Bild 2-104
Rippen sollen zur Herabsetzung der Gussspannung stets dünner als die Wanddicke ausgeführt werden. Die Rippendicke sollte das 0,8-fache der Wanddicke *s* betragen. Bei beiderseits angeordneten Rippen ist zur Verringerung der Werkstoffanhäufung (Lunkergefahr) ein Versatz erforderlich.

Bild 2-105

Bild 2-105
Versteifung in einem Gussfundament. Materialanhäufung wird durch Auseinanderlegen zweier Rippenanschlüsse und Durchbruch der Rippe in der Ecke des Gehäuses vermieden.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-106

Knotenpunkte, in denen Rippen oder Wände aufeinander treffen, bilden Werkstoffanhäufungen, die man durch besondere Gestaltung, durch das Einlegen von Kernen oder durch Speisung auflösen kann. Anderenfalls besteht die Gefahr der Lunkerbildung.

Bild 2-106

Bild 2-107

Die *Sternverrippung* (links) ist derart starr, dass für das Abkühlen des Gussteils nach dem Gießen kein Schwindungsspielraum bleibt und dadurch erhebliche Spannungen auftreten können (Rissgefahr).

Die *Wabenverrippung* (rechts) behindert das Schwinden des Gussstückes in der Form nur wenig. Daraus resultiert ein niedriger Eigenspannungszustand, so dass die Gefahr des Auftretens von Rissen nicht mehr gegeben ist. Trotzdem wird eine hohe Bauteilfestigkeit erreicht.

Bild 2-107

Bild 2-108

Hinweise für das Anordnen von Verrippungen.

Bild 2-108

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-109

Bild 2-109
Komplizierte Gussstücke erfordern mehrere Teilungsebenen oder zusätzliche Kerne. Durch eine bessere Gestaltung kann man Teilungsebenen und Kerne einsparen.

Bild 2-110

Bild 2-110
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.

Bild 2-111

Bild 2-111
Die Teilungsebene ist so zu legen, dass das Werkstück entgratet werden kann. Liegt die Formteilung unzweckmäßig, so wird das Entgraten erschwert und verteuert.

Bild 2-112

Bild 2-112
Beim Ventilgehäuse in konventioneller Ausführung (links im Bild) sind die Grate zwischen den beiden Flanschen nur schwierig zu entfernen; mit Hilfe von Rippen (rechts im Bild) werden die Grate nach außen gelegt und lassen sich problemlos entfernen.

Bild 2-113

Bild 2-113
Gebrochene Formteilungsebenen sind möglichst zu vermeiden und durch gerade Teilungsebenen zu ersetzen.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-114
Ist die Formteilungsebene festgelegt, dann ist darauf zu achten, dass die Außenflächen in Ausheberichtung schräg liegen. Sonst lassen sich die Modelle nicht aus der Form heben, ohne dass diese beschädigt wird.

Bild 2-114

Bild 2-115
Nach DIN EN 12890 sind die Formschrägen *(α)* in der Zeichnung in Winkelgraden anzugeben. Bei fehlenden Innenschrägen benötigt man Innenkerne.

Bild 2-115

Bild 2-116
Auch Querrippen und Augen sind so zu gestalten, dass sich die Modelle leicht aus der Form heben lassen (Hinterschneidungen vermeiden, weil sie Ansteckteile erfordern).

Bild 2-116

Bild 2-117
Kerne sind teuer und erschweren das Einformen. Sie sollten nach Möglichkeit vermieden werden. Anzustreben sind offene Querschnitte. Notwendige Öffnungen sind so zu legen, dass Kerne nicht erforderlich sind.

Bild 2-117

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-118
Kerne möglichst einfach gestalten, um den Aufwand bei der Kernherstellung gering zu halten, d. h. die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu verbessern.

Bild 2-119
Bearbeitungsleisten werden häufig so gestaltet, dass Kerne eingelegt werden müssen. In vielen Fällen kann auf die Arbeitsleisten verzichtet und ins Volle gearbeitet werden.

Bild 2-120
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 in diesem Fall notwendigen Kernstützen zur Bildung von Poren und Fehlstellen beitragen. Deshalb ist eine *zweiseitige* Kernlagerung oder eine seitliche Abstützung anzustreben.

Bild 2-121
Kerne müssen nach dem Abguss entfernt werden. Hierfür sind ausreichende und genügend große *Putzöffnungen* vorzusehen, die auch zur Kernlagerung (Kernmarken) dienen. Dadurch werden Kernstützen und damit undichte Stellen im Guss vermieden. Öffnungen mit einem Durchmesser $d < 30$ mm sind für Putzarbeiten unzureichend. Sie können mit Kernstopfen wieder verschlossen werden.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-122

Bild 2-123

Bild 2-122 und *2-123*
Scharfe Kanten sind zu vermeiden, da sie gießtechnisch schwer zu verwirklichen sind und 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.

2.6.4 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. Daher sind *Kerben*, d. h. Querschnittssprünge unbedingt zu vermeiden.

Bild 2-124
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.

Bild 2-124

Bild 2-125

Bild 2-125
Durch richtige Formgebung kann die in einem Zylinderdeckel durch den Innendruck bewirkte Zugspannung in eine Druckspannung umgewandelt werden.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-126

Bild 2-126
Auch die im Fuß des Lagerbocks auftretende Biegespannung (Gefahr der Rissbildung!) lässt sich mit Hilfe einer beanspruchungsgerechten Gestaltung erheblich vermindern.

Bild 2-127

Bild 2-127
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.

Bild 2-128

Bild 2-129

Bild 2-128 und *2-129*
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 geschlossene Bauteile (Hohlprofile) extrem steif, d. h., bei einer schlagartigen oder (und) dynamischen Beanspruchung sind sie sehr rissempfindlich.

Bild 2-130
Rippen mit konisch auslaufender und abgerundeter Form sind bei einer Biegewechselbeanspruchung anrissgefährdet.

An Durchbrüchen entstehen hohe Randspannungen. Zum Vermindern dieser Spannungen an den Rippenenden und Durchbrüchen werden Wülste vorgesehen. Die Wulsthöhe *h,* der Wulstradius R_w und der Ausrundungsradius *R* werden durch folgende Werte bestimmt:
$h = (0{,}5 \ldots 0{,}6) \cdot s$
$R_w = 0{,}5 \cdot s$
$R = (0{,}25 \ldots 0{,}35) \cdot s$

Bild 2-130

2.6.5 Fertigungsgerechte Gestaltung

Bild 2-131
Wichtige Voraussetzung für die nachfolgende spanende Fertigung ist ein gutes und sicheres Spannen des Werkstücks. Gussstücke müssen häufig auf zum Spannen ungeeigneten Flächen aufliegen. In solchen Fällen sind Stützen anzugießen, die man nach dem Bearbeiten leicht abtrennen kann.

Bild 2-131

Bild 2-132
Um Bearbeitungszeit zu sparen, sollten Standflächen von Maschinen so unterteilt werden, dass nur schmale Leisten oder Füße spanend zu bearbeiten sind. Spart man die Fläche nur aus, so wird die Bearbeitungszeit oft nicht verringert, da das Werkzeug auch in diesem Fall die gesamte Fläche mit der Vorschubgeschwindigkeit durchlaufen muss.

Bild 2-132

Bild 2-133
Befestigungsschrauben erfordern ausreichende Wandabstände *a*, damit sie mit Schraubenschlüsseln angezogen werden können und nicht von den Gussrundungen *R* behindert werden.

Bild 2-133

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-134
Befestigungsschrauben dürfen nicht an unzugänglichen Stellen, z. B. zwischen Rippen, sondern nur auf freiliegenden Augen oder Flanschen angeordnet werden.

Bild 2-134

Bild 2-135
Rippen sollten möglichst niedriger als die Wandung ausgeführt werden, um die Bearbeitung ihrer Stirnflächen zu sparen.

Bild 2-135

Bild 2-136
Bei zu bearbeitenden Flächen ist auf einen ausreichenden Auslauf für das verwendete Werkzeug zu achten. Die Flächen sollen gut zugänglich sein, weil das Werkzeug diese auch erreichen muss. So kann in der gezeigten zweckmäßigen Ausführung sowohl mit dem Wälz- als auch mit dem Stirnfräser gearbeitet werden.

Bild 2-136

Bild 2-137
Bei Drehkörpern muss der Drehmeißel auch bei unrund ausgefallenen Gussstücken (z. B. durch Kernversatz) auslaufen können. Die Bearbeitungsflächen sind daher ausreichend von den unbearbeiteten Flächen abzusetzen, damit das Maß *»a«* nicht zu klein wird (Allgemeintoleranzen beachten).

Bild 2-137

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-138

Bild 2-138
Bei Werkstücken mit langer Bohrung sollte der Kern so gestaltet werden, dass eine durchgehende Bearbeitung des Innendurchmessers nicht nötig ist. Bei der Bemessung des Kerns sind die jeweiligen Allgemeintoleranzen (Kernversatz) zu berücksichtigen.

Bild 2-139

Bild 2-139
Dicht nebeneinanderliegende Flächen sollte man zu einer zusammenfassen, um die Anschnittmöglichkeiten beim Spanen zu erweitern.

Bild 2-140

Bild 2-140
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.

Bild 2-141

Bild 2-141
Schräg liegende Bearbeitungsflächen sind zu vermeiden, da die Werkstücke schwieriger zu spannen sind und deshalb häufig Sondervorrichtungen benötigt werden. Bearbeitungsflächen ordne man daher möglichst rechtwinklig zueinander an.

Bild 2-142

Bild 2-142
Beim schrägen Anbohren von Flächen brechen die Werkzeuge leicht oder verlaufen. Dem kann durch Umgestaltung der Wände oder durch Anbringen von Augen abgeholfen werden.

2.6.6 Normung von Erzeugnissen aus Gusseisen

Im Folgenden sind einige wichtige DIN-Normen für Erzeugnisse aus Gusseisen aufgeführt.

DIN	Bezeichnung
	Flansche
EN 1092-2	Flansche und ihre Verbindungen – Runde Flansche für Rohre, Armaturen
EN 1591	Berechnung von Flanschverbindungen
3358	Anschlussmaße bei Flanschverbindungen
	Handräder
390	Handräder, gekröpft, Nabenloch gerader Vierkant
950	Handräder, gekröpft, Nabenloch rund
3220	Handräder, flach, Nabenloch Vierkant verjüngt
3319	Handräder, gekröpft, Nabenloch verjüngter Vierkant
	Kupplungen
116	Scheibenkupplungen, Maße
	Lager
189	Sohlplatten, Hauptmaße
502	Flanschlager, Befestigung mit 2 Schrauben
503	Flanschlager, Befestigung mit 4 Schrauben
504	Gleitlager – Augenlager
505	Deckellager, Befestigung mit 2 Schrauben
506	Deckellager, Befestigung mit 4 Schrauben
736	Stehlagergehäuse für Wälzlager der Durchmesserreihe 2 mit kegeliger Bohrung und Spannhülse, Hauptmaße
737	Stehlagergehäuse für Wälzlager der Durchmesserreihe 3 mit kegeliger Bohrung und Spannhülse, Hauptmaße
738	Stehlagergehäuse für Wälzlager der Durchmesserreihe 2 mit zylindrischer Bohrung, Hauptmaße
739	Stehlagergehäuse für Wälzlager der Durchmesserreihe 3 mit zylindrischer Bohrung, Hauptmaße
31690	Gehäusegleitlager; Stehlager
ISO 6280	Gleitlager; Anforderungen an Stützschalen für dickwandige Verbundgleitlager.
	Transmissionen
111	Flachriemenscheiben, Maße
	Ventile
86251	Absperrventile aus Gusseisen mit Lamellengrafit, mit Flanschen
86252	Absperrbare Rückschlagventile aus Gusseisen mit Lamellengrafit, mit Flanschen
EN 593	Industriearmaturen: Klappen
EN 12334	Rückflussverhinderer aus Gusseisen

2.6.7 Normung von Erzeugnissen aus Stahlguss

Für Stahlguss sind u. a. die folgenden DIN-Normen wichtig:

DIN	Bezeichnung
	Flansche
79	Vierkante für Spindeln und Bedienteile
3220	Handräder, flach – Nabenloch mit verjüngtem Vierkant
EN 1092-1	Flansche und ihre Verbindungen, Formstücke und Zubehörteile
	Handräder
950	Handräder, gekröpft
	Ventile
3160	Durchgang-Absperrventile für Kältemittelkreislauf, Nenndruck 25
3161	Eck-Absperrventile für Kältemittelkreislauf, Nenndruck 25
3163	Durchgang-Regelventile für Kältemittelkreislauf, Nenndruck 25
3356-1	Ventile, allgemeine Angaben
EN 593	Metallische Klappen
EN 13706	Absperrventile und absperrbare Rückschlagventile

2.7 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,
- gratfreies 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. Tiegel oder Zuschläge ähnlich wie in der Schmelzmetallurgie werden nicht benötigt.
- 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.

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*[6] genannt, umfasst mindestens drei Verfahrensstufen:
- die Pulvererzeugung,
- die Presstechnik und
- das Sintern.

2.7.1 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:

$$\text{Füllfaktor} = \frac{\text{Füllhöhe}}{\text{Fertighöhe}}.$$

Bild 2-143 verdeutlicht den Zusammenhang. Füllfaktoren zwischen 1,9 und 2,5 sind z. B. bei Eisenpulver mit einem spezifischen Füllvolumen von ungefähr 40 cm³/100 g und einer Einfülldichte, der *Scheindichte,* von 2,5 g/cm³ zu erreichen. Für den automatisierten Pressvorgang ist das *Fließverhalten* der Pulver eine wichtige Verarbeitungseigenschaft.

[6] Pulverpressen und Sintern 1. IFUM Universität Hannover. www.wissensfloater.de

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, Bild 2-144a), 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 Bild 2-144b) – 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 Bild 2-145 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.

Bild 2-143
Zum Begriff Füllfaktor am Presswerkzeug zum einseitigen Pressen.

Für Tränklager sind Eisenteilchengrößen von etwa 150 µm nötig, um gleichbleibend 25 % Porenraum für das Schmiermittel (Volumengehalt etwa 22 % Öl) zu schaffen.

Gesinterte Bronzezahnräder und -ritzel haben als Hauptsiebfraktion Teilchen mit einer Größe von etwa 50 µm. Feinstpulvermischungen aus Hartstoffen wie Wolframcarbid oder Bornitrid und Sondermetallen wie Kobalt oder Nickel mit Teilchengrößen unter 5 µm 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 gemäß DIN EN ISO 3252 nach ihrem mittleren Teilchendurchmesser D wie folgt bezeichnet:
- Granulate: $D > 1$ mm,
- Pulver: $D < 1$ mm,
- Kolloide: $D < 1$ µm.

2.7.2 Pulvererzeugung

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 Stamp-

fern ergibt ein Gemenge mit einem Teilchendurchmesser von 50 µm bis herab zum Feinststaub (5 µm Durchmesser). 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.

a) b)

Bild 2-144
Glaskugelmodell.
a) Dichteste Kugelpackung
b) Brückenbildung

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

Bild 2-145
Zum Begriff Raumerfüllung: Glaskugeln mit verschiedenen Durchmessern als Modell.

Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Das poröse *RZ-Pulver* lässt sich sehr gut pressen.

Hochreine Eisen- und Nickelpulver mit gleichmäßigen, kugeligen Teilchen von etwa 0,5 µm bis 10 µm Durchmesser werden chemisch nach dem *Carbonylverfahren* erzeugt. Bei etwa 200 °C bildet Kohlenmonoxidgas unter Druck mit Eisen und Nickel die flüssigen Carbonyle $Fe(CO)_5$ sowie $Ni(CO)_4$. 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.

2.7.3 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 *Schüttsintern* lassen sich unterschiedliche Formteile herstellen. Die einfache Formgebung erlaubt es, z. B. hohe Zylinder und Töpfe gemäß Bild 2-146a), auch mit Gewinden, durch einfaches Schütten und Sintern zu fertigen. Die Größe der Bronzeteilchen kann so eingestellt werden, dass Filterfeinheiten zwischen 200 µm und 8 µm Durchmesser, je nach dem gewünschtem Filtrierstoff, entstehen, wie Bild 2-146b) 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 Bild 2-147 für drei verschiedene Pressbedingungen dargestellt. Die Pressbarkeit kann z. B. bei einem konstanten Pressdruck von 60 kN/cm³ (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).

Bild 2-146
a) Bronzefilter mit Sechskantflansch und Gewinde für Ölbrennerdüsen
b) durch Schüttsintern erzeugtes Porenvolumen für Filter.

Bezieht man die erreichte Gründichte (Scheindichte) auf die theoretisch mögliche Dichte (Linie 4), erhält man den Begriff *Raumerfüllung.* Für den Pressdruck von 60 kN/cm³ ergibt sich als Quotient der Schnittpunkte von 3 und 4 eine Raumerfüllung von ca. 83 %, ausgehend von einer Fülldichte von etwa 2,5 g/cm³ und einer Klopfdichte von etwa 3,2 g/cm³. 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 Bild 2-143 wird selbst bei hohen Drücken keine gleichmäßige Raumerfüllung erreicht. Die meisten Werkzeuge arbeiten deshalb mit gegenläufig wirkendem Ober- und Unterstempel, wie Bild 2-148 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.

Bild 2-147
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 porenfreien Eisens

Nach Erreichen der Höchstkraft, die nur 1 s bis 1,5 s gehalten wird, fährt zunächst der Oberstempel zurück, während die Matrize durch eine 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 ± 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.

Bild 2-148
Koaxiales Pressen mit feststehendem Unterstempel nach dem Matrizenabzugsverfahren, schematisch.

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. Hochwarmfeste 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 Klopfverdichten wird der Blechbehälter vakuumdicht verschweißt und in einem Autoklaven unter hohem Gasdruck isostatisch heißgepresst. Der Pressling ist homogen verdichtet, praktisch porenfrei 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.

2.7.4 Sintern

Ein mechanisches Verklammern der Pulverteilchen beim Pressen erzeugt mit Hilfe 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 ermöglicht. Die Sintertemperatur T_{Sint} beträgt

$$T_{\text{Sint}} \approx \frac{2}{3} \cdot T_{\text{S}} \text{ bis } \frac{3}{4} \cdot T_{\text{S}}.$$

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 Grünling mit einem Aufmaß gepresst werden.

Bild 2-149
Zweiteilchenmodell zur mathematischen Beschreibung von Sintervorgängen.

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 °C 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

$$\text{H}_2\text{O (aus Feuchte)} \xrightarrow{T_{\text{Sint}}} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \cdot \text{O}_2$$

möglich. Hochwertige Sinterteile 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* gemäß Bild 2-149 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

$$\frac{h}{a} = \frac{x^2}{4 \cdot a^2}$$

liegen unter 20 % der theoretisch errechneten Werte. Für gepresste Teilchen gibt es nach *Exner* keinen einfachen Zusammenhang zwischen dem Halsradius und der Zentrumsannäherung.

2.7.5 Verfahren zum Verbessern der Werkstoffeigenschaften

Die verdichteten und gesinterten Formteile werden häufig nach verschiedenen Verfahren weiterverarbeitet, um die Werkstoffeigenschaften der Sinterteile

zu verbessern. Beim *Aufkohlen* von Sintereisen 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 Salzschmelzen für das flüssige Aufkohlen haben sich bei Sinterteilen nicht bewährt, da Salzreste in den Poren verbleiben, die später das Metall korrodieren.

Bild 2-150
Zustandsschaubild Wolframcarbid-Kobalt (nach Takeda).

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 gemäß Bild 2-150 ist das System WC–Co im Temperaturbereich von 800 °C bis 2000 °C dargestellt. Die Feinstpulverpresslinge 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 20 % WC, die sich bis zum Punkt »b« mit bis zu 38 % WC anreichert. Dadurch wird alles Kobalt aufgebraucht und das im Überschuss vorhandene Wolframcarbidpulver porenfrei benetzt.

Nach dem gesteuerten Abkühlen auf Raumtemperatur besteht das Gefüge aus scharfkantigen Wolframcarbidkristallen, 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:
- Warmhärte 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 Sinterteile, durch Tränken mit Flüssigkeiten oder Metallschmelzen gefüllt wird. Untersuchun-

Bild 2-151
Fertigung von Tränkkörpern:
a) Kontaktschiene mit aufgelegtem Kupferblech, nach Wärmebehandlung getränkt
b) gas- und öldichter Rotor mit aufgezogenem Kupferrohr, nach Wärmebehandlung getränkt

Tabelle 2-27. 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
Sintereisen und Sinterstahl: unlegiert, niedriglegiert, hochlegiert	Fahrzeug- und Maschinenbau, Waffen- und Haushaltstechnik, Werkzeugbau, Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik	Stoßdämpferkolben, Zahnriemenräder, Einspritzpumpenkeile, Schnecken, Pumpenräder, Ventilführungen, Lehren, Führungsleisten, Rändelmuttern und -schrauben
Reibwerkstoffe aus Eisenpulver mit nichtmetallischen Zusätzen, wie z. B. Glas, Grafit	Motorräder und Fahrzeuge, allgemeiner Maschinenbau	Bremsbeläge, Bremsklötze, Kupplungsscheiben, Synchronringe
Metallkohlen-Magnetwerkstoffe für Dauermagnete und Weicheisenteile	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, Spinndüsen, 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

gen 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.

Der Porenraum von Sinterteilen 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,

Bild 2-152
Mechanische Eigenschaften von Sinterstahl (nach DIN 30910, T1 bis T4, T6: Werkstoff-Leistungsblätter WLB).

so dass 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 Bild 2-151 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 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 wird dadurch die Dichte und damit die Härte erhöht.

2.7.6 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 Tabelle 2-27 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.[7]

Für die Werkstoffauswahl stehen verschiedene Pulver zur Verfügung, die einen Zugfestigkeitsbereich von 80 N/mm² bis ca. 1700 N/mm² abdecken. Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften werden stark von der relativen Dichte bzw. der Porosität beeinflusst, Bild 2-152.

2.8 Gestaltung von Sinterteilen

2.8.1 Allgemeines

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, Bild 2-153. Eine Mindestwanddicke von $s = 2$ mm sollte möglichst eingehalten werden (Bild 2-154). Die Fertigungsgenauigkeit entspricht (ohne Kalibrierung) mindestens der Qualität »mittel«.

2.8.2 Gestaltungsregeln

Im Folgenden sind einige wichtige Regeln für die Gestaltung von Sinterteilen zusammengestellt.

- Das Pressteil möglichst im Untergesenk unterbringen.
- Schräglaufende 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 spanend herstellen.
- Sehr unterschiedliche Querschnitte sowie kontinuierliche Querschnittsübergänge sind zu vermeiden, d. h., Kegel- und Kugelformen sollten durch zylindrische Formen ersetzt werden.

[7] Pulverpressen und Sintern 2 (Master). IFUM Universität Hannover
www.wissensfloater.de

2.8.3 Werkstoff- und werkzeuggerechte Gestaltung

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-153
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.

Bild 2-153

Bild 2-154

Bild 2-155

Bild 2-156

Bild 2-154 bis *2-156*
Um ein Aufeinanderschlagen der Gesenkhälften zu vermeiden, muss eine Wanddicke von mindestens $s = 2$ mm eingehalten werden. Querschnittsübergänge sind mit ausreichenden Rundungen zu versehen, extreme Querschnittsübergänge vermeiden.

Bild 2-157

Bild 2-157
Schräglaufende Formen sind möglichst zu vermeiden, weil die Stempelherstellung hierfür schwierig ist.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-158

Bild 2-159

Bild 2-158 und *2-159*
Um kräftige Pressstempel zu erhalten, dürfen keine messerscharfen Kanten vorgesehen werden. Außenkanten scharfkantig oder mit Fasen ausführen. Innenliegende Kanten ausrunden.

Bild 2-160

Bild 2-161

Bild 2-162

Bild 2-160 bis *2-162*
Hinterschneidungen und Zwischenflansche sind zu vermeiden, da sie sehr aufwändig in der Herstellung oder überhaupt nicht möglich sind. Einfache Körper sind wirtschaftlicher herzustellen. Erforderliche Nuten, Freistiche u. Ä. müssen spanend gefertigt werden.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-163

Bild 2-163
Für eine ausreichende Werkstoffdicke ist zu sorgen; dünnwandige Stellen sind zu vermeiden.

2.8.4 Fertigungs- und fügegerechte Gestaltung

Bild 2-164

Bild 2-164
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.

Bild 2-165

Bild 2-166

Bild 2-165 bis *2-167*
Kegel- und Kugelformen ergeben kontinuierliche Übergänge, die schwer herzustellen sind. Sie sind besser durch zylindrische Formen oder Fasen zu ersetzen.

Bild 2-167

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-168

Bild 2-168
Abschrägungen in Pressrichtung sind bei gedrehter Lage im Gesenk besser herstellbar.

Bild 2-169

Bild 2-170

Bild 2-171

Bild 2-172

Bild 2-169 bis *2-172*
Kleine Absätze ($d_2 \approx d_1$) sind zu vermeiden. 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.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-173

Bild 2-173
Hohe, dünnwandige Pressteile – d. h. Werkstücke mit extremen Querschnittsverhältnissen ($L/B \gg 1$) – sind schwer herstellbar. Günstigere Querschnittsverhältnisse sind anzustreben.

Bild 2-174

Bild 2-174
Abgerundete Ausläufe bei abgesetzten Formteilen sind zu vermeiden und durch kantige Anschlüsse zu ersetzen (kostengünstigere Werkzeuge).

Bild 2-175

Bild 2-175
Bei Drehknöpfen und ähnlichen Bedienteilen sind einfache Außenkonturen anzustreben und Kreuzrändelung zu vermeiden. Längsriffelung ist einfacher herzustellen.

Bild 2-176

Bild 2-176 und *2-177*
Bei Verzahnungen muss der Modul $m > 0{,}5$ gewählt werden. Verzahnungsausläufe sind nicht bis auf den Buchsengrund zu führen. Riffelungen sollen einen Öffnungswinkel > 60 ° aufweisen.

Bild 2-177

Bild 2-178

Bild 2-178
Bei gesinterten Buchsen muss die Freimachung für den Anschlag im Aufnahmeteil liegen.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 2-179
Selbstschmierende Lagerbuchsen sollen kurz sein ($l < 2\,d$). Bei großer Führungslänge sind zwei Buchsen vorzusehen. Die Wanddicke der Buchsen ist mit $s > 0{,}2\,d$ auszuführen, um einen genügenden Ölvorrat aufnehmen zu können und eine definierte Passung für die Lagerung zu erhalten.

Bild 2-180
Bei Grundlöchern ist das Verhältnis von Durchmesser d zu Länge l maximal 1:2 zu wählen. Bohrungen mit $d < 2$ mm sollten spanend gefertigt werden.

2.9 Generative Fertigungsverfahren (Rapid Technologien)

Generative Fertigungsverfahren umfassen die Gruppe der Verfahren, die additiv arbeiten. Mit diesen Verfahren wird die fast beliebig gestaltbare Geometrie eines Bauteils oder eines Produkts schichtweise aufgebaut, Bild 2-181. Ursprünglich hauptsächlich für die Fertigung von Design- und Funktions-Prototypen eingesetzt, haben generative Fertigungsverfahren heute eine weite Verbreitung gefunden. Sie können z.T. klassische Fertigungsschritte vollständig ersetzen. 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.

Je nach Anwendungszweck der erzeugten Produkte kann unterschieden werden nach

- 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), Bild 2-182.
- Rapid Manufacturing (Herstellung von einzelnen kundenspezifischen Endprodukten in Einzel- oder Kleinstserien),
- Additive Manufacturing (Herstellung von Serienprodukten).

Für alle Verfahren ist ein vollständiges 3D-CAD-Modell absolute Voraussetzung. Dieses rechnerinterne Modell entsteht entweder im Entwurfsprozess oder durch Laserscannen eines realen Bauteils und anschließende Aufarbeitung der Daten. Die Geometriedaten des 3D-CAD-Modells werden üblicherweise über eine STL-Schnittstelle (Standard Transformation Language) an den Prozess übergeben. Durch STL werden die Flächen des Modells als Dreiecks-Facetten approximiert. Je feiner die Facettierung erfolgt, desto genauer wird das Bauteil im Prozess abgebildet, allerdings erhöhen sich die Datenmengen und die erforderliche Rechnerleistung. Entsprechendes gilt für die VRML-Schnittstelle (Virtual Reality Modeling Language). Dieses Schnittstellen-Format wird für die Übertragung von Daten für das farbige 3D-Printing verwendet.

Modelle im STL-Format lassen sich mit sog. STL-Viewern im Rechner überprüfen und für die Zwecke der generativen Fertigung analysieren, ohne dass die Entwickler die eigentlichen Produktdaten außer Haus geben müssen. Aufgrund der einfach beschriebenen Geometrie können Modelle im STL-Format in jedem Maßstab hergestellt (skaliert) werden.

Basierend auf der STL-Datei müssen verfahrens- und maschinenspezifische Entscheidungen getroffen und Ergänzungen vorgenommen werden. Entscheidungen betreffen z.B. die „Aufbaurichtung“, da nur in der x-y-Ebene eine genaue Konturenge-

Bild 2-181
Prinzip der Modellgenerierung beim Rapid Manufacturing (nach Gebhardt).

bung erfolgen kann, in der z-Richtung jedoch immer ein Stufeneffekt durch die Schichtung verbleibt. Weitere Entscheidungen betreffen die erforderliche Schichtdicke, die für die Genauigkeit des Bauteils und die Gesamtdauer des Prozesses bestimmend ist. Ergänzungen betreffen die Stützstrukturen, die für einige der Verfahren erforderlich sind. Deren Generierung erfolg (halb-)automatisch.

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 nachbearbeitet werden.

Die Einfluss- und Zielgrößendarstellung für den Rapid-Technologie-Prozess zeigt die Vielfalt der Parameter, die zu beachten sind, Bild 2-183. Es muss betont werden, dass Rapid Technologien oft durchaus schwerer zu beherrschen sind, als die Anlagenhersteller suggerieren. Vielfach sind für ein optimales Prozessergebnis ein großes Erfahrungswissen sowie eine entsprechende Gestaltung der Bauteile erforderlich.

Die Wirtschaftlichkeit der Verfahren ist noch wenig erforscht, ebenso die Ökobilanz im Vergleich zu den konventionellen Technologien. Aufgrund der z. T. hohen Energieeinbringung in den Prozess lässt sich eine verbesserte Nachhaltigkeit erst über den gesamten Lebenslauf des Produkts darstellen. Bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit im Vergleich ist zunächst der Aspekt der Diskontinuierlichkeit der Verfahren zu beachten. Ein oder mehrere Produkte werden im Bauraum der Maschinen gefertigt und alle stehen erst nach Abschluss des gesamten Zyklus (Maschinenvorbereitung, Fertigung, Entfernung der Stützen etc.) zur Verfügung. Fehler während der Bearbeitung können nur schwer erkannt und nicht korrigiert werden. Andererseits hängt die weitere Bearbeitung der Bauteile (Aushärten, Oberflächenbearbeitung usw.) nicht nur vom Rapid-Prozess ab, sondern auch vom jeweils verwendeten Werkstoff und der Bauteil-Geometrie, so dass ein Wirtschaftlichkeitsvergleich schwierig ist.

Bild 2-182
Schematische Darstellung der Fertigungskette mittels Stereolithografie für eine Erodier-Elektrode (Rapid Tooling).

Bild 2-183
Einfluss- und Zielgrößendarstellung (nach VDI 3404)

Seit 2009 ist diese Gruppe von Verfahren als Rapid Technologien in der VDI-Richtlinie 3404 beschrieben:

- Stereolithografie,
- Laser-Sintern und Strahlschmelzen,
- Fused Layer Modeling/Manufacturing oder Fused Deposition Modeling,
- Multi-Jet Modeling,
- Poly-Jet Modeling,
- 3D-Printing,
- Layer Laminated Manufacturing oder Laminated Object Manufacturing,
- Masken-Sintern,
- Digital Light Processing.

2.9.1 Stereolithografie

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.

In einem Behälter mit flüssigem photoreaktivem Kunststoff werden durch gezieltes Einwirken von ultraviolettem Laserlicht beliebig geformte Werkstücke schichtweise aufgebaut. Der UV-Laser wird durch eine Optik gebündelt und über die Scanner-Spiegel auf die Arbeitsfläche (Flüssigkeitsoberfläche) des Behälters mit dem flüssigen Kunststoff gelenkt, Bild 2-184. Dort wird eine dünne Schicht vernetzt. 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.

Die durch Polymerisation vernetzten Bauteile werden anschließend mittels UV-Licht ausgehärtet. Je

Bild 2-184
Prinzip Stereolithografie.

nach Kontur der Bauteile müssen Stützstrukturen vorgesehen werden, die nach dem Prozess manuell entfernt werden, Bild 2-185.

Bild 2-185
Teil einer Motorrad-Verkleidung mit Stützstruktur auf der Plattform (3D-Systems).

2.9.2 Laser-Sintern und Strahlschmelzen

Das Laser-Sintern ist kein klassischer Sinterprozess in dem Sinn, dass Pulverteilchen unter hoher Temperatur bei hohem Druck über längere Zeit in einander diffundieren. Vielmehr werden beim Laser-Sintern Pulverpartikel aufgeschmolzen und zu einer Schicht verbunden. Verwendet werden Kunststoff-Pulver und Metall-Pulver. Als Strahlquelle dient ein Laser bzw. ein Elektronenstrahl.

Bild 2-186
Laser-Sintern (Funktionsprinzip).

Das Verfahrensprinzip ist in Bild 2-186 dargestellt. Der Arbeitsraum der Maschine wird vor Beginn des Prozesses unter Stickstoff (bei Kunststoff-Pulver) oder Schutzgas (bei Metall-Pulver) aufgeheizt. Neben der eigentlichen Arbeitsplattform sind ein oder zwei Vorratsbehälter mit Pulver angeordnet. Nach dem Aufheizen wird 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 Pulverschicht wird aufgetragen.
Kunststoff-Bauteile können mit diesem Verfahren ohne Stützstrukturen hergestellt werden, da das nicht aufgeschmolzene Pulver stützt, Bild 2-187. Metallische Bauteile benötigen i. Allg. Stützstrukturen, damit die entstehende Wärme zur Vermeidung von Bauteilverzug direkt in die Arbeitsplattform abgeführt werden kann, Bild 2-188.

Nach Abschluss des Aufbaus des Bauteils wird die Maschine kontrolliert und langsam abgekühlt. Das Bauteil wird aus dem Pulverbett entnommen, Bild 2-189, und das nicht auf geschmolzene Pulver kann, abhängig vom Anwendungszweck, wiederverwendet werden.

Bild 2-187
Laser-Sintern:Tiefseestation im Maßstab 1:11(Kunststoff-Modell).

Bild 2-188
Zahnbrücke mit Stützstrukturen (www.bego-medical.de).

Außer der eigentlichen Maschine gehören noch folgende Komponenten zu einer Laser-Sinter- oder Strahlschmelzanlage: Pulver-Aufbereitungsstation, Reinigungsstation, Aufbewahrung für die Pulver-Werkstoffe.

Die mit diesem Verfahren erzeugten metallischen Bauteile zeigen ein ähnliches Festigkeitsverhalten wie die entsprechenden Schmiedeteile. Das Laser-Sintern und Strahlschmelzen von Metallen zeigen großes Wachstumspotenzial, immer mehr metallische Werkstoffe werden von den Maschinenherstellern und Anwendern qualifiziert. Diese Verfahren werden insbesondere in der Luft- und Raumfahrtindustrie, in der Automobilindustrie, für den

Bild 2-189
Entnahme und Reinigen des Bauteils von Hand.

Bild 2-190
Mit dem Laser-Sintern hergestellte Zugstäbe zur Qualifizierung von metallischen Pulvern (FhG IPK – Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Berlin).

Werkzeugbau und in der Dental-Industrie zunehmend eingesetzt.

Um das Laser-Sintern und Strahlschmelzen von Metallen zur industriellen Reife zu führen, müssen neben den Anlagen auch die vorbereitenden und die nachfolgenden Prozesse stärker standardisiert und qualitätsgesichert werden, Bild 2-190. Zur Vorbereitung gehören die Pulverprüfung (Verteilung, Form, Fließfähigkeit des Korns, Reinheit des Werkstoffes, Restfeuchtigkeit) und die Validierung der CAD-Daten (d.h., in den Anlagen müssen die Prozesse sicher und robust ablaufen). Dazu ist eine verbesserte Prozessüberwachung erforderlich. Für die Nachbereitung der Bauteile sollte eine Werkstoffprüfung eingerichtet werden. Daneben müssen die Oberflächen oft noch nachgearbeitet werden, insbeson-

dere bei Funktionsflächen. Dies ist für die komplexen herstellbaren Außen- und Innenkonturen oft ein schwieriges fertigungstechnisches Problem [FhG-IPK].

2.9.3 Fused Layer Modeling/Manufacturing (oder Fused Deposition Modeling)

Bei diesem Verfahren ist das thermoplastische Ausgangsmaterial strang- oder fadenförmig 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, Bild 2-191. Zusätzlich können über eine zweite Düse (soweit erforderlich) Stützstrukturen aus einem anderen, wasserlöslichen Material aufgebaut und nach dem Prozess in Wasser oder in einer wässrigen Lösung entfernt werden. Dies stellt einen weiteren Arbeitsschritt dar.
Bild 2-192 zeigt eine Montagevorrichtung für den Automobilbau, die mit Hilfe dieses Verfahrens innerhalb weniger Tage entwickelt wurde und sofort einsetzbar war (www.stratasys.com).

Bild 2-191
Fused Layer Modeling/Manufacturing (oder Fused Deposition Modeling), Funktionsprinzip.

Neben den industriell eingesetzten Anlagen gehört das Open-Source Projekt RepRap (reprap.org) zu dieser Verfahrensgruppe. RepRap ist in den letzten Jahren überraschend populär geworden. Mit Hilfe von kompletten Anleitungen aus dem Internet oder kommerziell erhältlichen Baukästen kann sich auch ein Laie eine kleine Maschine zur Herstellung von individuellen Produkten „basteln“ (Kosten ab ca. 500 €). Mehr als 10.000 RepRap-Anlagen (Bild 2-193) sollen weltweit schon existieren [Wohlers 2011].

Bild 2-192
Montagevorrichtung im Automobilbau (Günter Schmid, Werkbild BMW Werk Regensburg).

Bild 2-193
Einsatzfähige RepRap-Maschine (reprap.org).

2.9.4 Multi-Jet Modeling

Beim Multi-Jet Modeling wird ein granuliertes thermoplastisches Material aufgeschmolzen und über beheizte, linienförmig angebrachte Düsen (die individuell angesteuert werden) durch einen Druckkopf auf die vertikal bewegte Arbeitsplattform aufgebracht. Stützmaterial kann über separate Düsen eingebracht werden. Das Material härtet unmittelbar nach dem Auftragen aus.
Beim Multi-Jet Modeling kann der Druckkopf mit den Düsen die gesamte Breite des Bauraums abdecken, so dass der Prozess schnell ablaufen kann.
Da mit diesem Verfahren sehr feine Strukturen erzeugt werden können, wird es in der Schmuckherstellung eingesetzt, Bild 2-194. Das Endprodukt wird dann mittels Wachsausschmelz- bzw. Feingieß-Verfahren hergestellt.

Bild 2-194
Schmuckherstellung mit dem Multi-Jet Verfahren (formabina.ch).

2.9.5 Poly-Jet Modeling

Dieses Verfahren ist mit dem Multi-Jet Modeling eng verwandt. Der Unterschied liegt in den verwendeten flüssigen bis breiförmigen Materialien, die UV-aushärtbar sind. Nach dem Auftragen des Materials über einen Druckkopf mit mehreren Düsen wird das Material direkt durch UV-Strahler ausgehärtet. Auch mit diesem Verfahren sind sehr feine Strukturen möglich. Außerdem lassen sich elastische bzw. gummiartige Artikel herstellen, Bild 2-195.

2.9.6 3D-Printing

Obwohl zunehmend alle generativen Fertigungsverfahren unter dem Oberbegriff 3D-Printing zusammengefasst werden, ist dieses Verfahren mit seinen Spezifikationen in der VDI 3404 festgelegt.
Das 3D-Printing arbeitet mit pulverförmigem Ausgangsmaterial, welches durch punktförmiges Einbringen von Bindemitteln über einen Druckkopf selektiv verklebt wird, Bild 2-196. Dieses Bindemittel kann auch eingefärbt sein; in diesem Fall entspricht das Verfahren dem farbigen Tintenstrahldrucken. Das Bauteil muss zur Erhöhung der mechanischen Belastbarkeit nachbearbeitet werden.
Industriell eingesetzt werden 3D-Printer, die auch mit sehr großem Bauraum erhältlich sind, z.B. für die Erstellung von Sand- und Kunststoffgussformen. 3D-Printing eignet sich gut für den Einsatz unter Büro-Bedingungen und ist durch die leicht mögliche Einfärbung der Bauteile sehr gut für Lehrzwecke geeignet, z. B. für das Erstellen von Anschauungsmodellen, Bild 2-197.

Bild 2-195
Pumpen-Balg, hergestellt mittels Poly-Jet Modeling (objet.com).

Bild 2-196
3D-Printing (Funktionsprinzip).

Bild 2-197
FEM-Simulation: Anschauungsmodell Kurbelwelle mit Kolben (4d-solution.com).

Bild 2-198
Layer Laminated Manufacturing (Funktionsprinzip).

2.9.7 Layer Laminated Manufacturing

Laminierverfahren benutzen laminierte Papier- oder Kunststofffolien mit thermisch aktivierbaren adhäsiven Oberflächen, die auf die vorangehende Schicht mit Hilfe von heißen Walzen geklebt werden (Bild 2-198). Laser, Messer oder Wasserstrahl schneiden die Konturen aus und schneiden auch das verbleibende Material so ein, dass es beim oder nach dem Prozess leicht zu entfernen ist.

Möglich sind auch sog. Green Tapes mit gebundenem Pulver (z. B. Keramik). Das Bauteil muss anschließend an den Prozess gesintert werden.
Laminierverfahren sind i. Allg. günstig hinsichtlich der Materialkosten und können ohne weitere Arbeitsschutzmaßnahmen überall durchgeführt werden. Die Bauteile aus Papier-Material können nach dem Prozess wie Holz weiterbearbeitet werden.

2.9.8 Masken-Sintern

Das Masken-Sintern arbeitet mit pulverförmigem Ausgangsmaterial (Kunststoff, beschichtetes Metall und Keramik). Dieses wird über ein sog. Schwert schichtweise auf die Arbeitsplattform aufgebracht. Für die Belichtung jeder Schicht wird elektrostatisch eine Maske erzeugt, die die jeweiligen Kontur-Informationen enthält. Eine Infrarot-Strahlquelle schmilzt das Material an den entsprechenden Stel-

Bild 2-199
Masken-Sintern (Quelle: Sintermask GmbH).

len auf. Es handelt sich also nicht um einen punkt- oder linienförmigen, sondern um einen flächigen Energieeintrag.

2.9.9 Digital Light Processing

Dieses Verfahren nutzt die spezielle Technologie von Texas Instruments. Deren Kernstück ist ein Chip aus bis zu 2 Millionen schwenkbar angeordneter, mikroskopisch kleiner Spiegel. Die Lichtquelle projiziert über die Spiegel das Licht an die Stellen, an denen das Material (Photopolymer-Flüssigharze) ausgehärtet werden soll. Auf diese Weise wird pro Schritt jeweils die ganze Kontur belichtet, Bild 2-200.

Bild 2-200
DLP-Technologie: Blick in den Maschinenraum (Zcorp.com)

2.9.10 Entwicklungen

Die Einsatzgebiete, die einzelnen Verfahren, die Werkstoffe sowie die Maschinen und deren Hersteller entwickeln sich weltweit sehr dynamisch. Nach [Wohlers Report 2011] sind die Umsätze der Anlagenhersteller und Dienstleister für diese Technologie seit 1987 weltweit um durchschnittlich 26 % pro Jahr gestiegen.

Es lassen sich mehrere Trends beobachten:

- Die Bedeutung der metallischen Werkstoffe und damit der Einsatz von Rapid Technologien direkt in der industriellen Prozesskette (Additive Manufacturing) nimmt stark zu.
- Die Anzahl der für die verschiedenen Verfahren qualifizierten Werkstoffe und deren Anbieter nehmen zu, in vielen Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen wird an der Standardisierung gearbeitet.
- Rapid Technologien haben eine stark zunehmende Bedeutung für die Dental-Technik und die Endo-Prothetik (künstliche Gelenke und Knochenersatz).
- Rapid Technologien haben das Potenzial, in der Architektur den klassischen Modellbau abzulösen.
- Rapid Technologien werden verstärkt von Künstlern für unterschiedlichste Projekte eingesetzt.
- Rapid Technologien werden zunehmend auch von Privatpersonen genutzt. Ein Beispiel dafür ist das Unternehmen Origo (www.origo3dprinting.com), das einen 3D-Printer für Kinder entwickelt. Zu diesem Trend gehört auch die RepRap-Community.
- Daneben existieren Portale, über die Designer und Privatpersonen ihre Entwürfe (Schmuck, Lampen, Möbel etc.) anbieten, welche dann von Dienstleistern hergestellt und an den jeweiligen Besteller ausgeliefert werden. Ebenso ist es möglich, seine eigenen 3D-Projekte auf diese Art fertigen zu lassen (imaterialize.com, shapeways.com).

Ergänzendes und weiterführendes Schrifttum

Beaman, J.J. u.a.: Rapid Prototyping: Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1997.

DIN 1688-1: Gußrohteile aus Leichtmetallegierungen – Sandguß – Allgemeintoleranzen, Bearbeitungszugaben; Nicht für Neukonstruktionen, 1998-08.

DIN EN 10021: Allgemeine technische Lieferbedingungen für Stahlerzeugnisse, 2010-06.

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, 2000-04.

DIN EN 1561: Gießereiwesen – Gusseisen mit Lamellengraphit, 2012-01.

DIN EN 1562: Gießereiwesen – Temperguss, 2012-05.

DIN EN 1563: Gießereiwesen – Gusseisen mit Kugelgraphit, 2012-10.

DIN EN 1706: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gussstücke – Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften, 2010-06.

Fachverband Pulvermetallurgie: Sinterwerkstoffe, Werkstoff-Leistungsblätter und technische Lieferbedingungen. Berlin, Köln: Beuth-Vertrieb 2000.

Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung: www.generativ.fraunhofer.de.

Gebhardt, A. (Hrsg): Forum für Rapid Technologie. www.rtejournal.de.

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. 3. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, Wien 2007.

Gebhardt, A.: Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing. Carl Hanser Verlag, München, Wien 2011.

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 2003.

Huppmann, W.: Metallographic Atlas of Powder Metallurgy. Verlag: Metal Powder Industry 1990.

ISO 16112: Gusseisen mit Vermiculargrafit – Klassifikation, 2006-08.

prEN 1560: Gießereiwesen – Bezeichnungssystem für Gusseisen – Werkstoffkurzzeichen und Werkstoffnummern, 2009-07.

prEN 1564: Gießereiwesen – Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit, 2009-07.

Richter, H.: Das Prinzip Sandguß; Gießen Großgußstücke; Gießen in Dauerformen; Stranggießen von Gusseisen (VDG) www.wissensfloater.uni-wuppertal.de

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 Heidelber, 2007.

Taschenbuch der Gießerei-Praxis. Fachverlag Schiele u. Schön, Berlin (erscheint jährlich).

VDI-Richtlinie 3404: Generative Fertigungsverfahren – Rapid-Technologien (Rapid Prototyping); Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. Beuth Verlag, Berlin 2009.

Wieneke-Toutaoui, B. u. H.Gerber: Rapid Prototyping Technology – New potentials for offshore and abyssal engineering. Proceedings of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference.

Wohlers, T.: Wohlers Report 2011. www.wohlers-associates.com

www.wissensfloater.de – Rapid Prototyping & Co-Generative Verfahren.

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.

3 Fügen

3.1 Das Fügeverfahren Schweißen

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-, Löt- 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).

3.1.1 Bedeutung der Schweißtechnik

Seit der Einführung des Gas- und Lichtbogenschweißens in der Industrie um 1900 hat die Bedeutung des Fügeverfahrens Schweißens erheblich zugenommen. Die Zahl der Schweißverfahren nimmt ständig zu, wie Bild 3-1 zeigt.

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 50 % bis 60 %. Mechanische Verbindungen (Nieten, Schrauben) werden wegen gravierender Nachteile (geringere Wertigkeit der Verbindung durch ungünstigen Kraftfluss, höheres Gewicht durch Überlappungen, Laschen) immer seltener verwendet.

Bild 3-1
Zunahme der Anzahl der Schweißverfahren im Laufe der vergangenen Jahrzehnte.

Die Fortschritte im Gasturbinenbau, in der Reaktortechnik, im chemischen Apparatebau, bei Hochgeschwindigkeitsflugkörpern, aber auch in der Mikroelektronik wären ohne die moderne Schweißtechnik nicht möglich geworden. Neu hinzukommende Werkstoffe mit besonderen Eigenschaften (Korrosions-, Hochtemperatur-, Festigkeitseigenschaften) stellen erhöhte Anforderungen an die Schweißverfahren und die Fertigungstechnologie. Dabei werden die leicht mechanisierbaren Verfahren mit hoher Reproduzierbarkeit an Bedeutung gewinnen (MSG-, UP-, Elektronenstrahl-, Laserstrahlschweißen).

Die Kosten von Produkten und Hilfsmitteln zum Schweißen (Stromquellen, Vorrichtungen, Zusatz- und Hilfsstoffe) werden sich von gegenwärtig etwa 40 € je Tonne Stahlkonstruktion auf mehr als 50 € erhöhen. Die künftige Entwicklung in der Schweißtechnik wird gekennzeichnet sein 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*[8] liegt bei etwa 35 % (im Schienenfahrzeugbau bei 70 %, im Schiffbau bei 12 %), für die nächsten Jahre wird mit 55 % bis 65 % gerechnet. Dies bedeutet, dass außer der Anwendung geeigneter Verfahren (z. B. Schutzgas-, UP-Verfahren), eine starke Zunahme von Ein- und Mehrzweckvorrichtungen notwendig sein wird.

3.1.2 Das Fertigungsverfahren Schweißen; Abgrenzung und Definitionen

Schweißverbindungen sind *stoffschlüssige* Verbindungen, die durch die Wirkung von Adhäsions- oder Kohäsionskräften zwischen den Fügeteilen entstehen. Die Verbindung ist unlösbar, die Fügeteile werden beim Lösen zerstört. Die Niet- und Schraubenverbindungen sind *kraftschlüssig*, also lösbar, d. h., die Fügeteile werden beim Lösen nicht zerstört.

[8] Dies ist das Verhältnis des durch mechanische Schweißverfahren abgeschmolzenen Schweißguts zur gesamten Schweißgutmenge.

A. H. Fritz, G. Schulze (Hrsg.), *Fertigungstechnik,* Springer-Lehrbuch
DOI 10.1007/978-3-642-29786-1_3, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Die Stoffschlüssigkeit geschweißter Verbindungen, die beim Schweißen entstehenden Gefügeänderungen, sowie die oft erheblichen mehrachsigen Spannungszustände erfordern eine dem Schweißverfahren angepasste Konstruktion. Die schweißgerechte Konstruktion ist nicht nur einfach eine 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 (und der aus ihnen hergestellten Schweißverbindungen, d. h. vor allem der WEZ und des Schweißguts, s. Abschn. 3.2.3) ausschlaggebend für die Sicherheit geschweißter Bauteile sind. Bei Nietverbindungen spielt die Zähigkeit dagegen nur eine geringere Rolle.

Bild 3-2 zeigt, dass durch geeignetere Werkstoffe, bessere Werkstoffausnutzung und eine dem Schweißen angepasste Konstruktionstechnik, wie z. B. im Brückenbau, immer größere Beanspruchungen zugelassen werden können.

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

Bild 3-2
Anstieg der zulässigen Grenzspannung geschweißter Bauteile im Brückenbau seit dem Jahre 1900 (nach Kallen).

– Material eingespart,
– die konstruktive Freizügigkeit größer,
– die Gefahr des Ausschusses geringer und
– das Ausbessern erleichtert.

Maschinenrahmen, Pressenständer, große Zahnräder, Rippenwellen, große Getriebegehäuse sind Beispiele für Konstruktionen, die mit beträchtlichem Erfolg geschweißt werden.

3.1.3 Einteilung der Schweißverfahren

Schweißen ist das Vereinigen von Werkstoffen unter Anwendung von Wärme und (oder) Kraft ohne oder mit Schweißzusatzwerkstoffen. Es kann mit Hilfe von Schweißhilfsstoffen, z. B. Pasten, Pulver oder Gase erleichtert werden. Das Vereinigen erfolgt gemäß Bild 3-3 im flüssigen oder im plastischen Zustand der Schweißzone (DIN 1910-100). Die Verbindung ist *stoffschlüssig*; sie beruht auf der Wirkung zwischenatomarer und zwischenmolekularer Kräfte.

Nach Bild 3-3 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 Tabelle 3-1. Nach dem Zweck des Schweißens unterscheidet man:

❒ **Verbindungsschweißen** (Bild 3-4) 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 (Werkstoff wird ergänzt) oder artfremd [Werk-

Bild 3-3
Zur Deutung wichtiger Vorgänge beim (Verbindungs-)Schweißen.

Tabelle 3-1. 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 $Q = I^2 \cdot R \cdot t$)	Wiederstandsschmelzschweißen, z. B. Elektroschlackeschweißen (72)	Wiederstandspressschweißen, 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)	–

stoff(e) mit besonderen Eigenschaften wird (werden) aufgetragen] sein. 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 gemäß Bild 3-4 sollte in diesen Fällen möglichst klein sein, aber noch so groß, dass er fertigungstechnisch ausreichend einfach realisierbar ist. Er ist das in Prozent ausgedrückte Verhältnis der Flächen- oder Mengenanteile a_G von aufgeschmolzenem Grundwerkstoff zum gesamten Schweißgut $a_G + a_S$, d. h. zum aufgeschmolzenen Grund- und Zusatzwerkstoff (s. a. Abschn. 3.2.4.3):

Zweck des Schweißens	Metallurgische und fertigungstechnische Hinweise
Verbindungsschweißen Zusatz = A 	Die Verbindbarkeit ist normalerweise vorhanden, wenn sich in der Mischzone »M« *keine* intermediären Verbindungen A_mB_n bilden, bzw. wenn deren Menge hinreichend gering ist. Metallurgische Mängel, spröde, rissanfällige Bereiche und eine verringerte Korrosionsbeständigkeit wären sonst die Folge. 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 *Pufferlagen*. Diese Arbeitstechnik ist aber wegen der sehr geringen Abschmelzleistung (Aufschmelzgrad A_S muss ausreichend klein sein) sehr teuer. $A_S = \frac{a_G}{a_G + a_S} \cdot 100$ in %.
Auftragschweißen (Zusatz A »artgleich«) 	Die Eigenschaften der Auftragung weichen nicht wesentlich von denen des Grundwerkstoffes »A« ab: Es entsteht das *artgleiche Schweißgut*. Die Größe des Aufschmelzgrades ist daher von geringerer Bedeutung. Die Eigenschaften des Gefüges der Mischzone »M« entsprechen etwa denen von »A«. Mit dieser Auftragtechnik werden vorwiegend verschlissene (abgetragene) Werkstoffbereiche ergänzt.
Auftragschweißen von Panzerungen, Plattierungen; der Zusatz B ist nicht »artgleich« 	»B« ist in der Regel hochlegiert (verschleißfest bzw. chemisch beständig), »A« meist un- oder niedriglegiert. »M« besteht daher häufig aus sprödem, rissanfälligem 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.
Auftragschweißen von Pufferschichten (P), der Zusatz ist nicht »artgleich« 	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 *lückenlose Mischkristallreihe* bzw. ausgedehnte *Mischkristallbereiche* bildet.

Bild 3-4
Metallurgische Vorgänge beim Schmelzschweißen unterschiedlicher Werkstoffe, schematisch, siehe auch Bild 3-14.

$$A_S = \frac{a_G}{a_G + a_S} \cdot 100 \text{ in \%.}$$

Nach der Art der Fertigung, d. h., im Wesentlichen nach dem Grad der Mechanisierbarkeit, unterscheidet man entsprechend Bild 3-5:

- 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.

Bei allen Schweißverfahren ist für die einwandfreie Bindung eine möglichst große *Sauberkeit* (Freiheit von Rost, Fett, Öl, Farben, Feuchtigkeit, Belägen aller Art, Bewüchsen) der Fügeteile im näheren Bereich der Schweißnaht einschließlich evtl. verwendeter Zusatzwerkstoffe erforderlich. Durch die sehr großen Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten bleibt das Schmelzbad nur in der Größenordnung von einigen Sekunden flüssig. Die aus den Verunreinigungen (und der umgebenden Atmosphäre) entstehenden Gase können nicht vollständig entweichen (Abschn. 3.2.2). Die Folgen sind Poren und metallurgische Mängel (z. B. Abbrand der Legierungselemente, Zähigkeitsverlust durch gelöste Gase).

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

Bild 3-5
Einteilung der Schweißverfahren nach der Art der Fertigung, Beispiele aus DIN 1910-100 (DIN ISO 857-1).

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 besser 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, die z. B. eine große Affinität zu Sauerstoff haben (Legierungsabbrand z. B. bei Chrom, Aluminium, Titan), oder bei einer Gasaufnahme leicht verspröden (z. B. Titan, Tantal, Molybdän und Zirkonium), besonders beachtet werden.

3.1.4 Hinweise zur Wahl des Schweißverfahrens

Die Wahl des »optimalen« Schweißverfahrens hängt von einer Vielzahl oft schwer beeinflussbarer Faktoren ab:
- Der Art der Bauteile,
- der Stückzahl,
- dem Werkstoff,
- der Werkstückdicke sowie von
- den betrieblichen Gegebenheiten.

Das für die Anwendung »optimale« Schweißverfahren ist meistens erst nach sorgfältiger Analyse *aller* genannten Einflussgrößen zu ermitteln.

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

Bild 3-6
Die 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 angegeben.

Art der Bauteile
Wesentlich für die Verfahrensauswahl sind die Größe der Konstruktion und 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 gemäß Bild 3-6 ausgeführt werden können. Mit Hilfe einfacher Dreh- und (oder) Wendevorrichtungen lassen sich Zwangslagen oft in Normallagen »umwandeln«. Außerdem muss bedacht werden, dass Zwangslagen in den meisten Fällen nur mit teureren Handschweißverfahren (z. B. Gasschweißen, Lichtbogenhandschweißen) hergestellt werden können und überwiegend nicht mit den wirtschaftlicheren 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 die, die zum Schweißen in Normallagen erforderlich ist. 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 (s. a. Abschn. 3.3.2.5.2).

Stückzahl
Bei kleinen Stückzahlen sind viele Schweißverfahren geeignet. Häufig wird die Wahl von den betrieblichen Gegebenheiten bestimmt. Große Stückzahlen erfordern schon aus wirtschaftlichen Gründen hochmechanisierte Schweißverfahren. Der Einsatz von (Einzweck-)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:
- 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 oder besser mit speziellen »flussmittelfreien« Verfahren (WIG- oder MIG-Verfahren) möglich.

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 (Abschn. 3.3.1.2).

Werkstückdicke
Verbindungsschweißungen an Fügeteilen mit einer Werkstückdicke unter etwa 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 und birgt außerdem 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 vor allem aber von der Art und chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes abhängige Grenzwerte überschreiten. Großvolumige, überhitzte (Abbrand) und heißrissanfällige Schweißgüter mit unerwünschtem *Stängelgefüge* wären die Folge (Abschn. 3.2.4.2).

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 wohlbegründete Überlegungen zur Wahl des Schweißverfahrens wegen betrieblicher Gegebenheiten bzw. einschränkender Möglichkeiten korrigiert bzw. 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. Vorrichtungen aller Art, Glühöfen) nicht verfügbar, dann muss man fachgerecht improvisieren.

3.2 Werkstoffliche Grundlagen für das Schweißen

Beim Herstellen von Schweiß- und in wesentlich geringerem Umfang auch Lötverbindungen, die alle notwendigen technischen und wirtschaftlichen Anforderungen erfüllen sollen, sind eingehende Kenntnisse der beim Schweißen ablaufenden Gefüge- und Eigenschaftsänderungen nötig.

3.2.1 Wirkung der Wärmequelle auf die Werkstoffeigenschaften

Für Schweißverfahren werden Wärmequellen verwendet, die folgende Aufgaben erfüllen müssen:

– *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: *Schmelzschweißverfahren.*
– *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 Fügeteile.* Eine erhöhte Temperatur der Fügeteile erleichtert den Bindevorgang, weil Diffusionsvorgänge, metallurgische oder chemische Reaktionen und die Rekristallisation beschleunigt ablaufen können: Zum Beispiel Lötverfahren, tieferer Einbrand bei *»heißeren«* Schweißverfahren (MIG/MAG, UP-Verfahren). In manchen Fällen müssen störende Oberflächenschichten (z. B. Oxidfilme) meistens mit Hilfe chemisch aktiver Substanzen (Flussmittel) metallurgisch unwirksam gemacht werden. Dazu sind ausreichend hohe Temperaturen notwendig.

Außer diesen für den Bindemechanismus erforderlichen Vorgängen bewirkt die Wärmequelle andere – meistens negative – Eigenschaftsänderungen (s. Abschn. 3.2.3).

Wenn Verfahren mit großer Leistungsdichte[9] verwendet werden, ist der *thermisch beeinflusste Be-*

[9] Der Begriff *»Leistungsdichte«*, angegeben z. B. in W/cm², kennzeichnet die Fähigkeit der Wärmequelle, wieviel Energie sie jedem cm² der Oberfläche zuführen kann. Davon zu unterscheiden ist die Kenngröße *Streckenenergie E.* Sie gibt die Wärmemenge an, die jedem Zentimeter der Schweißnahtlänge von der Wärmequelle zur Verfügung gestellt wird. Die tatsächlich dem Werkstoff zugeführte Wärmemenge ist aber von verschiedenen physikalischen Eigenschaften des Schweißverfahrens abhängig.

Diese *Wärmeeinbringen Q* genannte Wärmemenge wird bei den Lichtbogenschweißverfahren aus den Einstellwerten *Lichtbogenspannung* U(V), *Schweißstrom* I(A) und der *Vorschubgeschwindigkeit der Wärmequelle* υ(cm/s) berechnet: $Q = k \cdot E = k \cdot U \cdot I/\upsilon$ in J/cm. In dieser Beziehung beschreibt der *thermische Wirkungsgrad k* die unterschiedliche Fähigkeit der Schweißverfahren, Wärme von der Wärmequelle auf das Werkstück übertragen zu können.

reich der Verbindung klein. Mit der Wahl geeigneter auf den zu schweißenden Werkstoff angepasster Verfahren können die geschilderten metallurgischen Schwierigkeiten beseitigt bzw. verringert werden.

Daraus folgt:

Der Werkstoff diktiert die Schweißbedingungen

Die Schweißverfahren, die Einstellwerte (z. B. Strom, Spannung und Vorschubgeschwindigkeit) und die davon abhängigen Temperaturfelder sind in Abhängigkeit vom Werkstoff zu wählen. Von großer Bedeutung ist demnach die Einsicht, dass die Intensität der Wärmequelle kontrolliert werden muss, um unzulässige Werkstoffänderungen durch den Schweißprozess auszuschließen bzw. klein zu halten.

3.2.2 Physikalische Eigenschaften der Werkstoffe

Die physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe beeinflussen maßgebend
- das Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen (Schweißeignung, Abschn. 3.2.4.4) und demzufolge die mechanischen Gütewerte und die Sicherheit der Schweißverbindungen sowie
- die Eignung und Wirksamkeit des Schweißverfahrens.

Der **elektrische Widerstand** $\boldsymbol{R}$ der Werkstoffe (spezifischer Widerstand ρ bzw. Leitfähigkeit λ) ist für die einwandfreie Funktion verschiedener Schweißverfahren von großer Bedeutung. Beim Widerstandsschweißen (Abschn. 3.4) beträgt die 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** $\boldsymbol{\lambda}$ der Werkstoffe sind in der Regel Schweißverfahren mit großer Leistungsdichte erforderlich, um den während des Schweißens entstehenden Wärmeverlust auszugleichen. In der Praxis werden die Fügeteile aus gut wärmeleitenden Werkstoffen (z. B. Cu, Al) meistens zusätzlich vorgewärmt. Die sehr hohen Abkühlgeschwindigkeiten bei Verfahren mit großer Leistungsdichte führen sonst zu rissbegünstigenden thermischen Spannungen. Reine Metalle besitzen die größte Wärmeleitfähigkeit; Legierungselemente setzen sie z. T. stark herab.

Der **Wärmeausdehnungskoeffizient** $\boldsymbol{\alpha}$ 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. Geschweißte Bauteile aus Werkstoffen mit großem Wärmeausdehnungskoeffizienten (Kupfer, Aluminium, Magnesium) erfordern daher auch oft aufwändige Richtarbeiten (bzw. eigenspannungsvermindernde Vorrichtungen), wenn Abmessungen mit kleinen Toleranzen vorgeschrieben bzw. erwünscht sind.

In Tabelle 3-2 sind einige physikalische Eigenschaften ausgewählter Metalle angegeben. Bild 3-7 zeigt sehr 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:
- Vorausgesetzt, das Gas ist im Metall unlöslich: *Porenbildung*, *Gaseinschlüsse*.
- Vorausgesetzt, das Gas ist im Metall löslich. Die Bildung von *Einlagerungsmischkristallen* (das Gas wirkt wie ein »Legierungselement«!) ist häufig mit einer großen Abnahme der Zähigkeit verbunden. 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.
- Vorausgesetzt, das Gas bildet Verbindungen (z. B. Fe_2N). Abhängig von der Temperatur und 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 Gütewerte der Schweißverbindung durch Einschlüsse in aller Regel nur mäßig verschlechtert.

Tabelle 3-3 zeigt das Lösungsverhalten der wichtigen Gase Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff in Metallschmelzen beim Schmelzpunkt.

3.2.3 Einfluss des Temperaturfeldes

Die fachgerechte, wirtschaftliche und sinnvolle Auswahl eines Schweißverfahrens ist ohne Kenntnis der grundlegenden verfahrenstechnischen Besonderheiten und der von der Schweißwärme erzeugten Eigenschaftsänderungen des Grundwerkstoffes und der Wärmeeinflusszone nur in den wenigsten Fällen möglich.

Der Werkstoff wird an der Schweißstelle durch meistens punktförmig wirkende, also sehr konzentrierte Wärmequellen aufgeschmolzen. Die Folgen sind sehr große Aufheizgeschwindigkeiten (bis zu etwa 1000 K/s) und Abkühlgeschwindigkeiten (einige 100 K/s). Die Verweilzeit bei der jeweiligen Höchsttemperatur beträgt dabei nur einige Sekunden, wie Bild 3-8a) erkennen lässt.

Die *»Wärmebehandlung«* beim Schweißprozess unterscheidet sich deutlich von technischen Wärmebehandlungen (z. B. Normalglühen oder Härten). Sie ist die Ursache für eine ganze Reihe meist nachteiliger metallurgischer Änderungen des Werkstoffes und unerwünschter Eigenschaften bzw. Eigenschaftsänderungen des geschweißten Bauteils:

- Die **Aufheizgeschwindigkeiten** sind sehr groß. Alle Gefügeumwandlungen (beispielsweise die für Stahl wichtige Umwandlung: α-Fe → γ-Fe) erfolgen nicht vollständig, weil die Haltezeiten (z. B. »Austenitisierungszeit« t_H in Bild 3-8a) zu gering sind. Carbide, Nitride, Oxide, Gefügeinhomogenitäten (z. B. Kristallseigerungen) können daher nicht vollständig beseitigt werden. Große Temperaturgradienten, etwa die gemäß Bild 3-8b), führen zu größeren Spannungen und geringerem Verzug.

Tabelle 3-2. Physikalische Eigenschaften wichtiger metallischer Werkstoffe.

Werkstoff	Schmelzpunkt ϑ_s bzw. Schmelzbereich °C	spezifischer Widerstand ρ Ωm	Wärmeleitfähigkeit λ W/(mK)	Wärmeausdehnungskoeffizient α 10^{-6}/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

Tabelle 3-3. 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

Betrachtete Eigenschaft	Einfluss auf die Schweißverbindung bzw. auf die Schweißverfahren
thermische Leitfähigkeit λ	**λ groß:** Starker Wärmeabfluss in den Grundwerkstoff, daher sind i. Allg. Schweißverfahren mit hoher Leistungsdichte und (oder) Vorwärmen 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. *Beispiele:* Cu, Al, Mg. **λ klein:** Geringer Wärmeabfluss, großes Temperaturgefälle, Breite der WEZ gering, schärferer Eigenspannungszustand. *Beispiel:* austenitischer CrNi-Stahl.
elektrischer spez. Widerstand ρ	**ρ groß:** Wichtige Eigenschaft beim Widerstandsschweißen. Erzeugen ausreichender Energie zwischen den Blechen ist leichter. *Beispiele:* Stahl, Ti, NiCu30. **ρ klein:** Zum Herstellen der Punktschweißverbindung benötigte Energie ist schwer erzeugbar, besondere Maßnahmen sind erforderlich. *Beispiel:* Cu, durch große Wärmeleitfähigkeit ist das Widerstandsschweißen zusätzlich erschwert.
Wärmeausdehnungskoeffizient α	Bleche sind zwischen unbeweglichen Auflagern A und B eingeschweißt. **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. **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.

Bild 3-7
Einfluss wichtiger physikalischer Eigenschaften der Werkstoffe auf ihr Schweißverhalten.

- Die **Maximaltemperaturen** sind in der Nähe der Schmelzgrenze sehr hoch (Bild 3-8a)). Trotz der sehr kurzen zeitlichen Einwirkung ist die Wirkung erheblich: *Kornwachstum (Grobkorn)* und (oder) Lösung von Ausscheidungen (Carbiden, Nitriden) sind die Folge.
- Infolge der großen **Abkühlgeschwindigkeiten** in der Nähe der Schmelzgrenze wird bei der Werkstoffgruppe »wärmebehandelbarer Stähle« die Bildung aufgehärteter (d. h. martensitischer) rissanfälliger Bereiche begünstigt, Bild 3-9. Hierfür 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 [Bild 3-8a), 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 **Wärmeeinflusszone (WEZ)**, Bild 3-8 und 3-9. Bei umwandlungsfähigen Stählen reicht sie z. B. 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 Gütewerten des Schweißguts die Bauteilsicherheit.

Bild 3-8
Temperaturverlauf in der Wärmeeinflusszone (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 (L1 < L2)

Bild 3-9
Wirkung von Schweißverfahren unterschiedlicher Leistungsdichte auf die Temperatur- und Härteverteilung in einer Schweißverbindung aus einem aufhärtungsfähigen Stahl (schematisch).

Bild 3-9 zeigt, dass bei Stahlschweißungen eine geringe (große) Leistungsdichte eine geringe (große) Härte, aber eine breite (schmale) WEZ erzeugt. Abhängig davon, welche Eigenschaft (große Härte, breite WEZ) für die Bauteilsicherheit nachteiliger ist, muss das Schweißverfahren u. a. nach der Leistungsdichte ausgewählt werden.

3.2.4 Werkstoffbedingte Besonderheiten und Schwierigkeiten beim Schweißen

3.2.4.1 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 und einfach durch das *Wärmeeinbringen Q* beschrieben. Das ist die jedem Zentimeter Schweißnaht in der Sekunde von der Wärmequelle des Schweißverfahrens zur Verfügung gestellte elektrische Leistung:

$Q = k \cdot U \cdot I / \upsilon$ in J/cm

- k thermischer Wirkungsgrad, s. a. Fußnote 9,
- $U \cdot I$ elektrische Leistung im Schweißstromkreis in J/s,
- υ Schweißgeschwindigkeit in cm/s.

Das *Wärmeeinbringen Q* wird in der Praxis als Maßstab für die thermische Beeinflussung des Werkstoffes beim Schweißen weitgehend angewendet.

Beim Aufheizen entstehen große **thermische Spannungen.** Sie können bei wenig verformbaren Werkstoffen bzw. bei größeren Werkstückdicken zu Rissen führen. Je kleiner der Temperaturgradient im Werkstück ist, desto geringer ist die Rissgefahr. Mit Hilfe des Vorwärmens und (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, oder aus Vergasungsprozessen von Beschichtungen aller Art stammenden Gase – können sich beim folgenden raschen Erstarren

nur unvollständig ausscheiden und verursachen *Porenbildung* und *Zähigkeitsverlust* (Abschn. 3.2.2). Die atmosphärischen Gase müssen daher von der Schweißschmelze ferngehalten werden. Das geschieht bei den einzelnen Verfahren mit Hilfe sehr unterschiedlicher Maßnahmen:

- *Umhüllung* bei der Stabelektrode (Lichtbogenhandschweißen);
- *geeignete Schutzgase* (WIG-, MIG-, MAG-Verfahren), die extern zugeführt werden;
- *Pulverschicht* (UP-Verfahren), die die Schmelze und den Lichtbogen abdeckt;
- *völliges Ausschalten der Atmosphäre* (das Elektronenstrahlschweißen arbeitet mit Vakuum, oder die »natürliche« Atmosphäre wird vollständig durch ein Schutzgas ausgetauscht, z. B. Schweißen von hochreaktiven Werkstoffen unter einer Argonatmosphäre).

3.2.4.2 Probleme während des Erstarrens

Wegen der großen Abkühlgeschwindigkeiten und der erheblichen Turbulenzen im Schmelzbad sind Entmischungen der Legierungselemente über größere Bereiche 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, wie eine deutlich schlechtere Schweißeignung, eine verminderte Korrosionsbeständigkeit oder sogar Rissbildung entstehen.

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 des Heißrissbildung die Temperaturdifferenz zwischen der Solidus- und der Liquidustemperatur ist, sind die bei konstanter Temperatur erstarrenden Metalle und eutektische Legierungen praktisch heißrissfrei.

Bild 3-10 zeigt die Primärkristallisation einer in einer Lage hergestellten Schweißverbindung (s. a. Abschn. 3.2.4.3). Das Schweißgut erstarrt – beginnend von den *Schmelzgrenzen* – in Form länglicher Kristallite *(Dendriten)*. Die Kristallisationsfronten schieben die bei geringerer Temperatur erstarrende Restschmelze vor sich her, ehe sie sich in Nahtmitte (genauer thermische Mitte) treffen. Da der Gehalt an Verunreinigungen in der Restschmelze am größten ist (z. B. in Form niedrigschmelzender eutektischer Verbindungen, wie etwa FeS, NiS), muss bei großvolumigen Schmelzbädern mit einer ausgeprägten *Heißrissneigung* (evtl. *Wiederaufschmelzrisse* in der WEZ), mit sehr geringen Festigkeitswerten, vor allem aber mit einer sehr niedrigen Zähigkeit gerechnet werden. Die Probleme werden gravierender mit zunehmendem

- *Schmelzbadvolumen*, zunehmendem
- *Gehalt an Verunreinigungen* im Grundwerkstoff, zunehmendem
- *Wärmeeinbringen beim Schweißen* (Gasschweißen, u. U. UP-Schweißen) und zunehmendem
- *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 **Mehrlagentechnik** (in der Praxis oft auch *Pendellagentechnik* oder *Zugraupentechnik* genannt) gemäß Bild 3-10 gewählt. Die Streckenenergie jeder Lage ist ausreichend, um die jeweils darunter liegende zum Teil

- *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 erfolgt bei ihr in Form dünner und ohne größere Pendelbewegungen 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 Gussgefüge bleibt weitgehend erhalten, d. h., eine Gefüge-

Art des Nahtaufbaus		
Einlagentechnik	Mehrlagentechnik	
	Pendellagentechnik	Zugraupentechnik
Der gesamte Nahtquerschnitt wird mit einer Lage gefüllt. Das Schweißgutgefüge zeigt gussähnliche Eigenschaften. Es besteht aus langen Stängelkristallen. Das Gefüge ist anisotrop. Die im Schweißgut vorhandenen Verunreinigungen werden in Nahtmitte angehäuft und begünstigen stark die **Heißrissbildung**. Die mechanischen Gütewerte sind mäßig. Für sehr saubere Werkstoffe mit Handschweißverfahren bis zu Wanddicken von etwa 10 mm, mit Hochleistungsverfahren (z. B. UP-Verfahren) bis etwa 30 mm anwendbar.	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. Die Gütewerte (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).	Die einzelnen Lagen führen den darunter liegenden Lagen nur so wenig Energie zu, dass kein Umkörnen erfolgen kann. Das Gussgefüge bleibt weitgehend erhalten. Das Schweißgut und die WEZ sind als Folge der großen Eigenspannungen der vielen schnell abkühlenden kleinvolumigen Lagen bei härtbaren Stählen härter und spröder (Martensit und Spannungsversprödung). 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.

Bild 3-10
Erstarrungsvorgänge (»Primärkristallisation«) bei Fe-C-Legierungen (Stahl) in Abhängigkeit von der Art des Nahtaufbaus in einlagig und mehrlagig hergestellten Schweißverbindungen.

verbesserung 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 Bild 3-10 ist die unterschiedliche Gefügeausbildung der beiden Mehrlagentechniken schematisch dargestellt.

Bei hohem Einschlussgehalt, z. B. bei den qualitativ hochwertigen, besonders beruhigten Stählen, können auch in der Wärmeeinflusszone Heißrisse entstehen *(»Spaltfreudigkeit«)*, wie Bild 3-11a) 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. Bild 3-11b) 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 schmelzgrenzennahen Bereichen der Wärmeeinflusszone (Bild 3-9),
- Belastungs- und (oder) Eigenspannungen,
- Versprödung z. B. durch Gasaufnahme (Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff) oder durch niedrige Betriebstemperaturen (Sprödbruch).

Bild 3-11
Entstehung von Werkstofftrennungen in Stählen mit hohem Einschlussgehalt.
a) Schmelzende Einschlüsse »spalten« das Blech
b) große Schrumpfspannungen σ führen bei Einschlusszeilen zur Rissbildung (schematisch)

Risse infolge Aufhärtung lassen sich am sichersten durch die Wahl schlecht härtbarer, d. h. niedriggekohlter (C ≤ 0,2 %) (niedrig-)legierter Stähle vermeiden. Je geringer die werkstofflichen und fertigungstechnischen Schwierigkeiten eines Werkstoffes beim Schweißen sind, desto besser ist seine Schweißeignung (Abschn. 3.2.4.4). Fertigungstechnisch lässt sich eine zu große Abkühlgeschwindigkeit sehr sicher mit Hilfe eines **Vorwärmens** (100 °C 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 erwärmter 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. 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. Sie entstehen unmittelbar an der Schmelzgrenze in der aufgehärteten WEZ. Bei vergüteten Stählen können schon geringste Mengen (etwa 1 ml H_2/100 g Fe) den gefährlichen wasserstoffinduzierten Riss[10] auslösen. Außer vakuumerschmolzenen Grund- und Zusatzwerkstoffen sind in diesem Fall extrem sorgfältige Fertigungsbedingungen erforderlich.

3.2.4.3 Verbindungs- und Auftragschweißen unterschiedlicher Werkstoffe

Beim Verbinden zweier unterschiedlicher Werkstoffe durch Schmelzschweißverfahren entsteht wenigstens 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. 3.1.3 und Bild 3-4).

[10] Der *wasserstoffinduzierte Kaltriss* wird im englischen Schrifttum *delayed (verzögert) fracture* genannt. Diese Bezeichnung drückt aus, dass die Risse erst Stunden (Tage) nach der Wasserstoffbeladung entstehen (können).

Bild 3-12
Risse in einer Ansatzstelle beim Schweißen (»Zündstelle«); Werkstoff AlMg4,5Zn1; V ≈ 5:1.

Bild 3-13
Riss in der Wärmeeinflusszone einer Schweißverbindung aus dem Stahl C45 unmittelbar neben der Schmelzgrenze (»Unternahtriss« = wasserstoffinduzierter Kaltriss); V = 400:1.

Die Eigenschaften der Verbindung bzw. Auftragung werden weitgehend von denen der *»Mischzone«* bzw. ihres Gefüges bestimmt. Sie hängen sehr ab vom Grad der Löslichkeit der beteiligten Elemente ineinander, der Menge und Verteilung (Korngrenzenbereich, Korninneres) entstehender spröder Gefügebestandteile, siehe Bild 3-14:

❶ **Völlige Unlöslichkeit (Eutektikum).** Die Güte der Verbindung hängt entscheidend von den Eigenschaften der Komponenten ab. Durch das schnelle Abkühlen entsteht im Allgemeinen ein sehr feines, hartes eutektisches Gefüge. Niedrigschmelzende Bestandteile (z. B. FeS bei Stahl, NiS bei Nickelwerkstoffen) können zur Heißrissbildung führen.

lfd. Nr.	Zustandsschaubild	Gefüge des Schweißguts, Einlagentechnik (sehr vereinfacht)	zu erwartende Eigenschaften der Schweißverbindung
❶	 Δc = Konzentrationsbereich der Legierungselemente im Schweißgut	Zusatzwerkstoff = A Eutektikum E = A + B 	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. 2. Die Gütewerte 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.
❷		Zusatzwerkstoff = A Schweißgut besteht vollständig aus (kristallgeseigerten) α-MK.en	1. Das Schweißgut besteht nur aus zähen, wenig rissanfälligen Mischkristallen. 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.
❸		Zusatzwerkstoff = A Eutektikum E_1 = A + V 	1. Das Schweißgut enthält eine spröde intermediäre Verbindung V. Geringe Mengen (vor allem an den Korngrenzen!) führen meist zur vollständigen Versprödung der Verbindung. 2. a) Verfahren wählen, mit dem geringe Aufschmelzgrade erreichbar sind, dadurch wird V-Gehalt geringer. Hartlöten ist hervorragend geeignet, wenn die Festigkeit ausreicht. 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 intermediäre Verbindungen bildet. Siehe auch Bild 3-4. 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, risssicher und korrosionsbeständig, aber extrem empfindlich für Schwefel. Das Schweißgut besteht aus Ni-haltigen Mischkristallen.
		 Zusatzwerkstoff = Ni = C $\alpha_{Ni,A}$ (Ni + A) $\alpha_{Ni,B}$ (Ni + B) 	

Bild 3-14
Metallurgische Vorgänge beim Schweißen unterschiedlicher Werkstoffe A und B, schematisch, siehe auch Bild 3-4.

❷ **Völlige Löslichkeit (lückenlose Mischkristallreihe).** Das gesamte Schweißgut besteht aus sehr zähen, wenig rissanfälligen, aber meistens kristallgeseigerten Mischkristallen. Die Schweißverbindung hat gute metallurgische und mechanische Eigenschaften.

❸ **Spröde Gefügebestandteile.** Bilden sich **intermediäre Verbindungen,** dann führen selbst geringste Mengen in den meisten Fällen zum Versprödeln 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 $\mathbf{Cu_5Zn_8}$, bei
– *Cu-Sn-Legierungen (Bronzen)* $\mathbf{Cu_{31}Sn_8}$ und bei den
– *Al-Fe-Legierungen* $\mathbf{Al_3Fe}$ oder $\mathbf{Al_5Fe_2}$.

Durch Mischen der Legierungselemente der zu verbindenden Werkstoffe (insbesondere höher kohlenstoffhaltige bzw. legierte Stähle) kann spröder, rissanfälliger Martensit entstehen. Diese vor allem beim Panzern (Bild 3-4) zu beobachtende Erscheinung erfordert sorgfältigste Wahl des Panzerwerkstoffes, evtl. des Pufferwerkstoffes und des Schweißverfah-

rens. 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. Gasschweißen, MAG-Schweißen mit Kaltdrahtzufuhr, UP-Schweißen mit Bandelektroden, Flammspritzen, Plasmaauftragschweißen) wird dieses Ziel erreicht. In Bild 3-14 sind die Vorgänge, die die Verbindbarkeit zweier Werkstoffe bestimmen, schematisch an Hand typischer (Zweistoff-)-Zustandsschaubilder dargestellt.

3.2.4.4 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 (z. B. mechanische Beanspruchbarkeit, hohe bzw. tiefe Betriebstemperatur, ausreichende Sprödbruchsicherheit gegen Korrosionseinwirkung) sicher erfüllen (Bewährung).

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, Bild 3-15, hängt ab vom
- *Werkstoff* (Teileigenschaft Schweißeignung), der
- *Konstruktion* (Teileigenschaft Schweißsicherheit) und der
- *Fertigung* (Teileigenschaft Schweißmöglichkeit).

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 bestimmend für die Sprödbruchneigung, Alterungsneigung, Aufhärtung, Heißrissneigung, das Korrosionsverhalten und die mechanischen Eigenschaften der Verbindung.
- *Metallurgische Eigenschaften* (Erschmelzungs- und Desoxidationsart, Warm-, Kaltformgebung, Wärmebehandlung). Sie sind bestimmend 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, Anordnung der Schweißnähte, Kerbwirkung,
- *Beanspruchungszustand:* statisch, dynamisch, schlagartig, Betriebstemperatur,
- *Fertigungsbedingungen:* Temperatur, bei der geschweißt wird (unterhalb + 5 °C Außentemperatur 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 Werkstoffs anpassen).

Die **Schweißmöglichkeit** ist vorhanden, wenn die vorgesehenen Schweißungen bei den gewählten Fertigungsbedingungen fachgerecht hergestellt werden können. Sie wird u. a. bestimmt von der

Bild 3-15
Die Schweißbarkeit eines Bauteils hängt ab von der Schweißeignung, Schweißsicherheit und Schweißmöglichkeit (in Anlehnung an DIN Fachbericht ISO/TR 581).

– *Vorbereitung zum Schweißen:* Schweißverfahren, Zusatzwerkstoffe, Hilfsstoffe, Wanddicke(n), Stoßart(en) und der
– *Ausführung der Schweißarbeiten:* Wärmeführung, Wärmeeinbringen, Vorwärmen der Fügeteile, Wärmevor- bzw. -nachbehandlung.

3.3 Schmelzschweißverfahren

3.3.1 Gasschweißen (G) (Ordnungsnummer: 311)

3.3.1.1 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 (Abschn. 3.3.1.2) 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 (Abschn. 3.1.3 und 3.2.4.3).

1 Kaltes Acetylen-Sauerstoffgemisch
2 Acetylenzerfall: $2 \cdot C_2H_2 \rightarrow 4 \cdot C + 2 \cdot H_2$
3 1. Verbrennungsstufe *(Schweißbereich)* besteht überwiegend aus den reduzierenden Flammgasen CO und H_2:
$2 \cdot C + H_2 + O_2 \rightarrow 2 \cdot CO + H_2$
4 2. Verbrennungsstufe *(»Streuflamme«)*:
$4 \cdot CO + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot O_2 \rightarrow 4 \cdot CO_2 + 2 \cdot H_2O$

Bild 3-16
Temperaturverteilung und Verbrennungsvorgänge in der neutralen Acetylen-Sauerstoff-Flamme.

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 (Abschn. 3.3.1.7).

3.3.1.2 Die Acetylen-Sauerstoff-Flamme

Das aus dem Brennermundstück strömende Gas-Sauerstoffgemisch – üblicherweise im Verhältnis 1:1 – bleibt zunächst unverändert beständig, Bild 3-16, Pos 1. In dem hellleuchtenden Kern zerfällt das Acetylen unter erheblicher Wärmeentwicklung (Q_1), Position 2:

$$C_2H_2 \rightarrow 2 \cdot C + H_2 - Q_1.$$

In der *ersten Verbrennungsstufe,* Position 3, wird der beim Schweißen zugeführte Sauerstoff für eine unvollständige Verbrennung verbraucht:

$$2 \cdot C + H_2 + O_2 \rightarrow 2 \cdot CO + H_2 - Q_2.$$

Wegen der in dieser Zone vorhandenen reduzierenden Gase (CO und H_2) und der hier herrschenden höchsten Flammentemperatur (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 der der 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 m^3 Acetylen[11] benötigt zum vollständigen Verbrennen 2,5 m^3 Sauerstoff. Daher reagieren die noch nicht vollständig verbrannten Gase (CO, H_2) in der *zweiten Verbrennungsstufe*, Bild 3-16, Position 4, mit dem Luftsauerstoff, der der Umgebung entzogen wird.

[11] Alle Volumenangaben im Folgenden sind Normvolumen nach DIN 1343.

Sauerstoffmangel, CO_2- bzw. CO-Überschuss, oder die Bildung von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen können die Folge sein:

$$4 \cdot CO + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot O_2 \rightarrow 4 \cdot CO_2 + 2 \cdot H_2O - Q_3.$$

Für die Wärmeintensität ist nicht der gesamte Heizwert entscheidend, sondern nur die Summe aus Bildungsenthalpie des Acetylens und dem auf die erste Verbrennungsstufe entfallenden Heizwertanteil. Der Heizwert der 2. Verbrennungsstufe ist größer, er kann aber nicht genutzt werden, da aus den bekannten Gründen mit der heißen, *reduzierenden* Primärflamme geschweißt werden muss.

Abhängig vom Mischungsverhältnis M = Acetylen : Sauerstoff unterscheidet man drei Flammeneinstellungen:

- **Neutrale Flamme** (M = 1:1). Sie wird zum Schweißen nahezu aller Werkstoffe verwendet. Im Schweißbereich herrscht die größte Temperatur (Bild 3-16). Die Flammgase (CO, H_2) 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 vermieden bzw. 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.

Bild 3-17
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.

3.3.1.3 Betriebsstoffe: Acetylen, Sauerstoff

Das wichtigste Brenngas für die Gasschweißung ist **Acetylen**. Der Heizwert der 1. Verbrennungsstufe und die Zündgeschwindigkeit sind groß. Daher ist es zum Schweißen besonders gut geeignet.

Acetylen wird in Entwickler genannten Apparaten aus Calciumcarbid (CaC_2) und Wasser hergestellt:

$$CaC_2 + 2 \cdot H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2 - Q.$$

Die (praktische) 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 etwa 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 $C_2H_2 : O_2$ = 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 131 Aceton eingebracht, wobei ein Liter Aceton etwa 25 l Acetylen löst. Der Flaschenfülldruck des Acetylens beträgt 19 bar. Die Flasche enthält demnach annähernd $13 \cdot 25 \cdot 19 \approx 6000$ l Acetylen. Die Acetylenentnahme sollte 1000 l/h nicht überschreiten, weil sonst das in größeren Mengen mitgerissene Aceton die Schweißnaht schädigt und die Armaturen verschmutzt *(»verkleben«)*.

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 – weitaus häufiger – gasförmig in Stahlflaschen (Kennfarbe blau) geliefert. Bei einem Rauminhalt von 40 l (bzw. 50 l bei Leichtstahlflaschen) und einem Fülldruck von 150 bar (bzw. 200 bar bei Leichtstahlflaschen) enthalten sie bei dem Umgebungsdruck $p = 1$ bar nach dem Gesetz von *Boyle-Mariotte* 6000 l (bzw. 10 000 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. Dadurch 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 »gefahrlos« 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.

3.3.1.4 Der Schweißbrenner

Im Schweißbrenner (er besteht aus dem Griffstück mit Anschlüssen und Ventilen sowie dem Schweißeinsatz) werden Sauerstoff und Acetylen gemischt. Das Mischungsverhältnis muss dabei auch über längere Schweißzeiten möglichst konstant bleiben, weil nur dann die metallurgische Qualität des Schweißguts erhalten bleibt. Die bevorzugte Bauart ist der *Saugbrenner (Injektor-* oder *Niederdruckbrenner)*, wie er in Bild 3-17 dargestellt ist. 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 angesaugt, wodurch ein gefährlicher Druckaufbau (Acetylenzerfall, siehe weiter unten) zuverlässig ausgeschlossen. In der Mischdüse erfolgt die Mischung der Gase im vorgesehenen Mischungsverhältnis.

Für die verschiedenen zu schweißenden 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), könnte der Acetylenschlauch bzw. die Acetylenflasche explodieren. Dieses Ereignis lässt sich mit einer Vorrichtung *(Sicherheitsvorlage)* verhindern, die die rückschlagende Flamme löscht.

3.3.1.5 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 beim Schweißen unterscheidet man folgende Arbeitstechniken:

❒ **Nachlinksschweißen**
Der Schweißstab wird in Schweißrichtung vor der Flamme geführt, Bild 3-18a). 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 (Bild 3-18a)) kann Luft, d. h. im Wesentlichen Sauerstoff und Stickstoff in die Schmelze reißen. 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 Bild 3-18b) direkt auf das Schmelzbad gerichtet. Der Schutz der Schmelze ist wesentlich besser und die auf das Schmelzbad übertragene Wärme erheblich größer als beim Nachlinksschweißen. 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.

3.3.1.6 Zusatzwerkstoffe; Schweißstäbe

Als Zusatzwerkstoffe werden Schweißstäbe mit einer Regellänge von 1000 mm verwendet. Sie sollten beim Schweißen leicht und gleichmäßig fließen, eine leichtflüssige, einfach entfernbare 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, Tabelle 3-4.

Die Vorgängernorm DIN 8554-3 enthielt den jeweiligen Stabklassen zugeordnete Angaben über die Festigkeitseigenschaften der mit den entsprechenden Stäben zu schweißenden Stähle. Diese Angaben sind entfallen. Wegen der Besonderheiten des Gasschweißverfahrens wird auf die Angabe von Kerbschlagwerten des Schweißguts verzichtet, da die Zähigkeitswerte des Schweißguts nicht mit denen der Schweißverbindung vergleichbar sind. Sie sind i. Allg. deutlich besser. Außerdem können in dem für das Gasschweißen üblichen Werkstückdickenbereich (≤ 10 mm) nur *Charpy-V-ähnliche* Proben verwendet werden. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen von *Charpy*-V-Proben ist daher nur bedingt möglich.

3.3.1.7 Anwendung und 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 und technisch sinnvoller. 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, weil bei allen Mischungsverhältnissen, die von $M = 1{:}1$ abweichen, leicht Aufkohlen oder Abbrand der Legierungselemente auftreten können.

Bild 3-18
Arbeitstechniken beim Gasschweißen.
a) Nachlinksschweißen
b) Nachrechtsschweißen

Ein wichtiger Anwendungsbereich des Gasschweißens sind Schweißarbeiten an Rohren (Kessel- und Apparatebau, Rohrleitungsbau), insbesondere dann, wenn in Zwangslage oder bei schlechter Zugänglichkeit der Schweißnahtfugen geschweißt werden muss. Der entscheidende Vorteil des Verfahrens für diese Arbeiten ist die Möglichkeit, *»Wärme«* und *Zusatzwerkstoff* beim Schweißen getrennt zuführen zu können, wie weiter unten näher erläutert wird.

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 und das Schweißen ist wegen der großen Rückstrahlwärme der Schweißschmelze sehr belastend.

Ein anderer wichtiger Anwendungsbereich ist das *Auftragschweißen*. Durch die Möglichkeit, Wärme *und* Schweißstab den Fügeteilen getrennt von Hand feinfühlig zuzuführen, sind sehr geringe Aufschmelzgrade (≤ 10 %) erreichbar (Abschn. 3.1.3). Aus dem gleichen Grunde eignet sich das Verfahren auch hervorragend für *Wurzelschweißungen*, selbst dann, wenn die Passung ungenau und der Spaltabstand nicht konstant und (oder) zu groß ist (häufig bei Baustellenbedingungen!). Geringe Investitionskosten und die ortsunabhängige Wärmequelle sind weitere Vorteile des Gasschweißens.

3.3.2 Lichtbogenhandschweißen (E) (Ordnungsnummer: 111) – Metall-Lichtbogenschweißen

3.3.2.1 Verfahrensprinzip und Schweißanlage

Als Energiequelle dient ein zwischen der abschmelzenden Stabelektrode und dem Grundwerkstoff gezogener *Lichtbogen*. In Bild 3-19 sind einige Einzelheiten zu erkennen. An den Ansatzpunkten des Lichtbogens entstehen Temperaturen von 4500 K 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 ebenso wie die wirtschaftlich schweißbare Wanddicke sehr viel größer. Der notwendige Schutz des Schweißbades vor den stark versprödenden atmosphärischen Gasen (Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff) wird durch einen »Schutzgasmantel« erreicht, der aus verschiedenen Bestandteilen der **Elektrodenumhüllung** gebildet wird, s. Tabelle 3-6. Aus diesem Grunde werden *nackte* – also nicht umhüllte – Stabelektroden 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 (außer dem gebildeten Schutzgas) einen zusätzlichen Schutz der Tröpfchen vor den Gasen der Atmosphäre und ermöglicht vor allem die notwendigen chemischen bzw. metal-

Tabelle 3-4. Chemische Zusammensetzung und Schweißverhalten der Schweißstäbe zum Gasschweißen von unlegierten und warmfesten Stählen, nach DIN EN 12536 (Auswahl).

Kurzzeichen	Chemische Zusammensetzung in Prozent [1), 2)]						Schweißverhalten der Stäbe		
	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Fließverhalten	Spritzer	Porenneigung
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.

lurgischen Reaktionen (z. B. Desoxidation, Legierungsvorgänge).

Bild 3-19
Verfahrensprinzip des Lichtbogenhandschweißens mit umhüllten Stabelektroden.

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«.

Bild 3-20 zeigt schematisch die einfache Schweißanlage, die im Wesentlichen nur aus der Schweißstromquelle, dem Elektrodenhalter und der (umhüllten) Stabelektrode besteht.

Bild 3-20
Schweißanlage für das Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden.

3.3.2.2 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.

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 Werktoffs verdampft, so dass 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 ($\sim m v^2$) 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 (nähere Einzelheiten sind in Abschn. 3.3.3.3.2 zu finden) Leistungsdichten im Bereich von 10^5 W/cm^2 bis 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 potenzielle umgewandelt wird bzw. an Orten, wo Geschwindigkeitsänderungen der Ladungsträger erzwungen werden, d. h. an der
- *Anode,* der
- *Kathode* und in der
- *Lichtbogensäule* (Teilchenzusammenstoß).

Normalerweise ist die an den Lichtbogenansatzpunkten (Anode, Kathode) entstehende Energie größer als die in der Lichtbogensäule. Die Größe des umgesetzten Energieanteils an den Polen hängt ab von dem Elektrodenwerkstoff und dem Grundwerkstoff sowie von den Einstellwerten (Strom, Spannung), mit denen der Lichtbogen betrieben wird. Die in der Lichtbogensäule erzeugte Energie bestimmt auch die Abschmelzleistung und die Einbrandtiefe beim Metall-Schutzgasschweißen mit abschmelzender Elektrode (Abschn. 3.3.3.4).

Die Energieverteilung in den drei Bereichen des Lichtbogens *Anode, Kathode* und *Lichtbogensäule* ist nicht gleichmäßig, sondern hängt im Wesentlichen von dem dort vorhandenen Spannungsgefälle ab.

Bild 3-21 zeigt den nicht-*ohm*schen 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
- *gewünschten Nahtgeometrie,* besonders der Einbrandtiefe.

Bild 3-21
Spannungsverteilung im Lichtbogen.

Dabei ist zu beachten, dass unabhängig von den genannten Punkten in erster Linie ein stabil brennender Lichtbogen erzeugt werden muss.

Beim Lichtbogenschweißen wird die Stabelektrode meist negativ, die Drahtelektrode bei den MSG-Verfahren (Abschn. 3.3.3.4) 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, d. h. 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 aufkohlen.

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 (Abschn. 3.3.2.4.2) 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*[12]. 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 »Einzelleitern« 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«.

[12] englisch: *to pinch;* abquetschen, abkneifen.

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. Es ist bekannt, dass sie für Zwangslagenschweißungen nicht besonders gut geeignet sind: Die entscheidende von der Elektrodenspitze axial wegführende Kraft ist nicht mehr vorhanden, der Tropfen bewegt sich in Richtung des Schwerefeldes.

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. Da die Ladungsträger überwiegend von der Umhüllung geliefert werden, sind nicht umhüllte, also »nackte« Elektroden nicht mit einem Wechselstromlichtbogen verschweißbar. Sie werden daher und wegen ihrer schlechten Schweißgutqualität nicht mehr hergestellt.

Zu beachten ist, dass der im Wesentlichen aus Ladungsträgern bestehende Lichtbogen durch äußere Magnetfelder leicht abgelenkt wird. Diese Blaswirkung (Abschn. 3.3.2.5.3) genannte Erscheinung muss

Bild 3-22
Abhängigkeit Lichtbogenspannung von der Stromstärke = Lichtbogenkennlinie (Parameterkurven sind Lichtbogenlänge l_1).

beim Schweißen berücksichtigt werden, sonst sind fehlerhafte Schweißungen die Folge.

Für das Verständnis des Schweißvorganges ist die Kenntnis der **Lichtbogenkennlinie** gemäß Bild 3-22 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 (Bild 3-22). Die Lichtbogenspannung erhöht sich von U_1 auf U_3, wenn die Lichtbogenlänge von l_1 auf l_3 vergrößert wird.

Bei den Einstellwerten U_3 und I_1 würde z. B. eine Stromerhöhung einen Spannungsüberschuss bewirken ($U_3 > U_{\text{Lichtbogen}}$) und die Stromstärke bis zur stabilen Lage im Schnittpunkt (U_3, I_2) treiben. Ein Verringern der Stromstärke erfordert eine über das Verfügbare hinausgehende Spannung des Bogens; die Stromstärke sinkt, bis der Bogen erlischt.

3.3.2.3 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 Gefährdung [13], dann dürfen nur Umformer, Gleichrichter bzw.

[13] 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, die Wandung ist meistens die elektrische *»Erde«*) oder in *nassen, feuchten* oder *heißen Arbeitsplätzen*.

Schweißtransformatoren[14] 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 erforderlich (60 V bis 80 V).

– Die unvermeidlichen Änderungen der Lichtbogenlänge, d. h. der *Lichtbogenspannung* U_A während des Schweißens, sollten nur zu 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 *(Stoßkurzschlussstrom* I_{KSt}*)* 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 nicht zu unterschätzender Gesichtspunkt ist die Wirtschaftlichkeit der Schweißstromquelle. Neben anderen, leicht als wichtig erkennbaren Faktoren (z. B. Anschaffungskosten, Reparatur- und Wartungskosten, Kapitaldienst) werden oft der *Wirkungsgrad* und vor allem die *Leerlaufverluste* nicht genügend beachtet. Bei den moderneren Schweißstromquellen liegen die Leerlaufverluste zwischen 250 W und etwa 700 W, sie können bei älteren Geräten aber leicht 1000 W und mehr betragen. Es kann beispielsweise angenommen werden, dass während eines Arbeitstages (8 h) eine Stromquelle ungefähr 3 h im Leerlauf betrieben wird. Bei einem mittleren Preis von etwa 0,30 € für eine kWh ergibt sich damit ein täglicher *»Leerlaufverlust«* von ungefähr 0,25 € (bei 250 W) und 1,00 € (bei 1000 W).

Bild 3-23
Statische Grenzkennlinien einer Schweißstromquelle mit fallender Kennlinie. Derartige Schweißstromquellen werden für das Lichtbogenhandschweißen, das WIG- und UP-Verfahren (überwiegend bei dickeren Drahtelektroden) verwendet.

❶, ❷ *Minimal (❶) und maximal (❷) einstellbare statische Kennlinie der Schweißstromquelle*
A_1, A_2 *Arbeitspunkte bei kurzem und langem Lichtbogen*
E *Einstellbereich der Schweißstromquelle, festgelegt durch die VDE-Prüfkennlinie* $U_A = 20 + 0{,}04 \cdot I_A$

Die *dynamischen* und *statischen* Eigenschaften der Schweißstromquelle bestimmen ihre Schweißeigenschaften. Die sich im Beharrungszustand bzw. bei langsamen Änderungen von Stromstärke und Spannung in der Stromquelle einstellenden elektrischen Werte sind durch die **statische Kennlinie** vorgegeben. Bild 3-23 zeigt die minimal (❶) und maximal (❷) 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. Im Allgemeinen lassen sich zwischen ihnen beliebig viele weitere Kennlinien einstellen; es entsteht so ein lückenloses *Kennlinienfeld*.

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 ($A_1 \leftrightharpoons A \leftrightharpoons A_2$).

Diese Änderungen der Lichtbogenlänge verursachen selbst bei einer geringeren Steilheit der Kennlinie nur eine mäßige Stromstärkeänderung ΔI. Stromquellen mit fallender Kennlinie begrenzen also bei Spannungsänderungen ΔU sehr wirksam Stromstärkeänderungen ΔI. Sie sind daher für das Lichtbogenhandschweißen erforderlich.

[14] Im Falle eines Fehlers darf die zulässige Leerlaufspannung der Schweißstromquellen (s. Werte in Tabelle 3-5) *nicht überschritten* werden und der Wechselspannungsanteil der Gleichspannung nicht größer als 48 V_{eff} werden. Schweißgeräte, die für Arbeiten bei erhöhter elektrischer Gefährdung eingesetzt werden, tragen das Kennzeichen S (früher K oder 42 V bei Wechselstrom).

Nicht alle *U,I*-Wertepaare der Kennlinien sind auch schweißtechnisch nutzbar. Die in unterschiedlicher Dicke und Umhüllung verwendeten Stabelektroden haben einen Einstellwertebereich, der näherungsweise durch die VDE-Prüfkennlinie (Bild 3-23) 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 (❶) mit der VDE-Prüfkennlinie (I_{min}) und reicht bis zum Schnittpunkt der maximal einstellbaren statischen Kennlinie (❷) mit dieser Geraden (I_{max}), wie Bild 3-23 zeigt. Mit den in diesem Bereich liegenden Wertepaaren von *U* und *I* kann verfahrensabhängig (d. h. abhängig z. B. von dem Durchmesser der Stabelektrode und ihrer Umhüllungscharakteristik) geschweißt werden.

Schweißverfahren, bei denen sich die Lichtbogenlänge nach dem Prinzip der inneren Regelung einstellt – in erster Linie sind das die MSG-Verfahren (siehe Abschn. 3.3.3.4), z. T. auch das UP-Verfahren – benötigen Schweißstromquellen mit **Konstantspannungscharakteristik**[15]. Die statische Kennlinie hat eine sehr geringe Neigung (einige Volt je 100 A), wie aus Bild 3-24 hervorgeht. Der Einstellbereich *E* dieser Schweißstromquellen wird mit Hilfe der VDE-Prüfkennlinie festgelegt:

$U_A = 14 + 0{,}05 \cdot I_A$.

Diese Beziehung gilt bis $I_A = 600$ A;
für $I_A > 600$ A ist $U_A = 44$ V = konst.

Bild 3-24
*Statische Grenzkennlinien einer Konstantspannungs-Schweißstromquelle (**CP** = **C**onstant **P**otential). Schweißstromquellen mit CP-Charakteristik werden für die MSG-Verfahren und das UP-Verfahren (vorwiegend für dünnere Drahtelektroden) verwendet.*
❶, ❷ *Minimal (❶) und maximal (❷) einstellbare statische Kennlinie der Schweißstromquelle*
E *Einstellbereich der Schweißstromquelle. Er wird mit Hilfe der VDE-Prüfkennlinie $U_A = 14 + 0{,}05 \cdot I_A$ festgelegt*

Eine wichtige Kenngröße der Schweißstromquellen ist die **Einschaltdauer (ED),** DIN EN 60974. Sie ist ein praxisnaher Maßstab für die Belastbarkeit der Stromquelle, der von der Dauer der Lichtbogenbrennzeit abhängt. Die Einschaltdauer ist das prozentuale Verhältnis der Lichtbogenbrennzeit zu der genormten Spielzeit von zehn Minuten. Danach unterscheidet man den *Dauerschweißbetrieb (DB)* mit einer Einschaltdauer ED = 100 %, den *Nennhandschweißbetrieb (Nenn-HSB)*, mit einer ED = 60 % und den *Handschweißbetrieb (HSB)* mit einer ED von 35 %. Auf dem Leistungsschild der Schweißstromquelle sind die von ihr ohne Gefahr für die Stromquelle lieferbaren Ströme für diese genormten Schweißbetriebsarten angegeben.

Im Folgenden werden nicht nur die zum Lichtbogenhandschweißen verwendeten Schweißstromquellen besprochen, sondern auch grundsätzliche Informationen über die zum WIG- (Abschn. 3.3.3.3.1) und MSG-Schweißen (Abschn. 3.3.3.4) 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**. Wegen der schweren, rotierenden metallischen Massen wirken sich Änderungen der Netzspannung nur geringfügig auf Änderungen der Schweißspannung aus. Die Geräuschentwicklung ist beträchtlich. Der Wartungsaufwand ist groß, und die Anschaffungskosten sind im Vergleich zu denen anderer Stromquellen am größten. Wegen seiner prinzipbedingten Nachteile (Geräusche; sehr lange Reaktionszeit, d. h. nur mäßiges dynamisches Verhalten; Preis) werden Schweißumformer kaum noch eingesetzt. Ihre Entwicklung ist bereits seit längerer Zeit eingestellt worden.

[15] Sie wird auch als CP-Charakteristik (**C**onstant **P**otential) bezeichnet.

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 Stabelektroden (z. B. rein basische Stabelektroden) können nicht verschweißt werden, weil er nur Wechselstrom liefert. Er wird einphasig angeschlossen, wodurch sich eine sehr ungünstige, unsymmetrische Netzbelastung ergibt. Wegen des sich ständig ändernden magnetischen und elektrischen Feldes ist die Blaswirkung (Abschn. 3.3.2.5.3) 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 φ [16] ist verhältnismäßig »schlecht«.

Bild 3-25
Kennlinienverstellung bei Schweißtransformatoren mit Hilfe eines Streukerns (Streujoch).
a) Bildliche Darstellung
b) Schaltplan

[16] In einem Wechselstromkreis beträgt die
Scheinleistung: $P_S = U \cdot I$, die
Wirkleistung: $P_W = U \cdot I \cdot \cos\varphi$ und die
Blindleistung: $P_B = U \cdot I \cdot \sin\varphi$.
Nur die (*ohm*sche) Wirkleistung lässt sich in Energie umwandeln. Die Blindleistung wird zum Aufbau der elektrischen und magnetischen Felder in den Schweißstromquellen gebraucht. Sie führt zu einer unnötigen Belastung des Netzes. Deshalb wird man schon aus wirtschaftlichen Gründen dafür sorgen, dass sie möglichst klein ist, d. h. der cos φ möglichst groß ist. Das wird z. B. durch Kompensieren mit Kondensatoren erreicht. Der Leistungsfaktor wird seit einiger Zeit mit λ bezeichnet, da in vielen Fällen der Stromverlauf nicht mehr sinusförmig ist.

Bild 3-26
Schweißtransformator mit stufenloser Kennlinienverstellung mittels Transduktor.
a) Bildliche Darstellung
b) Schaltplan

Die erforderliche fallende Kennlinie kann mit einfachen Mitteln erzeugt werden. Weit verbreitet ist die Änderung des induktiven Widerstandes mit einem verstellbaren *Streukern (»Streujoch«)*, Bild 3-25. Bei ausgefahrenem Streukern ist der magnetische Nebenschluss am kleinsten, d. h. der Schweißstrom am größten: Das ist die maximal einstellbare Kennlinie, siehe Bild 3-23. Ein Nachteil dieser einfachen, robusten Bauart ist die sehr aufwändige Möglichkeit, eine Fernverstellung zu realisieren.

Mit einem *Transduktor* als Stellglied lässt sich die fallende Kennlinie weitaus eleganter erzeugen, Bild 3-26. Dieses auch als *gleichstromvormagnetisierbare Drossel* bezeichnete Bauteil besteht aus dem Eisenkern, der Arbeitswicklung (für den Schweißstrom) 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. Sein großer induktive Widerstand ist die Ursache für seine nur mäßigen dynamischen Eigenschaften, d. h. dem erheblich verzögerten Strom- bzw. Spannungsanstieg bei steilflankigen Impulsen. Diese relativ große »Grundinduktivität« verhindert auch bei den MSG-Schweißverfahren (Abschn. 3.3.3.4) das Einstellen hoher Tropfenfrequenzen.

Der **Schweißgleichrichter** besteht aus einem Transformator und einem Gleichrichtersatz (überwiegend Silicium). Der Netzanschluss kann einphasig sein (Einweg- oder meistens Brückenschaltung, Bild 3-27), er ist aber aus technischen Gründen meistens dreiphasig (Dreiphasentransformator), weil die Netzbelastung dann sehr viel gleichmäßiger ist und ein Gleichstrom mit einer deutlich geringeren Welligkeit erzeugt wird. Die Stromwelligkeit kann durch Drosseln *(»Glättungsdrossel«)* im Schweißstromkreis noch weiter verringert werden. Daher werden Einphasengleichrichter in der Schweißpraxis kaum noch verwendet. Der Dreiphasengleichrichter wird für das Lichtbogenhandschweißen und die MSG-Schweißverfahren sehr häufig eingesetzt.

Bild 3-27
Schaltung und Stromverlauf von einphasig angeschlossenen Schweißgleichrichtern.
a) Einwegschaltung
b) Brückenschaltung

Mit den bisher besprochenen Schweißstromquellen können die Einstellwerte nur *eingestellt*, nicht aber *geregelt* werden. Der »Regelkreis« besteht aus dem Schweißer, der den Istzustand erfasst, die für ihn erkennbare Qualität der Schweißnaht mit der geforderten vergleicht (Sollzustand) und eventuelle Abweichungen nur manuell an der Stellgröße ausgleichen kann.

Für eine hinreichend genaue, d. h. sinnvolle Regelung sind ausreichend kleine Regelzeiten erforderlich, die sich nur mit *elektronischen* Einrichtungen erreichen lassen. Derartige Schweißstromquellen bezeichnet man als elektronisch geregelt. Als elektronische Stellglieder werden
– Thyristoren und
– Transistoren
verwendet.

Thyristoren sind Gleichrichter, deren Stromdurchgang mit Hilfe negativer (oder positiver) Steuerspannungen geregelt wird. Diese Halbleiterbauelemente sind aus vier oder mehr Halbleiterschichten wechselnder Dotierung aufgebaut. Bei Wechselstrom kann kein Strom während der negativen Halbwelle fließen, während der positiven nur, wenn ein Steuerstrom fließt. Der Thyristor wird vom Steuerstrom *(»Gatestrom«)* für den Durchlass des Arbeitsstromes geschaltet *(»gezündet«)*. Je nach der Phasenlage des Steuerstromes lassen sich die Halbperioden des gleichgerichteten Stromes *»anschneiden«*. Sein Effektivwert kann also stufenlos und nahezu verlustfrei gesteuert werden *(Phasenanschnittsteuerung)*. Die Regelzeiten der Thyristoren betragen einige Millisekunden.

Transistoren sind Halbleiterelemente, die elektrische Leistungen mit sehr geringen Strömen extrem schnell steuern und verstärken können [17]. Da selbst moderne Leistungstransistoren nur etwa mit 30 A bis 40 A belastbar sind, müssen in Schweißstromquellen ausreichend viele Transistoren in einer Kaskadenanordnung parallel geschaltet werden.

Bild 3-28
Analoge Schweißstromquelle (Schweißgleichrichter mit Transistorregelung), nach Oerlikon.

[17] Die Regelzeiten der Transistoren liegen im Bereich einiger Mikrosekunden.

Bild 3-29
Schematische Darstellung einer Inverterschweißstromquelle.
a) Schaltplan
b) Regeln des Schweißstroms mittels Impulsweitenmodulation durch Ändern der Öffnungsphase

Bild 3-28 zeigt das Schaltbild einer transistorgeregelten analogen Schweißstromquelle. Die kurzen Reaktionszeiten ermöglichen die praktisch sofortige Regelung bei Störungen im Schweißstromkreis bzw. auch beliebige Stromverläufe z. B.:

– Impulse gewünschter Form: z. B. Anstieg der Impulsflanken und Impulsbreitenänderung;
– bestimmter Verlauf der Stromkurve: z. B. die für eine Reinigungswirkung günstige *»Square-Wave«*-Technik erzeugt durch ihre rechteckige Stromform aber einen extremen Geräuschpegel. Mit Hilfe der sog. *Fuzzylogik* (fuzzy: »verschwommen«) wird hier z. B. der leiseste und stabilste Lichtbogen eingestellt.

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 (abhängig vom Arbeitspunkt bei ca. 50 % bis 80 %). Aus diesem Grunde sind sie in der Praxis weitgehend verschwunden. Sie haben aber gegenüber den weiter unten besprochenen Inverterstromquellen auch wesentliche Vorteile. Aufgrund des Fehlens der Ausgangsinduktivität in Reihe zur Lichtbogenlast weisen sie keine Ausgangswelligkeit auf und besitzen eine große Ausgangsdynamik.

Der Wartungsaufwand für Schweißgleichrichter ist deutlich geringer als der für Umformer, aber merklich größer als der für Schweißtransformatoren. Die anfängliche erhebliche Störanfälligkeit der Elektronik (Gleichrichterelemente) ist behoben. Die Geräte gelten inzwischen als sehr betriebssicher. Wegen der guten Schweißeigenschaften, Regel- und Kontrollmöglichkeiten werden sie in der Praxis zunehmend auf Kosten der sehr viel teureren und unangenehm geräuschvollen Umformer verwendet.

Tabelle 3-5. 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 φ)	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 Kompensation* [2] *mit Kompensation* [3] *Werte in Klammern gelten für erhöhte elektrische Gefährdung*

Bei den neueren **Inverterschweißstromquellen** wird der dem Netz entnommene Wechselstrom mit Hilfe eines Stromrichters gleichgerichtet und anschließend mit einem thyristor- oder meistens transistorgesteuerten als Schalter wirkenden *Inverter* in positive und negative Stromimpulse umgewandelt, Bild 3-29. Die 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, Bild 3-29b). Die Transistoren bei dieser Anordnung arbeiten wie mechanische Ein/Ausschalter. 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 Kraterfülleinrichtung, Abschn. 3.3.3.3.1.2), 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 Verringerung 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** (bis 200 kHz sind möglich) ist ein mit Netzfrequenz betriebener Transformator und die Anordnung der Halbleiterschalter auf der Sekundärseite des Transformators, Bild 3-30. Der Transistor arbeitet als Schalter, d. h., die Schaltgeschwindigkeit ist extrem groß. Diese Bauart wird vor allem für (sehr) große Schweißleistungsbereiche angewendet.

Bild 3-30
Schematische Darstellung einer sekundär getakteten Schweißstromquelle.

Tabelle 3-5 zeigt die wichtigsten Eigenschaften der Schweißstromquellen im Vergleich.

3.3.2.4 Zusatzwerkstoffe; Stabelektroden

Aus verfahrenstechnischen Gründen (leichteres Zünden, stabiler Lichtbogen) und wegen metallurgischer Eigenschaften (wesentlich bessere Gütewerte) werden zum Lichtbogenhandschweißen überwiegend *umhüllte Stabelektroden* verwendet. Die Umhüllung wird um den Kernstab ausschließlich gepresst *(Pressmantelelektroden)*. Wegen der großen Gefahr, die durch dissoziierte bzw. ionisierte Feuchtigkeit im Lichtbogenraum entsteht, werden die Elektroden vor dem Verpacken bei unterschiedlichen Temperaturen getrocknet [18].

Während bei der *»Hüttenmetallurgie«* zum Herstellen des Werkstoffs mindestens einige zehn Minuten zur Verfügung stehen, muss das Schweißgut wegen der spezifischen Besonderheiten des Schweißprozesses (punktförmige Wärmequelle, große Leistungsdichte, hohe Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit) in einigen Sekunden desoxidiert und (oder) auflegiert werden. Allerdings sind die für das Ergebnis entscheidenden Reaktionstemperaturen meistens um einige Hundert Grad höher als im Hüttenwerk. Insgesamt kann daher davon ausgegangen werden, dass das entstehende Primärgefüge nicht so weit vom thermodynamischen Gleichgewichtszustand entfernt ist, wie aufgrund der geschilderten Zusammenhänge vermutet werden könnte.

[18] Die sauer- und rutil-sauer-umhüllten Stabelektroden werden bei etwa 100°C, die basisch-umhüllten bei etwa 250°C bis 300°C getrocknet.

3.3.2.4.1 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 (Abschn. 3.3.2.4.3) In der Normung wurden bisher (DIN EN 499) die verschiedenen Umhüllungsdicken durch die folgenden Kurzzeichen unterschieden:

- **Dünn-umhüllt (d)** bis zu der Gesamtdicke von 120 %,
- **mitteldick-umhüllt (m)** über 120 % bis 155 % und
- **dick-umhüllt (s)** über 155 %,
  bezogen auf den Kernstabdurchmesser.

In der Nachfolgenorm DIN EN ISO 2560 wird die Umhüllungsdicke nicht mehr explizit mit Hilfe von Kurzzeichen angegeben. Lediglich die Bezeichnung des Umhüllungstyps »RR« weist noch direkt auf eine dick-umhüllte rutile Stabelektrode hin.

Mit der Umhüllungsdicke ändern sich die Schweißeigenschaften und die Gütewerte des Schweißguts erheblich. Mit zunehmender Menge an Umhüllungsbestandteilen laufen nach dem Massenwirkungsgesetz die metallurgischen Reaktionen, wie z. B. Auflegieren, Desoxidieren und Entschwefeln, *vollständiger* ab. Die mechanischen Gütewerte, vor allem die Zähigkeit, nehmen damit zu. Wegen der großen Menge der entwickelten Gase ist der Schutz des Schweißschmelze sehr gut. Die Viskosität der Schmelze nimmt aber ab wegen der zunehmenden Wärmemenge, die aus den zahlreichen exothermen Verbrennungsvorgängen der Desoxidationsmittel Mangan und Silicium (evtl. auch der Legierungselemente) entstehen.

Die Stabelektrode besteht aus einem metallischen Kern, dem *Kernstab*, und der umpressten *Umhüllung* [19]. Diese besteht aus Erzen, sauren, basischen und organischen Stoffen. Die Umhüllung bestimmt das Verhalten des Schweißguts bzw. der Elektrode (z. B. das *»Verschweißbarkeitsverhalten«: Spaltüberbrückbarkeit*, *Zwangslagenverschweißbarkeit*) und die mechanischen Gütewerte der Schweißverbindung in hohem Maße.

[19] Zum Verringern der Reibung an der Pressdüsenwand bei der Herstellung werden jedem Stabelektrodentyp Gleitmittel zugesetzt. In der Hauptsache wird dafür *wasserhaltiges* Natron- oder Kaliwasserglas (Na_2SiO_3 bzw. K_2SiO_3) verwendet.

Die Umhüllung hat die folgenden Aufgaben zu erfüllen:

- *Stabilisieren des Lichtbogens*
  Durch Stoffe, die eine geringe Elektronenaustrittsarbeit haben (z. B. Salze der Alkalien Natrium, Kalium und Erdalkalien Calcium, Barium), wird die Ladungsträgerzahl im Lichtbogen wesentlich erhöht, d. h. die Leitfähigkeit der Lichtbogenstrecke verbessert. Der Bogen zündet besser und brennt stabiler.
- *Bilden eines Schutzgasstroms*
  Das Schmelzbad und der Lichtbogenraum müssen zuverlässig vor dem Einfluss atmosphärischer Gase (Luft) geschützt werden, da sonst ein starker Abbrand der Legierungselemente und die Aufnahme von Stickstoff und anderen Gasen, verbunden mit einer entscheidenden Verschlechterung der mechanischen Gütewerte (vor allem der Zähigkeit!), die Folge wären. Durch Schmelzen und Verdampfen der Umhüllungsbestandteile entsteht die schützende Gasatmosphäre. Außerordentlich wirksam ist das aus Carbonaten, wie z. B. aus Calciumcarbonat entstehende Kohlendioxid: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$. Die Umhüllung aller Elektroden enthält in unterschiedlichen Mengen Wasser, das im Lichtbogen in die metallurgisch sehr schädlichen Gase Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird.

Oxidationsvorgänge

durch freien Sauerstoff:
1: $Fe + O \rightarrow FeO$
$Mn + O \rightarrow MnO$

durch oxidische Schlacken:
2: $SiO_2 + 2 \cdot Cr \rightarrow 2 \cdot CrO + Si$
$Fe_2O_3 + Fe \rightarrow 3 \cdot FeO$

Desoxidations- und Legierungsvorgänge

durch Kohlenstoff:
3: $FeO + C \rightarrow Fe + CO$

durch oxidische Schlacken:
4: $SiO_2 + 2 \cdot Fe \rightarrow 2 \cdot FeO + Si$
$MnO + Fe \rightarrow FeO + Mn$
5: $MeO + Fe \rightarrow FeO + Me$

Bild 3-31
Metallurgische Vorgänge beim Schweißen mit umhüllten Stabelektroden (stark vereinfacht).

- *Bilden einer metallurgisch wirksamen Schlacke.* Die den Lichtbogenraum durchlaufenden Werkstofftröpfchen sind von einem Schlackenfilm umgeben, der den flüssigen Werkstoff vor Luftzutritt schützt. Auch das Auflegieren bzw. Desoxidieren erfolgt über den Schlackenfilm, weil Legierungselemente und auch die Desoxidationsmittel dem Schweißgut meistens über die Umhüllung in Form feinverteilter Vorlegierungen zugeführt werden. 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 sich nicht mehr schädlich auswirken. Auch diese metallurgischen Aufgaben übernimmt die Schlacke. Das Entgasen und das Entschlacken = Reaktionsprodukte der Desoxidationsbehandlung!) der Schmelze werden durch die flüssige, schlecht wärmeleitende Schlacke erleichtert. Ihr Sauerstoffgehalt bestimmt in großem Umfang die Viskosität der Schmelze, d. h. die Größe und die Zahl der Tropfen. Die gleichzeitige Abnahme der Abkühlgeschwindigkeit begrenzt die Härtespitzen in der Wärmeeinflusszone. Schließlich formt und stützt die Schlackendecke die Schweißnaht.

3.3.2.4.2 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 Metalltröpfchen stattfinden. Der Hauptort aller metallurgischen Reaktionen ist die Elektrodenspitze, weil hier die höchsten (Reaktions-)Temperaturen im System herrschen. Bild 3-31 zeigt die Vorgänge. Ein Teil der dem Schmelzbad zugeführten Legierungselemente geht durch Oxidation und Verdampfen im Lichtbogenraum sowie durch Spritzerbildung verloren.

Die Oxidationsvorgänge laufen im Wesentlichen über den Schlackenfilm ab, der den flüssigen Metalltropfen umhüllt. Für die Oxidation durch *freien Sauerstoff* gelten z. B. folgende Reaktionsgleichungen, Bild 3-31:

$$Fe + O_2 \rightarrow 2 \cdot FeO$$
$$Mn + O_2 \rightarrow 2 \cdot MnO.$$

Die Oxidation durch *oxidische Schlacke* findet an der Phasengrenze Metall-Schlacke statt:

$$Fe_2O_3 + Fe \rightarrow 3 \cdot FeO$$
$$SiO_2 + 2 \cdot Cr \rightarrow 2 \cdot CrO + Si.$$

Das FeO geht in die Schlacke und die Metallschmelze über. Durch oxidische Schlacken (und freien Sauerstoff) werden große Mengen von Legierungselementen verschlackt, z. B.:

$$Cr + O \text{ (bzw. } SiO_2) \rightarrow CrO.$$

Der Sauerstoff ist im Grunde der einzige von der Umhüllung gelieferte Bestandteil mit schädlichen Auswirkungen. Das Schweißgut *muss* daher desoxidiert werden.

Die Desoxidation der Schmelze erfolgt mit Elementen, die eine größere Affinität zum Sauerstoff haben als Eisen. Die Reaktionsprodukte können gasförmig (CO) oder fest sein (MnO, SiO_2), d. h., sie bilden Poren oder Einschlüsse unterschiedlicher Größe und Form (z. B. eckig, rundlich, flächig).

Der schmelzflüssige Tropfen wird mit Kohlenstoff (C) vordesoxidiert (Bild 3-31):

$$FeO + C \rightarrow CO + Fe.$$

Tabelle 3-6. Wichtige Umhüllungsbestandteile von Stabelektroden, eingeteilt nach ihrer metallurgischen Wirksamkeit.

basisch	sauer	oxidierend	reduzierend (desoxidierend)
$BaCO_2$ [1)] K_2CO_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_2O_3 [3)] Fe_3O_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

Das entstandene Gas (CO) begünstigt die Tropfenablösung. Die weitere Desoxidation geschieht über das SiO_2 in der den Tropfen umhüllenden Schlacke:

$$SiO_2 + 2 \cdot Fe \rightarrow 2 \cdot FeO + Si.$$

Das FeO bleibt jetzt vorwiegend in der Schlacke, Silicium wandert in den Metalltropfen und desoxidiert die Schmelze beim Abkühlen:

$$2 \cdot FeO + Si \rightarrow SiO_2 + 2 \cdot Fe.$$

Wegen der kurzen Erstarrungszeit ist es schwierig, den Gehalt an festen Reaktionsprodukten, wie z. B. SiO_2 und MnO, zu begrenzen.

Der Legierungseffekt (Übergang der Legierungselemente von der Umhüllung in das Schweißbad) wird weitgehend von der Oxidationsneigung der Elemente bestimmt, d. h. von deren Sauerstoffaffinität. Die Reaktionsgleichung für das Auflegieren lautet allgemein:

$$MeO + Fe \rightarrow FeO + Me.$$

Hierbei liegt das Legierungselement Me in Oxidform als MeO in der flüssigen Schlacke vor.

Bild 3-32
Verhalten der Lichtbogenatmosphäre und der Schlacke bei den wichtigsten Stabelektrodentypen, schematisch.

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 Gütewerte des Schweißguts – das gilt vor allem für die (Kerb-)Schlagzähigkeit! – des mit basisch-umhüllten Stabelektroden hergestellten sehr sauberen Schweißguts.

Die Umhüllungsbestandteile werden nach ihrer chemischen Wirksamkeit eingeteilt in

- saure,
- basische,
- oxidierende (sauerstoffabgebende) und
- reduzierende (sauerstoffbindende) Stoffe.

Einige wichtige Bestandteile der Umhüllung sind in Tabelle 3-6 aufgeführt. Danach verhalten sich die Nichtmetalloxide vorwiegend *sauer*, Metalloxide niedriger Oxidationsstufen reagieren vorwiegend *basisch*. Überwiegt ein chemisch saures, neutrales oder basisches Verhalten der aus der Umhüllung entstandenen Schweißschlacke, dann spricht man von sauer-umhüllten, rutil-umhüllten (neutraler Typ) oder basisch-umhüllten Stabelektroden.

Oxidierende Bestandteile spalten im Lichtbogen Sauerstoff ab, der zum Abbrand der Desoxidations- und Legierungselemente führt. Die mechanischen Gütewerte werden mit zunehmendem Sauerstoffgehalt schlechter, die Viskosität der Schmelze und ihre Oberflächenspannung nehmen stark ab. Dadurch wird ein Werkstoffübergang in Form feinster Tröpfchen begünstigt *(sprühregenartiger Werkstoffübergang)*. Das Sauerstoffangebot ist bei den sauer-umhüllten Stabelektroden am größten, bei den basisch-umhüllten am kleinsten.

3.3.2.4.3 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),* Bild 3-32.

Sauer-umhüllte Stabelektroden – sie haben das Kennzeichen A [20] – enthalten in der Umhüllung große Anteile Schwermetalloxide (oxidische Eisen- und Manganerze, Fe_2O_3, Fe_3O_4, SiO_2). 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 0,1 %

[20] englisch: acid; sauer, Säure.

extrem groß und die wichtigste Ursache für die verhältnismäßig schlechten mechanischen Gütewerte des Schweißguts.

Aufgrund der bei der Verbrennung der Legierungselemente (hauptsächlich Mangan und Silicium) freiwerdenden Wärmemenge (stark exothermer Vorgang) und der sauerstoffhaltigen Lichtbogenatmosphäre (geringe Viskosität der Metallschmelze) ergeben sich

- 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 sind entweder ein hinreichend zähflüssiges Schweißgut, eine geeignete Elektrodenführung (nur bedingt tauglich) oder geeignete Badsicherungen erforderlich, Bild 3-33, und
- eine erheblich *eingeschränkte Zwangslagenverschweißbarkeit* der sauer-umhüllten Stabelektroden.

Die dünnflüssige Schlacke formt sehr glatte Nahtoberflächen. Die »schöne« Nahtzeichnung sollte aber nicht darüber hinweg täuschen, dass die Gütewerte der Schweißverbindung verhältnismäßig schlecht sind. Der Anwendungsbereich dieser Stabelektroden ist daher sehr begrenzt und nimmt ständig weiter ab auf Kosten der rutil- und basisch-umhüllten. Beim Schweißen stark verunreinigter Stähle (durch Phosphor, Schwefel oder durch Seigerungen) oder höhergekohlter Stähle (C > 0,25 %) entstehen leicht Heißrisse, Poren oder infolge der geringen Verformbarkeit des Schweißguts Härterisse (Kaltrisse) in der Wärmeeinflusszone (Abschn. 3.2.3). Die sauer-umhüllten Stabelektroden können dünn- oder meistens dick-umhüllt sein (s. Abschn. 3.3.2.4.3).

Der Hauptbestandteil der Umhüllung **rutil-umhüllter Stabelektroden** ist Titandioxyd mit dem Kennzeichen R [21], das im Lichtbogen wesentlich schwächer oxidierend wirkt als Fe_2O_3, Fe_3O_4 oder MnO_2. Die annähernd neutrale Lichtbogenatmosphäre vermindert 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 B(R) oder RR(B)) verschoben sein. Entsprechend groß ist der Bereich der erzielbaren Schweißeigenschaften und mechanischen Gütewerte. Die rutil-umhüllte Stabelektrode ist daher der am häufigsten verwendete Stabelektrodentyp. Der rutil-saure Stabelektrodentyp RA hat sich im Laufe der Zeit wegen seiner günstigen Kombination der Verschweißbarkeitseigenschaften und der erreichbaren Gütewerte zu einem weiteren Grundtyp entwickelt.

Bei mitteldick-rutil-umhüllten Stabelektroden ist die Spaltüberbrückbarkeit und die Zwangslagenverschweißbarkeit sehr gut, die Heißrissempfindlichkeit gering. Sie ist vor allem zum Schweißen der Wurzellagen geeignet, wenn die damit erzielbaren Gütewerte ausreichend sind.

Das mit dick-rutil-umhüllten Stabelektroden hergestellte Schweißgut besitzt gute bis sehr gute mechanische Gütewerte. Ihre (Wieder-)Zündfähigkeit ist wegen der großen elektrischen Leitfähigkeit der Schlacke ausgezeichnet und besser als bei allen anderen Stabelektrodentypen.

Die Umhüllung der **basisch-umhüllten Stabelektroden** mit dem Kennzeichen B [22] enthält etwa 80 % Calciumoxid (CaO) und Calciumfluorid (CaF_2), also basische Bestandteile (Tabelle 3-6), die kaum Sauerstoff in der Lichtbogenatmosphäre abspalten.

Zum Schweißen der Wurzellage (offener Spalt!) sind ein hinreichend zähflüssiges Schweißgut oder geeignete Badsicherungen erforderlich.

Bild 3-33
Typischer Aufbau einer schmelzgeschweißten Stumpfnaht.

[21] Diese Bezeichnung leitet sich von Rutil (TiO_2), dem wichtigsten titanhaltigen Erz ab.

[22] englisch: basic; basisch

Die Schlacke ist neutral bis reduzierend (Bild 3-32) 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 Gütewerte 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 ($T_{ü.27} = -70\,°C$, *Charpy*-V-Proben) des Schweißguts und dessen sehr geringer Wasserstoffgehalt. Mit trockenen Stabelektroden lassen sich leicht Werte von 5 cm^3/100 g Schweißgut erreichen. Diese Eigenschaft macht die B-Stabelektroden zum Schweißen der niedriglegierten, feinkörnigen Vergütungsstähle hervorragend geeignet.

Wegen ihrer guten Legierungsausbeute werden sie zum Schweißen legierter Stähle überwiegend verwendet. Sie sind dick-umhüllt und haben einen mittel- bis grobtropfigen Werkstoffübergang (»kaltgehend«) und sind in jeder Position verschweißbar, einige von ihnen auch mäßig gut in der Fallnahtposition (von oben nach unten, Bild 3-6). Demnach ergeben sich die folgenden Anwendungsbereiche:

- *Verunreinigte Stähle:*
  Z. B. *Thomas*stahl, 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 (oder) stark verspannte Konstruktionen:*
  Die erforderliche (Kalt-)Zähigkeit (d. h. niedrige Übergangstemperatur der Kerbschlagzähigkeit, ein extrem geringer Wasserstoffgehalt im Schweißgut, sowie eine extrem hohe Bruchverformung) lässt sich nur mit den basisch-umhüllten Stabelektroden erreichen.

Die beschriebenen Eigenschaften sind aber nur dann vollständig nutzbar, wenn einige Besonderheiten im Umgang mit der B-Elektrode 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 °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: $Al_2O_3 \cdot 2\,SiO_2 \cdot 2\,H_2O$). Daraus ergeben sich bestimmte Konsequenzen im Hinblick auf das Verschweißen dieser Elektroden. Der Lichtbogen muss möglichst kurz sein, d. h. die Stabelektrode sehr steil gehalten werden. Pendeln der Elektrode ist möglichst zu vermeiden, anderenfalls besteht die Gefahr, dass Feuchtigkeit aus der Atmosphäre aufgenommen wird und es z. B. zur Porenbildung kommt. Das Ausgasen des sehr zähflüssigen Schweißguts ist prinzipiell erschwert. Mit Hilfe größerer Schmelzbäder können die Entgasungsbedingungen aber deutlich verbessert werden. Der fachgerechte Umgang mit diesem Elektrodentyp ist aufwändiger als der mit jeder anderen Stabelektrodensorte. Der Schweißer muss mit ihren Besonderheiten in speziellen Schulungen vertraut gemacht werden.

Die Umhüllung enthält einen großen Anteil Calciumfluorid (CaF_2), das Elektronen bindet, d. h. den Elektronenstrom in Richtung Anode schwächt und so die Ionisation behindert. Rein basische Stabelektroden sind daher kaum mit Wechselstrom, sondern nur mit Gleichstrom am positiven Pol[23] 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 C[24] 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 vorlaufend, den Schweißprozess empfindlich stören würde.
- Der Einbrand sollte möglichst tief sein, weil als Folge der großen Schweißgeschwindigkeit die

[23] Die zellulose-umhüllten Stabelektroden werden ebenfalls am positiven Pol verschweißt.

[24] englisch: cellulose; Zellulose

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.

3.3.2.4.4 Bedeutung des Wasserstoffs

Der Wasserstoff beeinträchtigt die Kerbschlagzähigkeit sehr stark. Insbesondere bei den vergüteten (schweißgeeigneten) 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 (Juli 2005) vereinheitlicht 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. Diese erzeugen den für die jeweilige Stabelektrode umhüllungstypischen *Grundwasserstoffgehalt*. Nach dem DVS-Merkblatt 0957 ist die *Ausgangsfeuchtigkeit* der Stabelektrode der Wassergehalt der Umhüllung unmittelbar vor ihrer Verpackung.
- Die von dem Wasserstoffpartialdruck, d. h. von der relativen Feuchte und der Temperatur der umgebenden Luft abhängigen *Umgebungsfeuchtigkeit*. Sie wird je nach der Beschaffenheit der Umhüllung zeitabhängig in die Umhüllung aufgenommen. Die *Gesamtfeuchtigkeit* ist die Summe aus Ausgangsfeuchtigkeit und Umgebungsfeuchtigkeit.
- Falsche Handhabung und (oder) eine ungeeignete Schweißtechnologie: Zu langer Lichtbogen (Luft kann in den Lichtbogenraum gelangen), falsche Einstellwerte erschweren Ausgasen der Schmelze, Oberflächenbeläge bestehen oft aus vergasbaren Bestandteilen.

Für die basisch-umhüllten Stabelektroden erweist es sich als sinnvoll und notwendig, die Neigung der Umhüllung zu definieren, während der Lagerung Feuchtigkeit aufzunehmen. Diese Eigenschaft wird *Feuchteresistenz* genannt. Sie kann z. B. durch die Zeit bestimmt werden, innerhalb der die Stabelektrode während der Lagerung in definierten Befeuchtungsräumen den Wasserstoffgehalt von max. 5 ml/100 g Schweißgut nicht überschreitet. Je größer diese Zeitspanne ist, desto unkritischer verhält sich die Elektrode bei einer nicht vorschriftsmäßigen Lagerung bzw. Trocknung durch den Verarbeiter.

Aufgrund neuerer Entwicklungen in der Stahlherstellung (Produktion unterschiedlicher in aller Regel vergüteter schweißgeeigneter, daher extrem wasserstoffempfindlicher Baustähle) besteht der Wunsch, Stabelektroden zur Verfügung zu haben, die Schweißgüter mit einem Wasserstoffgehalt von weniger als 3 ml/100 g möglichst reproduzierbar erzeugen.

Die Vorteile dieser extrem wasserstoffarmen Stabelektroden sind:

- Auf ein Vorwärmen kann verzichtet bzw. die Vorwärmtemperatur deutlich reduziert werden.
- Feuchteresistente Elektroden können Feuchtigkeit aus der Atmosphäre nur sehr langsam aufnehmen. Dann entfällt die Notwendigkeit, für die rückgetrockneten Elektroden beheizte Köcher zur Verfügung stellen zu müssen.

Bei gleicher Umhüllungsfeuchtigkeit (= Gesamtfeuchtigkeit) hat die Ausgangsfeuchtigkeit einen sehr viel größeren Einfluss auf den Wasserstoffgehalt des Schweißguts als die durch *kapillare Kräfte* aufgenommene. Diese ist weniger fest an die Umhüllung gebunden als die Ausgangsfeuchtigkeit und wird z. T. während des Schweißens durch Widerstandserwärmung aus der Umhüllung ausgetrieben. Die über den Lichtbogenraum praktisch immer eindringende Feuchtigkeit hängt stark von der Lichtbogenlänge, d. h. der Schweißspannung ab. Die Schweißspannung, ebenso wie der Sauerstoff- und Stickstoffgehalt, nehmen mit zunehmender Lichtbogenlänge stark zu.

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 (Entwurf 6/2009) mit der Quecksilbermethode bestimmt.
- Die Feuchteresistenz der Umhüllung von Stabelektroden. Die Vorschriften für ihre Ermittlung und prüftechnische Hinweise sind zu finden in DIN EN ISO 14372 (Entwurf 9/2009).

Bei der Entwicklung und Verwendung der extrem wasserstoffarmen umhüllten Stabelektroden sind einige physikalische Gesetzmäßigkeiten zu beachten. In erster Linie ist zu berücksichtigen, dass die Bedeutung der Umgebungsfeuchtigkeit um so größer ist, je niedriger der zu messende Wasserstoffgehalt im Schweißgut ist. Die Messung des aufgenommenen Wasserstoffs für nur ein »Normklima« ist daher nicht ausreichend. Für Schweißarbeiten unter vom Normklima abweichenden klimatischen Bedingungen müssen die von der Luftfeuchte abhängigen meistens sehr viel größeren Wasserstoffgehalte bekannt sein. Schweißungen z. B. an Konstruktionen im Offshorebereich oder in anderen Gebieten mit hoher Luftfeuchtigkeit sind Beispiele für extreme klimatische Bedingungen.

Häufig wird die Bedeutung des Taupunktes unterschätzt. Vor allem unter Baustellenbedingungen (Baugelände ist i. Allg. nicht beheizt!) ist zu beachten, dass ein Unterschreiten dieses von der Umgebungstemperatur abhängigen 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 °C.

3.3.2.4.5 Normung der umhüllten Stabelektroden

Die bisher verbindliche Norm DIN EN 499 wurde 2006 durch die DIN EN ISO 2560 ersetzt. Sie legt die Anforderungen (Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften) für die Einteilung umhüllter Stabelektroden im Schweißzustand für das Lichtbogenhandschweißen unlegierter und mikrolegierter Stähle mit einer Mindeststreckgrenze bis zu 500 N/mm² fest. 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 ist unter Anwendung des sog. *Kohabitationsprinzips* (lat.: co habere = zusammenwohnen; eine etwas ungeschickte Wortwahl, weil *»Kohabitation«* auch die medizinische Bezeichnung für Geschlechtsverkehr ist!) erarbeitet worden. Hierbei werden für denselben Gegenstand der Normung *zwei* Merkmalbeschreibungen »A« und »B« festgelegt. Die Einteilung nach dem System »A« entspricht dabei weitestgehend 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

Tabelle 3-7. Kennzeichen für Festigkeit und Dehnung des reinen Schweißguts nach DIN EN ISO 2560.

Kennziffer	Mindeststreckgrenze [1]	Zugfestigkeit [2]	Mindestdehnung [2]
	N/mm²	N/mm²	%
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] $L_0 = 5 \cdot d$.

Tabelle 3-8. Kennzeichen der Kerbschlageigenschaften des reinen Schweißguts nach DIN EN ISO 2560.

Kennbuchstabe/ Kennziffer	Temperatur (°C) für Mindestkerbschlagarbeit, KV = 47 J
Z	Keine Anforderungen
A	+ 20
0	± 0
2	– 20
3	– 30
4	– 40
5	– 50
6	– 60

Tabelle 3-9. Kurzzeichen für die chemische Zusammensetzung des Schweißguts mit Mindeststreckgrenzen bis zu 500 N/mm² nach DIN EN ISO 2560.

Legierungskurzzeichen	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 %.*

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	

Bild 3-34
Die wichtigsten Stoßarten nach DIN EN ISO 17659 (Auswahl).

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 anwenderfreundlich. Sie besteht aus den folgenden Teilen:

Nahtart	Benennung	Darstellung	Symbol
Stumpfnähte	I-Naht		
	V-Naht		
	Y-Naht		
	X-Naht		
Stirnnaht	Stirnflachnaht		
Kehlnähte	Kehlnaht		
	Überlappnaht		
	Ecknaht		

Bild 3-35
Die wichtigsten Nahtarten nach DIN EN ISO 17659 (Auswahl).

Bild 3-36
Einfluss der Schweißparameter Spannung U, Strom I und Vorschubgeschwindigkeit υ auf die Nahtform, d. h. auf die sie bestimmenden Größen t, b und h.

- Kurzzeichen für den *Schweißprozess* (**E** = Elektrohandschweißen, auch als Lichtbogenhandschweißen bezeichnet).
- Kennziffer für die *Festigkeit und Dehnung des Schweißguts*, gemäß Tabelle 3-7.
- Kennziffer für die *Kerbschlagarbeit des Schweißguts*, gemäß Tabelle 3-8.
- Kurzzeichen für die chemische *Zusammensetzung des Schweißguts*, gemäß Tabelle 3-9.
- Kurzzeichen für die *Art der Umhüllung*, die mit folgenden z.T. schon bekannten Buchstaben bzw. Buchstabengruppen (siehe Abschn. 3.3.2.4.3) 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*.

Bild 3-37
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.

- 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 cm³/100 g, 10 cm³/100 g bzw 15 cm³/100 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 %.

Bild 3-38
Einfluss des Schweißverfahrens auf die Größe des erforderlichen Öffnungswinkels α, d. h. der Schweißzeit (Wirtschaftlichkeit).
a) MAG, α = 40° bis 45°
b) E-Hand, α = 60° (bis 70°, z. B. bei Zwangslagen, Nickel)

m_S abgeschmolzene Masse der Stabelektrode (abzüglich Schlacke und Spritzer) in kg,
m_K Kernstabmasse in kg,
t_S reine Schweißzeit in h.

3.3.2.5 Ausführung und Arbeitstechnik

Die *Wirtschaftlichkeit* der schweißtechnischen Fertigung sowie die *technische* und *metallurgische Qualität* der Schweißverbindung sind außer von anderen Einflüssen (Schweißzeit, Art der Zusatzwerkstoffe, Schweißfolge, Wärmevor-, Wärmenachbehandlung) 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 Bewüchse wichtige vorbereitende Maßnahmen. Wesentlich – aber leider in einigen Fällen nicht genügend beachtet – 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).

3.3.2.5.1 Stoßart; Nahtart; Fugenform

Die zu schweißenden Teile werden am *Schweißstoß* durch *Schweißnähte* zu einem *Schweißteil* vereinigt. Bild 3-34 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. mit Hilfe des Brennschneidens oder Scherenschneidens), sich aber zuverlässig und fehlerfrei mit Schweißgut füllen lassen. Dazu gehört, dass der Schweißer die Fugenflanken mit dem Lichtbogen vollständig aufschmelzen kann.

Die wichtigsten Nahtarten sind
- Stumpfnähte,
- Stirnnähte und
- Kehlnähte.

Die Nahtarten sind in Bild 3-35 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.

Die die Geometrie der Schweißnaht – und somit die zu wählende Fugenform – bestimmenden wichtigsten Faktoren sind
- Einbrandtiefe t,
- Schweißnahtbreite b und
- Schweißnahtüberhöhung h.

Diese Einflussgrößen hängen ab vom Schweißverfahren (E-Handschweißen oder mechanische Verfahren: MSG-, UP-Verfahren) und den Einstellwerten. Bild 3-36 zeigt schematisch 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 gemäß Bild 3-37 gewählt werden. Je nach der Einbrandtiefe des verwendeten Schweißverfahrens ergeben sich erhebliche Unterschiede im Schweißgutgewicht aufgrund der unterschiedlich großen Öffnungswinkel. Bild 3-38 zeigt z. B. die Verhältnisse für das MAG- und das E-Handschweißen. Grundsätzlich sind mit einer geringeren Schweißgutmenge folgende Vorteile verbunden:
- Größere Wirtschaftlichkeit,
- geringere Lagenzahl,
- geringere Schweißzeit,
- geringerer Bauteilverzug.

Bild 3-39 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 und kürzere Schweißzeiten, also höhere Wirtschaftlichkeit, aber höhere Schweißeigenspannungen.
- Sie sollte *symmetrisch* sein: Die Winkelschrumpfung α gemäß Bild 3-40 ist bei beidseitigem (gleichzeitigem) Schweißen sehr gering.

Wanddicke s mm	Ausführungsart	Benennung	Symbol	Fugenform	Maße α, β Grad	Maße b mm	Maße c mm	Maße f mm	Bemerkungen
< 3 **2 bis 5**	einseitig beidseitig	I-Naht			– –	0 bis 2 1 bis 3	– –	– –	Fuge durch sauberen Scheren- bzw. Brennschnitt erzeugt: billig. Aufmischung sehr groß: Vorsicht bei verunreingtem Werkstoff. Dickere Bleche kann Metall-Lichtbogen nicht mehr (wirtschaftlich) aufschmelzen, aber MSG- und UP-Verfahren.
3 bis 15	einseitig beidseitig	V-Naht			≈ 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 gegenschweißen (Kapplage). Wie bei allen unsymmetrischen Fugenformen Gefahr der Winkelschrumpfung. Bei einseitigem Schweißen ist Schmelzbadsicherung häufig vorteilhafter.
< 12	einseitig	Steilflankennaht			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			$\alpha_{1,2} = 60$ $\alpha_1 = 60$ $\alpha_2 = 40$ 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			≈ 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.

Bild 3-39
Hinweise zur Wahl der Schweißnahtvorbereitung (Fugenformen) für Stumpfnähte (Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen, Gasschweißen), nach DIN EN ISO 9692-1.

3.3.2.5.2 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* (Bild 3-6) 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 dürfen (können). Außerdem erfordern die schwerer erlernbaren Zwangslagentechniken längere Schulungszeiten als die Techniken in Normallage. Zum Füllen des Fugenquerschnittes sind daher wesentlich mehr Raupen erforderlich. Die zweckmäßige und wesentlich wirtschaftlichere Pendellagentechnik (Abschn. 3.2.4.2 und Bild 3-10) kann daher nicht angewendet werden, sondern nur die sehr zeitaufwändige 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 daher grundsätzlich höher (Gase und Schlacken können nicht mehr ungehindert nach »oben« steigen!) als in jeder anderen Position. Aus diesem Grund ist auch der Prüfaufwand (Prüfkosten!) beträchtlich größer als bei Bauteilen, die in Normallage(n) geschweißt wurden.

Bild 3-40
Richtungen der Schrumpfvorgänge in einer Schweißverbindung.
a) Längsschrumpfung
b) Querschrumpfung
c) Dickenschrumpfung
d) Winkelschrumpfung α

Bild 3-41
Blaswirkung beim Schweißen nichtmagnetisierbarer Werkstoffe. Der Lichtbogen wird in Richtung der resultierenden magnetischen Kraft F abgelenkt, die durch die unterschiedliche Dichte der magnetischen Kraftlinien im Bereich des Lichtbogens entsteht.

– Als Folge der nur kleinvolumigen, rasch abkühlenden Schweißbäder werden die Zähigkeit von Schweißgut und der WEZ im Allgemeinen geringer, die Härte in den Wärmeeinflusszonen 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 Umkörnen der WEZ z. T. beseitigt.

Der Konstrukteur sollte diese wichtigen Zusammenhänge kennen, da sie nicht nur die Wirtschaftlichkeit, sondern auch die Güte der Konstruktion beeinflussen. Häufig lassen sich schon durch einfachste Vorrichtungen Zwangslagenschweißungen vermeiden.

3.3.2.5.3 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. Bild 3-41 zeigt die Blaswirkung des Lichtbogens bei nichtmagnetisierbaren Werkstoffen.

Bei ferromagnetischen Werkstoffen ist die Blasrichtung umgekehrt, wie Bild 3-42 verdeutlicht, weil wegen ihrer gegenüber Luft wesentlich besseren magnetischen Leitfähigkeit das Kraftlinienfeld an den Kanten *verdichtet* wird. Es entsteht 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.

Bild 3-42
Blaswirkung beim Schweißen eines ferromagnetischen Werkstoffs. Das wesentlich stärkere magnetische Feld wird an den Kanten verdichtet (»Kantenwirkung«). Es entsteht immer eine ins Blechinnere gerichtete Kraft F. Die häufig starke Blaswirkung wird beim Handschweißen u. a. durch eine besondere Elektrodenhaltung »a« gemindert. Siehe auch Bild 3-41.

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. Diese Erscheinung wird z. B. durch eine entsprechende Elektrodenhaltung (Bild 3-42, Stellung a) und die Verwendung von Wechselstrom wesentlich gemindert. Weitere in der Praxis verwendete Methoden sind das *Entmagnetisieren* mit kontinuierlich abnehmendem Wechselstrom oder das Erzeugen eines *magnetischen »Gegenfeldes«*. Diese Methode, eine bei Rohren vielfach praktizierte Maßnahme, wird durch 3 bis 6 Windungen einer üblichen Schweißstromleitung realisiert. Die Höhe des Stromes und der Wicklungssinn sind solange auszuprobieren, bis das resultierende Magnetfeld und damit die Blaswirkung minimal werden.

3.3.2.6 Anwendung und 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* (ein Verbrennungsmotor treibt den stromerzeugenden Generator an = *Aggregat*) betrieben werden und 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 und wirksamen Möglichkeiten, das Schweißgut metallurgisch zu beeinflussen (Auflegieren, Desoxidieren mit Hilfe der Umhüllungsbestandteile) machen es zum Schweißen der meisten metallischen Werkstoffe hervorragend geeignet. Mit basisch-umhüllten Stabelektroden lassen sich Schweißverbindungen mit mechanischen Gütewerten herstellen, die nur von wenigen anderen Verfahren erreicht werden.

Das Lichtbogenhandschweißen ist in den folgenden Fällen nur begrenzt anwendbar bzw. nicht zu empfehlen. Diese Einschränkungen haben überwiegend werkstoffliche und fertigungstechnische Ursachen:
- Bei Werkstückdicken unter 2 mm ist der Einsatz des Kurzlichtbogen-, des WIG- und u. U. des Gasschweißverfahrens zweckmäßiger, da hierbei die Gefahr des »Durchfallens« der Schmelze geringer ist.
- Bei Werkstückdicken über 20 mm bis 25 mm werden aus wirtschaftlichen Gründen praktisch nur noch Hochleistungsschweißverfahren mit ihrer wesentlich größeren Abschmelzleistung verwendet (z. B. 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 anderen Verfahren (z. B. WIG-, Plasmaschweißen) wesentlich zuverlässiger geschweißt werden.

3.3.3 Schutzgasschweißen (SG)

3.3.3.1 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, Bild 3-43. Damit das Schutzgas diese Aufgaben erfüllen kann, muss es in ausreichender Reinheit (Verunreinigungen im Schutzgas können zu unerwünschten Reaktionen führen) und Menge am Schweißort zur Verfügung stehen. Sind Reaktionen einzelner (aktiver) Gaskomponenten mit dem flüssigen Schweißgut möglich, dann lassen sich mit Hilfe von Desoxidations- bzw. Legierungselementen im Zusatzwerkstoff metallurgisch nachteilige Reaktionen vermeiden.

Schutzgas schützt Elektrodenspitze, Schmelzbad und hocherwärmten Bereich der Schweißnaht vor Zutritt der Atmosphäre.

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 verspröden. Diese Werkstoffe müssen daher durch zusätzliche Maßnahmen (z. B. Schweißen in Schutzgaskammer) vor Luftzutritt vollständig geschützt werden.

Bild 3-43
Verfahrensprinzip der Schutzgasschweißverfahren (SG).
a) MSG-Verfahren
b) WIG-Verfahren

3.3.3.2 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) und zu keinerlei Reaktionen (z. B. Abbrand von Legierungselementen und Desoxidationsmitteln durch Sauerstoff) mit der Schmelze führen. Dies trifft nur auf die einatomigen Edelgase zu, die chemisch träge (inert) sind, d. h., sie gehen unter »normalen Umständen« keinerlei chemische Verbindungen mit der Schmelze ein. Aus Kostengründen werden hauptsächlich Argon, Argon-Helium-Gemische und (für besondere Anwendungsfälle) in wesentlich geringerem Umfang Helium verwendet.

Die wichtigsten Verfahren, bei denen man inerte Gase verwendet, sind das

- ❒ **Wolfram-Inertgasschweißen** (**WIG,** Abschn. 3.3.3.3.1, Ordnungsnummer: 141) und das
- ❒ **Metall-Inertgasschweißen** (**MIG,** Abschn. 3.3.3.4.6.1, Ordnungsnummer: 131).

Abgesehen von der metallurgischen Wirkung beeinflussen die Schutzgase aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften die Lichtbogencharakteristik und damit in weiten Grenzen die *Nahtform*, die *Einbrandtiefe*, die *Einbrandform*, die Art des *Werkstoffüberganges* und die zulässige *Schweißgeschwindigkeit*. Die Art des Werkstoffüberganges ist bei den Schutzgasschweißverfahren, die mit stromführendem Zusatzwerkstoff (Abschn. 3.3.3.4) arbeiten, für die Qualität der Verbindung und den Verfahrensablauf von großer Bedeutung.

Verschiedene physikalische Eigenschaften von in der Schweißtechnik verwendeten Schutzgasen (im Vergleich zu einigen der Luft!) sind in Tabelle 3-10 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 um so feuchtigkeitsärmer (hochwertiger, d. h. wirksamer!), je niedriger der Taupunkt ist.

Dichte ρ: Ein dichteres Gas bedeckt zuverlässiger die Schweißstelle und wird durch Luftzug, z. B. bei

Tabelle 3-10. Physikalische Eigenschaften einiger für das SG-Schweißen verwendeter Schutzgase im Vergleich zu Luft.

Gas	Dichte ρ [1)]	Molare Masse M	Wärmeleitfähigkeit λ [2)]	Ionisierungsspannung U_i	Reinheit mind.	Taupunkt max.
	kg/m³	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

Montageschweißungen, nicht so leicht weggedrückt. Die Schutzwirkung des Argons ist daher gegenüber der des Heliums deutlich besser. Das sehr leichte Helium muss z. B. auf die Schweißstelle »gedrückt« werden, das schwere Argon »fällt«. Der Verbrauch an Helium, das wegen seiner geringen Dichte außerdem zu Turbulenzen (Gefahr des Lufteinwirbelns, d. h. Porenbildung) neigt, ist merklich größer.

Ionisierungsspannung U_I[25], 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 (Abschn. 3.3.2.2) unter Argon ist außerdem deutlich geringer (siehe Bild 3-21). Diese Eigenschaft macht Argon besonders geeignet für Handschweißverfahren und zum Schweißen dünner Bleche, denn ein unbeabsichtigtes (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 (automatischen) WIG-Verfahren (unter Helium) nützlich, weil die Spannung bequem durch Variieren der Lichtbogenlänge geändert werden kann.

[25] Dies ist die Spannung, mit der man ein Elektron beschleunigen muss, damit es ein Atom ionisiert.

Bild 3-44
Einbrandformen beim Wolfram-Inertgasschweißverfahren in Abhängigkeit vom verwendeten Schutzgas.

Die Ionisierungsarbeit wird dem Energievorrat des Lichtbogens entnommen. Sie wird wieder frei, wenn die Ionen auf der verhältnismäßig kalten Schmelzbadoberfläche auftreffen. Je größer die Ionisierungsspannung des Gases ist, desto tiefer wird daher der Einbrand. Aus diesem Grund ist der Einbrand unter Helium größer als unter Argon.

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 Einbrand im Zentrum, der am Rand flacher wird, wie Bild 3-44 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, siehe Abschn. 3.3.3.4.4. Die nur geringe Menge flüssigen Schweißguts, die wegen des hier flachen Einbrandes an die Schmelzränder fließt, kann die entstehenden Kerben nicht mehr auffüllen, siehe Bild 3-57.

Die große Stromdichte im Argon-Lichtbogenkern, und die große Masse der Argonionen 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 Argonionen 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 Argonionenstromes. Helium wird zzt. ausschließlich für mechanische Schweißverfahren verwendet, weil sich die erforderliche kleine Lichtbogenlänge von einem Handschweißer nicht zuverlässig einhalten lässt.

Bild 3-45
Verfahrensprinzip des WIG-Schweißens.

Bei den Schutzgasschweißverfahren mit abschmelzender Drahtelektrode (Abschn. 3.3.3.4) werden außer den Edelgasen/Edelgasgemischen häufig Gasgemische verwendet, die chemisch aktiv sind. Die aktiven Bestandteile sind meistens Sauerstoff (O_2) und Kohlendioxid (CO_2). Die Zugabe kontrollierter (begrenzter!) Mengen aktiver Gase verändert den *Lichtbogentyp* (Sprühlichtbogen, Langlichtbogen, Kurzlichtbogen, Abschn. 3.3.3.4.4), macht den *Lichtbogen stabiler,* beeinflusst günstig den *Werkstoffübergang*, die *Nahtform* und vermindert häufig die *Spritzerneigung*. Die in der Schweißpraxis verwendeten Schutzgase sind in DIN EN ISO 14175 genormt. Tabelle 3-12 zeigt ihre Einteilung, ihr chemisches Verhalten (inert, oxidierend, reduzierend) und die Bezeichnungsweise (s. auch Abschn. 3.3.3.4.5).

Von großer Bedeutung für die mechanischen Gütewerte der Schweißverbindung und den gewünschten Verfahrensablauf sind
- Art des Werkstoffübergangs und die
- Menge und Art der aktiven (oxidierenden, reduzierenden) Gasbestandteile.

3.3.3.3 Wolfram-Schutzgasschweißen (WSG) (Ordnungsnummer: 14)

3.3.3.3.1 Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) (Ordnungsnummer: 141)

3.3.3.3.1.1 Verfahrensprinzip

Der Lichtbogen brennt zwischen der nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück unter Edelgasschutz, Bild 3-45. 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 Gütewerte des Schweißguts.

Der Schutz der Schmelze unter inerten Gasen ist vollkommen, die metallurgische Qualität des Schweißguts und die mechanischen Gütewerte 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, d. h. unerwünschte Reaktionen jeder Art sind dann nicht möglich. Ein geeigneter Zusatzwerkstoff und eine fachgerechte Ausführung sind natürlich vorausgesetzt. Extreme Sauberkeit ist in diesem Fall besonders wichtig, weil während des Schweißens *keine* Reinigungsvorgänge (Entschwefeln, Denitrieren, Desoxidieren der Schmelze) ablaufen können, wie z. B. beim Gasschweißen (reduzierende Zone), beim Lichtbogenhandschweißen (Reaktionen der Umhüllungsbestandteile) oder beim UP-Schweißen (Reaktionen der Pulverbestandteile). Das »Reinigen« der Schmelze muss also mit Hilfe der in dem massiven Schweißstab untergebrachten Desoxidationsmittel zuverlässig erfolgen können.

3.3.3.3.1.2 Schweißanlage und Zubehör

Das Schema einer WIG-Schweißanlage zeigt Bild 3-46. 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 transduktor- oder bei höheren technologischen Anforderungen (z. B. Wahl verschiedener Stromprogramme) thyristor- bzw. invertergesteuert (Abschn. 3.3.2.3). 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 Lichtbogentemperatur (bei einer Schmelztemperatur des Wolframs von 3410 °C) etwa 40 Stunden.

Wolframelektrode

Im Allgemeinen wird sie am negativen Pol angeschlossen. Die Erwärmung ist dann am geringsten (Abschn. 3.3.2.2), 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«*, Abschn. 3.3.3.2) mit Wechselstrom: Während der positiven Halbwellen wird die Oxidhaut zerstört, und während der negativen kühlt 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 Tabelle 3-11.

1 Schweißbrenner
2 Magnetventil für Schutzgas
3 Magnetventil für Kühlwasser
4 Impulsgenerator (nur für Wechselstrom)
5 Wassermangelsicherung
6 Siebkondensator (nur für Wechselstrom)
7 Schutzdrossel (zum Abschirmen der HF)
8 Schutzkondensator (zum Abschirmen der HF)
9 Schutzgasflasche mit Druckminderer und Gasmengenmesser

Bild 3-46
Wassergekühlte WIG-Schweißanlage (schematisch).

Die Stabilität des Lichtbogens, d. h., letztlich das Schweißergebnis, hängt weitgehend von der richtigen Form der Elektrodenspitze ab. Danach gilt, dass die Elektrode um so spitzer sein muss, je geringer die Stromstärke ist, weil sich sonst nicht der für die Lichtbogenstabilität erforderliche flüssige Oberflächenfilm an der Elektrodenspitze bildet, Bild 3-47. Die gewünschte Spitzenform und die Oberflächengüte der Elektrodenspitze wird 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.

Stromart	Form der Elektrodenspitze
Wechselstrom und Gleichstrom, Elektrode positiv gepolt.	Strombelastung richtig Strombelastung zu hoch Die gewünschte Halbkugelform der Wolframelektrodenspitze ergibt sich durch ein kurzzeitiges »Warmbrennen« auf einem Kupferblech oder technisch eleganter mit Hilfe digitaler Stromquellen.
Gleichstrom, Elektrode negativ gepolt.	Für kleinste Schweißstromstärken, Kegel 1:6 bis 1:3, Elektrodenspitze *nicht* 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.

Bild 3-47
Formen der Wolframelektrodenspitze beim WIG-Schweißen.

Zündhilfen
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. Ein Lichtbogen kann also nicht gezündet 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-(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

Tabelle 3-11. Chemische Zusammensetzung und Eigenschaften von Wolframelektroden nach DIN EN ISO 6848, Auswahl.

Kurzzeichen	Farbkennzeichnung	Oxidzusätze Massegehalt in %	Strombelastbarkeit	Eigenschaften
WP	Grün	–	5 (5 = niedrig)	Weicher Lichtbogen, geringe Strombelastbarkeit, geringe Standzeit, hauptsächlich für WIG-Schweißen von Al und Al-Leg. verwendet
WTh 10 **WTh 20** **WTh 30**	Gelb Rot Lila	0,90 bis 1,20 ThO_2 1,80 bis 2,20 ThO_2 2,80 bis 3,20 ThO_2	4 2 1 (1 = hoch)	Leichtes Zünden, stabiler Lichtbogen, lange Standzeit, harter Lichbogen, teurer als oxidfreie Elektroden, Schleifstäube schwach radioaktiv (gefährlich ist die Alpha-Strahlung!)
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 Plasmaschmelzschneiden

zu zerstören nimmt ab, der Lichtbogen wird »härter« und die thermische Belastung des Transformators durch den Gleichstromanteil größer. Außerdem würde durch diese Gleichstromvormagnetisierung die Leistungsfähigkeit des Transformators abnehmen, da nach dem Induktionsgesetz nur Fluss*änderungen* Spannungen induzieren: Ein Teil des gesamten sich zeitlich ändernden Flusses wird durch den Gleichstrom kompensiert und steht damit für eine Spannungserzeugung auf der Sekundärseite nicht mehr zur Verfügung. Daher wird in den meisten Fällen der Gleichstromanteil I_{gl} mit Hilfe 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, Bild 3-48.

Eine negativ gepolte Elektrode zündet schlechter und viel langsamer. Bei den neueren elektronischen Stromquellen wird mit positiver Polarität gezündet und danach sofort automatisch umgepolt.

Kraterfülleinrichtung

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). Aus diesem Grunde ist der Einsatz von Kraterfülleinrichtungen, besonders für heißrissanfällige und thermisch empfindliche Werkstoffe (Legierungen mit einem größeren Erstarrungsintervall), sehr zweckmäßig. Durch stufenweises oder kontinuierliches Abschalten des Stromes kühlt der rissanfällige Endkrater langsamer ab und kann noch mit abschmelzendem Zusatzwerkstoff aufgefüllt werden.

Bild 3-48
Gleichrichterwirkung beim WIG-Schweißverfahren bei Anwendung von Wechselstrom, Reinigungswirkung s. Abschn. 3.5.2.

3.3.3.3.1.3 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 mit Hilfe 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 Berührungszünden) 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. 3.3.1.5). Nach dem Abschalten des Schweißstromes muss das Schutzgas noch einige Sekunden auf das Schmelzbad strömen, um zu verhindern, dass dieses und die Wolframelektrode vor einer merklichen Abkühlung mit der Luft in Berührung kommen. In den meisten Fällen ist ein Schweißen ohne Zusatzwerkstoff nicht empfehlenswert, weil das überwiegend aus Grundwerkstoff bestehende Schweißgut 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 mit einem Gas (z. B. Argon oder Formiergas, s. Tabel-

le 3-12: F) oder mit genuteten Unterlegschienen aus Kupfer oder (hochlegiertem) Stahl.

Bis zu einer Werkstückdicke von 3 bis 4 mm kann wegen der konzentrierten Wärmequelle i. Allg. ohne Schweißnahtvorbereitung gearbeitet werden.

3.3.3.3.1.4 WIG-Impulslichtbogenschweißen

Eine neuere Entwicklung stellt die *Impulstechnik* dar, verdeutlicht in Bild 3-49. Hierbei wird zum Schweißen ein Grundstrom I_g verwendet, dem ein rechteckförmiger Impulsstrom I_m bestimmter Amplitude und Frequenz 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 Impulsstrom 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 allen Zwangslagen sind einfacher ausführbar, weil das Schmelzbad besser beherrschbar und durch Wahl geeigneter Impulsparameter dickflüssiger gemacht werden kann. Die Gefahr des *»Durchfallens«* der Wurzel ist geringer. Außerdem wird das Einbrandverhalten verbessert und die Schweißgeschwindigkeit erhöht.

Bild 3-49
WIG-Schweißen mit Stromimpulsen.
a) Verlauf des Schweißstroms
b) impulsgeschweißte Naht; jeder »Schweißpunkt« wird durch einen Impuls erzeugt

3.3.3.3.1.5 Anwendung und Grenzen

Das Verfahren eignet sich zum Schweißen aller Metalle, die nicht im Lichtbogen verdampfen, wie z. B. Blei oder Zinn, oder beim Schweißen zu extremer Rissbildung (z. B. höhergekohlte Stähle) neigen. 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 risssicher. Es ist empfehlenswert, Fügeteile aus Aluminium mit Werkstückdicken $s \geq 5$ mm bis 6 mm auf 100 °C bis 250 °C ($s \geq 15$ bis 20 mm) vorzuwärmen.

Das WIG-Verfahren eignet sich hervorragend zum Schweißen der hochlegierten CrNi(MoMn)-Stähle sowie aller Leichtmetalle.

Das austenitische Schweißgut (CrNi-Stähle) ist sehr heißrissanfällig. Mit metallurgischen (z. B. erhöhter Mangangehalt im Schweißgut) und verfahrenstechnischen Maßnahmen (δ-Ferrit, schnell schweißen, geringe Streckenenergie) lässt sich die Heißrissanfälligkeit beseitigen bzw. verringern. Auf der erwärmten Werkstoffoberfläche bilden sich bei diesen Stählen Oxide (Anlauffarben), die nicht nur das Aussehen beeinträchtigen, sondern auch die Korrosionsbeständigkeit entscheidend verringern. Das Bespülen dieser Werkstoffbereiche mit zusätzlichem »Schutzgas« (z. B. Argon, Argon-Wasserstoff, Formiergase) *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 entsprechende Maßnahmen, wie z. B. Schweißen mit brauseähnlichen Vorrichtungen, die den erwärmten Werkstoff ständig mit Gas bespülen, 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 größeren Werkstückdicken ($s \geq 10$ mm) nicht mehr angewendet. Die metallurgische Qualität der Schweißverbindung und die nahezu universelle Anwendbarkeit des WIG-Verfahrens wird von kaum einem anderen Verfahren erreicht.

3.3.3.3.2 Wolfram-Plasmaschweißen (WP) (Ordnungsnummer: 15)

3.3.3.3.2.1 Physikalische Grundlagen

Das *thermische Plasma* ist eine Erscheinungsform der Materie. Es ist ein dissoziiertes, 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. $H_2 \rightarrow H + H - Q_1$) bzw. *ionisiert* (z. B. $H \rightarrow H^+ + e^- - Q_2$).

Der Plasmazustand kann mit einem elektrischen Lichtbogen einfach erzeugt werden. Dieser brennt aber nicht frei wie bei üblichen Lichtbogenschweißverfahren (Abschn. 3.3.2.2), sondern wird mit Hilfe 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. Bild 3-50 zeigt die Arbeitsweise des Verfahrens. Im Plasmakern werden Temperaturen bis 30 000 K mit entsprechenden Leistungsdichten von 10^5 W/cm² bis 10^6 W/cm² erreicht.

3.3.3.3.2.2 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. genauer von der zugeführten elektrischen Energie. Bei geringer kinetischer Plasmaenergie wird der flüssige Werkstoff *nicht* weggeblasen, d. h., diese Verfahrensbedingungen sind zum *Schweißen* geeignet. Mit zunehmender Energie des Plasmas wird dessen mechanische Wirkung größer und der verflüssigte Werkstoff durch die kinetische Energie

Bild 3-50
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

des Plasmastrahls aus der Fuge geblasen. Der Werkstoff ist getrennt, er wurde *plasmageschnitten*.

Das *Plasmaschweißen* ist eine neuere Weiterentwicklung des WIG-Verfahrens. Eine Verfahrensübersicht, Hinweise zur Gaseauswahl und Kennwerte des Verfahrens enthält das DVS-Merkblatt 2707 (4/1997). Das Plasmaschweißverfahren eignet sich hervorragend für folgende Arbeiten:

– Verbindungsschweißen an Werkstückdicken ab 0,01 mm mit dem Mikroplasmaschweißen,
– Verbindungsschweißen der *hochlegierten Chrom-Nickel-Stähle* nach dem gegenwärtigen Entwicklungsstand bis etwa 13 mm Dicke (I-Stoß!) mit Hilfe des *»Schlüsselloch-Effekts«* mit im Vergleich zum WIG-Schweißen etwa der doppelten Schweißgeschwindigkeit sowie
– Auftragschweißungen vor allem von Hartmetallen, Legierungen auf Eisen-, Nickel- und Kobaltbasis mit sehr geringem Aufschmelzgrad (Abschn. 3.1.3 und Bild 3-4).

Je nach der Art der Erzeugung des eingeschnürten Lichtbogens (Plasma) unterscheidet man folgende Formen, die unterschiedliche Plasmabrenner-Bauarten erfordern (Bild 3-50):

❒ **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 (Abschn. 3.3.3.3.1).

Der (Haupt-)Lichtbogen muss bei allen Plasmavarianten mit externen Hilfsmitteln gezündet werden Bei mechanisierten Schweiß- und Schneidanlagen erfolgt die Zündung mit Hochfrequenzstrom, (2) in Bild 3-50. 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-H_2-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 (s. Abschn. 3.3.3.2), 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 (Bild 3-50b)). 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 (Abschn. 4.9.2).

Die Kombination von **übertragenem/nicht übertragenem Lichtbogen (WPSL)** in einer Anlage führt zu einem für das Auftragschweißen (Plasmapulverauftragschweißen) sehr geeigneten Verfahren (Bild 3-61c)). Die Vorteile des Verfahrens bestehen im Wesentlichen in der Möglichkeit, die *Auftragdicke* und vor allem die *Einbrandtiefe* (Aufschmelzgrad) sehr genau einstellen zu können.

3.3.3.3.2.3 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 mit Hilfe des *»Schlüssellocheffekts«* (auch *Stichlochtechnik* genannt),
- 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 Schmelzbadsicherungen 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 (nahezu immer sind Vorrichtungen erforderlich!) und die absolute Notwendigkeit einer maschinellen Schweißung.

Beim **Plasmadickblechschweißen** wird für Werkstückdicken ab 3 mm der sog. *Schlüssellocheffekt* (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. etwa 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 $\varphi = t/b$ (s. genauer Abschn. 3.3.4.3) 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 (Bild 3-50c)). 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 Vorwärmen bzw. teilweise Anschmelzen des Auftragpulvers durch den Pilotlichtbogen in weiten Grenzen einstellen zu können. 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, den äußere Einflüsse (z. B. Kanten, Werkstoffmassen, Änderung der Lichtbogenlänge) nur wenig ablenken können (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/H_2- oder Ar/He-Gemische verwendet. Mit Wasserstoff oder Helium lässt sich die Schweißgeschwindigkeit um ca. 20 % erhöhen bzw. die Einbrandtiefe vergrößern.

3.3.3.4 Metall-Schutzgasschweißen (MSG) (Ordnungsnummer: 13)

3.3.3.4.1 Verfahrensprinzip

Der Lichtbogen brennt zwischen der i. Allg. positiv gepolten abschmelzenden Drahtelektrode und dem Werkstück innerhalb eines von Schutzgas ausgefüllten Raumes (Schutzgasglocke) gemäß Bild 3-51. 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 CO_2 verwendet. Die aktiven 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 Drahtlänge f.* Dies ist die Länge des stromdurchflossenen Drahtendes. Sie ist u. a. abhängig vom Durchmesser *D* der Drahtelektrode und beträgt etwa 10 mm bis 30 mm[26]. Somit ist die Strombelastbarkeit der Drahtelektrode wesentlich größer als sie beispielsweise mit umhüllten Stabelektroden möglich ist ($i \approx 100$ A/mm² bis $i \approx 200$ A/mm²), 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 führen[27].

Die Nahtgeometrie hängt überwiegend ab von den

- *Einstellwerten:* Schweißstrom, Schweißspannung, der Vorschubgeschwindigkeit des Lichtbogens, der
- *Brennerführung*, Abschn. 3.3.3.4.6), der
- *Art des Schutzgases* (Tabelle 3-12) und den
- *physikalischen Eigenschaften des Grundwerkstoffs*, z. B. Schmelzpunkt, thermische und elektrische Leitfähigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient (Abschn. 3.2.2).

Man schweißt nur mit Gleichstrom, wobei abgesehen von Sonderfällen die Drahtelektrode positiv gepolt ist. Wegen der ausgezeichneten Reinigungswirkung (Abschn. 3.3.3.2) eignet sich das MIG-Verfahren hervorragend zum Schweißen der Leichtmetalle.

Die MIG/MAG-Schweißverfahren sind die zzt. am weitesten verbreiteten Schweißverfahren (belegbar an Hand des Verbrauchs an Zusatzwerkstoff). Diese Entwicklung beruht auf der Möglichkeit, hochwertige Schweißverbindungen bei (scheinbar) einfacher Handhabung herzustellen, verbunden mit einer einfachen Mechanisierbarkeit des Schweißablaufs. Das 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) *Reaktions-*

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.

Bild 3-51
Verfahrensprinzip des Metall-Schutzgasschweißens.

[26] Mit genügender Genauigkeit gilt $f \sim 10 \cdot D$ bis $f \sim 15 \cdot D$.

[27] Eine Stabelektrode mit einem (Kernstab-)Durchmesser von 4 mm besitzt einen metallischen Querschnitt von ca. 12,6 mm². Bei einer mittleren Schweißstromstärke von 170 A ergibt sich eine Stromdichte von nur 15 A/mm².

zeit oder den 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. Bild 3-52 zeigt die Reaktionszeiten verschiedener Schweißstromquellenarten. Es wird deutlich, dass erst mit elektronischen Stromquellen eine Beeinflussung des Schmelzbades und der Art des Werkstoffüberganges möglich ist. Die künftig zu erwartenden noch schnelleren Stromquellen lassen auch eine Beeinflussung der Lichtbogenvorgänge möglich erscheinen.

3.3.3.4.2 Schweißanlage; Zubehör

Bild 3-53 zeigt das Schema einer MSG-Schweißanlage. Sie besteht aus der

- *Stromquelle*, dem
- *Schweißbrenner* mit *Schlauchpaket,* der
- *Drahtvorschubeinrichtung* und der
- *Gasflasche* mit dem *Druckminderer* und dem *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 (Abschn. 3.3.3.4.3).

Schweißbrenner und **Schlauchpaket**. Die Schweißbrenner sind luft- und bei höheren Schweißströmen (oberhalb 200 A 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, Adsorbtionswasser 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, den Förder- und Druckrollen und der Drahtrichteinrichtung. Die stufenlose Einstellung der Drahtvorschubgeschwindigkeit kann mit einem Motor (konstante Drehzahl) mit Getriebe oder eleganter nur mit einem drehzahlveränderbaren Motor (z. B. Gleichstrom-Nebenschlussmotor) erfolgen. In den meisten Fällen erfolgt der Drahtvorschub mit einem sog. Vierrollen-Antrieb, der im Vergleich zu einem Zweirollen-Antrieb die Drahtelektrode praktisch kaum verformt und sehr gleichmäßig vorschiebt. Drahtförderschwierigkeiten durch »unrunde« Drahtelektroden können daher nicht entstehen.

Bild 3-52
Elementarvorgänge beim Lichtbogenschweißen und typische Reaktionszeiten von Schweißstromquellen (nach Mecke, Fischer u. Merfert).

3.3.3.4.3 Die innere Regelung

Der Schweißvorgang ist stabil, wenn die Drahtvorschubgeschwindigkeit v_{Dr} gleich der Abschmelzgeschwindigkeit der Drahtelektrode v_{ab} ist. Anderenfalls würde die Drahtelektrode die Kontaktdüse verschmoren ($v_{Dr} < v_{ab}$) oder in das Schmelzbad stoßen ($v_{Dr} > v_{ab}$). Die Geschwindigkeit v_{Dr} wird stufenlos auf einen für die jeweilige Schweißaufgabe angepassten konstanten Wert eingestellt, d. h., je größer v_{Dr} gewählt wird, desto größer muss v_{ab} sein. 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 Bild 3-54. Die jeweilige Lichtbogenkennlinie hängt ausschließlich von v_{Dr} ab.

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 (Abschn. 3.2.3.3) haben und eine während des Schweißens gleichbleibende Drahtvorschubgeschwindigkeit ermöglichen. Darauf beruht die *innere Regelung*, die einen sehr geringen konstruktiven Aufwand erfordert. Ihre Wirkungsweise ist in Bild 3-55 zu erkennen. Unbeabsichtigte Änderungen der Lichtbogenlänge führen zu Änderungen des Lichtbogenwiderstandes R_{LB}. Die

Bild 3-54
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«.

Arbeitsspannung U_A ändert sich während des Schweißens kaum, weil die Spannung der Stromquelle nahezu konstant bleibt. Es gilt mit dem Schweißstrom I_A:

$$U_A = R_{LB} \cdot I_A \approx \text{konst.}$$

1 Schweißbrenner
2 Drahtvorschubgerät
2a Magnetventil für Schutzgas
2b Magnetventil für Kühlwasser
2c Wassermangelsicherung
2d Antrieb für Drahtvorschubrollen
2e Drahtelektrode auf Rolle
2f Drahtrichtrollen
2g Drahtzulauf-, Drahteinlaufdüse (2h)

Bild 3-53
Wassergekühlte MSG-Anlage (schematisch).

Eine Änderung des Lichtbogenwiderstands ($\pm \Delta R_{LB}$) ruft daher eine gegensinnige Änderung des Schweißstroms ΔI hervor:

Der Lichtbogen wird länger (Bild 3-55a)):
R_{LB} wird größer, I_A um ΔI kleiner. Die Drahtabschmelzgeschwindigkeit v_{Dr} wird wie gewünscht solange kleiner, bis der ursprüngliche Arbeitspunkt »A«, d. h. die ursprüngliche Lichtbogenlänge wieder erreicht ist.

Der Lichtbogen wird kürzer (Bild 3-55b)):
R_{LB} wird kleiner, I_A um ΔI größer. v_{Dr} wird wie gewünscht solange 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.

Bild 3-55
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 solange kleiner, bis der ursprüngliche Arbeitspunkt »A« wieder erreicht ist.
b) Der LB wird »plötzlich« kürzer: R_{LB} nimmt ab, und I_A nimmt um ΔI zu; »A« wandert nach »A''«. v_{Dr} wird solange größer, bis der Arbeitspunkt »A« wieder erreicht ist.
c) Die Spannung der Stromquelle ist nahezu konstant, ebenso die Arbeitsspannung U_A während des Schweißens: $U_A = R_{LB} \cdot I_A \approx konst.$

3.3.3.4.4 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 (Tabelle 3-12).

Abhängig von der Art des Schutzgases (und der Stromdichte) ergeben sich Lichtbogenformen, die eine sehr unterschiedliche Form des Werkstoffüberganges (und damit auch unterschiedliche mechanische Gütewerte der Schweißverbindung erzeugen!) von der Drahtelektrodenspitze auf das Werkstück zur Folge haben, Bild 3-56:
- 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 (Bild 3-56). Bei geringeren Stromdichten ergeben sich größere Werkstofftröpfchen, ein unstabilerer Lichtbogen 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 CO_2 und hoch CO_2-haltige Schutzgase.
- Als größere, rundliche, regelmäßigere Tropfen, die mit Hilfe bestimmter verfahrenstechnischer und elektrischer Maßnahmen nicht mehr kurzschlussfrei, sondern durch *»gesteuerte«* Kurzschlüsse auf das Werkstück übergehen. Dieser Lichtbogentyp ist nur unter CO_2 und Gasen mit hohem CO_2-Anteil realisierbar; er wird als Kurzlichtbogen bezeichnet (weitere Einzelheiten sind in Abschn. 3.3.3.4.6.2 zu finden).

Tabelle 3-12. Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse nach DIN EN ISO 14175, Auswahl.

Hauptgruppe	Untergruppe	Komponenten in Volumengehalt (Prozent)						Übliche Anwendung
		oxidierend		inert		reduzierend	reaktionsträge	
		CO_2	O_2	Ar	He	H_2	N_2	
I	1	–	–	100	–	–	–	WIG, MIG
	2	–	–	–	100	–	–	Plasmaschweißen
	3	–	–	Rest [1)]	≥ 0,5 bis ≤ 95	–	–	Wurzelschutz
M1	1	≥ 0,5 bis ≤ 5	–	Rest [1)]	–	≥ 0,5 bis ≤ 5	–	MAGM
	2	≥ 0,5 bis ≤ 5	–	Rest [1)]	–	–	–	
	3	–	≥ 0,5 bis ≤ 3	Rest [1)]	–	–	–	
	4	≥ 0,5 bis ≤ 5	≥ 0,5 bis ≤ 3	Rest [1)]	–	–	–	
M2	0	≥ 5 bis ≤ 15	–	Rest [1)]	–	–	–	
	1	≥ 5 bis ≤ 25	–	Rest [1)]	–	–	–	
	2	–	≥ 3 bis ≤ 10	Rest [1)]	–	–	–	
	3	≥ 0 bis ≤ 5	≥ 3 bis ≤ 10	Rest [1)]	–	–	–	
	4	≥ 5 bis ≤ 15	≥ 0,5 bis ≤ 3	Rest [1)]	–	–	–	
	5	≥ 5 bis ≤ 15	≥ 3 bis ≤ 10	Rest [1)]	–	–	–	
M3	1	≥ 25 bis ≤ 50	–	Rest [1)]	–	–	–	
	2	–	≥ 10 bis ≤ 15	Rest [1)]	–	–	–	
	3	≥ 5 bis ≤ 50	≥ 2 bis ≤ 10	Rest [1)]	–	–	–	
	4	≥ 5 bis ≤ 50	≥ 10 bis ≤ 15	Rest [1)]	–	–	–	
	5	≥ 25 bis ≤ 50	≥ 10 bis ≤ 15	Rest [1)]	–	–	–	
C	1	100	–	–	–	–	–	MAGC
	2	Rest	≥ 0 bis ≤ 30	–	–	–	–	
R	1	–	–	Rest [1)]	–	≥ 0,5 bis ≤ 15	–	WIG Plasmaschweißen
	2	–	–	Rest [1)]	–	≥ 15 bis ≤ 50	–	Plasmaschneiden Wurzelschutz
N	1	–	–	–	–	–	100	Wurzelschutz »Formiergas«
	2	–	–	Rest [1)]	–	–	≥ 0,5 bis ≤ 5	
	5	–	–	–	–	≥ 0,5 bis ≤ 50	Rest	

[1)] Für diese Einteilung darf Argon teilweise oder vollständig durch Helium ersetzt werden.
Beispiel: Die Bezeichnung eines Schutzgases der **Hauptgruppe M2** mit 7% Volumengehalt CO_2 und 4% Volumengehalt O_2 (Rest Argon), **Untergruppe 5: Schutzgas ISO 14175 – M25.**

Tabelle 3-13. Anwendungsbereiche der wichtigsten Schutzgase beim MSG-Schweißen. Die Klammerwerte entsprechen den Bezeichnungen der Schutzgase nach DIN EN ISO 14175 (alt: DIN EN 439), siehe auch Tabelle 3-12.

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 (≤ 3 %). Technisch besser und wirtschaftlicher ist die Verwendung der Impulstechnik.
Ar – CO_2 (M12, M21)	oxidierend	Für Kurzlichtbogentechnik ≥ 5 % 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 ($R_p \leq 500$ 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.

3.3.3.4.5 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. Anderenfalls sind z. B. unzureichende Gütewerte des Schweißguts bzw. ein unruhiger, unstabiler Lichtbogen die Folge.

Im Folgenden werden einige werkstoffliche und metallphysikalische Besonderheiten besprochen. Beim Schweißen von Eisen-Werkstoffen unter inerten 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 unbrauchbares Schweißgut. Ein geringer Sauerstoffzusatz (1 % bis 5 %) und (oder) CO_2-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 (O_2, CO_2) führt aber außer zu den oben geschilderten Vorteilen zu einem Abbrand vor allem der sauerstoffaffinen Legierungselemente (Cr, Al, V, Mn, Si) gemäß:

$$2 \cdot Me + O_2 \rightarrow 2 \cdot MeO.$$

Daraus folgt:
Zum erfolgreichen Schweißen der meisten Werkstoffe sind ihre metallurgischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften zu berücksichtigen, anderenfalls sind gravierende Mängel (Poren, Abbrand, Versprödung, Korrosionsanfälligkeit) bzw. unzureichende mechanische Gütewerte der Schweißverbindung die Folge.

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, können die dann zurückbleibenden gasförmigen Reaktionsprodukte außerdem Poren erzeugen. 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.

Bild 3-56
Einfluss des Schweißstroms auf das Tropfenvolumen des im Lichtbogen übergehenden schmelzflüssigen Werkstoffs in Abhängigkeit vom Schutzgas bei konstantem Drahtelektrodendurchmesser (stark vereinfacht).

CO_2 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:

$$CO_2 \rightarrow CO + 1/2 \cdot O_2 - Q.$$

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 gemäß der folgenden Beziehung zu einer weiteren Dissoziation des sauerstoffhaltigen CO:

$$CO \rightarrow C + O + Q.$$

Diese Reaktion ist temperaturabhängig und befindet sich in Abhängigkeit von der Temperatur in ei-

Tabelle 3-14. 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) Mehrlagenschweißung	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	Grobtropfiger 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, aluminierten 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, grobtropfiger Werkstoffübergang. Fluoridbasisches Schlackensystem ermöglicht hohe Abschmelzleistungen. Aufgrund des sehr geringen Schwefelgehalts ergibt sich ein sehr risssicheres 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. Risssicheres Schweißgut mit hoher Kerbschlagarbeit bei tiefen Temperaturen.
Z	Alle Fülldrahtelektroden, die durch die vorstehenden Beschreibungen *nicht* erfasst werden.			

nem (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 oder Schutzgasen mit hohen CO_2-Anteilen (bzw. Sauerstoffanteilen) ist daher – zumindest bei hoher Korrosionsbeanspruchung – nicht zu empfehlen.

Die in der Schweißpraxis verwendeten Schutzgase sind in DIN EN ISO 14175 genormt. Sie werden nach ihrem chemischen Verhalten (inert/aktiv) und

Art des Werkstoff-übergangs	Bemerkungen
Ar	**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 Oxidhaut zu durchschlagen, d. h. zu beseitigen. **Lichtbogenform Sprühlichtbogen:** Feinsttropfiger, kurzschlussfreier, wenig zum *»Spritzen«* neigender Werkstoffübergang durch überwiegenden Einfluss des *Pinch-Effektes*. Für viele Werkstoffe geeignet, besonders für NE-Metalle.
Mischgase Ar + CO_2 + O_2	Noch feintropfiger, 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**
CO_2	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. Billiges 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.
CO_2 und hoch CO_2-haltige Gase	Durch erzwungene, periodische Kurzschlüsse sind energiearme *(»kältere«)* Tropfen erzeugbar. Lichtbogenform ist für Schweißarbeiten zweckmäßig, die ein geringes Wärmeeinbringen erfordern: Wurzellagen, Dünnbleche, 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 argonhaltige Gase	Durch Überlagern eines Grundstromes mit Stromimpulsen (*Frequenz* und *Amplitude* 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 *Pinch-Effekt* erforderlich ist (Abschn. 3.3.2.2). **Lichtbogenform Impulslichtbogen**

Bild 3-57
Werkstoffübergang und Lichtbogenformen beim MSG-Schweißen in Abhängigkeit von der Art der Schutzgase (schematisch).

ihrer Zusammensetzung eingeteilt (Tabelle 3-12). Eine Zusammenstellung der Anwendungsbereiche der verschiedenen Schutzgase zeigt Tabelle 3-13. 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.

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 Tabelle 3-14 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.

3.3.3.4.6 MSG-Verfahrensvarianten

3.3.3.4.6.1 MIG-Schweißen (Ordnungsnummer: 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, Bild 3-56.

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 (s. Abschn. 3.3.3.4.4): Die geringe Menge flüssigen Schweißguts, die wegen des flachen Einbrandes an die Schmelzränder fließt, kann die Kerben nicht mehr auffüllen, Bild 3-57.

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 *Bindefehler* oder *Kaltstellen* genannten Defekte, die für das Verfahren charakteristisch sind, vermindern die Bauteilsicherheit entscheidend, da sie in ihrer Wirkung Rissen 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), s. Abschn. 3.3.2.3. 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 Elektrodenspitze soweit, dass die ihn überlagerten Stromimpulse eine mechanische Tropfenablösung durch den Pinch-Effekt bewirken (s. Abschn. 3.3.2.2), wie Bild 3-58 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. Die Wahl der Einstellwerte wird also nicht mehr von der gewünschten Tropfenform und -größe bestimmt, sondern nur von der Höhe des Stromimpulses. Die Wärmezufuhr ist daher grundsätzlich geringer als bei den herkömmlichen MSG-Verfahrensvarianten.

Bild 3-58
Stromverlauf beim MSG-Impulslichtbogenschweißen.
a) Stromimpulse I_p
b) Grundstrom (Gleichstrom) I_g
c) Verfahren arbeitet mit einem Strommittelwert I_m, der unterhalb der kritischen Stromstärke I_{kr} (Bild 3-56) liegt. Der Stromimpuls erzwingt trotzdem den gewünschten Tropfenübergang.

Der Tropfenübergang erfolgt synchron mit der einstellbaren Frequenz der Stromimpulse. Die Anzahl und Größe der übergehenden Tropfen werden also durch die *Größe* und *Frequenz* 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, teureren und knickanfälligen Drahtelektroden (0,8 mm bis 1,2 mm Ø) können dickere (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.

Bild 3-59a) zeigt das Makrogefüge einer mit M22 (etwa ArS1) geschweißten Stumpfnaht aus hochlegiertem Stahl. Man erkennt die durch die noch immer große Oberflächenspannung der Schmelze verursachten typischen Schweißfehler: 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 gemäß Bild 3-59b). Die genannten Fehler und Nachteile werden mit der Impulstechnik sicher vermieden. Daher werden in bestimmten Fällen für hochlegierte Stähle die stärker oxidierenden Schutzgase auf der Basis Ar-CO_2 bzw. Ar-CO_2-O_2 verwendet (s. Tabelle 3-13). Der Abbrand an Legierungselementen ist zwar deutlich größer und die Korrosionsbeständigkeit wegen des Zubrandes an Kohlenstoff und der damit zusammenhängenden Chromcarbidbildung etwas geringer (s. Abschn. 3.3.3.4.4), das Schweißverhalten ist aber wesentlich besser.

3.3.3.4.6.2 MAG-Verfahrensvarianten

Beim **MAG-Schweißen (Ordnungsnummer: 136)** werden aktive Schutzgase verwendet (s. Tabelle 3-12 und 3-13). Es ist zu beachten, dass mit zunehmender Aktivität des Schutzgases, d. h. mit zunehmendem Sauerstoffgehalt der Abbrand erhöht wird. Außer bei CO_2 und bei Schutzgasen mit einem CO_2-Anteil unter 15 % überwiegt der kurzschlussfreie, sprühregenartige Werkstoffübergang.

Beim **CO_2-Schweißen (MAGC)** ist mit praxisgerechten Stromdichten kein kurzschlussfreier, feintropfiger Werkstoffübergang möglich (Bild 3-56). Die kritische Stromdichte liegt in diesem Fall bei 350 A/mm² bis 400 A/mm². Sie ist damit technisch nicht mehr nutzbar[28]. Die Spritzerbildung ist unter CO_2 merklich und die Nahtzeichnung verhältnismäßig schuppig. Dieser **Langlichtbogen** ist die für das Schutzgas CO_2 typische Form des Lichtbogens.

Für die Bildung des Sprühlichtbogens (Ar und Mischgase mit ≥ 80 % Ar) bzw. Langlichtbogens (CO_2) 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.

- Wurzelschweißungen,
- Schweißen in Zwangslage,
- Schweißen von Dünn- und Feinblechen,
- Auftragschweißen.

a) *b)*

Bild 3-59
Makrogefüge einer MSG-geschweißten Stumpfnaht unter ArSl, entspricht M22 nach DIN EN ISO 14175, Vergrößerung 3:1.
a) Übliche Technik
b) Impulstechnik (Impulsfrequenz 100 Hz)

[28] Die Stromdichte ist so groß, dass extreme Überhitzungserscheinungen in der Schmelze beobachtet werden (Verlust an Legierungselementen und Desoxidationsmitteln). Außerdem können diese »Hochstromverfahren« wegen der großen Abschmelzmenge nur maschinell betrieben werden.

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 (Bild 3-54). Die Lichtbogenleistung wird außerdem durch Verkürzen der *Lichtbogenbrenndauer* verringert. Dies geschieht mit Hilfe 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 (besonders gut sind hierfür elektronische Geräte geeignet) muss dem ständigen Wechsel Kurzschluss-Leerlauf bzw. Lichtbogenbrennphase angepasst sein und hinreichend schnell folgen können. Insbesondere muss

Bild 3-60
Werkstoffübergang bei der Kurzlichtbogentechnik (schematisch). Die während der Kurzschlusszeit wirksame elektrische Leistung N = U·I ist wesentlich geringer als die in der Lichtbogenbrennzeit.

die Lichtbogenspannung nach einem Kurzschluss wieder ausreichend schnell zur Verfügung stehen. In Bild 3-60 ist der Werkstoffübergang beim Kurzlichtbogen schematisch dargestellt.

Außer CO_2 können auch *Mischgase* (bestehend aus Gemischen von Ar, CO_2, O_2) verwendet werden. Sie bieten den Vorteil eines geringeren *Einbrands* und einer besseren *Spaltüberbrückbarkeit.* Diese Eigenschaften sind besonders für die Wurzel- und Dünnblechschweißung vorteilhaft.

3.3.3.4.7 Praktische Hinweise; Anwendung und Möglichkeiten

Für eine fachgerechte Durchführung der Schweißarbeiten und die notwendige Gütesicherung sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- Werkstückoberflächen müssen frei von Verunreinigungen (z. B. Rost, Fett, Öl, Farben, sonstige Oberflächenbeläge) sein.
- Wegen der begrenzten Wirksamkeit und Vielfalt der metallurgischen Reaktionen (s. auch Abschn. 3.3.3.4.5) eignen sich die üblichen MSG-Verfahren (außer Fülldrahtelektroden) nicht oder nur bedingt zum Schweißen stärker verunreinigter Stähle.
- Schweißarbeiten *außerhalb* der Werkstatt sind wegen der Gefahr der Schutzgasverwehung als Folge von Luftbewegungen problematisch. Es müssen geeignete Abdeckungen vorgesehen werden. Sicherer ist es, ein weniger empfindliches Verfahren für Schweißarbeiten auf Baustellen zu wählen.

Anders als z. B. beim Lichtbogenhandschweißen ist der Bereich der Einstellwerte (I_A, U_A) erheblich größer (Bild 3-54). Eine Drahtelektrode mit einem Durchmesser von 1,2 mm kann z. B. für Schweißarbeiten an Dünnblech mit 80 A bis 100 A, zum Schweißen einer Kehlnaht aber auch mit 250 A bis 350 A belastet werden. Die daraus resultierende Änderung der Abschmelzleistung ist bedeutend. Je nach der Schweißaufgabe müssen also geeignete Einstellwerte gewählt werden, die sowohl von technischen (z. B. in Bezug auf die fertigungs- und schweißgerechte Bauteilherstellung) als auch von wirtschaftlichen Überlegungen (z. B. in Bezug auf eine ausreichend große Abschmelzleistung) bestimmt 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 *»Nachrechtsschweißen«* bezeichnet) und das *stechende* Schweißen *(»Nachlinksschweißen«).* In Bild 3-61 sind die beiden Arbeitstechniken erläutert.

Die MSG-Verfahren sind einfach *mechanisierbar.* Durch Wahl geeigneter Einstelldaten und Schutzgase lassen sie sich als Hochleistungsschweißverfahren (hohe Abschmelzleistung mit Sprüh- oder Langlichtbogen) oder als Kurzlichtbogen (dünnere Bleche, Wurzellagen) verwenden. Zusammen mit den entsprechenden Schutzgasen können die Verfahren deshalb den unterschiedlichsten *Werkstoffen* und *Werkstückdicken* angepasst werden.

Die kleinste noch gut schweißbare Werkstückdicke liegt bei 0,6 mm, bei noch geringeren Dicken werden die manuellen Schwierigkeiten extrem groß. Für Schweißarbeiten im *Dünnblechbereich* ist das Kurzlichtbogenverfahren nahezu konkurrenzlos. Bei größeren Werkstückdicken macht sich die große Einbrandtiefe positiv bemerkbar. Bei dem tief einbrennenden CO_2-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°. Außerdem ist die Lagenzahl und damit die Schweißzeit erheblich größer, wie Bild 3-38 zeigt. Allerdings erzeugt der tiefe Einbrand einen großen *Aufschmelzgrad* (Abschn. 3.1.3), der bei unsauberen, d. h. weniger gut schweißgeeigneten Stählen zu Problemen führen kann (zu geringe Zähigkeit, heißrissempfindlich, ausgeprägtes Grobkorn).

Ziehendes Schweißen (»Nachrechts«)		Stechendes Schweißen (»Nachlinks«)
Einbrandtiefe *t* **Nahtbreite *b*** **Nahtüberhöhung *h***	größer kleiner größer	kleiner größer kleiner
Porenanfälligkeit	geringer, Schweißgut bleibt länger flüssig, Schutzgas bedeckt Schweißgut und fertige Naht länger;	größer, Schmelzbad kann schlechter ausgasen, es erstarrt schneller;
Beobachtbarkeit	der Nahtoberfläche erleichtert, der Wurzel erschwert;	der Nahtoberfläche erschwert, der Wurzel erleichtert;
Kaltstellen, Bindefehler	Vorlaufen des Schmelzbades leichter vermeidbar, d. h., Kaltstellen sind unwahrscheinlicher;	Vorlaufen des Schmelzbades leichter möglich: Kaltstellen (Bindefehler) sind die Folge;
Anwendung bei Stumpfnähten	bevorzugt für Füll- und Decklagen, für Wurzellagen weniger geeignet;	bevorzugt für Wurzellagen und Schweißen in Zwangslagen; für Füll- und Decklagen in Form von Strichraupen;
Anwendung bei Kehlnähten	für Kehlnahtdicken $a > 4$ mm oft angewendet. Nahtüberhöhungen und Einbrandkerben schwerer vermeidbar.	für Kehlnahtdicken $a \leq 4$ mm; flache Naht, Einbrandkerben leichter vermeidbar.

Bild 3-61
Arbeitstechniken beim MSG-Schweißen.

3.3.4 Unterpulverschweißen (UP) (Ordnungsnummer: 12)

3.3.4.1 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)*, (Bild 3-62). 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 Bild 3-63 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 Amperemeter) erfolgen. Eine genaue Parallelführung des Schweißkopfes zur Schweißnaht und die präzise Einstellung aller Führungs- und Richteinrichtungen ist erforderlich, sonst sind Fehlschweißungen unvermeidlich.

1 Kaverne
2 flüssige Metall- /Schlackenschmelze
3 flüssige Schlacke
4 feste Schlacke
5 erstarrtes Schweißgut
6 aufgeschüttetes Pulver

Bild 3-62
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 dickeren 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. Art, Umfang und Vollständigkeit der metallurgischen Reaktionen (und damit die mechanischen Gütewerte 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 den Drahtförder- und Drahtführungseinrichtungen wird seine Oberfläche verkupfert oder verbronzt. Ein merklicher Korrosionsschutz ist dadurch allerdings nicht erreichbar.

1 Schweißkopf
1a Drahtelektrode
1b Schweißstromzuführung
1c Antrieb für Drahtvorschubrollen
1d Drahtelektrode auf Rolle
1e Drahtrichtrollen
1f Pulvertrichter
1g Pulverabsaugvorrichtung
2 Steuereinheit
3 Steuerleitung

Bild 3-63
UP-Schweißanlage (schematisch).

Die kleine freie Drahtlänge (Abschn. 3.3.3.4.1) 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 meistens 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 zzt. 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/mm^2.

Die für das Verfahren typischen großen und heißen *Schmelzbäder* gestatten i. Allg. nur das Schweißen in waagerechter Position und erfordern eine Badsi-

cherung 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 aufwändig zu beseitigenden Heißrisse entstehen (Abschn. 3.2.4.2, Bild 3-10, Bild 3-68), 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 Gesamtverluste an die Umgebung vermindert, ist der thermische Wirkungsgrad des UP-Verfahrens sehr groß. Bild 3-64 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. Die bessere Ausnutzung der zugeführten Energie erhöht aber nicht nur die Abschmelzleistung, sondern auch den Anteil des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffes. Das Volumenverhältnis von aufgeschmolzenem Zusatzwerkstoff zum Grundwerkstoff beträgt bei stumpfgeschweißten UP-Nähten etwa 1 : 2. Die metallurgische Qualität der Schweißverbindung wird daher wesentlich von der Qualität des Grundwerkstoffes bestimmt. Unberuhigte oder verunreinigte Werkstoffe sollten aus diesem Grunde nicht UP-geschweißt werden.

Der Mechanisierungsgrad dieses vollmechanisch betriebenen Verfahrens (Bild 3-5) kann sehr groß sein. Zur vollständigen Nutzung der wirtschaftlichen und technischen Möglichkeiten sind daher fast immer Vorrichtungen erforderlich.

3.3.4.2 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* (höhere Schweißgeschwindigkeit, Verringerung der Blaswirkung und der Porenneigung)

erzielt werden.

Die Nahtgeometrie wird außer von den Einstelldaten wesentlich von der Stromart und der Polung bestimmt. Daher ist die Wahl der »richtigen« Stromquelle bei vielen Verfahrensvarianten, vor allem bei denen, die mit *mehreren* Drahtelektroden arbeiten, besonders wichtig.

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.

Das Schweißen mit Wechselstrom verringert ganz erheblich die Blaswirkung (Abschn. 3.3.2.5.3) und merklich die Einbrandtiefe.

Bild 3-64
Wärmebilanz beim
a) Lichtbogenschweißen η = 25 % (15 % + 10 %) und
b) Unterpulverschweißen η = 68 % (24 % + 44 %).

Bild 3-65
Verfahrensprinzip des UP-Doppeldrahtschweißens.

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 (Abschn. 3.2.4.2 und Bild 3-10). Hierbei werden zwei Drahtelektroden verwendet, die in einem Schmelzbad niedergeschmolzen werden. Die Drähte werden gemäß Bild 3-65 in einem Abstand von 5 mm bis 10 mm zugeführt. Sie können in Schweißrichtung hintereinander *(Tandem)* oder senkrecht zu ihr *(Paralleldraht)* angeordnet werden. Die Tandem-Methode gemäß Bild 3-66a) hat folgende Vorteile:

Bild 3-66
Anordnung der Drahtelektroden und typische Einbrandverhältnisse beim UP-Mehrdrahtverfahren.
a) Tandemverfahren
b) Paralleldrahtverfahren

- Die Schweißgeschwindigkeit ist größer, d. h., die Wirtschaftlichkeit wird erhöht;
- größere Riss- und Porensicherheit durch leichteres Ausgasen des »langen« Schmelzbades, d. h. bessere Gütewerte der Schweißverbindung.

Die Paralleldrahttechnik nach Bild 3-66b) 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. Eine geringere Strombelastung des Pulvers erhöht im Allg. die metallurgische Qualität des Schweißguts (geringere *»Abbrandverluste«*).

UP-Mehrdrahtverfahren

Zwei oder mehr Drahtelektroden – meistens hintereinander angeordnet – werden mittels getrennter Schweißstromquellen gespeist. Die Lichtbögen können durch eine eigene Steuerung beeinflusst wer- den. Je nach dem Abstand der Drahtelektroden er- gibt sich ein gemeinsames Schmelzbad bzw. zwei oder mehrere getrennte Schmelzbäder. Bei der Variante mit getrennten Schmelzbädern wird die in Schweißrichtung vorlaufende Drahtelektrode mit Gleichstrom, die nachfolgende mit Wechselstrom betrieben, wie

Bild 3-67
Verfahrensprinzip des UP-Mehrdrahtschweißens:
Zwei Schmelzbäder (S1 und S2), zwei Schweißstromquellen (1 = Gleichstrom, 2 = Wechselstrom), Tandem-Anordnung (Bezeichnungen 1 bis 6 s. Bild 3-65).

das Schema, Bild 3-67 zeigt. Der Gleichstromlichtbogen erzeugt den (oft) gewünschten tiefen Einbrand; der Wechselstromlichtbogen verbreitert das Schmelzbad und schmilzt die z. T. schon erstarrte Naht bis zu zwei Drittel wieder auf. Dadurch werden günstige Erstarrungsverhältnisse für die Schweißnaht geschaffen (Abschn. 3.3.4.3). Mit Wechselstrom wird außerdem die gegenseitige Beeinflussung der Lichtbögen – die Blaswirkung, Abschn. 3.3.2.5.3 – wesentlich verringert. 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. Die Gefahr der Heißrissbildung ist geringer, und die mechanischen Gütewerte sind besser.
- Die Schweißgeschwindigkeit wird erheblich gesteigert.

UP-Auftragschweißen mit Bandelektroden

Mit bandförmigen Zusatzwerkstoffen[29] wird der Einbrand in den Grundwerkstoff soweit verringert, dass Aufschmelzgrade (Abschn. 3.1.3) von etwa 5 % erreichbar sind. Daher eignet sich das Verfahren hervorragend zum großflächigen Auftragen nicht artgleicher Werkstoffe, wie z. B. korrosionsbeständiger oder verschleißbeständiger Plattierungen. 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.

[29] Die Standardabmessungen der Bandelektroden betragen 30 mm x 0,5 mm und 60 mm x 0,5 mm. In der Praxis werden bereits Elektroden mit 120 mm x 0,5 mm verwendet. Bei noch breiteren Bandelektroden unterbleibt die hin- und hergehende Lichtbogenbewegung an der Bandkante, das ist aber der für den Abschmelzprozess entscheidende Vorgang. Ursache ist das starke Eigenmagnetfeld, entstanden durch die erforderliche große Schweißstromstärke. Überlagerte Gegen-Magnetfelder können Abhilfe schaffen.

3.3.4.3 Aufbau und Eigenschaften der UP-Schweißnaht

Die häufig großvolumigen Schmelzbäder erstarren in charakteristischer Form (Abschn. 3.2.4.2). 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 Bild 3-68 zeigt – am größten. Die Folgen sind eine ausgeprägte Heißrissneigung und (oder) unzureichende Zähigkeitseigenschaften. Daher ist die Anwendung der Eindrahttechnik (große Durchmesser der Drahtelektroden und große Schweißströme) aus technischen Gründen begrenzt, obwohl sie zunächst große wirtschaftliche Vorteile verspricht.

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 Bild 3-69 zu erkennen. Die Nahtform gemäß Bild 3-69b) ist anzustreben, denn sie gewährleistet Heißrisssicherheit und ermöglicht ein weitgehendes Ausgasen des Schmelzbades.

Es ist zu beachten, dass bisher lediglich von Einlagenschweißungen die Rede war (Bild 3-69), deren Schweißgut etwa aus 2/3 Grundwerkstoff und 1/3

Bild 3-68
Heißrissbildung in einer UP-geschweißten Wurzellage.

Zusatzwerkstoff besteht. Wegen des hohen Grundwerkstoffanteils im Schweißgut werden prinzipiell *Draht-Pulver-Kombinationen* gewählt (s. Abschn. 3.3.4.4), 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.

Bild 3-69
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.

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, allerdings sind die nach einem zu schnellen Abkühlen bei Stahl entstehenden härteren und spröderen Umwandlungsgefüge nicht erwünscht. Die Abkühlung der Schweißverbindung muss daher der Härteneigung des Werkstoffs angepasst sein.

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.

3.3.4.4 Zusatzstoffe

Anders als beim Handschweißen müssen das der Elektrodenumhüllung entsprechende Schweißpulver *und* die dem Kernstab entsprechende Drahtelektrode für eine Schweißaufgabe ausgewählt werden. Die Zusammensetzung des Schweißguts und damit die Gütewerte der Schweißverbindung werden von folgenden Faktoren bestimmt:

- Der *metallurgischen Wirksamkeit* der gewählten Drahtelektroden-Pulver-Kombination, von der die Legierungs-, Desoxidations-, Oxidationsvorgänge, sowie das Entschwefeln und die Porenfreiheit des Schweißguts abhängen;
- dem *Anteil an aufgeschmolzenem Grundwerkstoff*, der bei Verbindungsschweißungen etwa 60 % bis 70 % betragen kann und durch seinen mehr oder weniger großen Gehalt an Verunreinigungen besonders die Zähigkeit des Schweißguts beeinträchtigt;
- den *Einstellwerten*, die von der Werkstückdicke, der Werkstücktemperatur und dem Werkstoff abhängen.

3.3.4.4.1 Zusatzwerkstoffe

Das sind unlegierte, niedrig- und hochlegierte *Runddrähte* oder *Flachbänder* sowie spezielle *Füllmaterialien,* wie aus dem Schema Bild 3-70 hervorgeht. Im Allgemeinen entspricht die chemische Zusammensetzung weitgehend der der zu schweißenden Stahlsorten; sie sind *artgleich* oder *artähnlich*. 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 S3 beträgt danach $3:2 \approx 1{,}5\,\%$.

Für warmfeste Stähle und zum Verbessern der Sicherheit gegen Heißrisse werden molybdänlegier-

Bild 3-70
Zusatzwerkstoffe für das UP-Schweißen.

te Drahtelektroden verwendet, deren Molybdängehalt immer bei etwa 0,5 % liegt:

S2Mo – S3Mo – S4Mo.

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. Ein leicht erhöhter Siliciumgehalt in der Drahtelektrode (S1Si, S2Si) zum Verbessern der Porensicherheit wird lediglich zum Schweißen stark verrosteter oder geseigerter Stähle empfohlen.

Drahtelektroden sind zum Verbessern des Stromübergangs und zum Schutz gegen atmosphärische Korrosion verkupfert. Sie sollten sorgfältig aufgespult (Drahtförderschwierigkeiten!), kreisrund (sonst passieren sie die Kupfer-Stromführungsdüse nicht ruckfrei!) und fettfrei (metallurgische Probleme!) sein und müssen beim Lagern vor Feuchtigkeit geschützt werden (sonst Gefahr des Anrostens, d. h. Gasaufnahme beim späteren Verschweißen).

In letzter Zeit werden in zunehmendem Umfang Fülldrahtelektroden verwendet. Auf den ersten Blick macht ihre Anwendung beim UP-Schweißen wenig Sinn, da sie wesentlich teurer sind und außerdem bereits »Pulver« verwendet wird. Ihre entscheidenden Vorteile sind aber die hohen erreichbaren mechanischen Gütewerte und die Möglichkeit, das Füllpulver in seiner chemischen Zusammensetzung auf die geforderten Eigenschaften nahezu perfekt abstimmen zu können. Der für gleichmäßig hohe Kerbschlagwerte erforderliche Sauerstoffgehalt von etwa 250 ppm bis 350 ppm kann unabhängig vom gewählten Schweißpulver exakt eingehalten werden. Weiterhin lässt sich jede gewünschte Zusatzwerkstofflegierung, d. h. Schweißgutzusammensetzung verhältnismäßig leicht erzeugen.

Unterschieden werden – ähnlich wie bei den Schutzgasschweißverfahren – die *nahtlosen* und die *formgeschlossenen* Fülldrahtelektroden. Die nahtlosen Fülldrahtelektroden weisen gegenüber den Falzdrähten (formgeschlossen) eine Reihe von Vorteilen auf:

- Unempfindlich gegenüber Feuchtigkeitsaufnahme,
- auch nach langer Lagerung ist kein Rücktrocknen erforderlich,
- der Gehalt an diffusiblem Wasserstoff ist gering.

3.3.4.4.2 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 (erleichtert Zünden und Stabilisieren des Lichtbogens). Die mechanischen Gütewerte des Schweißguts werden von der Schweißgutzusammensetzung bestimmt. Diese hängt ab von der Art der Schweißpulver und deren metallurgischen Reaktionen in den übergehenden Tropfen in der Lichtbogenzone. Die Badreaktion mit der Schlacke ist bei den meisten Schweißpulvern zu vernachlässigen.

Als Folge des großen Aufschmelzgrades wird bei *Einlagenschweißungen* die Zusammensetzung des Schweißguts überwiegend vom aufgeschmolzenen Grundwerkstoffanteil bestimmt. Bei *Mehrlagenschweißungen* ist sie – und damit sind auch die Eigenschaften der Schweißverbindung – praktisch ausschließlich von der Draht-Pulver-Kombination und den Einstellwerten beim Schweißen abhängig. Die mechanischen Gütewerte mehrlagig geschweißter Verbindungen gleichen damit weitestgehend denen des reinen Schweißguts.

Bild 3-71 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) Gleichgewicht nähern. Abhängig von den gewählten Einstellwerten ergibt jede Draht-Pulver-Kombination ein charakteristisches Gleichgewichtsniveau der Legierungselemente, das nach unterschiedlichen Lagenzahlen erreicht wird.

Bild 3-71
Einfluss der Lagenzahl auf den Mangangehalt im Schweißgut, hergestellt mit einer bestimmten Draht-Pulver-Kombination. Jede Kombination ergibt im Schweißgut einen charakteristischen »Endgehalt« der einzelnen Legierungselemente.

Das Herstellungsverfahren ist ein wichtiges Charakteristikum der Schweißpulver. Nach DIN EN 760 unterscheidet man die folgenden Herstellungsverfahren 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.

Eine für die Beurteilung des metallurgischen Verhaltens wichtige Einteilung der Schweißpulver berücksichtigt ihren mineralogischen Aufbau (z. B Rutil-Silicat-Typ, basischer, fluorid-basischer Typ, ähnlich wie bei den umhüllten Stabelektroden). In den Bezeichnungen werden nur die Hauptbestandteile genannt. Die Herstellungsart (F, B oder M) muss aber zusätzlich angegeben werden. Eine Übersicht vermittelt Tabelle 3-15.

Schmelzpulver

Herstellung: Die Pulverbestandteile – vorwiegend Oxide der Elemente Al, Ba, Ca, Ka, Mn, Na, Si, Zr – werden zerkleinert. Anschließend wird ihnen in einem Röstofen die Feuchtigkeit ausgetrieben und einige Verunreinigungen entfernt. Danach werden sie bei 1500 °C bis 1800 °C in Elektro- oder Kupolöfen geschmolzen.

Die glasartige Schmelze wird anschließend durch *Wassergranulieren* oder Schäumen »körnig« (Körner von etwa 5 mm Durchmesser) gemacht. Ein gleichzeitiges Einblasen von Luft während des Wassergranulierens *(Schäumen)* ergibt die feinporösen, sehr leichten, geschäumten Schmelzpulver. Bei der *trockenen Granulation* wird die Schmelze in eine wassergekühlte Stahlwanne abgegossen, in der sie als dünne Kruste erstarrt. Abhängig von der Zusammensetzung und der Erstarrungsgeschwindigkeit der Pulverschmelze können die Pulver amorph oder kristallin erstarren. Die Teilchen werden gemahlen, auf die gewünschte Körnung ausgesiebt und verpackt.

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 Handlingsvorgängen 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 Stabelektroden (Abschn. 3.3.2.4.3) 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

Herstellung: Die feinstgemahlenen Bestandteile werden nach dem Glühen mit einem Bindemittel (meist Wasserglas) verdickt, wobei sich unter dem Einfluss der Oberflächenspannung schon ein »Vorgranulat« bildet. Anschließend erhalten sie auf dem rotierenden Granulierteller ihre nahezu kugelige

Tabelle 3-15. 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 %)	**M**angan-**S**ilicat
CS	$CaO + MgO + SiO_2$ (min. 55 %), CaO + MgO (min. 15 %)	**C**alcium-**S**ilicat
ZS	$ZrO_2 + SiO_2 + MnO$ (min. 45 %), ZrO_2 (min. 15 %)	**Z**irkonium-**S**ilicat
RS	$TiO_2 + SiO_2$ (min. 50 %), TiO_2 (min. 20 %)	**R**util-**S**ilicat
AB	$Al_2O_3 + CaO + MgO$ (min. 40 %), Al_2O_3 (min. 20 %), CaF_2 (max. 22 %)	**A**luminat-**B**asisch
AF	$Al_2O_3 + CaF_2$ (min. 70 %)	**A**luminat-**F**luorid-basisch
FB	$CaO + MgO + MnO + CaF_2$ (min. 50 %), SiO_2 (max. 20 %), CaF_2 (min. 15 %)	**F**luorid-**B**asisch
AR	$Al_2O_3 + TiO_2$ (min. 40 %)	**A**luminat-**R**util
AS	$Al_2O_3 + SiO_2 + ZrO_2$ (min. 40 %), $CaF_2 + MgO$ (min. 30 %), ZrO_2 (min. 5 %)	**A**luminat-**S**ilicat
Z	Andere Zusammensetzungen	spe**Z**ial

Gestalt (Agglomeration). Das Pulver wird anschließend zwischen 600 °C und 900 °C getrocknet, wobei das Wasserglas abbindet und die restliche Feuchtigkeit ausgetrieben wird. Hierdurch ergeben sich typische Wassergehalte im Pulver von etwa 0,02 %, die im Schweißgut zu Wasserstoffmengen von 3 bis 4 ppm führen (können). Die (Glüh-)Temperaturen überschreiten in keinem Fall die geringste Reaktionstemperatur (Schmelztemperatur) der Gemengebestandteile.

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 »kochen« beginnt. Die hoch kieselsäurehaltigen (die sauren Mangan-Silicat-Typen MS) Pulver sind am höchsten (etwa 2000 A), die basischen am niedrigsten (etwa 1000 A) strombelastbar.

Die Schmelzpulver werden in **Körnungen** verschiedener Größe, die agglomerierten 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 dem

- Schweißpulver, dem
- Grundwerkstoff, der
- Drahtelektrode, den
- Einstellwerten beim Schweißen und der
- Anzahl der geschweißten Lagen.

Die chemische Charakteristik der *Umhüllung* der Stabelektroden beschreibt das metallurgische Verhalten des Schweißguts (Abschn. 3.3.2.4.3) hinreichend genau. Beim UP-Verfahren ist dagegen die metallurgische Wirksamkeit (Legierungsarbeit, Desoxidationsvorgänge, Entschwefeln) in weiten Grenzen durch die Möglichkeit einstellbar, die Kombination Drahtelektrode und Schweißpulver relativ »frei« wählen zu können. Die chemische Charakteristik des Schweißpulvers wird i. Allg. mit dem *Basizitätsgrad* beschrieben, der oft mit der Formel von *Boniszewski* berechnet wird:

$$B = \frac{CaO + MgO + BaO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + 0{,}5 \cdot (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} + \frac{Li_2O + CaF_2 + 0{,}5 \cdot (MnO + FeO)}{SiO_2 + 0{,}5 \cdot (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}.$$

Gemäß dieser Beziehung wird die Summe der basisch wirkenden Bestandteile durch die Summe der sauer wirkenden dividiert. Ähnlich wie bei den

Bild 3-72
Zu- und Abbrandverhältnisse von Mangan bei verschiedenen Schweißpulvern (P1, P2, P3) in Abhängigkeit vom Mangangehalt der verwendeten Drahtelektroden (S1, S2, S3, S4).

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 (Bild 3-72, mit Ort für Spanentnahme).

Bild 3-73
Einige Möglichkeiten der Schmelzbadsicherung beim UP-Schweißen.
❶: *Genutete Kupferschiene*
❷: *Flachstahl-Unterlage*
❸: *geeignete Anordnung der Fügeteile*
❹: *Pulverkissen auf Kupferschiene*
❺: *Vorlegen von Handlagen*

Das Ergebnis dieser Auftragschweißversuche wird in Schaubildern dargestellt. Der Zu- und Abbrand – dies ist die Differenz zwischen dem Gehalt des jeweiligen Legierungselements 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.

Mit Hilfe dieser Schaubilder können über das metallurgische Verhalten des Schweißguts bestimmte Aussagen (Abbrand Zubrand von Legierungselementen) gemacht werden. Dies sei an Hand von Bild 3-72 für das Element Mangan erläutert:

❒ **Beispiel 1:**
Mit welchem Zubrand (bzw. Abbrand) ist zu rechnen, wenn die Draht-(S1)-Pulver-(P1)-Kombination verwendet wird?
Man ermittelt $\Delta Mn \approx 0{,}6\,\%$.

❒ **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 (≈ 1,5 % Mn) erhält man $\Delta Mn \approx -0{,}4\,\%$ (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.

3.3.4.5 Hinweise zur praktischen Ausführung

Es sind besondere Maßnahmen erforderlich, um das Durchbrechen des verhältnismäßig großvolumigen, heißen, also dünnflüssigen Schweißguts zu verhindern. In Bild 3-73 sind einige Möglichkeiten der Schmelzbadsicherung dargestellt:

❶: Eine üblicherweise genutete Kupferschiene führt die Wärme des Schmelzbades ab, ohne selbst aufgeschmolzen zu werden.

❷: Ein unter die Fügeteile gelegter Flachstahl (Mindestdicke ≥ 10 mm) wird angeschmolzen, bleibt also in der Regel mit der Schweißnaht verbunden. Wegen der erheblichen Kerbwirkung ist diese Badsicherung für dynamisch beanspruchte Konstruktionen *nicht* zu empfehlen.
❸: Die geometrische Anordnung der Fügeteile verhindert das Durchbrechen der Schmelze, z. B. Y-Nahtvorbereitung oder Überlappstoß mit Sicke (vorwiegend bei kleineren Behältern, z. B. Propanflaschen).
❹: Kupferschienen, die mit Schweißpulver bedeckt sind *(»Pulverkissen«)*, leiten intensiv die Wärme ab. Das geschmolzene Pulver (Schlacke) stützt und formt die Unterseite der Wurzel.
❺: 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. Pulverkissen verhalten sich in dieser Hinsicht erheblich vorteilhafter, Bild 3-73 ❹).

Die Schweißnahtvorbereitung für das UP-Schweißen muss wesentlich genauer erfolgen als beim Handschweißen, weil bei größeren Toleranzen der Nahtabmessungen die Gefahr besteht, dass die dünnflüssige Schmelze durchbricht. Die Fugenflanken werden daher normalerweise mit Hilfe einer spanenden Bearbeitung oder des maschinellen Brennschneidens erzeugt.

3.3.4.6 Anwendungen und Anwendungsgrenzen

Das UP-Verfahren eignet sich besonders zum Schweißen langer, gerader Nähte, d. h. von Längs- und Rohrrundnähten. Für gekrümmte Nähte sind entsprechende Führungseinrichtungen des Schweißkopfes oder des Werkstücks erforderlich, die die Kosten und die Störanfälligkeit des Verfahrens sehr stark erhöhen. Die sehr große Abschmelzleistung und hohe Schweißgeschwindigkeit (bis 4 m/min), die größere Poren- und Risssicherheit sind die herausragenden Merkmale des Verfahrens. In den meisten Fällen ist es wirtschaftlicher und technisch viel zweckmäßiger, eine große Schweißgeschwindigkeit (Schweißzeit, d. h., die Herstellzeit wird geringer) zu wählen als eine große Abschmelzleistung (d. h. großes Schmelzbad, ungünstige Kristallisationsformen, Heißrissgefahr). UP-Schweißen wird bevorzugt eingesetzt im

- *Kessel-* und *Apparatebau* (Rund-, Längs-, Innen-, Außen- und Spiralrohr-Schweißungen), im
- *Tankbau,* auf
- *Werften* (Paneele, Rippen, Sektionen, Deck, Außenhaut), im
- *Fahrzeugbau* (Chassis, Achsbrücken), im
- *Maschinenbau* (Ständer, Gehäuse), im
- *Stahlbau, Brückenbau* (Träger, Platten).

Das Schweißen von Stumpfnähten bei Werkstückdicken unter 4 mm ist wegen des tiefen Einbrandes problematisch und unsicher und erfordert in jedem Fall geeignete Schmelzbadsicherungen und vor allem festspannende und ausreichend massive Vorrichtungen. Allerdings lassen sich mit speziellen Fülldrahtelektroden und bei Wahl von I-Stößen sehr betriebssichere Schweißnähte herstellen

3.3.5 Elektronenstrahlschweißen (EB)[30] (Ordnungsnummer: 51)

3.3.5.1 Verfahrensprinzip

Bei diesem Verfahren 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 den Fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderte bekannt. Seit dieser Zeit nimmt der Anwendungsbereich der »Strahlenschweißverfahren« ständig zu.

Bild 3-74 zeigt schematisch den Aufbau einer Elektronenschweißanlage. Der Elektronenstrahl wird mit Hilfe eines aus Kathode (1), Steuerelektrode (2) (*Wehnelt*-Zylinder) und Anode (3) bestehenden Triodensystems (Strahlerzeugungssystem) erzeugt. 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 Lichtgeschwindig-

[30] Die Verfahrensbezeichnung »EB« ist die Abkürzung für **E**lectron **B**eam Welding.

keit beschleunigt. Hohe Strahlströme erfordern in erster Linie möglichst hohe Temperaturen an der Kathode, was sehr große Schmelztemperaturen des Kathodenwerkstoffs erfordern. Besonders geeignet hierfür sind Tantal und Wolfram, z. T. legiert mit Rhenium, die einen sehr geringen Dampfdruck im Vakuum besitzen, wodurch eine hohe Lebensdauer der Kathode erreicht wird. Die zwischen Kathode und Anode angebrachte Steuerelektrode (2) regelt den Elektronenfluss, wobei die spezielle Form der auch *Wehnelt*-Zylinder genannten Einrichtung die Bündelung des Elektronenflusses bewirkt, vergleichbar in ihrer Wirkung etwa 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 fopkussiert. Mit Ablenkspulen (7) lässt sich der Elektronenstrahl oszillierend bewegen. Der Schweißprozess erfolgt in der Vakuumkammer (8).

Bild 3-74
Schematische Darstellung einer Elektronenschweißanlage. Es bedeuten:
1 Kathode
2 Wehnelt-Zylinder (Steuerelektrode)
3 Anode
4 Justierspule
5 Vorfokusspule
6 Hauptfokusspule
7 Ablenkspule
8 Vakuumkammer
9 Sichtfenster
10 Werkstück
11 Werkstückschlitten
12 Kammertür
13 Anschluss für Vakuumpumpen
14 Einblickoptik

Bild 3-75
Vorgänge beim Tiefschweißen mittels EB- bzw. des LA-Schweißverfahrens (nach Messer-Griesheim).
a) Beim Auftreffen des Elektronen- bzw. Laserstrahls 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 dem gewünschten Ziel entsteht am Ende des Erstarrungsprozesses eine Schweißnaht, ein Bohrloch oder eine Schnittfuge.

3.3.5.2 Eigenschaften und Anwendungen

3.3.5.2.1 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 (abhängig von seinem Fokussierungsgrad) auf die Werkstückoberfläche zu extrem tiefen, schmalen Schweißnähten und sehr großen Schweißgeschwindigkeiten. Diese Möglichkeit ist einer der bemerkenswerten Vorteile des Verfahrens und die wichtigste Ursache für die große Wirtschaftlichkeit des Elektronenstrahlschweißverfahrens.

Beim Auftreffen des Elektronenstrahls auf die Werkstückoberfläche (Bild 3-75a) werden die Elektronen stark abgebremst, sie dringen dabei aber nur einige Mikrometer in den festen Werkstoff ein. Als Folge der großen Leistungsdichte schmilzt und verdampft der Werkstoff an der Aufschlagstelle ohne große Wärmeableitung. Der verdampfende Werkstoff drückt die Schmelze nach unten und zur Seite, wobei sich ein schmelzflüssiger, zylinderförmiger Kanal bildet, dessen Kern aus Metalldampf besteht, Bild 3-75b. Bei ausreichender Energiezufuhr durchdringt der Kanal die gesamte Werkstückdicke. Damit der Dampfkanal während des Schweißprozesses ständig offen bleibt, muss der Dampfdruck die umgebende Schmelze gegen ihren hydrostatischen Druck und die Oberflächenspannung der Schmelze an die Kanalwand drücken. Für den ordnungsgemäßen Ablauf des Schweißprozess ist es wichtig, dass die Nahtfuge genau in der Achse des Elektronenstrahls liegt.

Bild 3-76
Vergleich von Aufschmelzquerschnitten verschiedener Schmelzschweißverfahren.
Es bedeuten:
❶: *Elektronenstrahlschweißnaht (Tiefschweißen)*
❷: *Elektronenstrahlschweißen (Wärmeleitungsschweißen)*
❸: *Plasmaschweißnaht*
❹: *MAG-Schweißnaht*
❺: *WIG-Schweißnaht*

Bild 3-76 zeigt beispielhaft die Einbrandformen einiger bekannter Schweißverfahren im Vergleich zum Elektronenstrahlschweißen. Es ist deutlich die Überlegenheit dieses Verfahrens hinsichtlich der erreichbaren Einbrandtiefe erkennbar. Wird das Verfahren mit einer geringen Strahlintensität (das sind ungefähr 100 kW/cm²) betrieben oder der Strahl defokussiert (»Wärmeleitungsschweißen«), dann lassen sich Einbrandtiefen erreichen, wie sie auch mit konventionellen Verfahren erreichbar sind. Da Metalle Laserstrahlen, abhängig von der eingestrahlten Wellenlänge, bis zu 95 % reflektieren, reicht die Strahlungsintensität nicht aus, um eine Dampfkapillare *(»keyhole«)* zu erzeugen.

3.3.5.2.2 Die Schweißnahtvorbereitung

Die konventionellen 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 Mehrlagentechnik. Mit dem EB-Schweißverfahren können mit Hilfe des Tiefschweißeffekts Schweißverbindungen (Stumpfstoß) ohne Zusatzwerkstoff als I-Naht hergestellt werden, Bild 3-77. Diese lässt sich einfach erzeugen und ist deshalb die bevorzugte Nahtform für dieses Schweißverfahren. Die damit schweißbare maximale Wanddicke 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 ausfüllen würde. Lunkerbildung und gravierende Fehlschweißungen wären die Folge.

Mit Badunterlagen oder Zentrierlippen, Bild 3-77 lässt sich eine gute Zentrierung der Fügeteile erreichen, im Gegensatz zum einfachen I-Stoß. Außerdem entsteht bei innen nicht zugänglichen Hohlkörpern so keine Spritzerbildung. Das wird z. B. gefordert, wenn während des späteren Betriebs Korrosionserscheinungen auftreten (können).

3.3.5.2.3 Anwendungsbeispiele

Einer der größten Vorteile des EB-Schweißverfahrens ist die extreme Leistungsdichte und damit verbunden die sehr große Schweißgeschwindigkeit. Sie ist die Ursache für die Möglichkeit, nahezu verzugsfreie Schweißverbindungen herstellen zu können. 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 sauber, d. h. frei von Oberflächenbelägen aller Art (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 das Schweißen eine Reihe von weiteren Anwendungsmöglichkeiten, wie z. B. das Härten, Beschichten und Umschmelzen von Oberflächen sowie das Bohren (≥ 0,1 mm Durchmesser, gepulster Strahl), s. auch Bild 3-82.

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 Überlappstoß, bevorzugt angewendet im Dünnblechbereich ($s \leq 3$ 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)	Hohlraum (Pfeil) zu groß Hohlraum (Pfeil) richtig
a) Hohlraum mit Entlüftungsbohrung versehen b) Keine besondere Vorbereitung für Überlappnaht erforderlich	a) b)
Schweißen von Fügeebenen, die für konventionelle Schweißverfahren nicht zugänglich sind	Blindnaht Schweißnaht

Bild 3-77
Einige Konstruktionshinweise und Gestaltungsgrundsätze für das Elektronenstrahlschweißen, nach Merkblatt DVS 3201.

3.3.5.2.4 Schweißeignung der Werkstoffe

Eine wichtige Voraussetzung für die Herstellung betriebssicherer und wirtschaftlicher Schweißverbindungen ist die Kenntnis des Werkstoffverhaltens bei den von konventionellen Schweißverfahren stark unterschiedlichen thermischen Ereignissen beim EB-Schweißverfahren.

Die extreme Abkühlgeschwindigkeit des Schweißnahtbereichs führt zu einer sehr feinkörnigen Erstarrung und einer minimalen Überhitzung des Schweißguts. Die typische gütevermindernde Gussstruktur ist daher nur schwach ausgebildet. Da die Breite der Wärmeeinflusszone insgesamt sehr schmal ist, sind die mechanischen Gütewerte der Schweißverbindung i. Allg. gut. Die mit den großen Abkühlgeschwindigkeiten verbundenen extremen (mehrachsigen) Schweißeigenspannungen können allerdings bei weniger verformbaren Werkstoffen zur Rissbildung im Bereich der Schmelzgrenze bzw. im Schweißgut führen.

Das Ausgasen der Schweißschmelze wird durch das Hochvakuum sehr begünstigt. Das ist ein weiterer Grund für die hervorragenden mechanischen Gütewerte der Schweißverbindung.

Im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren nimmt wegen der großen Abkühlgeschwindigkeit die Härteneigung bei Stählen schon oberhalb 0,15 % Kohlenstoff 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 mit höherem Kohlenstoffgehalt ($C \geq 0{,}4\,\%$) müssen zum Vermeiden von Kaltrissen allerdings wärmevor- bzw. -nachbehandelt werden.

Hochlegierte Stähle sind bis auf wenige Ausnahmen immer elektronenstrahlschweißgeeignet. Das hier vorherrschende Problem der Heißrissbildung (Schweißgut und Wärmeeinflusszone) lässt sich mit einem δ-Primärferritanteil im Schweißgut von > 5 bis 10 % sicher beherrschen.

Die schweißtechnische Verarbeitung von Grauguss, Temperguss sowie Gusseisen mit Kugelgrafit bereitet allerdings wegen des sehr großen Kohlenstoffgehalts dieser Werkstoffe große Probleme. Die Schweißnaht ist extrem spröde und rissanfällig. Eine Wärmevor- bzw. -nachbehandlung ist daher zwingend erforderlich.

Die hochreaktiven Metalle, z. B. Titan, lassen sich wegen der Abwesenheit atmosphärischer Gase hervorragend EB-Schweißen. So ist dieses Verfahren das einzige zum (Tief-)Schweißen von Titan.

3.3.5.2.5 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Im Folgenden sollen in einer Zusammenstellung die wichtigsten Vorteile des EB-Schweißverfahrens dargestellt werden:

- Im Vergleich zu allen konventionellen Schweißverfahren ist das spezifische Wärmeeinbringen am niedrigsten.
- Es ergeben sich schmalste Wärmeeinflusszonen, die zu einem extrem geringen Verzug führen.
- Auflösen komplizierter Konstruktionen in einfacher zu fertigende Baugruppen, 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. Es ergeben sich anlauffarbenfreie Schweißnähte.
- Gleichzeitiges Schweißen an mehreren Orten: Der Strahl wird durch das Ablenksystem in Bruchteilen von Sekunden an die jeweiligen Schweißorte geführt und setzt hier den Schweißvorgang fort.
- Hohe Wirtschaftlichkeit durch Einlagenschweißungen bei großen Wanddicken und sehr großer Schweißgeschwindigkeit.
- Verbindungsschweißungen unterschiedlicher Werkstoffe ist meistens problemloser als mit konventionellen Verfahren möglich.

Darüber hinaus existieren aber auch einige Nachteile des EB-Schweißverfahrens:

- Große Abkühlgeschwindigkeit erhöht die Aufhärtungsgefahr und damit die Rissgefahr.
- Das Verfahren erfordert große Investitionskosten.
- 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 von der Größe der Strahlkammer begrenzt.
- Für den reibungslosen und optimalen Betrieb ist ein erhebliches »Know-how« erforderlich.

3.3.6 Laserstrahlschweißen (LA) (Ordnungsnummer: 52)

3.3.6.1 Verfahrensprinzip

Das Wort »Laser« ist ein aus dem Amerikanischen stammendes Kunstwort, das die Abkürzung für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation ist. Die Übersetzung lautet etwa sinngemäß: Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission.

Im Gegensatz zum »normalen« Licht (z. B. das einer Glühbirne) ist die Laserstrahlung gleichgerichtet und phasengleich, sie ist kohärent (gleiche Phasenlage zu unterschiedlichen Zeiten an verschiedenen Orten im Raum, das ist die Grundlage der Lichtverstärkung) und monochromatisch und ist nur geringfügig divergent, d. h. ihre Strahlaufweitung beträgt nur einige zehntel Millimeter.

Bild 3-78
Prinzip der Laserstrahlung, nach Dilthey.

Bild 3-78 zeigt sehr vereinfacht das Prinzip der Laserstrahlung. Im Resonator wird das (aktive) Lasermedium durch Energiezufuhr (elektrische Gasentladung, Blitzlampen) in den *angeregten* Zustand gebracht. Beim Rücksprung in den Grundzustand oder in einen energetisch niedrigeren Zustand wird Energie in Form eines Lichtquants frei. Die Wellenlänge des emittierten Lichts ist für das jeweilige Lasermedium charakteristisch. Angeregte Elektronen springen nach etwa 10^{-8} bis 10^{-7} s in den Grundzustand zurück (ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit in den metastabilen Niveaus beträgt aber bis zu 1 s). Diese dienen als *»Speicher«* für angeregte Elektronen. Die Energiezufuhr des Lasers *(»Pumpen«)* füllt die metastabilen Niveaus mit Elektronen.

Beim Zurückfallen eines Elektrons vom höheren Energieniveau E_2 auf das Ausgangsniveau E_1 wird ein Photon der Energie $E_{ph} = hf = E_2 - E_1$ ausgesandt, Bild 3-79b. Dieser Vorgang verläuft spontan und ungerichtet. Er kann aber auch dadurch *»induziert«* werden, dass ein Elektron zu einem Übergang von E_2 nach E_1 *»stimuliert«* wird. Das dabei emittierte Photon verstärkt das primäre, Bild 3-79c. Die Emission erfolgt jetzt gleichgerichtet und phasengleich, sie ist kohärent und monochromatisch. Zwischen den parallel laufenden Spiegeln des Resonators (einer von ihnen ist halbdurchlässig), kann sich eine stehende Welle ausbilden, Bild 3-78. Photonen, die sich senkrecht zu den Spiegeloberflächen bewegen, durchqueren immer wieder das aktive Material und werden verstärkt. Die sich schräg zur Längsachse bewegenden Photonen verlassen sehr schnell das aktive Medium und werden nicht verstärkt. Den (teildurchlässigen) Auskoppelspiegel verlässt ständig ein Bruchteil der Photonen in Form der Laserstrahlung.

Bild 3-79
Wechselwirkungen zwischen Photonen und Elektronen in einem Atom, nach Hering u. a.

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:

- **Nd-YAG-Laser** [31]. Er ist ein Festkörperlaser, der vorwiegend zum Schweißen verwendet wird. Die Auskopplung der Laserstrahlen erfolgt mit Lichtleitfasern, mit denen die Laserstrahlen ohne große Probleme direkt an die Wirkstelle geführt werden. Die Wellenlänge der Laserstrahlung beträgt 1,06 µm.
- **CO_2-Laser.** Der aktive Bestandteil dieses Lasertyps besteht aus CO_2-Molekülen sowie N_2- und He-Anteilen. Die Anregung des Mediums erfolgt indirekt über eine elektrische Gasentladung.
- **Diodenlaser.** Der Laserstrahl wird hier von einer mikroelektronischen Diode (GaAs-Halbleiter) erzeugt. Hoher Wirkungsgrad bis zu 50 %. Entkopplung mit Lichtleitkabeln ist möglich.

[31] Der Kristall ist ein **Y**ttrium-**A**luminium **G**ranat (Nd-YAG), bei dem im Gitter Y3+-Ionen durch Nd3+-Ionen (Neodym) ersetzt werden, die der aktive Bestandteil sind.

Bild 3-80
Schematischer Aufbau einer CO_2-Laserschweißanlage, nach Dilthey.

Bild 3-80 zeigt schematisch den Aufbau einer CO_2-Laserschweißanlage. Diese besitzt im Vergleich zu anderen Lasersystemen einen relativ hohen Wirkungsgrad ($\eta = 15\,\%$). Der CO_2-Laserstrahl wird vom Resonator über ein aus Umlenkspiegeln bestehendes Strahlführungssystem auf das Werkstück geleitet. Am Werkstück wird der Strahl schließlich auf die für die Bearbeitungsaufgabe erforderliche Form gebracht.

Eine visuelle Einführung findet man unter www.wissensfloater.de unter Produktionstechnik: Metalle schneiden mit dem Laserstrahl.

3.3.6.2 Eigenschaften und Anwendung

Auch beim Laserstrahlschweißen wird der Tiefschweißeffekt angewendet, der bereits in Abschn. 3.3.5.2.1 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, dessen Durchmesser etwa dem des Laserstrahls entspricht. Der Dampfkanal bewegt sich entlang dem Schweißstoß. Der aus ihm entweichende Metalldampf erzeugt ein Plasma über der Werkstückoberfläche. Damit dieses Plasma den einfallenden Laserstrahl nicht defokussieren kann und damit den Schweißprozess empfindlich stört, führt man inerte Gase (oder Mischungen von ihnen) als Prozessgas zu. Dieses schützt das Schmelzbad außerdem vor dem Einfluss der atmosphärischen Gase. Das Laserstrahlschweißen erfordert 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, Bild 3-77.

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 % sind ausgezeichnet laserstrahlschweißgeeignet. In Stählen über 0,2 % Kohlenstoff entstehen als Folge der extremen Abkühlgeschwindigkeit oftmals unzulässige Härtespitzen. Abhilfe schafft in den meisten Fällen ein Defokussieren des Laserstrahls.

Bild 3-81
Absorption verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Laserstrahlung.

Die Energieeinkopplung hängt sehr stark von der Absorption der Laserstrahlung ab. Diese Größe wird von der Oberflächenqualität und von der Wellenlänge der Laserstrahlung bestimmt, Bild 3-81. Danach lässt sich z. B. das hochreflektierende Metall Kupfer kaum laserstrahlschweißen, es wird aber als Spiegelwerkstoff eingesetzt. Stahlwerkstoffe reflektieren die Laserstrahlen bis zu 95 %, d. h. bei geringen Strahlintensitäten ($I \leq 10^5$ W/cm^2) ist daher lediglich ein Wärmeleitungsschweißen möglich, bei dem nur die Oberfläche angeschmolzen wird. Abhängig von der Strahlintensität sind eine Reihe verschiedenartigster Metallbearbeitungen möglich. Bild 3-82 zeigt die Einsatzbereiche des Werkzeugs »Laser« in der Metallbearbeitung.

Bild 3-82
Einsatzbereiche des Lasers in der Metallbearbeitung, nach Dilthey.

Die Möglichkeit, die Strahlintensität an der Werkstückoberfläche durch Fokussieren und Ändern der Bearbeitungsgeschwindigkeit reproduzierbar ändern zu können, machen den Laser zu einem flexiblen, berührungslosen Werkzeug.

Selbst (thermoplastische) Kunststoffe lassen sich wegen der einfachen und weitgehenden Änderung der Strahlintensität schweißen. Die Schweißnähte werden meistens 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 absorbierende Partikel (z. B. ca. 0,3 % Ruß) zu, wodurch der Kunststoff zu schmelzen beginnt. Die entstandene Wärme wird auch an das obere Fügeteil abgegeben. Die Fügeteile müssen durch äußeren Druck fixiert werden.

3.3.6.3 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Im Folgenden werden summarisch einige Vor- und Nachteile des Laserschweißverfahrens mitgeteilt:

- Es ist keine Vakuumkammer erforderlich.
- Eine Abschirmung des Arbeitsraumes gegen Röntgenstrahlung ist nicht erforderlich.
- Beim Festkörperlaser (Nd-YAG-Laser) erfolgt die Strahlführung mit Hilfe von Glasfaserkabeln, wodurch diese *»beweglich«* wird. Dreidimensionale Konturen lassen sich so relativ einfach mit Hilfe von Robotern schweißen.
- Bei Einbrandtiefen unter 5 mm und schweißgeeigneten Werkstoffen bei großen Werkstücken kostengünstiger als das EB-Schweißverfahren.
- Anders als beim EB-Schweißverfahren ist eine elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffs nicht erforderlich.
- Extrem große Abkühlgeschwindigkeiten.
- Hohe Investitionskosten.

3.4 Widerstandsschweißen (Ordnungsnummer: 2)

Die stoffschlüssige Verbindung der Fügeteile beim Widerstandsschweißen elektrisch leitfähiger Werkstoffe wird mit Hilfe eines durch die Verbindungsstelle fließenden elektrischen Stromes durch den **elektrischen Widerstand** der Schweißzone erzeugt (Widerstandswärme, *Joule*sche Wärme). Es wird mit oder ohne Kraft und in den meisten Fällen ohne Schweißzusatz(-werkstoff) 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 Widerstandserwärmen werden die Stoßflächen der Fügeteile aufgeschmolzen, und etwaiger Schweißzusatz wird verflüssigt, siehe Abschn. 3.4.2.

Die wichtigsten Widerstandspressschweißverfahren sind

- Punktschweißen,
- Rollennahtschweißen (Foliennahtschweißen, Folienstumpfnahtschweißen),
- Buckelschweißen,
- Pressstumpfschweißen und
- Abbrennstumpfschweißen.

Bild 3-83
Verfahrensprinzip des Widerstandspunktschweißens.

Der Anwendungsbereich der Verfahren erstreckt sich von Folienschweißungen bis zu Verbindungen mit einer Gesamtwerkstückdicke von etwa 10 mm. Bei Schweißströmen von einigen 1000 A bis über 100 000 A liegen die Schweißspannungen deutlich unter 20 V. Die erforderliche erhebliche elektrische Leistung wird im Sekundärkreis geeigneter (leistungsfähiger) Transformatoren erzeugt. Bild 3-83 verdeutlicht schematisch das Prinzip des (Punktschweiß-)Verfahrens.

3.4.1 Widerstandspressschweißen

3.4.1.1 Widerstandspunktschweißen (Ordnungsnummer: 21)

3.4.1.1.1 Wärmeerzeugung an der Schweißstelle

Durchfließt ein elektrischer Strom I den *ohm*schen Widerstand R während einer Zeit t, dann wird in ihm eine Wärmemenge erzeugt, die nach dem *Joule*schen Gesetz berechnet werden kann, Bild 3-84:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t.$$

Hier ist $R = \Sigma R_i = R_1 + R_2 + ... + R_7$ 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 – das ist die gewünschte Verbindungsstelle zwischen den Werkstücken – die *größte* Wärmemenge erzeugt wird. Die Erwärmung aller anderen Teilwiderstände sollte möglichst gering sein (»Verlustwärme«, die auch die Punktschweißelektroden verschleißt). 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 (siehe Abschn. 3.4.1.1.5).

Die Differenz aus erzeugter Wärmemenge je Zeiteinheit durch Leitung (und Strahlung) und abgeführter 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, s. DVS-Merkblatt 2902-2. Große Abkühlgeschwindigkeiten als Folge einer großen Wärmeleitfähigkeit führen außerdem bei Werkstoffen wie Stahl zu Aufhärtungserscheinungen und damit zur Rissneigung. 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

Bild 3-84
Typische Temperaturverteilung beim Punktschweißen.

Bild 3-85
Einfluss der Elektrodenkraft auf den Kontaktwiderstand beim Punktschweißen.

ein Anlegieren *(»Kleben«)* der Elektroden auf dem Werkstück zu vermeiden.

Bild 3-84 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.

Die für den Punktschweißprozess erforderliche Wärmemenge ist nicht nur gemäß dem *Joule*schen Gesetz von I, R und t abhängig, sondern auch von einer Reihe verfahrenstechnischer Besonderheiten und Erfordernissen sowie den Eigenschaften des zu schweißenden Werkstoffs.

3.4.1.1.2 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. schlechtleitender 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 Kontaktwiderstand geringer, wie Bild 3-85 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. 3.4.1.1.4) – 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 mit Hilfe von
- *mechanischen Verfahren* (Bürsten, Schleifen, Schaben) oder mit
- *physikalisch-chemischen Verfahren* (z. B. Glühen in reduzierender Atmosphäre, Beizen)

erreicht werden.

Gemäß 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 *ohm*scher 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«* (Sekundärfensteröffnung, Abschn. 3.4.1.1.5) und der Menge des sich in ihr befindlichen magnetisierbaren Werkstoffs kann die Induktivität erhebliche Werte annehmen. Der für die Qualität der Schweißverbindungen wichtige hinreichend konstante Schweißstrom lässt sich also

nur mit (kleinen) möglichst konstanten Widerständen und Induktivitäten erreichen.

Den grundsätzlichen Einfluss des Schweißstroms auf die *Scherzugfestigkeit*[32] der Verbindung zeigt Bild 3-86. Unterhalb bestimmter (geringer) Werte ist die *erzeugte* Wärmemenge geringer als die *abgeführte*, eine Verbindung kommt daher nicht zustande (Punkt ❶, ❷). 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 ❹) d. h. der Bauteilsicherheit. Optimale Scherzugfestigkeiten ergeben sich, wenn der Prozess des Spritzens gerade beginnt (Punkt ❸).

Einstellwerte, z. B. zum Schweißen von (niedrig-)legiertem Stahl

Werkstückdicke s	2 x 0,5 mm	2 x 2 mm
Schweißstrom I	6,5 kA	11,5 kA
Schweißzeit t	7 Perioden	25 Perioden
Elektrodenkraft F	1000 N	4000 N

Bild 3-86
Einfluss des Schweißstroms auf die Größe der Scherzugfestigkeit von Punktschweißverbindungen.

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 und bei dickwandigeren bis zu einigen Sekunden[33].

[32] Die Scherzugfestigkeit wird vielfach als Kennwert für die erreichten Festigkeitseigenschaften von Punktschweißverbindungen verwendet. Die Probenform und die Versuchsdurchführung sind in Bild 3-86 schematisch angegeben.

[33] Zum Beispiel drei Perioden bei 0,8 mm dickem und 0,3 s bei 4 mm dickem Stahlblech, s. DVS 2902-1.

Mit zunehmenden Schweißzeiten vergrößert sich die Menge an verflüssigtem Werkstoff an der Schweißstelle, die wärmebeeinflusste Zone wird größer und der erweichte Grundwerkstoffanteil nimmt zu. Dadurch können Spritzerbildung, Porenbildung sowie eine unzulässige Verformung der Werkstückoberfläche bzw. des Werkstücks durch die eindringenden Elektrodenspitzen entstehen.

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 (Bild 3-84) erhöht, weniger die an den Kontaktstellen Werkstück-Elektrode, weil die wassergekühlte, gut wärmeleitende Elektrode die Wärme an diesen Orten sehr viel rascher abführt als die Schweißlinse und der sie umgebende hoch erhitzte Bereich.

Beim Punktschweißen wird die Wärme infolge der Wirkung des elektrischen Stroms, hauptsächlich aufgrund des Widerstands der Werkstücke – vorzugsweise des Kontaktwiderstands R_4 Werkstück-Werkstück, gemäß Bild 3-83 – erzeugt. Der Strom wird über metallische Punktschweißelektroden (Kupferlegierungen!) zugeführt, die gleichzeitig die flächigen Teile unter Anwendung von Kraft zusammenpressen. Daher muss der Elektrodenquerschnitt ausreichend groß sein; der Werkstoff der Elektrode soll eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit haben.

Das Ergebnis der Schweißung ist ein linsenförmig ausgebildeter Schweißpunkt, die **Schweißlinse** (Bild 3-83). Diese ist der durch den Schweißvorgang in seinem Gefüge veränderte, aus dem flüssig gewor-

Bild 3-87
Verfahrensvarianten des direkten Punktschweißens.
a) Übliche (Zweiblech-)Variante
b) Dreiblech-Punktschweißen
c) Doppelpunktschweißen

denen Grundwerkstoff bestehende Bereich, der die Werkstücke miteinander verbindet. Die Güte der Schweißpunkte wird in erster Linie von folgenden Faktoren bestimmt:

– Richtige Wahl der an der Schweißmaschine einstellbaren Einflussgrößen: Schweißstrom, Stromzeit, Elektrodenkraft, Durchmesser der Elektrodenkontaktfläche (Abschn. 3.4.1.1.2).
– Zustand der Werkstückoberfläche (s. Abschn. 3.4.1.1.2) und der Elektrodenspitzen (s. Abschn. 3.4.1.1.4).
– Symmetrische Ausbildung der Punkte, d. h., die verflüssigten Anteile der beiden Werkstücke sollten im Idealfall gleich sein (Abschn. 3.4.1.1.5).

3.4.1.1.3 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 gemäß Bild 3-87 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. 3.4.1.3).

Bild 3-88 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 Kunststoffschicht einen Stromfluss unmöglich macht. Sehr schlecht oder nicht punktschweißgeeignet sind lackierte Bleche, feinperlitische (»sorbitisch vergütete«) Federstähle und Stähle mit einer emaillierten Oberfläche.

Bild 3-88
Verfahrensvarianten des indirekten Punktschweißens.
a) Punktschweißen mit Blindelektrode
b) Punktschweißen kunststoffbeschichteter Bleche

3.4.1.1.4 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«)*, z. B. häufig 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.

Bild 3-89
Geometrie üblicher Punktschweißelektroden.
a) Elektrode plan ($d_2 \approx 4 \cdot s$ bis $d_2 \approx 10 \cdot s$)
b) Elektrode ballig

Form und Abmessungen der Elektroden bestimmen weitgehend die Wärmeleitung, Stromdichte, Kontaktwiderstände und Größe der Schweißlinse. Der größte Durchmesser der Elektrode d_1 gemäß Bild 3-89a) ist so zu wählen, dass er für die Übertragung des Schweißstroms und der Elektrodenkraft ausreicht.

Der Durchmesser der Kontaktfläche d_2 hängt von der Werkstückdicke s der zu schweißenden Teile nach folgender Beziehung ab:

$$4 \cdot s \leq d_2 \leq 10 \cdot s.$$

Der Punktdurchmesser d_e (Linsendurchmesser, Bild 3-91) beträgt üblicherweise:

$$0{,}7 \cdot d_2 \leq d_e \leq 0{,}8 \cdot d_2.$$

Die plane Elektrode wird vorzugsweise für Schweißteile mit blanken Oberflächen verwendet, Bild 3-89a). Zweckmäßiger ist die ballige Form, da dünne Oxidschichten zerquetscht werden und wegen der anfänglichen Punktberührung die gewünschten sehr großen Stromdichten entstehen, Bild 3-89b).

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 *»schleichende Fehler«* muss besonders bei der Massenfertigung sorgfältig kontrolliert, erkannt und behoben werden. Die Oberfläche der Elektrodenspitze ist durch vorsichtiges Schmirgeln und Polieren, am sichersten durch Drehen – auf keinen Fall durch Feilen! – metallisch blank und in Form zu halten, damit die Kontaktwiderstände möglichst klein bleiben.

3.4.1.1.5 Technologische Besonderheiten

Elektrodeneindrücke

In manchen Fällen ist es notwendig, dass die *Eindrücke* der Elektrode auf der Werkstückoberfläche nicht erscheinen. Dies gelingt mit Elektroden mit einer großflächigen äquidistanten, möglichst glatten Arbeitsfläche, die an der zu schützenden Oberfläche gemäß Bild 3-90 angeordnet werden. 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.

Bild 3-90
Ausbildung der Elektrode (großflächig, plan), wenn Eindrücke auf einer Blechoberfläche vermieden werden müssen.

Stromnebenschluss

Stromnebenschlüsse können u. a. infolge einer nicht punktschweißgerechten Konstruktionen und wegen zu kleiner Punktabstände entstehen. Diese Zusammenhänge verdeutlicht Bild 3-91. 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.

Bild 3-91
Stromnebenschlüsse in Punktschweißverbindungen.
a) Stromverlauf ohne Nebenschlüsse
b) Nebenschluss als Folge zu dicht nebeneinander liegender Schweißpunkte
c) mit $l_{min} \approx 4 \cdot d_e$ bis $5 \cdot d_e$ lassen sich Nebenschlüsse vermeiden

Das *thermische Gleichgewicht* wird von der *thermischen* und *elektrischen Leitfähigkeit* der Werkstücke sowie von ihren Abmessungen beeinflusst. Bild 3-92a) zeigt die unsymmetrische Ausbildung der Schweißpunkte bei unterschiedlicher Wanddicke und Leitfähigkeit der Fügeteile. Durch Elektroden mit großen Arbeitsflächen am Werkstück mit dem größeren Widerstand bzw. der geringeren Wärmeleitfähigkeit ergeben sich die gewünschten symmetrischen Schweißpunkte gemäß Bild 3-92b).

Bild 3-92
Zum thermischen Gleichgewicht beim Punktschweißen.
a) Unsymmetrische Schweißlinsen als Folge unterschiedlicher Wanddicken bzw. unterschiedlicher thermischer Wärmeleitfähigkeit der Fügeteile
b) Elektroden mit großen Arbeitsflächen auf dem stärker zu erwärmenden Fügeteil (größere Wanddicke, geringere Wärmeleitfähigkeit) symmetrieren die Schweißlinsen

Sekundärfensteröffnung

Diese ist eine Fläche und wird gebildet aus Armabstand A und Ausladung L entsprechend Bild 3-93. Je größer sie ist, und je mehr magnetisierbarer Werkstoff in sie eintaucht oder sich in ihrer unmittelbaren Nähe befindet, um so 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 hat darauf zu achten, dass die Fügeteile in möglichst geringem Umfang in die *»Fensteröffnung«* eintauchen. Vorrichtungen aus unmagnetischen Werkstoffen sind ebenfalls sinnvoll.

Bild 3-93
Zur Definition der Sekundärfensteröffnung, $S = A \cdot L$.

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 Bild 3-94 zeigt. Diese Strom- und Kraftprogramme werden für folgende Werkstoffe angewendet:

- Schlecht schweißgeeignete Stähle, die aufhärtungsempfindlich 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 mm) oder für
- höchste Qualitätsansprüche, z. B. in der Luftfahrttechnik.

Bild 3-94
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. Den Schweißstrom wählt man bei sehr empfindlichen Werkstoffen (z. B. aushärtbaren Legierungen) in einigen Fällen kontinuierlich ansteigend oder abfallend.
– *Nachwärmen*. Mit dieser Wärmebehandlung wird in erster Linie die metallurgische Qualität der Verbindung verbessert. Anlasseffekte und das Verringern der Abkühlgeschwindigkeit als Folge des Stromabfalls sind die wichtigsten Ziele dieser Behandlung.

3.4.1.1.6 Anwendung und 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 (Bruchteile einer Periode) 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 Titan(-legierungen) im großen Umfang punktgeschweißt.

Lassen sich die Werkstücke einfach transportieren, dann wird in der Regel mit stationären Maschinen gearbeitet. Im anderen Fall kann die Maschine in Form leicht beweglicher *Punktschweißzangen* an die Werkstücke herangeführt werden, wie dies z. B. weitgehend in der Automobilfertigung geschieht. 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 Sonderanlagen (Transferstraßen).

3.4.1.2 Rollennahtschweißen (Ordnungsnummer: 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. Durch die Verwendung von Rollenelektroden gemäß Bild 3-95, die

– den Schweißstrom zuführen,
– die Elektrodenkraft ausüben und
– den Transport der Werkstücke übernehmen,

werden diese Schwierigkeiten vermieden.

Im Gegensatz zum Punktschweißen heben die Rollenelektroden beim Vorschub, der in den meisten Fällen auch durch die Elektroden erfolgt, nicht ab. Zum Schweißen von Stahl wird meistens nur eine,

Bild 3-95
Prinzip des Rollennahtschweißverfahrens. Mindestens eine der beiden Rollen wird angetrieben (B = Rollenbreite).

bei Leichtmetallen werden wegen der größeren Gefahr des Rutschens beide Rollenelektroden angetrieben. Wie auch beim Punktschweißen muss für den Schweißprozess eine für das Aufschmelzen ausreichende Wärmemenge erzeugt werden. 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 mm x 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.

Bild 3-96
Herstellung verschiedener Nahtformen mit dem Rollennahtschweißen.
a) Dichtnaht, hergestellt mit Dauerwechselstrom
b) Rollenpunktnaht, hergestellt mit Dauerwechselstrom
c) Rollenpunktnaht, hergestellt mit unterbrochenem Strom (Gleich- oder Wechselstrom)

Die *Dicht-* und *Rollenpunktnähte* lassen sich entsprechend Bild 3-96a) und 3-96b) mit kontinuierlicher oder intermittierender Elektrodendrehbewegung gemäß Bild 3-96c) abhängig von der Schweißaufgabe mit Hilfe von *Dauerwechselstrom* oder mit *Stromimpulsen* herstellen.

Beim Schweißen mit Dauerwechselstrom hängt der Punktabstand von der Schweißgeschwindigkeit und der Schweißstromfrequenz ab. Diese Verfahrensvariante wird bevorzugt 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 (Abschn. 3.4.1.1.5), die eine bessere Temperaturverteilung im Werkstück ermöglichen. Das Schweißen mit Stromimpulsen erlaubt es auch, dickere oder schweißempfindlichere Werkstoffe sicherer zu verarbeiten, wie z. B. die austenitischen CrNi-Stähle, die sich durch ihre geringe elektrische Leitfähigkeit auszeichnen.

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

$$v_{\max} = \frac{2 \cdot 60 \cdot f}{100 \cdot p} \approx 15 \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{min}},$$

die nur bei sehr dünnen Blechen annähernd erreicht werden kann. Der Punktabstand $e = 1/p$ beim Rollenpunktschweißen 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, Bild 3-95) 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

$$B = b + 1 \text{ in mm}$$

betragen. 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.

Die *Überlappnaht* gemäß Bild 3-97a) ist sehr sicher herzustellen. Sie wird daher am häufigsten angewendet. Die Breite der Überlappung wird etwa gleich der dreifachen 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.

Bild 3-97
Fügeteilanordnungen beim Rollennahtschweißen für:
a) Überlappnaht (ü ≈ 3 ·s), Ordnungsnummer: 226
b) Quetschnaht (ü ≥ s), Ordnungsnummer: 222
c) Folienstumpfnaht (ü = 0), Ordnungsnummer: 225
d) Folienüberlappnaht, Ordnungsnummer: 226

Bei der *Quetschnaht* entsprechend Bild 3-97b) verschwindet die Überlappung nach dem Schweißen vollständig, d. h., die Bleche liegen bündig nebeneinander. Man muss mit geeigneten Vorrichtungen arbeiten, weil die Bleche die Neigung haben, sich beim Schweißen zu verziehen.

Die Schweißnahtqualität hängt sehr stark von der Gleichmäßigkeit der Überlappung ab. Größere Abweichungen als ± 10 % vom eingestellten Maß bezogen auf die Einzelblechdicke sind im Allgemeinen 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* (Bild 3-97d)) 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 der Werkstoffe 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 (Flugzeugbau, Automobilbau, Waggonbau) und vor allem für Massenbedarfsgüter (Haushaltsgeräte, Gehäuse, Stahlradiatoren) erfolgreich eingesetzt.

3.4.1.3 Buckelschweißen (Ordnungsnummer: 23)

Eines der Fügeteile (sehr selten beide) ist mit einem oder mehreren Schweißbuckeln versehen. Der Strom 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 Bild 3-98, 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 werden.[34]

Ein wesentlicher wirtschaftlicher Vorteil ist die Möglichkeit, bis etwa 20 Buckel gleichzeitig schweißen zu können. Dies setzt möglichst gleichmäßige Buckelabmessungen voraus – insbesondere sollte

Bild 3-98
Verfahrensprinzip des (einseitigen) Buckelschweißens.

[34] Buckelschweißen. Fa. Schlatter. www.wissensfloater.de

die Toleranz der Buckelhöhen maximal ± 5 % betragen – und erfordert eine gleichmäßige Verteilung der Elektrodenkraft und des Schweißstroms auf jeden Buckel. Die Lebensdauer der großflächigen Buckelschweißelektroden ist größer als die der deutlich kleineren Punktschweißelektroden.

Abhängig von der Art der Stromzuführung unterscheidet man zwischen *einseitigem* und *zweiseitigem* Buckelschweißen.

Eine gleichmäßige Stromverteilung ist wegen der für die einzelnen zu schweißenden Buckel 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 Netzbelastung (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 soweit verlorengehen, dass dieses wirtschaftliche Verfahren nur durch aufwändige konstruktive Maßnahmen durchzuführen ist.

Das Verfahren wird vorteilhaft in der Großserienfertigung im Dünnblechbereich verwendet, wenn mehrere Schweißpunkte notwendig sind, z. B. bei der Herstellung von Haushaltsgeräten und Fahrzeugen aller Art. 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 Bild 3-99 zeigt. Der Ringbuckel bietet die größte Steifigkeit und wegen der großen Querschnittsfläche auch die größte Festigkeit.

Bild 3-99
Wichtige Buckelformen.
a) Rundbuckel
b) Langbuckel
c) Ringbuckel
d) »angeschobener« Buckel

3.4.1.4 Pressstumpfschweißen (Ordnungsnummer: 25)

Wie Bild 3-100 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 °C bis 1300 °C).

F Stauchkraft, erzeugt mit beweglichem Stauchschlitten (St)
E_1, E_2 Einspannlängen
K Kontaktstelle, Berührungsfläche der Fügeteile

Bild 3-100
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 Bild 3-101 zeigt. Zu beachten ist, dass die *»Halslänge« h* mindestens so groß ist wie der beim Stauchen entstehende Längenverlust.

Bild 3-101
Beispiele für das Vorbereiten von Fügeteilen mit unterschiedlichen Querschnitten für das Pressstumpfschweißen.

Ebenso wichtig für die Güte der Schweißverbindung ist die gleichmäßige Erwärmung der vom Schweißstrom durchflossenen Fügeteile (Einspannlänge E_1 bzw. E_2, Bild 3-100). 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.

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* gemäß Bild 3-102a), der auch die sehr anschauliche Bezeichnung *Wulststumpfschweißen* verständlich macht.

Die Qualität der Schweißverbindung hängt entscheidend von der Sauberkeit und Parallelität der Kontaktflächen ab, die mit aufwändigen fertigungstechnischen Mitteln zu erreichen ist.

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.

Bild 3-102
Stauchwulst- bzw. Schweißgratformen beim
a) Pressstumpfschweißen
b) Abbrennstumpfschweißen mit massivem Querschnitt
c) Abbrennstumpfschweißen mit rohrförmigem Querschnitt

3.4.1.5 Abbrennstumpfschweißen (Ordnungsnummer: 24)

Je nach Größe und Form der zu verbindenden Querschnitte wird das Abbrennstumpfschweißen ohne Vorwärmen (Abbrennen aus dem Kalten) oder mit Vorwärmen 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 aufweisen.[35]

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« *(Planbrennen)*. Der Metalldampf sorgt für eine wirksame *»Schutzgasatmosphäre«*, so dass eine erneute Oxidation vermieden wird. Der Werkstoffverlust beim Abbrennen muss durch einen entsprechenden (verfahrenstypisch großen) Vorschub des Stauchschlittens (Bild 3-100) ausgeglichen werden. Die Abbrennphase ist beendet, wenn die Stoßflächen ausreichend gesäubert ist und die Fügeteilenden die Schweißtemperatur erreicht haben. Bemerkenswert ist, dass im Gegensatz zum Pressstumpfschweißen nur die Werkstoffbereiche in unmittelbarer Nähe der Stoßfläche erwärmt werden. 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 können.

Der für das Abbrennstumpfschweißen so typische scharfzackige Schweißgrat (Bild 3-102b)) wird meist im warmen Zustand abgearbeitet (Abscheren oder spanende Bearbeitung) bzw. bei Rohren (Bild 3-102c)) innen mit einem scharfkantigen Dorn abgeschert und ausgestoßen. Er ist verhältnismäßig leicht entfernbar. Die dynamische Bauteilbeanspruchung wird durch das Beseitigen dieser scharfen Kerbe(n) erheblich verbessert.

[35] Abbrennstumpfschweißen von Schienen. www.wissensfloater.de

Die Maschinenleistung nimmt mit der Größe der zu schweißenden Querschnitte erheblich zu. Außerdem wird es zunehmend schwerer, die gesamte Schweißstoßfläche auf die erforderliche Temperatur zu bringen und den flüssigen Grundwerkstoff einschließlich der Verunreinigungen vollständig aus der Schweißstoßfläche herauszudrücken. Fehlerhafte Schweißungen sind dann kaum zu vermeiden. Daher wird in diesen Fällen das **Abbrennstumpfschweißen mit Vorwärmung** angewendet. Das Vorwärmen geschieht induktiv oder häufiger mit Hilfe der Widerstandserwärmung 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.

Im Vergleich zum Pressstumpfschweißen können in diesem Fall Fügeteile mit großen Querschnitten bis zu 100 000 mm² 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), in der Hausgeräteindustrie und in zahlreichen anderen Industriezweigen angewendet.

3.4.2 Widerstandsschmelzschweißen

Durch *Widerstandserwärmen* werden die Stoßflächen der Fugenflanken aufgeschmolzen und eventuell verwendeter Zusatzwerkstoff verflüssigt und so die Schweißverbindung erzeugt.

3.4.2.1 Elektroschlackeschweißen (Ordnungsnummer: 72)

Das mechanisch arbeitende, sehr wirtschaftliche Schweißverfahren wird sowohl zum Verbindungsschweißen vorwiegend dickwandiger Halbzeuge als auch zum Auftragschweißen verwendet, Bild 3-103. Das Verfahrensprinzip ähnelt dem UP-Schweißverfahrenen. Zum Schmelzen (Grundwerkstoff, Pulver, Drahtelektrode) wird aber nicht die Energie eines Lichtbogens verwendet, sondern vielmehr die Widerstandswärme eines 20 mm 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 (bei den vorhandenen Einstellwerten) liegen. Nur unter diesen Bedingungen kann der Lichtbogen verlöschen und der Strom über die Schlacke 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 Schlacke!) 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 Schlacke werden durch wassergekühlte, kupferne Gleitschuhe gehalten, die mit der Schweißgeschwindigkeit vorwärts bewegt werden (Bild 3-103).

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 mm² können in einer Lage geschweißt werden.
- *Geringe Abkühlgeschwindigkeit*
  Martensitische, d. h. harte und spröde Zonen in der WEZ können in keinem Fall entstehen. Al-

Bild 3-103
Verfahrensprinzip des Elektroschlackeschweißverfahrens.

lerdings besteht die Gefahr der Versprödung und des extremen Kornwachstums in der Wärmeeinflusszone und im Schweißgut. Besonders problematisch ist daher das Erreichen ausreichender Zähigkeitswerte vor allem im Schweißgut, das durch extreme Dendritenbildung gekennzeichnet ist. Als Vorteile der geringen Abkühlgeschwindigkeit können die fast vollständige Porenfreiheit des Schweißguts und der sich dem thermodynamischen Gleichgewicht nähernde Ablauf aller chemischen Reaktionen genannt werden.

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. Seltener wird es zum Schweißen von Rundnähten verwendet. Verschiedentlich wurde es auch zum Plattieren und zum formgebenden Schweißen eingesetzt. Es wurden bereits Werkstücke mit Wanddicken bis zu 2000 mm geschweißt.

3.5 Gestaltung von Schweißverbindungen

3.5.1 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 Zähigkeitseigenschaften) und die wirtschaftliche Herstellung der Bauteile. Zu berücksichtigen ist weiterhin die Schweißeignung der Werkstoffe (Abschn. 3.2.4.4).

3.5.2 Gestaltungsregeln

- Die gewählten Grundwerkstoffe sollten ausreichend schweißgeeignet sein, d. h. hinreichend sauber und kohlenstoffarm ($C \leq 0{,}2\,\%$) sein;
- 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 Kehlnähte nach Möglichkeit vermeiden (rissähnlicher Spalt, d. h. extreme Kerbwirkung vorhanden);
- große, ebene Wände vermeiden, da sie zum Ausbeulen neigen, Aussteifungen vorsehen;
- auf gute Zugänglichkeit der Schweißnähte achten (Fehleranfälligkeit ist geringer);
- möglichst so konstruieren, dass in der PA-(w-) oder PB-(h-)Position (das sind die sog. Normallagen!) geschweißt werden kann. Ein Arbeiten in Zwangslagen ist zu vermeiden, da es hohe Anforderungen an die Handfertigkeit des Schweißers stellt, einen erhöhten Prüfaufwand erfordert und in jedem Fall nur eine erheblich geringere Abschmelzleistung möglich ist, s. a. Bild 3-6;
- 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 ist es oft unumgänglich, dieses vor der mechanischen Bearbeitung spannungsarm zu glühen;
- die vorgeschriebenen Prüfungen müssen durchführbar sein, d. h., die zu prüfenden Schweißnähte müssen für Prüfer und Prüfgeräte hinreichend einfach zugänglich sein.

3.5.3 Gestaltung von Schmelzschweißverbindungen

Bild 3-104 bis *Bild 3-106*
Jede Kraftlinienumlenkung (z. B. in Kehlnähten) oder bei einer Kehlnahthäufung verursacht eine Spannungsspitze (Kerbwirkung) und damit eine örtliche, oft gefährliche Überbeanspruchung. Kehlnähte sollten möglichst doppelseitig ausgeführt und Schweißnähte aus Zonen mit ungünstigem Kraftfluss verlagert werden, Bild 3-105 (1), Bild 3-106. Durchgeschweißte Kehlnähte, Bild 3-105 (2), vergrößern den tragenden Querschnitt, sie verringern also die spezifische Beanspruchung. Weiterhin beseitigen sie die extreme Kerbwirkung im Bereich der Kehlnahtwurzel, erhöhen aber (insbesondere bei normalgeglühten Feinkornbaustählen) die *Terrassenbruchempfindlichkeit.* Außerdem vergrößern sie die Gefahr des Sprödbruches, weil ein laufender Riss die gesamte Verbindung durchschlagen kann. Bei zwei voneinander getrennten Kehlnähten ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass der Riss aufgehalten wird.

Die aus dünnen ferritischen und perlitischen *Schichten* (einige hundertstel Millimeter!) aufgebauten normalgeglühten Feinkornbaustähle werden bei dieser Versagensform unter dem Einfluss äußerer, vor allem aber unter der Wirkung von Schweißeigenspannungen, in Form charakteristisch verlaufender Risse zerstört (*lamellar tearing = Terrassenbruch,* Bild 3-105 (2)). Wegen der sehr viel größeren Schweißgutmenge, d. h. der größeren Schweißeigenspannungen, wird auch die *Sprödbruchempfindlichkeit* erhöht.

Bild 3-107
Der Anschluss mit Kehlnähten ist manchmal scheinbar wirtschaftlicher, weil die Kosten für die Nahtvorbereitung entfallen. Kehlnähte lenken jedoch den Kraftfluss um (Kerbwirkung!). Die *zwei* Nähte im Vergleich zu *einer* Stumpfnaht erhöhen die Größe der Eigenspannungen und den Verzug. Die Qualifikation eines Schweißers für Stumpfnähte muss aber deutlich größer sein als die eines für Kehlnähte.

Bild 3-108
Eine elliptische Schweißnaht (kompliziert herzustellen und zu schweißen) kann durch Aushalsen in eine kreisförmige überführt werden.

Bild 3-104

Bild 3-105

Bild 3-106

Bild 3-107

Bild 3-108

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 3-109
Die Naht ist im Allg. am Flansch (meistens ein ebenes und *nicht* ein räumliches Gebilde, weil Flansche leichter bearbeitbar sind!) einfacher vorzubereiten als am Gehäuse. Den Flansch mit Kehlnähten am Gehäuse anzuschweißen ist eine wirtschaftliche Lösung. Die Kehlnaht a ist aber meistens erforderlich, um die extreme Kerbwirkung des Spaltes zu beseitigen. Es ist auf eine ausreichende Zugänglichkeit der inneren Kehlnaht b zu achten.

Bild 3-109

Bild 3-110
Bei hoher geforderter Oberflächengüte oder geringer Maßtoleranz soll die Funktionsfläche nicht durch Schweißnähte (Verzug!) gestört werden.

Bild 3-110

Bild 3-111
Schweißnähte soll man so legen, dass die Fügeteile möglichst lange den Schrumpfbewegungen frei folgen können, da sonst unerwünschte Reaktionsspannungen (und natürlich auch wanddickenabhängige Eigenspannungen!) auftreten. Allerdings entsteht dann ein größerer Bauteilverzug!

Bild 3-111

Bild 3-112
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*. Das Schweißen von *Bocknähten* (PA-Position!) ist sehr sinnvoll, wenn dies fertigungstechnisch (z. B. Vorrichtungen vorhanden?) möglich ist. Die Kehlnaht wird dann in jedem Fall symmetrisch. Ein »Wegrutschen« der Naht ist praktisch nicht möglich.

Bild 3-112

Bild 3-113
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).

Bild 3-113

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 3-114
Bei Schräganschlüssen ist eine scharfkantige Abschrägung unzweckmäßig (zuviel Schweißgut, Verformungen, Wurzelkerbe); diese sollte nur bei dünnen Blechen angewendet werden. Bei dickeren Blechen ($s > 16$ mm) sollte die Abschrägung maximal $0{,}5 \cdot s$ betragen.

Bild 3-114

Bild 3-115
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 dem linken Bild eine Schweißvorrichtung erforderlich ist.

Bild 3-115

Bild 3-116
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«)*.

Bild 3-116

Bild 3-117
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).

Bild 3-117

Bild 3-118
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.

Bild 3-118

Bild 3-119
Bei genuteten Bearbeitungsflächen sind außer den Entlüftungsbohrungen auch Lochschweißungen vorzusehen, um z. B. beim Nuten ein Abheben der Flächen zu vermeiden.

Bild 3-119

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 3-120
Schweißnähte in schroffen Querschnittsübergängen (unterschiedliche Querschnitte erzeugen Kerbwirkung, d. h. Spannungsspitzen!) sind zu vermeiden. Angleichen der Querschnitte schafft Abhilfe.

Bild 3-120

Bild 3-121
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.

Bild 3-121

Bild 3-122
Schweißnähte sollten möglichst nicht in zu bearbeitende Flächen oder in Werkstoffbereiche mit hohen (Zug-)Spannungen gelegt werden.

Bild 3-122

Bild 3-123
Bei aufgeschweißten Flanschen ist die Dichtnaht stets nach innen zu legen.

Bild 3-123

Bild 3-124
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.

Bild 3-124

Bild 3-125
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.

Bild 3-125

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 3-126

Bild 3-126
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.

Bild 3-127

Bild 3-127
Bei zu bearbeitenden Teilen mit Bohrung, die an schrägen Wänden angeschweißt werden, ist die Bearbeitung in einer Aufspannung sowie ein gerader Anschnitt zu gewährleisten.

Bild 3-128

Bild 3-128 und *Bild 3-129*
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. Die gleichen Werte sind zu wählen, wenn Aussteifungen in Halbzeuge aus unberuhigtem Stahl eingeschweißt werden: Die geseigerte Zone in der Hohlkehle sollte nicht angeschmolzen werden. Die Variante a) hat aber den erheblichen Nachteil, dass die Kehlnähte nicht geschlossen werden können (Folgen: Korrosion, Kerbwirkung). Eine viertelkreisförmige Ausklinkung b) erlaubt das Rundumschweißen der Rippe, d. h. das Schließen der Kehlnähte (teurer!).

Bild 3-129

Bild 3-130
Die Herstellung eines Winkels durch Abkanten ist billiger als das Zusammenschweißen aus drei Teilen. Beachte aber den Einfluss der Kaltverformung, die bei Stählen mit geringerer Zähigkeit zu Grobkorn und Alterungserscheinungen führen kann. Bei hochlegierten austenitischen CrNi-Stählen besteht die Gefahr der Spannungsrisskorrosion.

Bild 3-130

Bild 3-131
Durch Auftragschweißen lassen sich z. B. Werkzeuge und Verschleißteile wirtschaftlich herstellen bzw. in Stand setzen. Zu beachten ist, dass sich in dem aufzutragenden Werkstück keine Kanten, die das Schweißgut nicht mehr ausfüllen kann und so rissbegünstigende Kerben entstehen, sondern Rundungen befinden. Es sind zwei, besser drei Lagen erforderlich (Vermischung gering halten!). Besonders kritisch und problematisch ist die Wahl geeigneter Zusatzwerkstoffe (metallurgisch extrem unterschiedliche Werkstoffe!) und die anzuwendende Schweißtechnologie.

Bild 3-131

Bild 3-132
Bei der Bemessung der Bearbeitungszugaben sind die jeweiligen Toleranzen zu beachten. Die Höhe des Anschweißteils muss so gewählt werden, dass das Nennmaß »*N*« bei gegebener Toleranz »*t*« erreicht wird, ohne die Schweißnaht zu zerstören.

Bild 3-132

Bild 3-133
Sollen über einen Rohranschluss 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 verscheißt (b). Durch die Kehlnaht (1) entfällt außerdem die extreme Kerbwirkung des Wurzelspaltes (siehe Pfeil) von Kehlnaht (2) und die Schweißnaht ist geschlossen (Korrosion!).

Bild 3-133

Bild 3-134
Mit Hilfe des Bolzenschweißens können Gewindebolzen bis M24 aufgeschweißt werden. Dies ist im Allgemeinen wirtschaftlicher als die Verwendung von Stiftschrauben (Kernloch bohren, Gewinde schneiden, Bolzen eindrehen).

Bild 3-134

3.5.4 Gestaltung von Punktschweißverbindungen

Bild 3-135
Punktschweißverbindungen sind nach Möglichkeit so anzubringen, dass sie nicht auf Schälen, sondern auf Abscheren beansprucht werden. Eine Torsionsbeanspruchung bei Einzelpunkten ist unbedingt zu vermeiden.

Bild 3-135

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 3-136
Für die Punktschweißelektroden sind ausreichend große, möglichst *ebene* und *parallele* Auflageflächen vorzusehen.

Bild 3-136

Bild 3-137
Auf gute Zugänglichkeit der Schweißpunkte ist zu achten, da sonst gekröpfte (teure!) Spezialelektroden zu verwenden sind, die weniger formstabil als die üblichen zylindrischen Elektroden sind.

Bild 3-137

Bild 3-138
Mit vielen kleinen Punkten wird meist keine ausreichende Festigkeit erzielt. Wenige größere Punkte ergeben zuverlässigere Verbindungen.

Bild 3-138

Bild 3-139
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.

Bild 3-139

Bild 3-140
Größere Werkstücke sind so zu gestalten, dass mit möglichst kleiner Armausladung L und geringem 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 (*ohm*schen) Schweißstrom.

Bild 3-140

3.6 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!

3.6.1 Grundlagen des Lötens

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* T_A erwärmten Werkstoffes lassen sich mit Hilfe der *Grenzflächenspannungen* γ beschreiben, Bild 3-141:

$$\gamma_{1,3} = \gamma_{1,2} + \gamma_{2,3} \cos \varphi$$

$$\gamma_{1,3} - \gamma_{1,2} = \gamma_{2,3} \cos \varphi = \gamma_H \; (\gamma_H = \text{»}\textit{Haftspannung}\text{«}).$$

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 $\varphi \leq 30\,°$. 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 hat[37]. Die tatsächliche Löttemperatur ist i. Allg. höher als die Arbeitstemperatur, sie darf aber eine höchste Temperatur nicht überschreiten, weil dann Schädigungen des Flussmittels, des Lotes oder des Grundwerkstoffes möglich sind.

Bild 3-141
Beziehungen zwischen Grenzflächenspannungen an den Oberflächen Grundwerkstoff – flüssiges Lot – Lötmedium.
❶: *Grundwerkstoff*
❷: *flüssiges Lot*
❸: *Lötmedium: Flussmittel, Schutzgas oder Vakuum*

[37] Die für die gesamte Löttechnik außerordentlich wichtige Arbeitstemperatur ist die niedrigste Oberflächentemperatur an der Lötstelle, bei der das Lot benetzt oder sich mit Hilfe von Grenzflächenreaktionen eine flüssige Phase bildet (nach DIN ISO 857-2).

Bild 3-142
Abhängigkeit des kapillaren Fülldrucks p_k beim Löten von der Spaltbreite b (schematisch).

Eine ausreichende Benetzbarkeit 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«[38]. 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.

[38] Unter »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

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. 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*. Bild 3-142 zeigt diesen Zusammenhang. Bei Spalt-

breiten $b > 0{,}5$ 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 Gasschweißen 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.

Bild 3-143
»Verschießen« eines außerhalb des Lötspalts angebrachten Lotformteils (auch entgegen der Schwerkraft).

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 mm 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, Bild 3-143. Bemerkenswert ist die zum Abfluss des Flussmittels erforderliche Bohrung. Anderenfalls entstehen Flussmitteleinschlüsse, d. h., die vorgegebene Spaltfläche kann nicht vollständig mit Lot ausgefüllt werden. Unzureichende Festigkeitswerte sind dann nicht vermeidbar.

Der Bereich, in dem die Bindung Lot/Grundwerkstoff erzeugt wird, ist eine extrem dünne (einige µm dicke) *Diffusionszone* $D = D_L + D_{GW}$ (Bild 3-144), 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 (siehe Abschn. 3.2.4.3) kaum beeinträchtigt. Damit sind im Gegensatz zum Schweißen, metallurgische oder werkstoffliche Überlegungen bei der Auswahl »geeigneter« Lote von untergeordneter Bedeutung. Benetzt das Lot den Werkstoff, dann ist eine Lötung prinzipiell möglich. Die geringen werkstofflichen Schwierigkeiten erleichtern das Verbinden metallurgisch »unverträglicher« Werkstoffe außerordentlich. Im Gegensatz dazu bilden sich beim »metallurgischen« Prozess Schweißen größere 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

Bild 3-144
Diffusionszone $D = D_L + D_{GW}$ an der Phasengrenze Grundwerkstoff – erstarrtes Lot (G) bei einer Hartlötverbindung.
D_L *Diffusionszone im Lot*
D_{GW} *Diffusionszone im Grundwerkstoff*
A_{GW} *Grundwerkstoffatome*
A_{Lot} *Lotatome*

der Ursache des Problems wird die Versagenswahrscheinlichkeit um so 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 Bild 3-145 sind einige charakteristische Formen der Diffusions- bzw. Legierungszone dargestellt. Je nach Arbeitstemperatur der Lote entstehen Diffusionszonen mit Breiten zwischen 0,5 µm und ca. 20 µm. Die größte Bauteilsicherheit der Lötverbindung existiert dann, wenn die Legierungszone aus Primärkristallen oder aus Mischkristallen besteht. Lötverbindungen aus kaltverformten Stahlteilen, hergestellt mit kupfer- oder zinkhaltigen Loten, neigen 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 solange 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 Diffusonsfähigkeit) 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.

3.6.2 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.

Bild 3-146
Einrichtung zum Lötbadweichlöten (nach DIN ISO 857-2).

Flüssigkeit

Beim *Lötbadweichlöten* (korrekter wäre die Bezeichnung *Lotbadweichlöten*) werden die zu lötenden Teile mit Flussmittel benetzt und in ein Bad mit flüssigem Lot getaucht, Bild 3-146. Selektives Löten wird durch Aufbringen von Pasten, Lacken oder Papiermasken erreicht. Durch das senkrechte Eintauchen

Bild 3-145
Ausbildung der Legierungszone D bei verschiedenen Lot-Grundwerkstoff-Kombinationen (nach Degussa).

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, Bild 3-146. Diese Nachteile sind beim *Wellenweichlöten* nicht vorhanden. Die das Werkstück berührenden Stellen der *»Lötwelle«* sind oxidfrei, wenn mit Stickstoff als Schutzgas gearbeitet wird, Bild 3-147. Eine Stickstoffumgebung 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.
– 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 Sn96.5Ag3.0Cu0.5 und Sn99.3Cu0.7 empfohlen. Dabei zeichnet sich das Lot SnAgCu im Vergleich zu SnCu durch eine höhere Benetzungsgeschwindigkeit 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 Lötvorgangs!) 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), mit Hilfe von Lotformteilen oder auch galvanisch.

Bild 3-147
Einrichtung zum Wellenweichlöten (nach DIN ISO 857-2).

Die Wärmeübertragung kann durch Kondensation, Strahlung oder Konvektion erfolgen. Das Verfahren lässt sich demnach dadurch gekennzeichnen, 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 aufwändige und damit teure maschinelle Einrichtung macht das Löten etwa zwei- bis viermal teurer als das Wellenweichlöten.

Das **Dampfphasenlöten,** auch **VP-Löten** oder **Vapour Phase Reflowlöten** genannt, ist das zur Zeit universellste, einfachste und zuverlässigste Lötverfahren. Es ist für jede Art von SMD-Komponenten (surface monted 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 Lötgut in die Dampfzone ein, kondensiert der Dampf auf dem Lötgut und überträgt seine Wärme. Gleichgültig wie lange das Lötgut 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 inerten Gasatmosphäre können keine Oxidationsvorgänge entstehen, und ein Löten ohne Flussmittel ist ebenfalls möglich.

Gas

Die Wärmequelle beim *Flammlöten* ist ein gasbetriebener 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 Flamm-

Tabelle 3-16. 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)] **3** ohne Halogene aktivieren	**A** flüssig **B** fest **C** Paste
	2 ohne Kolophonium (Harz)		
2 organisch	**1** wasserlöslich		
	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	

[1)] Andere Aktivierungsmittel dürfen verwendet werden.

erwärmung arbeiten, sind verhältnismäßig kostengünstig und leicht umrüstbar. Sie werden häufig eingesetzt, wenn zum Zusammenbau der Teile Halterungen erforderlich sind, oder wenn große, sperrige Bauteile gelötet werden.

Das *Ofenlöten* kann mit Flussmitteln, mit inerten Schutzgasen oder im Vakuum durchgeführt werden. Die Wärmequelle sind elektrische 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 Oberflächen der Lötteile metallisch blank.

Elektrischer Strom

Die Arbeitstemperatur beim *Induktionshartlöten* wird durch einen in den zu lötenden Teilen induzierten, hochfrequenten Wechselstrom erzeugt, Bild 3-148. 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 s 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.

Bild 3-148
Einrichtung zum Induktionshartlöten (nach DIN ISO 857-2).

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 und auch aus wirtschaftlichen Gründen nicht erwünscht ist. Die Teile müssen in der richtigen Lage zueinander fixiert und solange 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 aufwändigen Lötvorrichtungen oder Lötmaschinen verwendet, die Einrichtungen zum automatischen Werkstücktransport besitzen. Bild 3-149 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 Lötprozess abläuft.

3.6.3 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 Lötens neu gebildeten Oxide werden mit auf die Lötflächen aufgetragenen **Flussmitteln** oder mit Hilfe 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.

Bild 3-149
Lötmaschinenbauarten für das mechanisierte und automatische Löten (nach Degussa).
a) Karussell-Lötmaschine (intermittierende Bewegung)
b) Förderband-Lötmaschine (kontinuierliche Bewegung)

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 tiefliegender 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 Minuten.

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 Fehllötungen, sind dann unvermeidlich (s. a. Abschn. 3.6.5). Grundsätzlich muss mit höherer Arbeitstemperatur die Spaltbreite größer werden, weil die Oxidfilmdicke dann zunimmt.

Tabelle 3-17. Flussmittel zum Weich- (DIN EN 29454-1) und Hartlöten (DIN EN 1045) metallischer Werkstoffe, Auszug. Die bisher gültigen Bezeichnungen sind in Klammern angegeben.

Flussmittel-gruppe	Typ		Zusammensetzung (Verhalten der Flussmittelrückstände)	Anwendungsbereich
Hartlöten Schwermetalle (DIN EN 1045)	FH10	Flussmittel zum Hartlöten	Borverbindungen und Fluoride (korrodierend)	Silberhartlote 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		Hygroskopische Chloride und Fluoride (korrodierend)	Für Werkstoffe, die gewaschen (auch gebeizt, neutralisiert) werden können
	FL20		Nicht hygroskopische Fluoride (nicht korrodierend)	Für Werkstoffe, die nicht mit Feuchtigkeit in Berührung kommen dürfen
Weichlöten Schwermetalle (DIN EN 29454)	3.2.2 (F-SW-11)	Flussmittel zum Weichlöten	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 *nicht* möglich, Feinlötungen, 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.*

Die Flussmittel sind in DIN EN 1045 (Hartlöten), DIN EN 29454-1 bzw. DIN EN ISO 9454-1 (Weichlöten der Schwer- und Leichtmetalle) genormt. Tabelle 3-17 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).

- **Flussmittel** zum **Weichlöten** von **Schwer-** und **Leichtmetallen** (DIN EN 29454-1) werden nicht mehr nach der Wirkung der *Flussmittelrückstände*, sondern gemäß ihrem Gruppenaufbau gekennzeichnet, Tabelle 3-16. 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 liegen etwa zwischen 200 °C und 400 °C. Ein Beseitigen der Flussmittelrückstände wird mit zunehmender Oxidlöslichkeit wegen ihrer korrosiven Wirkung immer dringlicher.

In Tabelle 3-17 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:
- 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 Minuten) 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. H_2, CO) und nicht reduzierenden Komponenten (z. B. H_2O, CO_2). 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 Gütewerte 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 inerten Schutzgase verantwortlich. Die Qualität des Vakuums wird entscheidend von der Menge der unerwünschten Gasbestandteile Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid bestimmt.

3.6.4 Lote

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** ($T_L < 450$ °C) und **Hartlöten** ($T_L > 450$ °C). Das **Hochtemperaturlöten** ist ein

Tabelle 3-18. 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	Erstarrungs-bereich °C	Anwendungsbereich
Schwermetallweichlote (DIN 1707-100)	**Weichlote**	S-Pb60Sn40E S-Sn70Pb30 S-Pb78Sn20Sb2 S-Sn63Pb37P S-Sn90Pb10 S-Pb95Sn3Ag2 S-Cd95Ag5	183 bis 238 183 bis 192 183 bis 270 183 183 bis 215 304 bis 310 340 bis 395	Elektroindustrie Elektrogerätebau, Miniaturtechnik, Elektronik Klempnerarbeiten Kupferinstallation für Warm- und Kaltwasser Elektroindustrie, für hohe Betriebstemperatur Klempnerarbeiten Elektroindustrie, für hohe Betriebstemperatur
Schwermetallweichlote (DIN EN ISO 9453) Bleifreie Sn-Cu-Lote, Bleifreie Sn-Cu-Ag-Lote		S-Sn99Cu1 S-Sn91Zn9 S-Sn52In48 S-Sn96Ag4 S-Sn97Ag3 S-Sn96Ag3Cu1	227 199 118 221 221 bis 230 221 bis 224	Elektronik, Leiterplatten (SMD-Technik)
Schwermetallweichlote (DIN EN 61190-1-3) Bleifreie Elektroniklote		Sn99Cu.7C Sn96Ag04E Sn96Ag03Cu04E Sn99 In52Sn48C	227 221 217 232 118	Elektronik, Leiterplatten
Aluminiumweichlote (DIN 1707-100)		S-Zn95Al5	380 bis 390	Ultraschall- und Ofenlöten
Al Aluminiumhartlote (DIN EN 1044)	**Hartlote**	AL 102 (L-AlSi7,5) AL 103 (L-AlSi10) AL 104 (L-AlSi12)	575 bis 615 575 bis 590 575 bis 585	Elektrotechnik, Elektronik, lochplattierte Bleche Elektrotechnik, Elektronik, lochplattierte Bleche Elektrotechnik, Elektronik
AG Silberhartlote (DIN EN 1044)		AG 101 (L-Ag60Sn) AG 106 (L-Ag34Sn) AG 304 (L-Ag40Cd)	620 bis 685 630 bis 730 595 bis 630	Gas- und Wasserinstallation Gas- und Wasserinstallation Elektrotechnik, Kältetechnik, Kfz-Zulieferindustrie
Silberhartlote (DIN EN ISO 3677)		B-Ag60CuSn-600/730 B-Ag44CuZn-675/735 B-Cu36AgZnSn-630/730 B-Ag40ZnCdCu-595/630	600 bis 730 675 bis 735 630 bis 730 595 bis 630	Löten von CrNi-Stählen, Titan Für Lötstellen mit Betriebstemperaturen bis 200 °C Für Lötstellen mit Betriebstemperaturen bis 200 °C Stähle, Cu, Cu-Legierung, Ni, Ni-Legierung
CP Kupfer-Phosphorhartlote (DIN EN 1044)		CP 201 (L-CuP8) CP 202 (L-CuP7) CP 203 (L-CuP6)	710 bis 770 710 bis 820 710 bis 890	Kupfer, Rotguss, Kupfer-Zink-Legierungen Hartmetallwerkzeuge
Kupfer-Phosphorhartlote (DIN EN ISO 3677)		B-Cu80AgP-645/800 B-Cu89PAg-645/815 B-Cu93P-710/820	645 bis 800 645 bis 815 710 bis 820	Verbindungen, die mit Trinkwasser in Berührung kommen. Cu mit Cu ohne Flussmittel, mit Flussmittel für Messing, Bronze
CU Kupferhartlote (DIN EN 1044)		CU 101 (L-Cu) CU 103 (–) CU 202 (L-CuSn12)	1085 bis 1085 1085 bis 1085 825 bis 990	Stähle Stähle Eisen- und Nickelwerkstoffe
NI und CO Nickel- und Kobalthartlote (DIN EN 1044)		NI 102 (L-Ni2) NI 106 (L-Ni6) NI 108 (L-Ni8) CO 101 (–)	970 bis 1000 875 bis 875 980 bis 1010 1120 bis 1150	Nickel, Kobalt und ihre Legierungen, legierte Stähle
PD Palladiumhartlote (DIN EN 1044)		PD 101 (–) PD 102 (–) PD 201 (–) PD 203 (–)	900 bis 950 875 bis 900 1235 bis 1235 1080 bis 1090	Typische Vakuumhartlote Turbinen- und Reaktorbau Radio- und Elektronenröhren
AU Goldhartlote (DIN EN 1044)		AU 101 (–) AU 102 (–) AU 104 (–)	905 bis 910 930 bis 940 995 bis 1020	

flussmittelfreies 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 (siehe im Sachwortverzeichnis) 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 der Fachliteratur und dem Zustandsschaubild, Bild 3-150, entnommen werden. Schnellfließende, dünnflüssige für die Elektroindustrie geeignete Lote sind eutektische oder naheutektische Legierungen. Wegen des bei ihnen fast fehlenden Erstarrungsbereich 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 Massenlötungen müssen grundsätzlich aus eutektischen Legierungen bestehen. Bei Loten mit größeren Erstarrungsintervallen kann nur die sich zuerst bildende Schmelze in den Lötspalt eindringen, die noch festen Kristalle (Kristallite) machen ein Verschießen des Lotes unmöglich.

Bild 3-150
Zustandsschaubild Blei-Zinn (Weichlote), s. Tabelle 3-18.

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 Tabelle 3-18 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 weden dürfen, die die Anforderungen nach RoHS erfüllen. Gemäß diesen Vorgaben dürfen dann für diese Geräte nur noch bleifreie Lote verwendet werden. Der Einsatz bleifreier Lotlegierungen hat eine höhere Löttemperatur (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, Tabelle 3-18.

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 (Tabelle 3-18). 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). Reinaluminium 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 kadmiumhaltigen Universalhartlote sind niedrigschmelzend und erlauben ein werkstoff- und werkstückschonendes Löten bei sehr kurzen Lötzeiten. 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 Phosphorzusätzen
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 (s. Abschn. 3.6.1).

NI: Nickelbasislote
Diese auch korrosionsbeständigen Lote werden zum Hochtemperaturlöten z. B. von Eisen- und Nickelwerkstoffen im Kern- und Reaktorbau verwendet.

PD: Palladiumlote

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. Nach DIN EN 1044 (Tabelle 1) werden Klasse 1 für die höchsten, Klasse 2 für die weniger hohen Ansprüche an die Verunreinigungsgrenzwerte unterschieden. Lote, deren Verunreinigungswerte diesen Bedingungen entsprechen, erhalten den zusätzlichen Buchstaben V und dazu die Ziffer 1 oder 2, z. B. AU 101 V1.

Die Vorteile der sehr teuren Vakuumhartlote (8 000 bis 10 000 €/kg!) sind die im Vergleich mit anderen Hartloten erzielbaren deutlich besseren mechanischen Gütewerte. 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 lötenden Grundwerkstoffe) ist ein möglichst hoher Dampfdruck der beteiligten Elemente. Ein »Verdampfen« der Bestandteile (»Verderben« des Vakuums, Porenbildung, mangelhafte Benetzbarkeit des Lots) muss während des Lötvorganges und bei der Beanspruchung im Betrieb vermieden werden. Die notwendige Benetzung des flüssigen Lotes im Vakuum erfordert extrem verunreinigungsfreie Werkstoffe. Die Lötflächen sind sorgfältigst zu reinigen und nachzubehandeln (spülen und trocknen).

3.6.5 Konstruktive Hinweise für Lötverbindungen

Ähnlich wie beim Schweißen wird die Qualität und Funktionssicherheit einer Lötverbindung entscheidend durch eine lötgerechte Konstruktion bestimmt. Der Konstrukteur muss insbesondere sicherstellen, dass das Lot die Lötflächen möglichst vollständig benetzen und sich auf ihnen ausbreiten kann. Die Fertigung sollte wirtschaftlich möglich sein.

Die hier gegebenen Hinweise erleichtern das Verständnis der in Abschn. 3.7 skizzierten Konstruktionsbeispiele. Nachstehend werden die wichtigsten Grundregeln zusammengestellt.

Wahl und Form der Spaltbreite
Die Spaltbreite ist abhängig von dem angewendeten Lötverfahren (Bild 3-142) und der Art des Lotes. Die dünnflüssigen eutektischen Lote erfordern enge Lötspalte. Da ihr kapillarer Fülldruck hoch ist, können sie großflächige Lötfugen hervorragend aus-

füllen. 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, Bild 3-151. Plötzliche Querschnittsänderungen des Spaltes sind ebenso nachteilig wie z. B. keil- oder trichterförmige Spalterweiterungen (Bild 3-165, 3-171). Der Lotverbrauch ist groß und die Bildung von Schwindungslunkern wahrscheinlich. Sind Anordnungen gemäß Bild 3-151 konstruktiv oder fertigungstechnisch nicht möglich, dann müssen geeignete Lotformteile vorgesehen werden (Bild 3-159, Bild 3-160, Bild 3-166).

Die notwendigen Platzwechselvorgänge innerhalb der Flussmittel-Lot-Kombination laufen um so 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. Diese Methode ist in den Bildern 3-143 und Bild 3-157 dargestellt.

Oberflächenfeingestalt der Lötstellen
Die (mittlere) Rautiefe *Rz* ist wesentlich für das Vermögen des Lotes, Oberflächen zu benetzen und sich auf ihnen auszubreiten. Die Rautiefen sollten nicht größer als 80 µm bis 100 µm sein, optimal im Bereich zwischen 1,6 µm und 25 µm liegen. Die Riefen bei geschruppten Oberflächen (Rautiefen 25 µm bis > 100 µm) müssen in Fließrichtung des Lotes angeordnet sein. Anderenfalls wird das Verschießen des Lotes sehr behindert, die Füllung des Lötspaltes bleibt unvollständig, und die Belastbarkeit der Lötverbindung wird verringert.

Bild 3-151
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 verschießt bei einem eingelegten Lotdraht in beide Richtungen (nach Degussa)*

3.7 Gestaltung von Lötverbindungen

3.7.1 Allgemeines

Die konstruktive Gestaltung der Lötverbindungen muss eine Reihe von löt- und fertigungstechnischen Bedingungen sicherstellen, so dass
- die für den ordnungsgemäßen Ablauf des Lötprozesses erforderlichen physikalischen und chemischen Vorgänge (Benetzen, Ausbreiten des Lots) stattfinden können,
- die wirtschaftliche Fertigung möglich ist,
- sich die auftretenden Kräfte sicher übertragen lassen.

Voraussetzungen hierfür sind die
- richtige Wahl der Lötspaltbreite und die
- lötgerechte Gestaltung der Lötverbindung.

3.7.2 Gestaltungsregeln

Die Wahl der Lötspaltbreite ist abhängig von dem
- verwendeten Lot, der
- Art der Lotzufuhr bzw. der Fertigung, dem
- verwendeten Schutzmedium und der
- Spaltbreitenänderung bei Erwärmung.

Die Form der Lötstelle soll gewährleisten, dass
- der Lötspalt möglichst gleichmäßig die gesamte Lötfläche umschließt,
- ein Unterbrechen des Lötspalts vermieden wird,
- das Flussmittel entweichen kann,
- keine Spannungskonzentration auftritt.

Großflächige Lötstellen sollen möglichst vermieden werden, weil die erreichbaren Lotflusslängen relativ gering sind. Beim Löten unterschiedlicher Werkstoffe sind die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten und die erheblich schlechteren Korrosionseigenschaften (Metalle bilden ein sehr wirksames galvanisches Element!) zu beachten.

3.7.3 Gestaltung gelöteter Blechverbindungen

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 3-152
Eine keil- oder trichterförmige Ausbildung des Lötspaltes sollte vermieden werden, da sie eine Verminderung der Festigkeit, Erhöhung des Lotverbrauchs (teuer, d. h. unwirtschaftlich) und Bildung von Fehlstellen (Lunker) zur Folge hat.

Bild 3-152

Bild 3-153
Bei Stumpflötungen wird die Festigkeit des Grundwerkstoffs nicht ausgenutzt (Lotfestigkeit geringer als Werkstofffestigkeit). Überlapp- und Laschenverbindungen ermöglichen eine größere Lötfläche.

Bild 3-153

Bild 3-154
Eckverbindungen sollten stets überlappt ausgeführt werden. Mit dieser Maßnahme lässt sich die Lötfläche auf die für die zu übertragende Kraft erforderliche Größe erhöhen.

Bild 3-154

Bild 3-155
Bei Dünnblechbehältern neigt die Querüberlappung zum Abheben. Bei der Falznaht ist die Lötverbindung teilweise mechanisch entlastet und übernimmt vorwiegend Dichtfunktionen (teuer).

Bild 3-155

3.7.4 Gestaltung gelöteter Rundverbindungen

Bild 3-156
Beim Verbinden eines Bolzens mit einer Platte ist die Stumpflötung zu vermeiden. Steckverbindungen verringern die Beanspruchung und sind wegen der größeren Nahtfläche höher beanspruchbar.

Bild 3-156

Bild 3-157
Beim Einlöten von Bolzen in Grundlöcher muss für eine Entlüftung gesorgt werden, damit das Flussmittel entweichen kann. Anderenfalls sind Flussmitteleinschlüsse die Folge.

Bild 3-157

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 3-158

Bild 3-158
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. Der Fließweg des Lotes wird so wirksam verkleinert und der vorgegebene Fließweg über die gesamte Länge sicher ausgefüllt.

Bild 3-159

Bild 3-159
Die Lötfugen müssen so gestaltet sein, dass das Lot gut einfließen und sich möglichst ungehindert ausbreiten kann, d. h., es ist eine *ausreichende Spaltbreite b* erforderlich, Bild 3-142.

Bild 3-160

Bild 3-160
Ein Lotdepot L soll so eingelegt werden, dass möglichst *kurze* Wege für den Lotfluss im parallelen Spalt gewährleistet sind. Dadurch wird das Ausfüllen (auch längerer Fließwege!) des Lotspaltes sehr erleichtert.

Bild 3-161

Bild 3-161
Verengungen im Lötspalt beeinträchtigen den Durchfluss des mit Oxiden angereicherten Flussmittels. In Spalten und in Rundungen muss die Spaltbreite äquidistant bleiben.

Bild 3-162

Bild 3-162
Ein allmählicher Übergang der Nabe zur Welle – besonders wichtig bei dynamisch beanspruchten Verbindungen – erzeugt eine geringere Kerbwirkung.

Bild 3-163

Bild 3-163
Durch zweckmäßige Anordnung des Lotes kann der Fließweg verkleinert und die Lagesicherung des Lotes besser gewährleistet werden.

3.7.5 Gestaltung gelöteter Rohrverbindungen

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 3-164

Bild 3-164
Rohre mit Wanddicken von 1 mm und darüber lassen sich stumpf aneinander löten (genaues Ausrichten ist aber erforderlich, daher zeitaufwändig und teuer!). Muffen- und Steckverbindungen bieten ausreichend große Lötflächen. Sie sind daher die zweckmäßigeren Konstruktionsformen.

Bild 3-165

Bild 3-165
Bei der Lötverbindung der beiden Rohre ist darauf zu achten, dass das aufnehmende Rohrende möglichst zylindrisch aufgeweitet ist und sich somit äquidistant verlaufende Lötspalte ergeben. Kontinuierliche Erweiterungen, wie sie zum Vereinfachen der Herstellung oder Montage häufiger angewendet werden, verbrauchen viel Lot, sind damit unwirtschaftlich und haben schädliche Schwindungslunker zur Folge, d. h., sie füllen den vorgegebenen Lötspalt nicht vollständig aus.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 3-166
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«.

Bild 3-167
Lotanhäufungen vermeiden (Lot ist gewöhnlich relativ teuer, hat eine deutlich geringere Festigkeit als der Grundwerkstoff, und es besteht die Gefahr der Lunkerbildung). Das Einarbeiten bzw. Anpassen des Rohres ergibt eine einwandfreie Verbindung.

Bild 3-168
Zum Anlöten von Flanschen an Rohre ist ein Absatz zwischen Flansch und Rohr zur Lotaufnahme zweckmäßig. Ohne Absatz besteht die Gefahr, dass sich das Lot großflächig über die Oberfläche verteilen würde (1), ohne dass es zu der gewünschten Bindung zwischen Rohr und Flansch kommt. Außerdem wird der vorgegebene Lötspalt nicht vollständig ausgefüllt (2).

Bild 3-169
Der Lotring muss so eingelegt werden, dass das Lot durch Kapillarwirkung in den Lötspalt gesaugt werden kann.

3.7.6 Gestaltung gelöteter Bodenverbindungen

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 3-170
Stumpflötungen von Böden sind zu vermeiden, weil die Lötfläche bei einer überwiegenden Zugbeanspruchung (Innendruck!) zu gering ist. Zweckmäßig ist ein Absatz innen oder außen zwischen Boden und Rohr zur Lotaufnahme. Mit dieser Maßnahme wird die Lötfläche beträchtlich vergrößert.

Bild 3-170

Bild 3-171
Keinen keilförmigen Spalt vorsehen. Die zu fügenden Teile müssen zylindrisch sein, damit sich äquidistante Lötspalte ergeben. Eine andere zweckmäßige konstruktive Maßnahme besteht darin, das Lot in Richtung eines sich *verengenden* Spaltes fließen zu lassen, siehe auch Bild 3-151.

Bild 3-171

Bild 3-172
Blindflansche nicht stumpf verbinden, sondern mit Führungszapfen anlöten.

Bild 3-172

3.8 Kleben

Das Verbinden von Fügeteilen wird beim Kleben durch eine dünne Klebstoffschicht erreicht. Die Festigkeit der geklebten Verbindung hängt von der Eigenfestigkeit (Kohäsion) und den Verformungseigenschaften des Klebstoffs sowie von den Bindekräften zwischen Klebstoffschicht und der Fügeteiloberfläche (Adhäsion) ab. Diese Grenzschichten sind von besonderer Bedeutung, Bild 3-173.

Bild 3-173
Aufbau einer Klebverbindung.

Weitere Einflussgrößen sind die Eigenschaften der Fügeteilwerkstoffe und die Abmessungen. Die Wirksamkeit der Bindekräfte in der Grenzschicht kann durch Vorbehandlung der Klebflächen beeinflusst werden (s. VDI-Richtlinie 2229).

Die Festigkeit der Klebstoffe ist im Vergleich zu den Metallen verhältnismäßig gering. Damit die Tragfähigkeit einer Metallklebung und die 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.

3.8.1 Wirkprinzip des Klebens

Die Kraftübertragung in einer Klebverbindung ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Adhäsions- und Kohäsionskräften[38]. Dabei werden die Kräfte zwischen den Klebstoff- und Fügeteilmolekülen als Adhäsion zusammengefasst und jene Kräfte, die zwischen den einzelnen Klebstoffmolekülen wirken als Kohäsion definiert, Bild 3-174.

Bild 3-174
Adhäsionskräfte (●) und Kohäsionskräfte (○) im Klebspalt (nach Fa. DELO Industrie Klebstoffe).

Die **Adhäsion** kann nur wirksam werden, wenn der Klebstoff die Fügeteile vollständig benetzt. Deshalb müssen die Oberflächen vor dem Kleberauftrag gereinigt werden, damit Verunreinigungen oder Trennmittel, Lötstopplacke, 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 Be-

[38] Kleben. Podcast des IFAM Bremen. www.wissensfloater.de

urteilung 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 Bild 3-175.

K Klebstoff
F Fügeteil
G Gasatmosphäre der Umgebung
α Benetzungswinkel
σ_{FG} Oberfächenenergie des Fügeteils
σ_{KG} Oberflächenspannung des flüssigen Klebstoffs
γ_{KF} Grenzflächenspannung zwischen Fügeteiloberfläche und dem flüssigen Klebstoff

Bild 3-175
Einfluss der Oberflächenspannungsverhältnisse auf den Benetzungswinkel α.

In der Praxis lässt sich die Oberflächenspannung eines Werkstoffs als Schnelltest mit Prüftinten ermitteln. Diese weisen jeweils eine definierte Oberflächenspannung auf und werden einzeln auf den Prüfling aufgetragen. Nach etwa 2 Sekunden 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.

Tab. 3-19. 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	Titan	Eisen
1250	1550	1850	2050	2550

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. Tabelle 3-19 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, Bild 3-176.

Gute Benetzung:

– Benetzungswinkel α ist klein
– Oberflächenspannung $\sigma_{Substrat} > \sigma_{Klebstoff}$
– Adhäsionsarbeit > Kohäsionsarbeit

Schlechte Benetzung:

– Benetzungswinkel α ist groß
– Oberflächenspannung $\sigma_{Substrat} < \sigma_{Klebstoff}$
– Adhäsionsarbeit < Kohäsionsarbeit

Bild 3-176
Benetzungswinkel α als Kennzeichen der Klebfähigkeit.

Wenn der Klebstoff auf dem Substrat kein ausreichend gutes Benetzungsverhalten zeigt, könnte eine Verunreinigung vorliegen. Falls auch nach einer Reinigung mit einem rückstandsfrei ablüftenden Reiniger keine Verbesserung der Oberflächenspannung eintritt, sollte eine geeignete Vorbehandlung der Oberflächen durchgeführt werden.

3.8.2 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 Klebflächen lässt sich gegenüber dem alleinigen Entfetten in fast allen Fällen mit Hilfe nachfolgender mechanische oder chemischer 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 durchgeführter 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 erwärmter 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 Klebfläche 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. Anderenfalls kommt es zu beträchtlichen Festigkeitseinbußen der Klebverbindung.

Tabelle 3-20. Beanspruchbarkeit von Klebverbindungen (nach *Brockmann*).

Beanspruchung	Eigenschaften, Anwendbarkeit
Niedrig	
Zugscherfestigkeit **Umgebung** **Einsatzgebiete**	bis 5 N/mm² Klima in geschlossenen Räumen, kein Kontakt mit Wasser Feinmechanik, Elektrotechnik, Modellbau, Schmuckindustrie, Möbelbau, einfache Reparaturen
Mittel	
Zugscherfestigkeit **Umgebung** **Einsatzgebiete**	bis 10 N/mm² gemäßigtes Klima, Öl, Treibstoffe Maschinenbau, Fahrzeugbau, Reparatur
Hoch	
Zugscherfestigkeit **Umgebung** **Einsatzgebiete**	über 10 N/mm² beliebiges Klima, direkte Berührung mit wässrigen Lösungen, Ölen, Treibstoffen, Lösungsmitteln (Beständigkeit der Klebstoffe beachten) Fahrzeugbau, Schiffbau, Behälterbau

Art und Umfang der jeweils notwendigen Vorbehandlung der Klebflächen hängen auch von den geforderten Beanspruchungen ab. Als Beispiel für die mechanische Beanspruchbarkeit wird hier die Zugscherfestigkeit nach DIN 54455 gewählt, Tabelle 3-20.

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, Bild 3-177.

Bild 3-177
Verlauf der Scherspannungen bei Belastung einer einfach überlappten Klebverbindung.

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.

3.8.3 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 Klebflächen vorgesehen werden. Nur bei Plastisolklebstoffen 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 beeinträchtigt, 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, Tabelle 3-21, und unterhalb des Behälterrandes in einer Kühlzone kondensiert.

Tabelle 3-21. Siedepunkt von Lösungsmitteln für Reinigungszwecke.

Lösungsmittel	Siedepunkt in °C
Aceton	+ 56
Methylenchlorid	+ 42
Perchlorethylen	+ 121
Trichlorethylen	+ 87
1.1.1-Trichlorethan	+ 74

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, so dass eine gute Entfettung erzielt wird. Der Entfettungsvorgang ist beendet, wenn die zu entfettenden Teile die Temperatur des Dampfes erreicht haben.

Die Entfettung kann auch im Lösungsmitteltauchbad durchgeführt werden, dessen Wirksamkeit sich durch zusätzliches Einwirken von Ultraschall wesentlich steigern lässt. Hierbei ist zu beachten, dass sich der Badinhalt mit Fett anreichert, so dass die Teile beim Herausnehmen nicht völlig fettfrei sind. Der Badinhalt muss daher kontrolliert und öfter erneuert werden. Erhöhte Sicherheit beim Tauchbadentfetten 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 Klebflächen 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.

3.8.4 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 polymeren 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, quellbar 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, Bild 3-178.

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, Bild 3-179a).

Das Polymersystem ist temperaturstandfest, nicht schmelz- und schweißbar, unlöslich sowie nur schwach quellbar.

Bild 3-178
Zustandsschaubilder typischer Thermoplaste.
a) Amorpher Thermoplast
b) teilkristalliner Thermoplast

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;
– Acrylatklebstoffe.

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, Bild 3-179b. 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 äußeren Kräfte nimmt das System wieder die ursprüngliche Lage ein. Das Polymersystem ist nicht schmelzbar und nicht löslich, aber durch die weitmaschige Vernetzung quellbar.

Bild 3-179
Zustandsschaubilder verschiedener polymerer Werkstoffe.
a) Duroplast
b) Elastomer
c) thermoplastisches Elastomer

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, Bild 3-179c).

3.8.5 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 klebtechnischen Gesichtspunkten.

3.8.5.1 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 Druckzusammengefügt und erreichen sofort eine relativ hohe Anfangsfestigkeit.

Schmelzklebstoffe trägt man in geschmolzenem Zustand auf. Die Mehrzahl der Produkte wird etwa zwischen 150 °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.

Klebplastisole 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.

3.8.5.2 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 Härter 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 Polyestern 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 Klebfilm 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 N/cm^2 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.

3.8.6 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 Klebflächen aufgetragen werden. Je frühzeitiger dies geschieht, desto größer ist die Sicherheit und die Festigkeit der Klebung. Viskose Klebstoffe können mittels Pinsel, Spachtel oder Spritzen von Hand aufgebracht werden. Meist wird der Klebstoff aber mit automatisch arbeitenden Geräten aufgetragen, die eine genaue Dosierung gewährleisten. 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.

Einkomponenten-Klebstoffe in fester Form werden auf den Fügeteiloberflächen aufgeschmolzen. Eine Sondergruppe der Einkomponenten-Klebstoffe sind Klebfilme. Sie werden entsprechend den Fügeflächen zugeschnitten und zwischen die zu klebenden Teile gelegt. Sind Klebfilme 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. Ablüftzeit 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 Bild 3-180.

Bild 3-180
Verfestigungsprinzip bei lösungsmittelhaltigen Klebstoffen.
a) Beginn des Klebprozesses, im Spalt verteilte 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

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. 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 Klebfläche 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.

3.8.7 Anwendungsbeispiele

Das Kleben ist eine sehr alte Verbindungstechnik, 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 1918/19 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. Jährlich werden allein in Deutschland ungefähr 815 000 t Klebstoff produziert, die Hersteller bieten über 25 000 unterschiedliche Produkte an (Quelle: Industrieverband Klebstoffe e.V., 2009).

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 Bild 3-181 Kupplungselemente, die mit Reibbelägen verklebt werden. Hierbei kommen wegen der geforderten Temperaturbeständigkeit 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.

Bild 3-182 zeigt eine hochfeste Verklebung von Saugrohrmodulen aus Magnesium für Kfz-Motore. 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 erzielen hohe Festigkeiten, so dass sie häufig konventionelle Fügeverfahren wie Nieten, Hartlöten oder Schweißen ersetzen können.

Bild 3-181
Kleben eines Reibbelages bei einem Kupplungselement.

In der Automobilindustrie ist Kleben zu einer Schlüsseltechnologie geworden. Ein Auto enthält heute 15 bis 18 kg Klebstoff, von der gesamten jährlichen Klebstoffproduktion entfallen rd. 9 % 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.

Bild 3-182
Verklebung von Magnesiumteilen / Saugrohrmodul für Kfz-Motore.

Auch direkt eingeklebte Front- und Heckscheiben 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 Schwingungsbelastungen halten auch geklebte (und wegen der Beständigkeit gegen Salzwasser beschichtete) Steckkontakte an beheizten Kfz-Spiegeln stand, Bild 3-183.

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 zusammengefügt werden. Beim Pres-

sen wird der Haftklebstoff fest und verbindet den Kunststoff sicher mit dem Metall. Dadurch werden Zeit und Geld bei der Montage eingespart.

Bild 3-183
Geklebte und beschichtete Steckkontakte an Kfz-Spiegelheizungen.

Eine völlig andere Klebstoffart wird für Schraubensicherungen, Gewindeabdichtungen bei Luft- und Gasleitungen sowie Flächendichtungen an Flanschen eingesetzt, Bild 3-184. Es handelt sich um anaerob (d. h. unter Sauerstoffabschluss) härtende *Methacrylate*. Diese 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 °C bis + 200 °C, Beständigkeit gegen Vibrationen und dynamische Dauerbelastung.

Bild 3-184
Abdichtung von Flanschen gegen Medienaustritt, niedrigfest und leicht lösbar.

Von Wichtigkeit ist auch die DVGW-Zulassung dieser Klebstoffart für Gasverbrauchsanlagen.

Bild 3-185 zeigt die hochfeste Verklebung eines Rotorpakets auf der Welle eines Elektromotors. Bei einer Spaltdicke von d = 0,1 mm sind die Bauteile nach 2 min handfest und nach 1 bis 3 Stunden endfest. Die Einsatztemperatur beträgt bis 200 °C, die Druckfestigkeit erreicht 33 MPa.

Bild 3-185
Verkleben eines Rotorpakets auf der Welle.

Auch bei der Herstellung von Statorgehäusen für Elektromotore lassen sich Kosten einsparen, wenn statt der klassischen Befestigung mit Mitteln des Maschinenbaus geklebt wird, Bild 3-186. Hier muss die Klebefuge < 0,5 mm sein, die Aushärtungszeit beträgt 15 min bei 180 °C.

Bild 3-186
Einkleben von Magneten in Statorgehäuse eines Elektromotors.

Im Bereich **Elektronik** hat das Kleben eine noch größere Bedeutung erlangt, z. B. bei der fortschreitenden Tendenz zur Miniaturisierung von Bauteilen. Hier werden häufig *photoinitiiert 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, Bild 3-187. Nach dem gleichen Prinzip werden auch die Einzelteile von Handys (Glas- oder Plastikscheiben, Lautsprecher, Kameragehäuse) verklebt, Bild 3-188.

Bild 3-187
Fixieren einer Spule auf einem Ferritkern.

Nicht durchscheinende Werkstoffe werden besser mit *photoinitiiert härtenden Epoxidharzen* verklebt. Sie können aufgrund der Voraktivierung (DELO-Patent) durch Licht ausgehärtet werden. Typische Anwendungen sind die Sicherung von Lötkontakten bei elektronischen Bauteilen, die Leiterplattenbeschichtung, das Einkleben von Leiterplatten in Gehäuse und die zuverlässige Gehäuseabdichtung bei Airbag-Sensoren, Bild 3-189.

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

Bild 3-188
Verklebung verschiedener Handy-Komponenten.
Es bedeuten:
❶: *Fixieren von Designelementen der Oberschale*
❷: *Einkleben von Glas- oder Plastikscheiben in die Oberschale*
❸: *Einkleben von Rahmen in die Abdeckung*
❹: *Verkleben verschiedenster Komponenten und Werkstoffe des Lautsprechers*
❺: *Einkleben des Kameragehäuses in die Unterschale*
❻: *Verkleben der einzelnen Unterschalenelemente*

Bild 3-189
Gehäuseabdichtung bei Airbag-Sensoren. Der Pfeil kennzeichnet die Dichtfuge.

oben aufgebracht werden. Daher wird der Chip ohne Gehäuse direkt auf die Leiterplatte geklebt. Diese sog. *Chip-on-Board-Technologie* (COB) wird in Bild 3-190 erläutert.

Bild 3-190
Chip-on-Board-Technologie (COB).

Nach dem Aufkleben werden zunächst die Bonddrähte (aus Gold oder Aluminium) kontaktiert. 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).

Dualhärtende 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 Bild 3-191.

Bild 3-191
Fixierung und Verklebung einer Spule vor dem Verlöten. Der Pfeil kennzeichnet die Klebschicht.

Zunächst wird die Kehlnaht (im Bild 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 Vibrationen.

3.9 Gestaltung von Klebverbindungen

3.9.1 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 von 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.

3.9.2 Gestaltung geklebter Blechverbindungen

Bild 3-192

Bild 3-192
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: $l_ü \approx (10 \ldots 15) \cdot s$.
c) Mit größerer Überlappungslänge $l_ü$ lässt sich die Klebfläche kostengünstig vergrößern.
d) Zugeschärfte Überlappungen haben eine etwas höhere Festigkeit, erfordern jedoch – wie geschäftete Verbindungen – einen meist erheblichen Fertigungsaufwand.
e) Bei abgesetzten Überlappungen ist der Fertigungsaufwand extrem groß und die Tragfähigkeit der Fügeteile sinkt durch die Querschnittsverminderung auf die Hälfte.

Bild 3-193

Bild 3-193
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.

Bild 3-194

Bild 3-195

Bild 3-194
Schälbeanspruchungen können vermieden werden durch
a), c) Überlappen oder
b) Doppellaschen bzw. mit Hilfe
d) nicht lösbarer Verbindungselemente.

Lässt sich eine Schälbeanspruchung nicht vermeiden, so ist die Verbindung zusätzlich nach d) zu sichern.

Bild 3-195
Bei Winkelverbindungen kann das Abschälen vermieden werden durch
a), b) Abbiegen,
c) Anbringen von Winkelblechen bzw. Eckstücken oder durch
d) ein genutetes, spanend hergestelltes Eckstück. Die Varianten c) und d) sind fertigungstechnisch sehr aufwändig zu realisieren, d. h. ihre »Vorteile« relativieren sich!

3.9.3 Gestaltung geklebter Rohrverbindungen

Bild 3-196
Bei Rohrleitungen kann die Klebfläche vergrößert werden durch
a) Schäften,
b), c) Stecken oder
d), e) Muffen.

Bei den konstruktiven Lösungen c) bis e) liegt eine rotationssymmetrische Überlappung vor, bei der eine ausreichende Klebfläche durch Verändern der Überlappungslänge $l_ü$ einzustellen ist.

Als Lastart kommen Zug, Druck und Torsion in Betracht. Da bei der Klebung im rotationssymmetrischen Spalt kein Aushärten unter Druckkräften möglich ist, besteht die Gefahr der Hohlraumbildung. Die dadurch bewirkten Spannungsspitzen erfordern bei der Festigkeitsrechnung Sicherheitszuschläge.

Bei richtiger Anwendung können Rohrsteckverbindungen teure Passungen ersetzen.

Bild 3-196

3.9.4 Gestaltung geklebter Rundverbindungen

Bild 3-197
Geklebte Bolzen sind zu zentrieren, um ein Verschieben bei der Montage zu vermeiden.

Bild 3-197

Bild 3-198
Bei Rundverbindungen müssen konstruktive Vorkehrungen getroffen werden, um die zuverlässige Ausfüllung des Klebspalts mit Klebstoff bei der Montage sicherzustellen. Auch wenn es sich um dünnflüssigen Klebstoff handelt, ist ein Abstreifen durch scharfe Kanten zu vermeiden.

Bild 3-198

Bild 3-199
Aufwändige Welle-Nabe-Verbindungen können häufig kostengünstiger geklebt hergestellt werden; außerdem ist bei Rundverbindungen die erwünschte alleinige Scherung vorhanden.

Bild 3-199

Ergänzendes und weiterführendes Schrifttum

Aichele, G.: 140 Arbeitsregeln für das Schutzgasschweißen. DVS-Verlag, Düsseldorf 2007.

Bargel, H.-J., u. *G. Schulze (Hrsg.):* Werkstoffkunde, 11. Aufl., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2012.

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. Käufer:* Kleben von Kunststoff mit Metall. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1989.

DELO Industrie Klebstoffe (Hrsg.): Bond it – Nachschlagewerk zur Klebtechnik, 4. Aufl., Windach 2007.

DIN 1707-100: Weichlote – Chemische Zusammensetzung und Lieferformen, 2011-09.

DIN 1910: Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe.
Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610, 2008-02.

DIN 54455: Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen; Torsionsscherversuch, 1984-05.

DIN 8505, s. DIN ISO 857-2, 2007-03.

DIN 8528, s. DIN EN 1011-2, 2001-05.

DIN EN 1011: Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe.
Teil 7: Elektronenstrahlschweißen, 2004-10.

DIN EN 1044: Hartlöten – Lotzusätze, s. DIN EN ISO 17672, 2010-11.

DIN EN 1045: Hartlöten – Flußmittel zum Hartlöten – Einteilung und technische Lieferbedingungen, 1997-08.

DIN EN 12345. Schweißen – Mehrsprachige Benennung für Schweißverbindungen mit bildlichen Darstellungen, s. DIN EN ISO 17659, 2005-09.

DIN EN 12536: Schweißzusätze – Stäbe zum Gasschweißen von unlegierten und warmfesten Stählen – Einteilung, 2000-08.

DIN EN 22553: Schweiß- und Lötnähte – Symbolische Darstellung in Zeichnungen, 1997-03.

DIN EN 29454: Flussmittel zum Weichlöten; Einteilung und Anforderungen.
Teil 1: Einteilung, Kennzeichnung und Verpackung, 1994-02.

DIN EN 439, s. DIN EN ISO 14175, 2008-06.

DIN EN 499, s. DIN EN ISO 2560, 2010-03.

DIN EN 60974: Lichtbogenschweißeinrichtungen.
Teil 1: Schweißstromquellen, 2006-07.

DIN EN 756, s. DIN EN ISO 14171, 2011-01.

DIN EN 760: Schweißzusätze – Pulver zum Unterpulverschweißen – Einteilung, 1996-05.

DIN EN 923: Klebstoffe – Benennungen u. Definitionen, 2008-6.

DIN EN ISO 13919: Schweißen – Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen; Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten.
Teil 1: Stahl, 1996-09.
Teil 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-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung, 2008-08.

DIN EN ISO 17659: Schweißen – Mehrsprachige Benennungen für Schweißverbindungen mit bildlichen Darstellungen, 2005-09.

DIN EN ISO 17672: Hartlöten – Lote, 11/2010.

DIN EN ISO 2560: Schweißzusätze – Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung, 2006-03.

DIN EN ISO 3677: Zusätze zum Weich-, Hart- und Fugenlöten – Bezeichnung, 1995-04.

DIN EN ISO 3690: Schweißen und verwandte Prozesse – Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes im ferritischen Schweißgut, 2009-06.

DIN EN ISO 6848: Lichtbogenschweißen und -schneiden – Wolframelektrode – Einteilung, 2005-03.

DIN EN ISO 6947: Schweißnähte – Schweißpositionen, 2011-08.

DIN EN ISO 9013: Thermisches Schneiden – Einteilung thermischer Schnitte – Geometrische Produktspezifikation und Qualität, 2003-07.

DIN EN ISO 9453: Weichlote – Chemische Zusammensetzung und Lieferformen, 2006-12.

DIN EN ISO 9692: Schweißen und verwandte Verfahren – Empfehlungen zur Schweißnahtvorbereitung.
Teil 1: Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen, Gasschweißen, WIG-Schweißen und Strahlschweißen von Stählen, 2005-04.
Teil 2: Unterpulverschweißen von Stahl, 1999-09.

DIN ISO 857-1, s. DIN EN 14610, 2005-02.

DIN ISO 857: Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe.
Teil 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 0950 Technische Regel: Mechanisiertes WIG- und Plasmaschweißen – Anforderungen an Stromquellen und Gerätetechnik, 2006-01.

DVS 0957 Technische Regel: Umgang mit umhüllten Stabelektroden – Transport, Lagerung und Rücktrocknung, 2005-07.

DVS 2707: Technische Regel: Plasmaschweißen – Verfahrensübersicht, Gaseauswahl und Kennwerte zum Schweißen, s. DVS 0950, 2001-06.

DVS 2803 Technische Regel: Elektronenstrahlschweißen in der Mikrotechnik (Übersicht), 1974-12.

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, 1988-06.

DVS 3311: Klebaufsicht. Aufgaben u. Verantwortlichkeiten. Düsseldorf 2012-05.

Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren, Bd. 1, Schweiß- und Schneidtechnologien, 3. Aufl., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2006.

Dorn, L.: Hartlöten u. Hochtemperaturlöten. Expert-Verlag 2007.

Düren, C., u. *W. Schönherr:* Verhalten von Metallen beim Schweißen. DVS-Berichte, Bd. 85, DVS-Verlag, Düsseldorf 1988.

Enke, K., u. *St. Gülde:* Anwendungsmöglichkeiten der Klebtechnik im Montagebereich von Baumaschinen. Dipl.-Arbeit an der TFH Berlin 1996, Betreuer Prof. Dr.-Ing. A. H. Fritz.

Fahrenwald, H. J, u. *V. Schuler (Hrsg.).: Praxiswissen* Schweißtechnik – Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, 4. Aufl. Vieweg + Teubner Fachverlage, Braunschweig, Wiesbaden 2011.

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, www.wissensfloater.de

Fritz, A. H.: Schweißen bei Offshore-Anlagen und im Schiffbau. In: Fügetechnik/Schweißtechnik. Lehrunterlage, 5. Aufl., DVS-Verlag, Düsseldorf 1995.

Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen, 6. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2009.

Hennemann, O.-D., W. Brockmann, u. *H. G. Kollek:* Handbuch Fertigungstechnologie Kleben. Hanser-Verlag, München 1992.

Hermann, F.-D.: Handbuch der Schweißverfahren, Tl.2, Autogentechnik, Thermisches Schneiden, Elektronenstrahlschweißen, Laserstrahlschweißen, Reibschweißen, 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.

Killing, R.: Angewandte Schweißmetallurgie. DVS-Verlag, Düsseldorf 1998.

Kuo, S.: Welding Metallurgy. Verlag Wiley-Interscience 2002.

Lancaster, J. F.: Metallurgy of Welding, 6. Aufl., Verlag William Andrew Publishing 1999.

Lippold, J. C., u. *D. J. Kotecki:* 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 Umformen. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Wien 2003.

Müller, P., u. *L. Wolff:* Handbuch des UP-Schweißens. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 55. DVS-Verlag, Düsseldorf 1978.

Neumann, A.: Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure, Teil 1. DVS-Verlag, Düsseldorf 1996.

Pomaska, H.-U.: MAG-Schweißen – kein Buch mit sieben Siegeln – Linde AG, Höllriegelskreuth 1989.

Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik, Bd. I: Werkstoffe (1991), Bd. II: Verfahren und Fertigung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1982.

Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens, 4. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2010.

Technische Regel für Gefahrstoffe, TRGS 401, 2008-06.

Unfallverhütungsvorschrift VBG 15: Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren 1997.

VDI 2229: Metallkleben, Hinweise für Konstruktion und Fertigung. Düsseldorf 1979-06.

Walker, J. R.: Arc Welding. Verlag Goodheart-Wilcox Publisher 2000.

www.wissensfloater.de unter Produktionstechnik:
– Bolzenschweißen
– Buckelschweißen
– Abbrennstumpfschweißen von Schienen
– Schienenschweißen mit dem Thermit-Prozess
– Laserstrahlschweißen und -schneiden mit Industrierobotern

4 Trennen (Zerteilen; Spanen; Abtragen; thermisches Schneiden)

Trennen ist Fertigen durch Ändern der Form eines festen Körpers. Dabei wird der Zusammenhalt örtlich aufgehoben, d. h. im Ganzen vermindert (z. B. durch Zerteilen, Spanen, Abtragen, thermisches Schneiden).

4.1 Allgemeines und Verfahrensübersicht

Im Ordnungssystem der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 ist das charakteristische Merkmal der Gruppe 3 *Trennen* das örtliche Aufheben des Stoffzusammenhalts. Bild 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.) 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 vornehmlich 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 angewendete 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.

Das Scherschneiden kann mit parallelen oder schrägen Schneiden erfolgen. Bild 4-2 zeigt hierzu Einzelheiten. Der Schrägungswinkel 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 Beschneiden beim Stanzen unterschieden.

Ausschneiden und Lochen sind Schneidverfahren mit in sich geschlossener Schnittlinie, wie Bild 4-3 zeigt. Beim *Ausschneiden* ist der vom Stempel durch die Schneidplatte 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

A. H. Fritz, G. Schulze (Hrsg.), *Fertigungstechnik,* Springer-Lehrbuch
DOI 10.1007/978-3-642-29786-1_4, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Bild 4-1
Trennen und Einteilung der Verfahren (auszugsweise) nach DIN 8580.

Bild 4-2
Prinzip des Schneidevorgangs.

Bild 4-3
Gegenüberstellung der Schneidverfahren Ausschneiden und Lochen.

Bild 4-4
Beschneidewerkzeug für den Flansch von Tiefziehteilen, schematisch.

Bild 4-5
Beschneiden von rotationssymmetrischen Hohlkörpern.

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. Bild 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 Bild 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 Biegespannungen 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 Gütewerte 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-

Bild 4-6
Kraft-Weg-Schaubild beim Blechschneiden.
s_0 Blechdicke, F_s Schnittkraft, s Weg des Schneidstempels.

Weg-Schaubild unterschiedlich ausfallen. Bild 4-6 zeigt diese Unterschiede. Bei harten Werkstoffen, die wenig Dehnung aufweisen, steigt die Schnittkraft 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 Bild 4-7. Bei extrem kleinem Spalt können bereits beim Anschneiden Risse als Folge der verhältnismäßig großen Querspannungen auftreten (Bild 4-7a)). Die Schnittkraft sowie der Arbeitsbedarf sind hoch. Am Werkstück zeigen die Schnittflächen dann keine geraden Kanten, sondern Anrisse in der Schnittfläche.

In Bild 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 gemäß Bild 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 schneidenden 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 Gegensatz zu scharfen Schneidkanten tritt keine Zipfelbildung mehr ein.

Bild 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.

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 gemäß Bild 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*.

Bild 4-8
Formfehler am Schnittteil (nach G. Spur).

Der Kantenabzug s_A wird vom Werkstoff, dem Schneidspalt und von der Form der Schneidlinie bestimmt. Nur an kreisrunden Zuschnitten 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 Zipfelbildung 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:

$$k_s = \frac{F_{s\,max}}{A_s}. \qquad [4\text{-}1]$$

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

$$F_{s\,max} = l_s\ s_0\ k_s \qquad [4\text{-}2]$$

ermittelt. Näherungsweise kann k_s aus der Zugfestigkeit hergeleitet werden:

$$k_s \approx 0{,}8\ R_m. \qquad [4\text{-}3]$$

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 Bild 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.

Die Höhe H der Abschrägung kann das 1- bis 1,5fache der Blechdicke betragen. Die größte Schneidkraft berechnet sich dann zu

$$F_{s\,max} = 0{,}67\ l_s\ s_0\ k_s.$$

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-Schneidwerkzeug bezeichnet. Ein Beispiel für ein *Freischneidwerkzeug* zeigt Bild 4-10. Die schneidenden Werkzeugelemente sind im Werkzeug nicht gegeneinander geführt. Die Führung wird nur durch die Führungen des Pressenstößels übernommen.

Bild 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

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

Bild 4-10
Freischneidwerkzeug zum Stanzen von Blechen, schematisch.

großer Verschleiß entstehen, z. B. beim Schneiden von Blechen mit $s \leq 1$ mm bei einem Schneidspalt von $u = 0{,}01$ mm.

Plattenführungsschneidwerkzeuge nach Bild 4-11 haben eine Führungsplatte, die meist eine Führungsbuchse enthält. Die beim Einrichten des Werkzeuges möglichen Lagefehler der Werkzeugelemente werden dadurch vermieden. Verschiebelagefehler der schneidenden Werkzeugelemente infolge der Führungsungenauigkeit 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.

Bild 4-11
Plattenführungsschneidwerkzeug, verstiftet u. verschraubt.

Da ein Werkzeugelement direkt zum Führen verwendet wird, kann durch am Stempel anhaftende Werkstoffteilchen ein starker Verschleiß auftreten.

In *Säulenführungsschneidwerkzeugen* entsprechend Bild 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 Einrichtehilfen und als Herstellungshilfen für genaue Werkstücke anzusehen sind. Verschiebungskräfte bei nichtmittiger Einspannung der Werkzeuge oder Auffederungsfolgen bei C-Gestell-Pressen las-

Bild 4-12
Säulenführungsschneidwerkzeug, schematisch.

sen sich nicht aufnehmen, weil die Führungssäulen meist nicht steif 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. lm 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 Bild 4-13. Die Anordnung der Werkzeuge beim Folgeschnitt geht aus Bild 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 gemäß Bild 4-14b) zu beachten, die mitunter zu Problemen bei der Weiterverarbeitung führt. Als Vorschubbegrenzungen (Bild 4-15) können im Werkzeug *Einhängestifte* oder *Seitenschneider* verwendet

Bild 4-13
Beispiel einer Werkstückteilung (Stanzen vom Blechstreifen).

Bild 4-14
Werkzeugaufbau beim Folgeschnitt (a) und Gratlage am Blechabschnitt (b).

werden. Einhänge- oder Anschlagstifte (Bild 4-15a)) sind die einfachste Vorschubbegrenzung, beim automatischen Vorschub aber meist nicht zu 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, Bild 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. Anderenfalls 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 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 Nach-

Bild 4-15
Verschiedene Arten der Vorschubbegrenzung.
a) Einhänge- und Anschlagstift
b) Fang- oder Pilotstift (siehe VDI 3358)
c) Seitenschneider bzw. Formseitenschneider (im oberen Bildteil), B Blechstreifenbreite; b nutzbare Breite (VDI 3367)

teil kann durch einen Formseitenschneider vermieden werden, der im oberen Teil des Bildes 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 ±0,01 mm bei modernen *Stanzwerkzeugen* gewährleisten.

Auf die Gestaltung von Schnittteilen – auch unter Bezug auf Vorschubprobleme – wird in Abschn. 4.11 eingegangen.

4.3 Spanen

Unter Spanen versteht man gemäß 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. Bild 4-16 und 4-17 geben einen Überblick über die einzelnen Verfahrensuntergruppen nach den entsprechenden DIN-Normen. Zum *Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden* wird ein

Bild 4-16
Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden; Einteilung nach DIN 8589.

Bild 4-17
Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden; Einteilung nach DIN 8589.

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 sind durch die ersten drei Stellen der Ordnungsnummer bestimmt (z. B. 3 3 1 Schleifen, Bild 4-18). 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 Bild 4-18 den systematischen Aufbau einer *Verfahrensbenennung* beim Schleifen, die die primären Verfahrensmerkmale Werkstück, Werkzeug und Kinematik in Form einer Zahlenkombination miteinander verbindet.

Bild 4-18
Aufbau einer Verfahrensbenennung (Beispiel Schleifen).
v_c *Schnittgeschwindigkeit*
v_{ft} *Vorschubgeschwindigkeit (tangential)*
v_{fa} *Vorschubgeschwindigkeit (axial)*
v_{fr} *Vorschubgeschwindigkeit (radial)*

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) 70 % gegenüber einem Anteil von 20 % bei umformenden Werkzeugmaschinen, gemessen an der Gesamtproduktion der Werkzeugmaschinen in der Bundesrepublik Deutschland. Steigende Anforderungen an Oberflächengüten, Maß-, Form- und Lagegenauigkeiten sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Konstruktionswerkstoffen lassen für spanende Fertigungsverfahren deutliche Wettbewerbsvorteile erwarten.

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: www.wissensfloater.de (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 gemäß Bild 4-19 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 gekennzeichnet 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 (Bild 4-19). Mit ihnen lassen sich kinematische Unterschiede zwischen den verschiedenen spanenden Fertigungsverfahren kennzeichnen.

Der *Vorschubrichtungswinkel* φ ist der Winkel zwischen Vorschubrichtung und Schnittrichtung. Der *Wirkrichtungswinkel* η ist der Winkel zwischen Wirkrichtung und Schnittrichtung. Allgemein gilt:

$$\tan\eta = \frac{\sin\varphi}{v_c / v_f + \cos\varphi}. \qquad [4\text{-}5]$$

Der Vorschubrichtungswinkel φ ist verfahrensabhängig und beträgt beispielsweise beim Drehen $\varphi = 90°$, 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 Bild 4-20 und 4-21.

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* a_p 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 Werkstück, gemessen in der Arbeitsebene und senkrecht zur Vorschubrichtung.

Bild 4-19
Bewegungen, Arbeitsebene P_{fe}, Vorschubrichtungswinkel φ und Wirkrichtungswinkel η beim Drehen (nach DIN 6580).

Bild 4-20
Eingriffs- und Spanungsgrößen beim Längsdrehen.
a_p *Schnitttiefe,* f *Vorschub*
h *Spanungsdicke,* b *Spanungsbreite*
A *Spanungsquerschnitt*
κ *Einstellwinkel*

Der *Vorschubeingriff* 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).

Bild 4-21
Eingriffsgrößen beim Umfangsfräsen und Umfangsschleifen.
a_p *Schnittbreite*
a_e *Arbeitseingriff*
a_f *Vorschubeingriff*

Der *Spanungsquerschnitt A* (Bild 4-20) ist die senkrecht zur Schnittrichtung projizierte Querschnittsfläche eines abzunehmenden Spans. Für Drehmeißel mit geraden Schneiden und scharfkantigen Schneidenecken gilt

$$A = a_p f = b\,h. \qquad [4\text{-}6]$$

Die *Spanungsbreite b* gibt die Breite, die *Spanungsdicke h* die Dicke des Spanungsquerschnitts an.

Bild 4-22
Flächen, Fasen, Schneiden und Schneidenecken am Dreh- oder Hobelmeißel (nach DIN 6581).

Die geometrischen Zusammenhänge zwischen Vorschub, Eingriffs- und Spanungsgrößen gehen aus Bild 4-20 hervor. Bei vereinfachter Betrachtung gelten die Beziehungen

$$b = \frac{a_p}{\sin\kappa} \qquad [4\text{-}7]$$

$$h = f \cdot \sin\kappa. \qquad [4\text{-}8]$$

Eine wichtige Spanungsgröße, besonders beim Vergleich von spanenden Fertigungsverfahren, ist das Zeitspanungsvolumen Q_w. Dieses ist das auf eine Zeiteinheit bezogene vom Werkstück abzuspanende Werkstoffvolumen (Spanungsvolumen).

Für das Zeitspanungsvolumen beim Drehen gilt

$$Q_w = A\,v_c = d_m a_p v_f. \qquad [4\text{-}9]$$

Hierbei ist d_m der mittlere Durchmesser der vom Werkzeug nach einer Zustellung in einem Durchgang vom Werkstück abzuspanenden Werkstoffschicht (Spanungsschicht).

4.4.4 Geometrie am Schneidteil

Wie aus Bild 4-22 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.

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 Bezugssysteme eingeführt. Man unterscheidet zwischen dem Werkzeug- und dem Wirkbezugssystem. Die im *Werkzeugbezugssystem* gemessenen Werkzeugwinkel kennzeichnen gemäß Bild 4-23 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. 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 Bild 4-24. *Spanwinkel* γ, *Keilwinkel* β und *Freiwinkel* α werden in der Keilmessebene gemessen ($\alpha + \beta + \gamma = 90°$). 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 Werk-

Bild 4-23
Werkzeug- und Wirkbezugssystem am Drehmeißel (nach DIN 6581).

Bild 4-24
Werkzeugwinkel für einen Punkt der Hauptschneide am Drehmeißel (nach DIN 6581).

zeugschneidenebene 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).

4.4.5 Kräfte und Leistungen

Die bei einem Zerspanvorgang auf das Werkstück wirkende *Zerspankraft F* kann in verschiedene Komponenten zerlegt werden, wie Bild 4-25 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

$$F = \sqrt{F_a^2 + F_p^2} = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}. \qquad [4\text{-}10]$$

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

$$P_c = v_c F_c, \qquad [4\text{-}11]$$

als *Vorschubleistung*

$$P_f = v_f F_f \qquad [4\text{-}12]$$

und als *Wirkleistung*

$$P_e = v_e F_e. \qquad [4\text{-}13]$$

Die Wirkleistung ist auch die Summe aus Schnittleistung P_c und Vorschubleistung P_f

$$P_e = P_c + P_f. \qquad [4\text{-}14]$$

4.4.6 Standzeit- und Verschleißbegriffe

Das *Standvermögen* kennzeichnet die Fähigkeit eines Wirkpaares (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. Kühlschmierung).

Bild 4-25
Komponenten der Zerspankraft beim Drehen (nach DIN 6584), F_c ist meist doppelt so groß wie F_f.

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. St*andzeiten, Standwege, Standmengen*). Zur eindeutigen Beschreibung des Standvermögens sind die Standgrößen stets in Verbindung mit dem Standkriterium und den zugehörigen Standbedingungen anzugeben.

Beispiel:

$$T_{\mathrm{VB\ 0{,}2:\ 200}} = 60\ \mathrm{min}$$

Standgröße Standkriterium Standbedingung

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 Bild 4-26 dargestellten Verschleißgrößen. Als Standkriterium sind besonders der *Freiflächenverschleiß* und der *Kolkverschleiß* von Bedeutung.

Bild 4-26
Verschleißgrößen am Schneidteil eines Drehmeißels.
γ *Spanwinkel*
α *Freiwinkel*
SV_α *Schneidenversatz, in Richtung der Freifläche gemessen*
SV_γ *Schneidenversatz, in Richtung der Spanfläche gemessen*
VB *Verschleißmarkenbreite an der Freifläche*
KM *Kolkmittenabstand*
KT *Kolktiefe*
KL *Kolklippenbreite*

4.5 Grundlagen zum Spanen

Die *Zerspanbarkeit* eines Werkstücks kann nicht, wie es bei vielen physikalischen Vorgängen der Fall ist, durch eine allgemeingültige Gesetzmäßigkeit beschrieben oder beurteilt 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 $\kappa = 90°$ gemäß Bild 4-27 weitgehend verwirklicht.

Ausgehend vom Orthogonalprozess entwickelten *Piispanen* und *Merchant* eine sehr vereinfachte *Mo-*

Bild 4-27
Plan-Längsdrehen eines Rohres; Beispiel für einen Orthogonalprozess.

Bild 4-28
Spanbildungsmodell (nach Merchant).
Φ Scherwinkel
η Strukturwinkel
Ψ Fließwinkel
h Spanungsdicke
h_{ch} Spandicke
γ Spanwinkel
α Freiwinkel

dellvorstellung der Spanbildung, Bild 4-28 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*. Den 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 Bild 4-29 zeigt. Die *primäre Scherzone* (Zone 1) wird als unmittelbare *Spanentstehungszone* angenommen. In der *Verformungsvorlaufzone* (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.

4.5.2 Spanstauchung

Verformungen und Reibungsvorgänge in den vorgenannten Spanbildungszonen bewirken die Spanstauchung, die man als Änderung der Spangrößen gegenüber den zugehörigen Spanungsgrößen bezeichnet. Entsprechend den Abmessungen des Spans unterscheidet man

Spandickenstauchung

$$\lambda_h = \frac{\text{Spandicke } h_{ch}}{\text{Spanungsdicke } h} > 1 \qquad [4\text{-}15]$$

Spanbreitenstauchung

$$\lambda_b = \frac{\text{Spanbreite } b_{ch}}{\text{Spanungsbreite } b} > 1 \qquad [4\text{-}16]$$

Bild 4-29
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

α *Freiwinkel*
γ *Spanwinkel*
Φ *Scherwinkel*
h *Spanungsdicke*
h_{ch} *Spandicke*
v_c *Schnittgeschwindigkeit*
v_s *Schergeschwindigkeit*
v_{sp} *Spangeschwindigkeit*

Bild 4-30
Geometrie und Geschwindigkeitsverhältnisse in der Spanentstehungszone.

Durch die Stauchung des Spanquerschnitts

$$\lambda_A = \lambda_h \lambda_b \qquad [4\text{-}17]$$

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 gemäß Bild 4-30 erhält man nach *Kronenberg*

$$\lambda_h = \frac{v_c}{v_{sp}} = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi}. \qquad [4\text{-}18]$$

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 (Bild 4-30). Es gilt unter der Annahme eines freien, ungebundenen Schnittes (Orthogonalprozess)

$$\tan \Phi = \frac{\cos \gamma}{\lambda_h - \sin \gamma}. \qquad [4\text{-}19]$$

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 gemäß Bild 4-31 vier Spanarten:
- *Reiß-* oder *Bröckelspäne,*
- *Scherspäne,*
- *Lamellenspäne,*
- *Fließspäne.*

Bild 4-31
Spanarten: a) Reißspan, b) Scherspan, c) Lamellenspan, d) Fließspan.

Reiß- bzw. Bröckelspäne treten vorwiegend bei spröden Werkstückstoffen auf, z. B. bei Eisengusswerkstoffen und Bronzen, und haben meist sehr schlechte Oberflächen zur Folge.

Beim Drehen mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c < 10$ m/min und negativen Spanwinkeln können Reißspäne z. B. auch bei Baustählen entstehen.

Scherspäne sind je nach Werkstückstoff in einem Schnittgeschwindigkeitsbereich von 20 m/min 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 Baustählen mit einer Schnittgeschwindigkeit von ungefähr $v_c = 80$ 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 Bild 4-32. Bei konstantem Reibwert μ steigt der Scherwinkel mit dem Spanwinkel an und verschiebt die dargestellten Zusammenhänge in das Gebiet der Fließspanbildung.

Bild 4-32
Einfluss von Scherwinkel Φ, Schnittgeschwindigkeit v_c, Spanwinkel γ und Gleitreibungskoeffizient μ auf die Spanarten (nach Hucks).

Bild 4-33
Aufbauschneidenbildung.
H Höhe der Aufbauschneide
L Länge der Aufbauschneide

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 Bild 4-33 verdeutlicht. Es bilden sich keilförmige Schneidenansätze, 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, Bild 4-33a).
- 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, Bild 4-33b).
- Die Werkstoffpartikel wandern an der Spanunterseite und der gefertigten Werkstückfläche ab, und es entstehen charakteristische schlechte Oberflächen, Bild 4-33c).

Bild 4-34
Einfluss von Schnitttemperatur ϑ und Schnittgeschwindigkeit v_c auf die Abmessungen von Aufbauschneiden (nach Opitz).

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 Bild 4-34 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.

Für das Drehen lassen sich verschiedene Spanformen entsprechend Bild 4-35 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. Unerwünscht 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 Gl. [4-20] ergibt:

$$R = \frac{\text{Raumbedarf der Spanmenge}}{\text{Werkstoffvolumen der gleichen Spanmenge}}.$$

Band- und Wirrspäne bilden unerwünschte Formen mit Spanraumzahlen $R > 90$.

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 Spanformstufen werden in der Praxis Spanformdiagramme, etwa gemäß Bild 4-36, herangezogen, die in Abhängigkeit von den jeweiligen Eingriffs- bzw. Spanungsgrößen die Bereiche mit guter Spanformung kennzeichnen.

Spanform		Spanraumzahl R	Beurteilung
Bandspäne		≥ 90	ungünstig
Wirrspäne			
Wendelspäne	lang	≥ 50	brauchbar
	kurz	≥ 25	gut
Spiralspäne		≥ 8	
Spanbruchstücke		≥ 3	brauchbar

Bild 4-35
Spanformen bei der Drehbearbeitung und deren Beurteilung.

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 Bild 4-37 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 möglich, 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.

Bild 4-37 zeigt die Temperaturverteilung im Werkstück, im Span und im Werkzeug beim Zerspanen von Stahl mit einem Hartmetallwerkzeug bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60$ m/min.

Bild 4-36
Spanformdiagramm für verschiedene Geometrien von Spanformstufen nach Krupp-Widia (Werkstückstoff: C60, Schneidstoff: mehrlagenbeschichtetes Hartmetall Widalon TK 15, Schnittdaten: $v_c = 200$ m/min, $\kappa = 95°$).

4.5.7 Schneidstoffe

Als Schneidstoffe bezeichnet man Werkstoffe, die für den Schneidteil von spanenden Werkzeugen verwendet werden. Die Art der Beanspruchungen der Schneidstoffe ist außerordentlich vielfältig und führt zu einer Reihe von zu fordernden 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. Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über Schneidstoffe für das Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden und einige wichtige Eigenschaften.

Bild 4-37
Energieumwandlungsstellen und Temperaturverteilung in Werkstück, Span und Werkzeug beim Zerspanen von Stahl (Schneidstoff: Hartmetall P 20, Werkstückstoff: Stahl mit einer Fließspannung $k_f = 850$ N/mm², Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60$ m/min, Spanungsdicke $h = 0{,}32$ mm, Spanwinkel $\gamma = 10°$).
a Scherebene
b Trenngebiet
c Reibungszone Werkzeugfreifläche
d Reibungszone Werkzeugspanfläche

Tabelle 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/mm²	N/mm²	kg/dm³	10³ N/mm²
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 bis300
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

Die Entwicklung neuer Schneidstoffe hat in den letzten Jahren zu einem sprunghaften Anstieg der Schnittgeschwindigkeiten bei den spanenden Fertigungsverfahren geführt. Bild 4-38 zeigt – ausgehend vom Zeitpunkt der 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 °C 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, während die gute Anlassbeständigkeit und Warmhärte (bis etwa 600 °C) hauptsächlich von den in der Stoffmatrix gelösten Legierungsbestandteilen (Carbidbildner) beeinflusst wird.

Bild 4-38
Entwicklung der anwendbaren Schnittgeschwindigkeiten beim Drehen mit verschiedenen Schneidstoffen im Lauf der Jahrzehnte.

Tabelle 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 Carbidbildung 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 Titannitrid (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. Unterdessen 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 Härteträger und einem die Zähigkeit bestimmenden Bindemetall. Als *Härteträger* haben *Wolframcarbid* (WC), *Titancarbid* (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,
- WC-TiC-Ta-(Nb)-Co-Legierungen, beschichtete Hartmetalle,
- Sonderhartmetalle.

Nach DIN ISO 513 teilt man Hartmetalllegierungen in die *Zerspanungsanwendungsgruppen P, M* und *K* gemäß Tabelle 4-3 ein. Die WC-TiC-Ta-(Nb)-Co-Legierungen der 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

Tabelle 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	Für mittlere und große Spanungsquerschnitte, besondere Anforderungen an Kantenfestigkeit und Zähigkeit
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	

Tabelle 4-3. Zusammensetzung, Eigenschaften und Anwendung verschiedener Hartmetalle (mit Schaftkennfarben).

Anwendungsgruppe nach ISO		Eigenschaften	Zusammensetzung WC %	TiC+TaC %	Co %	Vickershärte HV 30	Biegefestigkeit N/mm²	Druckfestigkeit N/mm²	Elastizitätsmodul N/mm²	Anwendung
P02	blau	Verschleißwiederstand (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, Kunstoffe
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	

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 Zerspanungsanwendungsgruppen haben durch das zunehmende Angebot von Hartmetall-Mehrbereichssorten 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 Hartmetalle (Cermets) auf der Basis von Titancarbonitrid 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 zähen 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 µm bis 15 µm Dicke. Beispielsweise erfolgt das Abscheiden von Titancarbid nach der chemischen Reaktion

$$TiCl_4 + CH_4 + n\,H_2 \xrightarrow{1000\,°C} TiC + 4\,HCl + n\,H_2 .$$

Heute gebräuchliche Kombinationen von Hartmetallgrundkörpern und Hartstoffschichten zeigt Bild 4-39.

Durch das Beschichten von Hartmetall mit dünnen Hartstoffschichten wird beim Spanen von Werkstoffen auf Eisenbasis eine deutlich 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 Bild 4-40 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.

Hartstoffschicht(en) / Hartmetallgrundkörper nach ISO 513	TiC	TiN	TiC Ti(C,N) -TiN	Al_2O_3	TiC Al_2O_3	TiC Ti(C,N) -TiN- Al_2O_3	HfN	Al-O-N
M15	●		●	●	●	●	●	●
P25	●	●	●				●	
P40	●		●					
K10	●	●	●		●			●

Bild 4-39
Gebräuchliche Kombinationen von Hartmetallgrundkörpern und Hartstoffschichten.

Bild 4-40
Widerstand gegen Verschleiß bei beschichteten Hartmetallen durch abstützende Wirkung (nach Reiter).

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 geschwindigkeitsabhängigen Standzeiten liegen deshalb im Vergleich zu anderen Schneidstoffen deutlich höher. Bild 4-41 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 Bild 4-42. 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 Titancarbid-/nitrid eignen sich vor allem für die Drehbearbeitung von Eisengusswerkstoffen und Stählen mit Härten bis zu 750 HV bzw. 65 HRC.

Bild 4-41
Zusammenhang zwischen Standzeit und Schnittgeschwindigkeit beim Drehen mit verschiedenen Schneidstoffen (Werkstückstoff: C45E (Ck 55 N), Standzeitkriterium VB = 0,5 mm, Schnitttiefe a_p = 2 mm, Vorschub f = 0,5 mm/U), nach VDI 3321, Bl. 1.

Allgemein werden die durch Schneidkeramik anwendbaren hohen Schnittgeschwindigkeiten besonders vorteilhaft genutzt werden können, 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 Kühlschmierflüssigkeiten 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.

Schneidstoffzusammensetzung			Werkstückstoffe
Feinschlichten N6	Schlichten N8	Schruppen N10	
	Al_2O_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_2O_3 > 80 % TiC / TiN < 20 %	Al_2O_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_2O_3 > 60 % TiC / TiN < 40 %			gehärtete Stähle/Eisen-Gusswerkstoffe bis 65 HRC bis 750 HV

Reinkeramiksorten Mischkeramiksorten

Bild 4-42
Anwendungsfälle für verschiedene Schneidkeramiksorten (nach Gomoll).

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

$$R = \frac{\sigma_B \, \lambda}{E \, \alpha} \qquad [4\text{-}21]$$

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 Kühlschmierflüssigkeiten 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 begrenzten mechanischen Belastbarkeit nur für die Feinbearbeitung mit einer Schnittiefe 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 mm 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 Schneid-

platte etwa eine 4,5fache Widerstandsfähigkeit gegenüber Stoßbelastungen. *CBN-Werkzeuge* ermöglichen beim Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden bereits Oberflächengüten, die in einigen Fällen die Anwendung von Feinbearbeitungsverfahren entbehrlich machen könnten.

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, Bild 4-43.

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 Mikroausbröckelungen im Werkstück und vor allem im Werkzeug. Mikroausbröckelungen 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 Fe_3W_3C, $(FeW)_6C$ und $(FeW)_{23}C_6$.

Bild 4-43
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 °C 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 Freiflächenverschleißes 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 *Kammrissbildungen* 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 ohne bzw. 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 disperses 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 ist der Ersatz von mineralölbasischen Kühlschmierstoffen durch physiologisch unbedenklichere und umweltverträglichere Kühlschmierstoffe ebenso anzustreben wie eine möglichst weitgehende Substitution kühlschmierstoffintensiver Prozesse 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 mm angewandt. Die erreichbaren gemittelten Rautiefen Rz liegen bei $Rz \leq 2\,\mu m$.

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 Kühlschmierstoffen in mehrfacher Hinsicht problematisch. Für die Umwelt und den damit in Berührung kommenden Menschen stellen Kühlschmierstoffe sowohl ein erhebliches Gefährdungspotenzial als auch einen beträchtlichen Kostenfaktor dar. Die Trockenbearbeitung vermeidet die mit der Anwendung von Kühlschmierstoffen 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 Wirkpaares 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 Kühlschmierung 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 Minimalmengenkühlschmierung ($\dot{V}$< 50 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 Mikrozerpanung 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.

Fräs- und Bohrverfahren bieten die Möglichkeit mikromechanische Strukturen von 10 bis 1000 µm Größe herzustellen. Die Zeitspanungsvolumina 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-Hartstoffschichten oder CVD-Diamantschichten Anwendung, aber auch monokristalline Diamantwerkzeuge.

Typische Werkzeuge und Beispiele für Bearbeitungsaufgaben zeigt Bild 4-44.

4.5.12 Standzeitberechnung und Standzeitoptimierung

Die Standzeit eines Werkzeugs wird durch ein vorzugebendes *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,* etwa gemäß Bild 4-45a), entnommen werden.

Aus den Verschleißkurven lassen sich für das gewählte Standkriterium, z. B. eine zulässige Verschleißmarkenbreite VB_{zul} = 0,1 mm, die den verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten zuzuordnenden Standzeiten T ermitteln. Mit diesen Werten kann ein *Standzeit-Schnittgeschwindigkeitsdiagramm* entsprechend Bild 4-45b) entwickelt werden. Der Zusammenhang zwischen Standzeit T und Schnittgeschwindigkeit υ_c folgt meist angenähert einer Exponentialfunktion und wurde von *Taylor* in Form der Gleichung

$$\upsilon_c T^{-\frac{1}{k}} = c_T \qquad [4\text{-}22]$$

beschrieben.

Die graphische Darstellung der Standzeit in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit im doppelt-logarithmischen Maßstab entsprechend der Beziehung

$$\log T = k \log \upsilon_c = k \log c_T \qquad [4\text{-}23]$$

führt zu der *Standzeitgeraden (Taylor-Gerade)*, wie Bild 4-45c) zeigt. Hierin sind die Konstanten k und c_T nicht von der Schnittgeschwindigkeit, sondern nur von der Schneidstoff-Werkstückstoff-Paarung abhängig. Die Stoffkonstante k gibt die Steigung der Standzeitgeraden an, während die Stoffkonstante c_T die Schnittgeschwindigkeit für die theoretische Standzeit T = 1 min bestimmt.

Eine andere gebräuchliche Form der Standzeitgleichung ist

$$T = c_v \upsilon_c^k. \qquad [4\text{-}24]$$

Hierin ist die Stoffkonstante c_v als Standzeit für eine Schnittgeschwindigkeit υ_c =1 m/min definiert. Im doppelt-logarithmischen System ergibt sich dann für die Standzeitgerade die Beziehung

$$\log T = k \log \upsilon_c + \log c_v. \qquad [4\text{-}25]$$

Die Stoffkonstanten c_v und c_T stehen gemäß

$$c_v = \frac{1}{c_T^k} \qquad [4\text{-}26]$$

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.

Bild 4-46 zeigt *Fertigungskosten* und Anteile der werkzeug- und maschinengebundenen Fertigungseinzelkosten abhängig von der Schnittgeschwindigkeit. Mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit steigen die werkzeuggebundenen 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 Nebenzeitanteilen

$$K_F = K_{ML} \cdot t_h + \frac{t_h}{T} \cdot \left(K_{ML} \cdot t_W + K_{WT}\right) \qquad [4\text{-}27]$$

mit

K_{ML} Maschinen- und Lohnkostensatz,
K_{WT} Werkzeugkosten je Standzeit,
T Standzeit,
t_W Werkzeugwechselzeit,
t_h Hauptzeit.

Bild 4-44
Werkzeuge und Beispiele für Bearbeitungsaufgaben bei der Mikrozerspanung (nach Hlavac).

Bild 4-45
Ermittlung der Standzeit in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit:
a) Verschleißkurven
b) Standzeit-Schnittgeschwindigkeit-Diagramm
c) Standzeitkurve im doppelt-logarithmischen Maßstab

Die Hauptzeit für das Fertigungsverfahren Drehen errechnet sich beispielsweise nach der Gleichung

$$t_h = \frac{d_w \pi l_f}{f v_c}. \qquad [4\text{-}28]$$

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 Gl. [4-28] in die Kostengleichung ergibt sich durch Differentiation die *kostenoptimale Standzeit zu*

$$T_{ok} = -(k+1)\left(t_w + \frac{K_{WT}}{K_{ML}}\right). \qquad [4\text{-}29]$$

Bild 4-46
Fertigungskosten je Werkstück in Abhängigkeit von der Schnitt- geschwindigkeit (VDI 3321, Bl. 1).

Bild 4-47
Fertigungszeit und Fertigungskosten je Werkstück in Abhängigkeit von der Standzeit (VDI 3321, Bl. 1).

Analog erhält man durch Differentiation der Fertigungszeitgleichung die zeitoptimale Standzeit

$$T_{ot} = -(k+1) \cdot t_w. \qquad [4\text{-}30]$$

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 ($v_{c\,min}$, $v_{c\,max}$) zu kennen. Es besteht sonst die Gefahr, unrealistische Optimalwerte T_{ok} bzw. T_{ot} zu ermitteln.

Bild 4-47 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.

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):

$$k_c = \frac{F_c}{A} \text{ in N/mm}^2, \qquad [4\text{-}31]$$

$$F_c = a_p\, f\, k_c = b\, h\, k_c \text{ in N.} \qquad [4\text{-}32]$$

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 Bild 4-48a) zeigt.

Kienzle drückte diesen Zusammenhang durch ein Potenzgesetz aus:

$$k_c = k_{c\,1.1}\, h^{-m} \text{ in N/mm}^2. \qquad [4\text{-}33]$$

Die *spezifische Schnittkraft* $k_{c\,1.1}$ gibt die auf eine Spanungsbreite $b = 1$ mm und eine Spanungsdicke $h = 1$ mm bezogene Schnittkraft an.

Bild 4-48
Spezifische Schnittkraft in Abhängigkeit von der Spanungsdicke (Spanungsbreite b = 1 mm = konst.).
a) in arithmetischer Darstellung
b) in doppeltlogarithmischer Darstellung

Diese Abhängigkeit wird im Allgemeinen im doppeltlogarithmischen Maßstab als Gerade gemäß Bild 4-48b) 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

$$F_c = b\, h^{1-m}\, k_{c\,1.1} \text{ in N.} \qquad [4\text{-}34]$$

In Gl. [4-34] bezeichnet der Exponent $(1 - m)$ den Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft.

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 machen könnte.

Umgekehrt ist es durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Schleiftechnologie gelungen, die Zeitspanungsvolumina in erheblichem Maße zu steigern, so dass Schleifverfahren in bestimmten Anwendungsfällen eine wirtschaftliche Alternative zu spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden bieten.

Bild 4-49 zeigt die heute unter Großserienbedingungen erreichbaren Werkstückqualitäten und Tendenzen in Abhängigkeit vom Zeitspanungsvolumen 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

Bild 4-49
Anwendungsbereiche und Tendenzen beim Drehen und Schleifen.

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 hinsichtlich der Kosten und der Verfahrensflexibilität. Außerdem kann in vielen Fällen auf Kühlschmierstoffe 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 und das Werkzeug die erforderlichen Vorschub- und Zustellbewegungen. Die Werkstücke sind Rotationskörper.

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 Bild 4-50 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. Bild 4-51 verdeutlicht die drei Verfahrensvarianten: *Quer-Plandrehen, Längs-Plandrehen*

Bild 4-50.
Einteilung der Drehverfahren nach DIN 8589, Teil 1.

Bild 4-51.
Plandrehverfahren.

Bild 4-52.
Runddrehverfahren.

und *Quer-Abstech-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 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 Bild 4-52.

Gegenüber dem herkömmlichen *Längs-Runddrehen* mit parallel zur Drehachse gerichteter (axialer) Vorschubbewegung haben besonders die Runddrehverfahren *Breitschlichtdrehen* und *Schäldrehen* 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 **Schäldrehen** 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

$$P_A = f\,v_c. \qquad [4\text{-}35]$$

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

$$Rt.th \approx \frac{f^2}{8r}. \qquad [4\text{-}36]$$

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. Bild 4-53 zeigt einen Vergleich der Eingriffsverhältnisse beim Längs-Runddrehen und Breitschlichtdrehen.

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* gemäß Bild 4-54 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.

Bild 4-53
Eingriffsverhältnisse beim
a) Längs-Runddrehen und b) Breitschlichtdrehen (nach Nedeß).
Rt.th theoretische Rautiefe
r Eckenrundung
f Vorschub
v_f Vorschubgeschwindigkeit
κ_n Einstellwinkel der Nebenschneide

Bild 4-54.
Schraubdrehverfahren.

Bild 4-55
Profildrehverfahren.

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. Bild 4-55 vermittelt eine Übersicht.

Längs-Profildrehen ist Profildrehen mit Vorschub parallel zur Drehachse des Werkstücks; hierbei ist die Schneide des Profildrehmeißels mindestens so breit wie das zu erzeugende Profil. Beim *Längs-Profileinstechdrehen* 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 Werkstücks können rotationssymmetrische 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 $b_w = 15$ mm (in Sonderfällen bis zu 30 mm) zu begrenzen.

Beim *Quer-Profileinstechdrehen* wird mit einem Profildrehmeißel ein ringförmiger Einstich an der Umfangsfläche des Werkstücks erzeugt. Als Quer-Profilabstechdrehen bezeichnet man einen Drehvorgang, bei dem ein Profildrehmeißel gleichzeitig das Werkstück oder Teile des Werkstücks absticht.

Formdrehen ist Drehen, bei dem durch die Steuerung der Vorschub- bzw. Schnittbewegung (z. B. Unrunddrehen) die Form des Werkstücks erzeugt wird. Nach der Art der Steuerung von Bewegungen kann zwischen

- *Freiformdrehen,*
- *Nachformdrehen,*
- *Kinematisch-Formdrehen* und
- *NC-Formdrehen*

unterschieden werden, wie aus Bild 4-56 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 nummerischen Steuerung erzeugt wird.

Bild 4-56
Formdrehverfahren.

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

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.

Bild 4-57
Werkzeugformen beim Drehen für verschiedene Bearbeitungsaufgaben.

Werkzeugformen für verschiedene Bearbeitungsaufgaben beim Drehen mit aufgelöteten Schneidplatten aus Hartmetall zeigt Bild 4-57. Bei der Schneidenbefestigung durch Löten besteht die Gefahr von Rissbildungen, besonders durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten 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.

Bild 4-58 zeigt einige Beispiele für gebräuchliche Befestigungs- bzw. Klemmsysteme. Konstruktionsprinzipien sind

a) Befestigung mittels Klemmfinger,
b) Befestigung mit Klemmfinger über verstellbar angebrachte Spanformplatten,
c) Befestigung mit Klemmpratze mit mechanisch betätigter, über Exzenter stufenlos verstellbarer Spanformstufe,
d) Befestigung mittels eines über eine Spannschraube betätigten Winkelhebels,

e) Schraubenbefestigung ohne Spanformstufe,
f) Schraubenbefestigung mit Spanformstufe.

Befestigungs- und Klemmsysteme lassen sich unterscheiden in solche für Wendeschneidplatten ohne (Bild 4-58a), b) und c)) und mit Befestigungsloch, Bild 4-58d), e) und f).

Weiterhin können Positiv- oder Negativplatten eingesetzt werden. Positivplatten besitzen einen Keilwinkel < 90° und ermöglichen in Klemmsystemen positive Spanwinkel in Bild 4-58a), b) und c), während Negativplatten einen Keilwinkel von 90° aufweisen und negative Spanwinkel in Bild 4-58d) 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 Zeitspanungsvolumen Q_w. Es berechnet sich aus dem Spanungsvolumen V_w und der Schnittzeit t_c (Abschn. 4.4.3):

$$Q_w = \frac{V_w}{t_c} \text{ in } \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}. \qquad [4\text{-}37]$$

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

$$t_h = t_c + t_a + t_ü. \qquad [4\text{-}38]$$

Die Schnittzeit t_c ist der Quotient aus dem *Vorschubweg* l_f und der Vorschubgeschwindigkeit v_f. Für die Vorschubgeschwindigkeit v_f = konst. gilt

$$t_c = \frac{l_f}{v_f} \text{ in s.} \qquad [4\text{-}39]$$

Zusätzlich zur Werkstücklänge l_w ist gegebenenfalls der *Anschnittweg* $l_{a\kappa}$ in Abhängigkeit vom Einstellwinkel κ zu berücksichtigen.

Zur Berechnung der Hauptnutzungszeit sind außer der Schnittzeit auch die *Anlaufzeit* t_a und die *Überlaufzeit* $t_ü$ zu berücksichtigen.

Die Berechnungsgleichungen für die Schnittzeiten und die Zeitspanungsvolumina sind für das Längs-Runddrehen in Bild 4-59 angegeben.

Bild 4-58
Klemmsysteme für Wendeschneidplatten (nach Krupp-Widia):
a) mit Klemmfinger
b) mit Klemmfinger und Spanformplatte
c) mit Klemmpratze und über Exzenter verstellbarer Spanformstufe
d) mit Winkelhebel
e) mit Schraubenbefestigung ohne Spanformstufe
f) mit Schraubenbefestigung und Spanformstufe

Zur Berechnung der Schnittzeit beim Quer-Plandrehen muss zwischen dem Drehen mit konstanter Drehzahl und konstanter Schnittgeschwindigkeit unterschieden werden. Die Beziehungen sind in Bild 4-60 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.

Längs-Runddrehen 3.2.1.2.1

Symbol	Bezeichnung	Formeln
D_w	Werkstückdurchmesser vor dem Drehen	$l_{a\kappa} = \frac{a_p}{\tan \kappa}$
d_w	Werkstück-(Dreh)-Durchmesser	$i = \frac{z}{a_p}$
l_w	Werkstücklänge	$v_c = d_w \cdot \pi \cdot n_c$
z	Bearbeitungszugabe	$v_{fa} = f \cdot n_c$
a_p	Schnitttiefe	$t_c = \frac{l_f}{f \cdot n_c} \cdot i$
f	Vorschub	$Q = a_p \cdot f \cdot v_c$
l_f	Vorschubweg	
$l_{a\kappa}$	Anschnittweg	
v_c	Schnittgeschwindigkeit	
v_{fa}	Vorschubgeschwindigkeit (axial)	
t_c	Schnittzeit	
i	Anzahl der Schnitte	
n_c	Drehzahl	
κ	Einstellwinkel	
Q	Zeitspanungsvolumen	

Bild 4-59
Zeitberechnung beim Längs-Runddrehen.

Quer-Plandrehen 3.2.1.1.1

Symbol	Bezeichnung	Formeln
d_{wa}	Werkstückaußendurchmesser	n_c = konst.
d_{wi}	Werkstückinnendurchmesser	$v_c = f(d_w)$
z	Bearbeitungszugabe	$t_c = \left(\frac{d_{wa} - d_{wi}}{2} + \frac{a_p}{\tan \kappa}\right) \frac{1}{f \cdot n_c}$
a_p	Schnitttiefe	v_c = konst.
f	Vorschub	$v_{fr} = n_c(r) \cdot f$
l_f	Vorschubweg	$t_c = \frac{\pi}{4 \cdot f \cdot v_c} (d_{wa}^2 - d_{wi}^2)$
$l_{a\kappa}$	Anschnittweg	
v_c	Schnittgeschwindigkeit	
v_{fr}	Vorschubgeschwindigkeit (radial)	
t_c	Schnittzeit	
n_c	Drehzahl	
κ	Einstellwinkel	

Bild 4-60
Zeitberechnung beim Quer-Plandrehen.

Bild 4-61
Einteilung der Bohrverfahren (nach DIN 8589-2).

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 Bild 4-61. Unter *Plansenken* versteht man Senken zur Erzeugung von senkrecht zur Drehachse der Schnittbewegung liegenden ebenen Flächen, wie Bild 4-62 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 Rund-Bohrverfahren nach Merkmalen des Werkzeugeingriffs unterteilt. Man unterscheidet zwischen

- *Bohren ins Volle*,
- *Kernbohren,*
- *Aufbohren* und
- *Reiben*.

Bild 4-63
Rundbohrverfahren.

Weitere Besonderheiten des Bohrwerkzeugs werden durch die Unterteilung in der sechsten Stelle der Ordnungsnummer angegeben. Beispiele für das Rundbohren mit symmetrisch angeordneten Hauptschneiden zeigt Bild 4-63.

Beim Rundbohren ins Volle wird mit dem Werkzeug ohne Vorbohren in den Werkstückstoff gebohrt.

Bild 4-62
Plansenkverfahren.

Kernbohren ist Bohren, bei dem das Bohrwerkzeug den Werkstückstoff ringförmig zerspant 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.

Reiben ist als weitere Untergruppe des Rundbohrens definiert. Beim *Rundreiben* werden maß- und formgenaue, kreiszylindrische Innenflächen mit hoher Oberflächengüte durch Aufbohren mit geringer Spanungsdicke erzielt. Es kann dabei je nach Art des verwendeten Reibwerkzeugs zwischen mehrschneidigem Reiben (Bild 4-63) und einschneidigem Reiben unterschieden werden.

Einige ausgewählte Profilbohrverfahren sind in Bild 4-64 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 koaxial zur Schnittbewegung liegende Innenschraubflächen, z. B. beim Gewindebohren mit einem Gewindebohrer gemäß Bild 4-65.

Formbohren sind Bohrverfahren mit gesteuerter Schnitt- bzw. Vorschubbewegung zur Erzeugung von Innenflächen, die von der kreiszylindrischen Form abweichen. Bild 4-65 zeigt das Unrundaufbohren eines gegossenen oder vorgebohrten Loches.

Bild 4-64
Profilbohrverfahren.

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 Bild 4-66 sind den nach DIN 8589-2 definierten Fertigungsverfahren und den daraus abgeleiteten Fertigungsstufen für bestimmte zu erzeugende Formelemente typische Bohrwerkzeuge zugeordnet.

Bild 4-65
Schraub- und Formbohren.

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						

Bild 4-66
Werkzeuge für verschiedene Fertigungsstufen beim Bohren (nach Meyer).

Wendelbohrertyp	Seitenspan-winkel γ_x	Spitzen-winkel 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

Bild 4-67
Wendelbohrertypen nach DIN 1414-1/2 und ihre Anwendung.

Bild 4-68
Anwendung von Tiefbohrwerkzeugen beim Rundbohren ins Volle.

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 Bild 4-67 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 Anforderungen 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*[39]*),*
- *Bohrköpfe nach dem Doppelrohrsystem (Ejektor-Bohrwerkzeuge).*

Bild 4-68 zeigt Rundbohrverfahren mit Tiefbohrwerkzeugen. Beim Rundbohren ins Volle mit Einlippenbohrer wird ein Bohrwerkzeug mit unsymmetrisch angeordneten Schneiden benutzt. Die Kühlschmierflüssigkeit wird dabei durch das Innere des meist rohrförmigen Werkzeugschafts zugeführt. Span- und Kühlschmierflüssigkeitsabfluss erfolgen durch eine äußere Spannut im Werkzeugschaft. Einlippen-Tiefbohrwerkzeuge benötigen zum Anbohren stets eine besondere Führungseinrichtung.

[39] Verfahren entwickelt von der Boring und Trepanning Association.

Beim Rundbohren mit einem Bohrkopf nach dem Einrohrsystem *(BTA-Verfahren)*[39] wird die Kühlschmierflüssigkeit von außen zwischen Werkzeugschaft und Bohrungswand zugeführt. Die anfallenden Späne werden dann von der Kühlschmierflüssigkeit in das Innere des Bohrkopfes gespült und durch das Bohrrohr abgeführt. Das Einbringen der Kühlschmierflüssigkeit erfolgt dabei über ein besonderes Zuführsystem, 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 Kühlschmierflüssigkeit 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 Kühlschmierflüssigkeitsdrücken 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 m zwischen Werkzeug und Werkstück vorgesehen. Die Überlaufwege sind bei den einzelnen Bohrverfahren unterschiedlich. Beim Rundbohren ins Volle mit einem Wendelbohrer beträgt der Überlaufweg $l_ü = 2$ mm. Der die Hauptnutzungszeit bestimmende Weg des Bohrwerkzeugs L in mm beträgt somit

Symbol	Bezeichnung	Formeln
d_w	Bohrdurchmesser	
l_w	Bohrtiefe nach dem Durchbohren	$l_{a\kappa} = \frac{a_p}{\tan\kappa} = \frac{d_w}{2\cdot\tan\frac{\sigma}{2}}$
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	Zeitspanungsvolumen	$t_c = \frac{l_w + l_{a\kappa}}{f\cdot n_c}$
z	Anzahl der Schneiden	
κ	Einstellwinkel	
σ	Spitzenwinkel	$Q = \frac{d_w^2\cdot\pi}{4}\cdot f\cdot n_c$
$l_{a\kappa}$	Anschnittweg	
n_c	Drehzahl	$f = z\cdot f_z$
f(f_z)	Vorschub (Vorschub je Schneide)	

Bild 4-69
Zeitberechnung beim Rundbohren ins Volle mit einem Wendelbohrer.

$$L = l_w + l_{a\kappa} + 1\ \text{mm} + l_ü. \qquad [4\text{-}40]$$

Bild 4-69 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 Fräsverfahren

Fräsverfahren werden nach DIN 8589-3 in *Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil-* und *Formfräsen* unterteilt, wie aus Bild 4-70 hervorgeht. Nach Art des Werkzeugeingriffs kann zwischen dem

Bild 4-70
Einteilung der Fräsverfahren (nach DIN 8589-3).

– *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.

Planfräsen ist Fräsen mit geradliniger Vorschubbewegung zur Erzeugung ebener Flächen. Verfahrensvarianten des Planfräsens sind in Bild 4-71 gezeigt.

Beim Rundfräsen lassen sich kreiszylindrische Flächen mit außen- oder innenverzahnten Fräsern erzeugen. Werkzeug- und Werkstückdrehachse stehen bei üblichen Rundfräsverfahren parallel zueinander.

Als wirtschaftliche Alternative zum Drehen haben sich in bestimmten Anwendungsfällen Rundfräsverfahren entwickelt, bei denen die Werkzeugdrehachse annähernd senkrecht zur Werkstückdrehachse angeordnet ist (sog. Drehfräsen), Bild 4-72.

Mit *Schraubfräsen* bezeichnet man Fräsverfahren, bei denen unter wendelförmiger Vorschubbewegung schraubenförmige Flächen am Werkstück entstehen (z. B. Gewinde und Zylinderschnecken).

Zum Schraubfräsen gehören gemäß Bild 4-73 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 mehrpro-

Bild 4-71
Planfräsverfahren.

Bild 4-72
Rundfräsverfahren.

Bild 4-73
Schraub- und Wälzfräsverfahren.

filigen Gewindefräser, dessen Achse zur Werkstückachse parallel liegt und dessen Vorschub der Gewindesteigung entspricht. Zur Herstellung des Gewindes ist dabei lediglich etwas mehr als eine Werkstückumdrehung erforderlich.

Bild 4-74
Profilfräsverfahren.

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 (Bild 4-73).

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 Bild 4-74.

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 Bild 4-75 dargestellte

- *Freiformfräsen,*
- *Nachformfräsen,*
- *Kinematisch-Formfräsen* und
- *NC-Formfräsen.*

Ein weiterer Gesichtspunkt für die Unterscheidung von Fräsverfahren ist die Richtung der Vorschubbe-

Bild 4-75
Formfräsverfahren.

Bild 4-76
Werkzeug- und Werkstückbewegungen beim Umfangfräsen (nach DIN 6580):
a) Gleichlauffräsen ($\varphi > 90°$)
b) Gegenlauffräsen ($\varphi < 90°$)

wegung gegenüber der Schnittbewegung. Man unterscheidet zwischen *Gleichlauf-* und *Gegenlauffräsen*. Die beiden Fräsarten sind in Bild 4-76 schematisch dargestellt.

Beim Gleichlauffräsen sind die Drehrichtung des Fräsers 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, Bild 4-76a).

Das Gegenlauffräsen ist ein Fräsen, bei dem im Bereich des Werkzeugeingriffs die Drehrichtung des Fräsers und die Werkstückbewegung einander entgegengerichtet sind. Beim Gegenlauffräsen mit Walzenfräser kann der Vorschubrichtungswinkel φ im Eingriffsbereich Werte im Bereich $0° \leq \varphi° 90°$annehmen, Bild 4-76b).

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,
- Schaftfräser,
- Langlochfräser,
- Schlitzfräser,
- T-Nutenfräser,
- Wälzfräser,
- Gewindefräser und
- Satzfräser.

Bild 4-77 zeigt, dass grundsätzlich vier verschiedene *Fräswerkzeugtypen* definiert werden können. Demnach lassen sich die hauptsächlich angewendeten Fräswerkzeuge in *Umfangs-, Stirn-, Profil-* und *Formfräser* unterteilen.

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 Bild 4-78 und 4-79 am Beispiel des Umfangs-Planfräsens und Stirn-Planfräsens zusammengestellt.

Die Schnittzeit und das Zeitspanungsvolumen beim Fräsen werden im Wesentlichen durch die Größe der Vorschubgeschwindigkeit bestimmt. Die Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} 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 be-

Fräsertyp	Wirkprofil	Wirkfläche	Beispiele
1 **Umfangs-(walzen-) fräser**	werkstück-ungebunden	Umfangsfläche (kreiszylindrisch)	Walzenfräser
2 **Stirnfräser**	werkstück-ungebunden	Seiten(-Stirn)- u. Umfangsflächen	Walzenstirnfräser, Schaftfräser, Messerkopf
3 **Profilfräser**	werkstück-gebunden	Profilfläche	Halbkreisfräser, Prismenfräser, Scheibenfräser
4 **Formfräser**	werkstück-ungebunden	Formfläche beliebig	Gesenkfräser

Bild 4-77
Fräswerkzeuge und einige typische Anwendungen.

zeichnet man den Abstand zweier hintereinander entstehender Schnittflächen, gemessen in der Vorschubrichtung und in der Arbeitsebene. Es ist demnach

$$f_z = f/z. \qquad [4\text{-}41]$$

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

$$f_z = f. \qquad [4\text{-}42]$$

Vom Zahnvorschub abgeleitet ist der *Schnittvorschub* f_c. Als Abstand zweier unmittelbar hintereinander entstehender Schnittflächen wird er ebenfalls in der Arbeitsebene, jedoch senkrecht zur Schnittrichtung gemessen (vgl. Verfahrensschema Bild 4-78 und 4-79). Es gilt

$$f_c \approx f_z \sin \varphi. \qquad [4\text{-}43]$$

Bei Zerspanvorgängen mit $\varphi = 90°$ und einschneidigen Werkzeugen, wie z. B. beim Drehen und Hobeln, ist

$$f_c = f_z = f. \qquad [4\text{-}44]$$

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 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 Bild 4-80 zeigt. Nach der Art der zu erzeugenden Flächen, kinematischen und werkzeugbezogenen Gesichtspunkten ergeben sich für

Umfangs-Planfräsen 3.2.3.1.1

Symbol	Bezeichnung	Formeln
l_w	Werkstücklänge	$l_H = l_w + l_a + l_ü$
l_a	Anlaufweg	
$l_ü$	Überlaufweg	$l_a = \sqrt{D \cdot a_e - a_e^2}$
l_H	Hublänge	
D	Fräserdurchmesser	$v_c = D \cdot \pi \cdot n_c$
z	Zähnezahl des Fräsers	
a_p	Schnittbreite	$v_{ft} = z \cdot f_z \cdot n_c$
a_e	Arbeitseingriff	
f_z	Vorschub je Zahn	$t_c = \frac{l_w + l_a}{v_{ft}}$
n_c	Drehzahl	
v_{ft}	Vorschubgeschwindigkeit (tangential)	$f_c \approx f_z \cdot \sin\varphi;\ f_z = \frac{f}{z}$
v_c	Schnittgeschwindigkeit	
t_c	Schnittzeit	
f_c	Schnittvorschub	$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_{ft}$
Q_w	Zeitspanungsvolumen	

Bild 4-78
Zeitberechnung beim Umfangs-Planfräsen.

Stirn-Planfräsen 3.2.3.1.2

Symbol	Bezeichnung	Formeln
l_w	Werkstücklänge	$l_H = l_w + l_a + l_ü$
l_a	Anlaufweg	
$l_ü$	Überlaufweg	$l_a + l_ü = D$
l_H	Hublänge	
D	Fräserdurchmesser	$v_c = D \cdot \pi \cdot n_c$
z	Zähnezahl des Fräsers	
a_p	Schnittbreite	$v_{ft} = z \cdot f_z \cdot n_c$
a_e	Arbeitseingriff	
f_z	Vorschub je Zahn	$t_c = \frac{l_w + l_H}{v_{ft}}$
n_c	Drehzahl	
v_{ft}	Vorschubgeschwindigkeit (tangential)	$t_h = \frac{l_H}{v_{ft}}$
v_c	Schnittgeschwindigkeit	$f_c \approx f_z \cdot \sin\varphi;\ f_z = \frac{f}{z}$
t_c	Schnittzeit	
f_c	Schnittvorschub	$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_{ft}$
Q_w	Zeitspanungsvolumen	

Bild 4-79
Zeitberechnung beim Stirn-Planfräsen.

Bild 4-80
Einteilung der Hobel- und Stoßverfahren (nach DIN 8589-4).

das Hobeln und Stoßen Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil- und Formverfahren. Bild 4-81 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 gemäß Bild 4-82.

Bild 4-81
Plan-, Wälz-, Profil- und Formverfahren beim Hobeln und Stoßen.

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. Bild 4-83 gibt die wichtigsten Berechnungsgleichungen auf der Grundlage der jeweiligen Werkzeugwege für das Planhobeln und -stoßen an.

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 komplizierte Fertigteilgeometrie meist in einem

Bild 4-82
Hobelwerkzeuge für typische Bearbeitungen:
1 Breitschlichthobelmeißel 3 gerader Hobelmeißel
2 Nutenhobelmeißel 4 gerader Hobelmeißel

Symbol	Bezeichnung	Formeln
l_w	Werkstücklänge	$l_\kappa = \frac{a_p}{\tan \kappa}$
b_w	Werkstückbreite	
l_c	Schnittweg	
l_f	Vorschubweg	$v_m = \frac{2\,\bar{v}_c \cdot \bar{v}_r}{\bar{v}_c + \bar{v}_r}$
l_κ	Anschnittweg	
l_a	Anlaufweg	
$l_ü$	Überlaufweg	
$b_ü$	Überlaufbreite	$n_{hd} = \frac{v_m}{2 \cdot l_H}$
l_H	Hublänge	
b_H	Hubbreite	
a_p	Schnitttiefe	$t_c = \frac{l_f}{f \cdot n_{hd}}$
f	Vorschub	
v_c	Schnittgeschwindigkeit	$t_h = \frac{b_H}{f \cdot n_{hd}}$
v_r	Rückhubgeschwindigkeit	
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	
v_m	mittlere Arbeitsgeschwindigkeit	
n_{hd}	Anzahl der Doppelhübe/min	
t_h	Hauptnutzungszeit	
t_c	Schnittzeit	

Bild 4-83
Zeitberechnung beim Planhobeln und -stoßen.

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 $v_c = 1$ m/min bis $v_c = 15$ m/min. Beim Hochgeschwindigkeitsräumen können heute bereits Schnittgeschwindigkeiten bis zu $v_c = 50$ 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 Bild 4-84 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 Außenräumens 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.

Bild 4-84
Einteilung der Räumverfahren (nach DIN 8589-5).

Das Profilräumen wird zum Herstellen von komplizierten Innen- und Außenprofilen angewandt. Einige typische Profile für das Außen- und Innenräumen zeigt Bild 4-85.

Bild 4-85
Herstellbare Profile beim Außen- und Innenräumen.

Beim Räumen von ebenen und kreiszylindrischen Flächen oder Profilen entsprechend Bild 4-86 führt das Werkzeug oder das Werkstück eine geradlinige Schnittbewegung aus. Wenn der geradlinigen Schnittbewegung zusätzlich eine Drehbewegung des 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. Bei größeren zu räumenden Volumen kann der Zahnungsteil auch aus mehreren auswechselbaren Räumbuchsen bestehen.

Bild 4-86
Plan-, Rund- und Profilräumverfahren.

Bild 4-87
Aufbau eines Innenräumwerkzeugs.

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 Bild 4-87. 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 Einführungsteil 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. Bild 4-88 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 Spanungsdicke 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

$$t = (2{,}5 \text{ bis } 3) \cdot \sqrt{h\, l_w\, R} \text{ in mm} \qquad [4\text{-}45]$$

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 eingebracht.

Bild 4-88
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	*Spanungslänge*

Bild 4-89
Staffelungsarten und Zerspanschemata beim Räumen (nach DIN 1415).

Die Anordnung der aufeinanderfolgenden Schneiden bezeichnet man als *Zahnstaffelung*. Nach DIN 1415 lassen sich verschiedene Staffelungsarten definieren, wie aus Bild 4-89 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 fertigenden 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

Symbol	Bezeichnung	Formeln
l_w	Werkstücklänge	$l_H = l_w + l_a + l_ü + l_z$
d_w	Werkstückdurchmesser	
l_a	Anlaufweg	$t_c = \frac{l_w + l_z}{v_c}$
$l_ü$	Überlaufweg	
l_z	Zahnungslänge	$t_h = \frac{l_H}{v_c}$
l_H	Hublänge	
v_c	Schnittgeschwindigkeit	$z_e = \frac{l_w}{t}$
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	Zeitspanungsvolumen	

Bild 4-90
Zeitberechnung beim Innenrundräumen.

größere Werkzeugbeanspruchungen räumen. Gegenüber der Tiefenstaffelung ergeben sich bei der Seitenstaffelung jedoch längere Werkzeuge. Eine Sonderform ist die so genannte *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 Zeitspanungsvolumens von der Eingriffszähnezahl z_e auszugehen. Wenn für alle Schneiden die gleiche Spanungsdicke je Zahn h_z angenommen wird, gilt

$$Q_w = z_e \, h_z \, b \, v_c \qquad [4\text{-}46]$$

mit

$$z_e = \frac{l_w}{t}. \qquad [4\text{-}47]$$

Die wichtigsten Gleichungen für die Zeitermittlung beim Innenrundräumen zeigt Bild 4-90.

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 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 Werkstückkon-

Bild 4-91
Auswahl spangebender Fertigungsverfahren abhängig von der Werkstückkontur, den Formelementen, dem Zerspanvolumen und der Oberflächengüte.

tur (Komplexteil), 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, Bild 4-91.

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, Bild 4-92.

Bild 4-92
Technologiebezogene Auswahlkriterien beim Spanen wellenförmiger Teile, wie z. B. Zeitspanvolumen, Spanbildung, Zerspankräfte sowie Oberflächengüte und Maß-, Form- und Lagegenauigkeit.

Geometrische und technologische Kenngrößen:

Mittl. Werkstoffausnutzungsgrad $\bar{\eta}_i = \frac{V_{Fti}}{V_{Rti}} \approx 0{,}85$

Durchmesserverhältnis $D = \frac{d_{wmax}}{d_{wmin}} \approx 5{,}6$

Verhältnis der Bearbeitungszugaben $Z = \frac{Z_{max}}{Z_{min}} \approx 26{,}6$

Längenverhältnis $\frac{l_{wmax}}{d_{wmax}} \approx 1{,}4$

Stabilitätsgrad $\lambda = \frac{l_{wmax}}{\sum \frac{d_{wi}}{i}} \approx 3{,}2$

Bild 4-93
Bearbeitungsbeispiel aus der Automobilindustrie: Einfluss der Werkstückkontur auf die geometrischen und technologischen Kenngrößen.

Bild 4-94
Fertigungsanforderungen für verschiedene Formelemente, gemäß Beispiel in Bild 4-93.

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, Bild 4-93. 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 Bild 4-94 den jeweiligen Formelementen zugeordnet. Neben der Beurteilung anwendbarer Fertigungsverfahren gestattet die formelementbezogene Analyse der Fertigungsanforderungen eine Überprüfung von Gestaltungsbereichen hinsichtlich ihrer Fertigungsgerechtheit. Können z. B. Formelemente wie Einstiche oder Fasen vereinheitlicht werden oder gar entfallen? Können

Fertigungsverfahren \ Formelement	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
Plandrehen	●															
Runddrehen				●				(●)					(●)		●	
Profildrehen							●				●	●		●		
Formdrehen	●	●	●	●	●	●	●	(●)	●	●	●	●	(●)	●	●	●
Planfräsen	●															
Rundfräsen				●				(●)					(●)		●	
Profilfräsen					●					●	●	●		●		
Formfräsen	●			●			●	(●)			●		●		●	
Hobeln, Stoßen	●															
Räumen	●															
Abtrennsägen	●															
Planschleifen	●															
Rundschleifen				●				●					●		●	
Profilschleifen	●	●	(●)	●	●	●	●	●	(●)	●	●	●	●	●	●	●
Formschleifen	●			●			●	●			●		●		●	
Bandschleifen	●	●				●					●		●		●	

● normal erfüllbar (●) durch Sondermaßnahmen

Bild 4-95
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.

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 Fertigungsverfahren, die geeignet sind, die geometrischen und technologischen Fertigungsanforderungen zu erfüllen, in einer Verfahrensmatrix darstellen, wie sie in Bild 4-95 dargestellt ist.

Sie zeigt die Verfahrensalternativen, die in einer ersten Schätzung zusammenhängende Konturbereiche (Formelementkomplexe) erstellen können und eine minimale Anzahl von Fertigungsverfahren zum Erzeugen der gesamten Werkstückkontur benötigen. Im vorliegenden Fall sind das die Fertigungsverfahren **Formdrehen** und **Profilschleifen**, Bild 4-95.

Für beide Verfahrensalternativen ließe sich nun eine feinere Unterteilung nach den in DIN 8589, Teil 0 festgelegten Ordnungskriterien zugrunde 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 verschiedene Hartstoffe in Kornform mit Durchmessern im Bereich von 0,5 µm 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 der Großteil der Schneidkörner vorwiegend negative Spanwinkel aufweist.

Bild 4-96
Kinematisches Wirkprinzip und Oberflächenausbildung beim Schleifen, Honen, Läppen und Strahlspanen.

Aufgrund der geometrischen Ausbildung der Werkzeuge und der verwendeten Kinematik ergeben sich vier Wirkprinzipien der Schneidkörner an der Werkstückoberfläche (Bild 4-96). Das Wirkprinzip bestimmt die spätere Oberflächentextur des Werkstücks. Beim Schleifen werden die Schneiden auf einer fest vorgegebenen Bahn durch den Werkstoff geführt, woraus sich geradlinig angeordnete Schnittspuren ergeben. Die Schneiden haben (auf ihre Bahnkurve bezogen) nur einen kurzen Kontakt mit dem Werkstoff und sind sonst nicht im Schnitteinsatz. Sind die Schneiden ständig im Eingriff und werden ebenso zielgerichtet geführt, dann wird von Honen gesprochen. Wegen des ständigen Anpressdrucks, der für die Zerspanung eine wichtige Einflussgröße darstellt, wird das Wirkprinzip als kraftgebunden bezeichnet. Aufgrund der zeitgleichen Überlagerung einer rotatorischen und translatorischen Schnittbewegung der Schneidkörner entstehen sich kreuzende, geradlinige Schnittspuren auf der Werkstückoberfläche.

Das Läppen zählt zu den raumgebundenen Verfahren. Hier können sich die Schneidkörner zwischen der Andruckplatte und dem Werkstück unter Druckbelastung beliebig bewegen. Die Schneidkörner können dabei eine rollende oder auch ziehende bzw. schiebende Bewegung durchführen. Die Druckquotienten und die Bewegung von Werkstück und Andruckplatte sowie die Werkstoffpaarung zwischen Werkstück, Andruckplatte und Schneidkorn entscheiden, wie sich die Schneidkörner vorwiegend bewegen. Wenn es sich um eine vorwiegend rollende Bewegung der Schneidkörner handelt, entsteht eine matte Oberfläche mit sehr kleinen Eindrücken. Neben der Zerspanung an der Oberfläche tritt dabei auch eine Randzonen-

verfestigung am Werkstück ein. Ein Läppprozess mit einer Korngröße kleiner 3 µm wird auch als Polieren bezeichnet. Der Begriff Polieren ist nicht genormt.

Zu den energiegebundenen Wirkprinzipien gehört das Strahlspanen, bei dem die Schneidkörner mit einer großen Geschwindigkeit auf die Werkstückoberfläche geströmt werden. Dies ergibt eine ähnliche Oberflächenstruktur wie beim Läppen, jedoch ist der Ebenheitsfehler erheblich größer.

4.7.1 Schleifen

In vielen Anwendungsfällen ist Schleifen das letzte Bearbeitungsverfahren in der Prozesskette. In diesen Fällen wird durch das Schleifen die Werkstückqualität am Werkstück erzeugt. Heutige Schleifverfahren verfügen über eine große Anwendungsbreite. Es werden sowohl große Zerspanvolumen als auch sehr kleine, für die endkonturnahe Bearbeitung direkt nach dem Ur- oder Umformen, geschliffen. Es gibt kaum einen Werkstoff, der nicht durch Schleifen zu bearbeiten wäre. Während früher ausschließlich gehärtete Werkstoffe geschliffen wurden, so ist es heute auch möglich, weiche und lang spanende Werkstoffe zu bearbeiten. Das Schleifen besitzt fertigungstechnische Vorteile gegenüber anderen Fertigungsverfahren, wenn geometrische Genauigkeit und feinste Oberflächenzustände (Rauheit, Textur, Randzonenzustand usw.) gefordert sind.

Der Werkstoff wird mit sehr hohen Schnittgeschwindigkeiten zerspant. Der Schnittgeschwindigkeitsbereich für die konventionellen Schleifscheiben umfasst etwa 20 bis 80 m/s. Mit sogenannten hochharten Schleifscheiben werden Schnittgeschwindigkeiten bis etwa 300 m/s gefahren. Für die meisten Anwendungsfälle werden aber 200 m/s nicht überschritten, weil sich keine nennenswerten fertigungstechnischen Vorteile mehr ergeben in Bezug auf den maschinellen Aufwand, der dafür erforderlich ist. Der Energiebedarf ist beim Schleifen höher als bei vielen anderen Zerspanprozessen. Dabei wird nur ein geringer Anteil der Schnittleistung für die Zerspanung eingesetzt, der Rest wird durch Reibung in Wärme umgewandelt. Aus diesem Grund ist für das Schleifen eine effektive Kühlung der Kontaktzone erforderlich. Bisherige Versuche zu Alternativen, wie Minimalmengenschmierung oder gar trocken schleifen, waren bisher nicht erfolgreich. Vom Prinzip her ist es möglich, mit einer Minimalmengenschmierung zu schleifen, dabei bleibt aber das Zeitspanvolumen deutlich unter den bisher erreichten Werten, woraus eine unwirtschaftliche Schleifbearbeitung resultiert. Ohne wirkungsvolle Kühlung des Schleifprozesses besteht die Gefahr, dass die Werkstücke thermisch geschädigt werden.

Die heutigen Schleifmaschinen erlauben in vielen Fällen eine Komplettbearbeitung der Werkstücke in einer Aufspannung, so dass Nebenzeiten reduziert und Umspannfehler vermieden werden können. Dies und die hohe Leistungsfähigkeit moderner Schleifprozesse bei Erfüllung der Qualitätsanforderungen führen zu einer hohen Wirtschaftlichkeit des Schleifens mit geringen Fertigungszeiten und einer hohen Ausbringung an Werkstücken.

Ohne die Schleifscheiben auf der Maschine zu konditionieren sollte allerdings nicht mit dem Schleifen begonnen werden. Diese Vorbereitung der Schleifscheiben sorgt für den erforderlichen Rundlauf, das Profil und die gewünschte Schnittfähigkeit der Schleifscheiben. Je nach Schleifwerkzeug und -Prozess muss hierzu auch das richtige Verfahren ausgewählt werden. Durch die Konditioniermöglichkeit auf der Maschine lässt sich die Profilveränderung durch den Schleifscheibenverschleiß auf einfache Weise korrigieren. Abweichungen vom optimalen Schleifprozess werden teilweise durch Sensoren oder Messverfahren erkannt, um frühzeitig reagieren zu können und Ausschuss sowie Nacharbeit zu vermeiden.

4.7.1.1 Grundlagen

Kinematik und Kennwerte des Schleifens

Die Schnittgeschwindigkeit ist eine Überlagerung von Schleifscheiben-Umfangsgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit des Werkstücks. Dabei können das Schleifwerkzeug und das Werkstück rotatorische und/oder translatorische Bewegungen durchführen. Wirken die Geschwindigkeiten am Wirkpunkt in entgegengesetzter Richtung, so addieren sich die Geschwindigkeiten, bei Richtungsgleichheit subtrahieren sie sich. Wenn es sich nicht um spezielle Verfahren, wie z.B. das Schnellhubschleifen handelt, dann ist die Schleifscheiben-Umfangsgeschwindigkeit deutlich größer als die Werkstückvorschubgeschwindigkeit, so dass die Schnittgeschwindigkeit v_c normalerweise mit der Schleifscheiben-Umfangsgeschwindigkeit v_s gleich gesetzt wird:

$$v_c = v_s = d_s \cdot \pi \cdot n_s \qquad [4\text{-}48]$$

mit
d_s = Schleifscheibendurchmesser
n_s = Schleifscheibendrehzahl.

Die Vorschubbewegung ist je nach Schleifverfahren translatorisch (Planschleifen) oder eine Kombination aus translatorischer und rotatorischer Bewegung des Werkstücks oder des Werkzeugs (Innenrund- oder Außenrundschleifen). Die Vorschubgeschwindigkeit wird mit dem Index „f“ gekennzeichnet und erhält weitere Indizes, je nach Bewegungskomponente (z.B. Tischvorschubgeschwindigkeit v_{ft}, Werkstückgeschwindigkeit v_{fw} oder radiale Einstechgeschwindigkeit v_{fr}).

Eine sehr wichtige Kenngröße zur Beurteilung des Schleifprozesses ist das Zeitspanvolumen Q_W. Dies gibt an, wieviel Werkstoff pro Zeiteinheit zerspant wird:

$$Q_W = v_{ft} \cdot A_D \qquad [4\text{-}49]$$

mit
v_{ft} = Vorschubgeschwindigkeit, in Umfangsrichtung der Schleifscheibe wirkend
A_D = Spanungsquerschnitt der Schleifscheibe.

Für das Flachschleifen ist v_{ft} die Tischvorschubgeschwindigkeit und für das Rundschleifen die Umfangsgeschwindigkeit des Werkstücks v_w. Der Spanungsquerschnitt A_D errechnet sich aus der Zustelltiefe a_e und der Zustellbreite a_p:

$$A_D = a_e \cdot a_p \qquad [4\text{-}50]$$

Häufig wird das Zeitspanvolumen auf 1 mm der Zustellbreite bezogen. Daraus ergibt sich das sogenannte bezogene Zeitspanvolumen $Q_w^{'}$:

$$Q_w^{'} = \frac{Q_w}{a_p} \qquad [4\text{-}51]$$

bzw.

$$Q_w^{'} = a_e \cdot v_f \qquad [4\text{-}52]$$

Dies lässt sich in der vorgestellten Form aber nur bei rechteckigen Eingriffsquerschnitten anwenden. Bei Profilen müssen das Zeitspanvolumen und das bezogene Zeitspanvolumen mit dem Profilquerschnitt berechnet werden. Das Zeitspanvolumen wird zur Leistungsbeurteilung des jeweiligen Schleifprozesses benötigt.

Die Größe der Späne beim Schleifen kann rechnerisch ermittelt werden. Es handelt sich dabei natürlich nur um einen Mittelwert, der aber zur Interpretation der Zerspanungsvorgänge herangezogen wird. Für keramische Werkstoffe darf z. B. die äquivalente Spandicke einen werkstoffabhängigen kritischen Wert nicht überschreiten. Andernfalls wird nicht mehr ausschließlich zerspant, sondern Risse werden vermehrt im Werkstoff erzeugt. Die äquivalente Spandicke (auch der mittlerer Spanquerschnitt genannt) berechnet sich aus dem bezogenen Zeitspanvolumen und der Schnittgeschwindigkeit:

$$h_{eq} = \frac{Q_w^{'}}{v_c} \qquad [4\text{-}53]$$

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:

$$a_e \cdot v_{ft} = h_{eq} \cdot v_c \qquad [4\text{-}54]$$

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.

Je nach Schleifverfahren stellen sich unterschiedlich große Kontaktlängen zwischen der Schleifscheibe und dem Werkstück ein (Bild 4-97). Je größer die Kontaktlänge l_k und damit der Umschlingungswinkel $\Delta\varphi$ ist, desto schlechter sind die Bedingungen für eine effiziente Kühlschmierstoffzufuhr und desto höher ist damit die Gefahr der thermischen Überlastung des Werkstücks. Die Kontaktlänge l_k lässt sich aus der Zustellung a_e und dem äquivalenten Werkstückdurchmesser d_{eq} mit folgender Näherungsgleichung berechnen:

$$d_{eq} = \sqrt{a_e \cdot d_{eq}} \qquad [4\text{-}55]$$

Durch den äquivalenten Schleifscheibendurchmesser d_{eq} lassen sich die Schleifverfahren untereinander vergleichen und die Kontaktlänge für die Verfahren leicht berechnen:

$$d_{eq} = \frac{d_s \cdot d_w}{d_w \pm d_s} \qquad [4\text{-}56]$$

mit
d_s = Schleifscheibendurchmesser
d_w = Werkstückdurchmesser

Für das Außenrundschleifen ist das positive und für das Innenrundschleifen das negative Vorzeichen zu verwenden. Für das Planschleifen ist der äquivalente Schleifscheibendurchmesser gleich dem realen Schleifscheibendurchmesser. Die Kontaktbogenlänge (Bild 4-97) wird sehr stark durch die Krümmungsquotienten der Schleifscheibe und des Werkstücks beeinflusst und ist für das Außenrundschleifen am kleinsten, nimmt über dem Planschleifen zu und erreicht für das Innrundschleifen den größten Wert.

Schneideneingriff und Schneidenraum

Die Schneidkörner nehmen bei der Herstellung der Schleifwerkzeuge eine beliebige Position in der Bindung ein. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Spanwinkel vorwiegend negativ sind. Die Eindringtiefe des Schneidkorns beträgt abhängig von der Körnung (je nach Einstellparameter) nur einige zehntel Mikrometer (Bild 4-98). Aufgrund der Wirkkräfte ergibt sich zu Beginn des Schnittvorgangs eine elastische Verformung an 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 sogenannten Scheren des Werkstoffs mit der Ausbildung eines Spans. In dem Bild 4-98 wird nur das Schneidkorn gezeigt, so dass der Einfluss der Bindung hier nicht deutlich hervor-

Bild 4-97
Kontaktlängen beim Rundschleifen.

Bild 4-98
Spanbildung beim Schleifen nach König.

Bild 4-99
Prinzipielle Schleifscheibentopografie nach Saljé.

tritt. Die Körner sind etwa 2/3 ihres Durchmessers tief in der Bindung gefasst, so dass auch ein Kontakt zwischen Bindung und Werkstück entsteht, der zu der schon erwähnten Reibung beim Schleifen führt.

Die Schneidkörner befinden sich nicht alle auf demselben Flugkreis zur Drehachse der Schleifscheibe, so dass aufgrund der Schleifscheibentopografie ganz unterschiedliche Schneidenpositionen vorliegen (Bild 4-99). Jedes einzelne Schneidkorn wird nun auf der Schnittbahn durch den Werkstoff geführt und zerspant unterschiedlich bezüglich der Schnitttiefe und der Schnittbreite. Diese Wirkraumtiefe der Schleifscheibe überträgt sich auf das Werkstück und ist mitentscheidend für die Werkstückrautiefe. Durch das Konditionieren lässt sich die Topografie der Schleifscheibenoberfläche beeinflussen und an die Schleifaufgabe anpassen. Jedoch verändert sich der Schneidenraum beim Schleifen stetig aufgrund der Belastung durch den Schnittvorgang. Dies führt je nach Belastung zu unterschiedlichen Verschleißmechanismen, wie der Schneidkornabflachung, der Schneidkornsplitterung und dem Schneidkornausbruch. Die Schleifscheibentopografie ändert sich ständig und somit unterliegt auch die erzeugte Werkstückrautiefe einer zeitlichen Veränderung.

4.7.1.2 Aufbau der Schleifwerkzeuge

Die Schleifscheiben können je nach Schneidkorn in konventionelle und hochharte Schleifscheiben eingeteilt werden. Zu den konventionellen Schneidkörnern zählen verschiedene Arten von Elektrokorund und Siliziumkarbid. Als hochharte Schneidstoffe werden natürliche und synthetische Diamanten und kubisch kristallines Bornitrid (CBN) bezeichnet.

Der konventionelle Schleifscheibenaufbau besteht aus einem Dreistoffsystem: 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 Kühlschmierstoff in die Kontaktzone hinein befördern.

Die hochharten Schleifscheiben besitzen einen Grundkörper aus Keramik, Kunstharz oder Metall, auf dem Schleifsegmente mit CBN oder Diamant (gehalten in einem Bindungssystem) aufgeklebt werden. Die Segmente mit keramischer Bindung verfügen über Poren; die Kunstharzbindungen besitzen keine Poren und müssen daher vor dem Schleifeinsatz geschärft werden. Die galvanischen Bindungen halten nur eine einzige Schneidkornlage und lassen sich nur begrenzt konditionieren.

Konventionelle Schleifscheiben arbeiten teilweise im sog. Selbstschärfbereich, bei dem die Körner kontinuierlich splittern oder ausbrechen, um ihr Schneidvermögen beizubehalten. Für die hochharten Schleifscheiben wird dies vermieden, weil die Schneidkornkosten deutlich höher sind.

Schneidstoffe und Bindung
Die heute vorwiegend eingesetzten Schneidstoffe sind Edelkorund (Elektrokorund), Siliziumkarbid, kubisches Bornitrid (CBN) sowie synthetischer und natürlicher Diamant. Dabei ist der Diamant der härteste Schneidstoff, gefolgt von CBN, Silizumkarbid und Edelkorund als weichster dieser Schneidstoffe.

Der 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.

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) wird trotz seines höheren Preises insbesondere beim Hochgeschwindigkeitsschleifen mehr und mehr eingesetzt. Es ist zwar nicht so hart wie Diamant, jedoch lassen sich mit CBN nahezu alle Werkstoffe problemlos schleifen. Die einzige Ausnahme bilden die Nickel-, Titan- und Kobaltbasislegierungen aus dem Triebwerksbau wegen des hohen abrasiven Verschleißes der Körner.

Diamantschneidkörner eignen sich hervorragend für die Schleifbearbeitung von nichteisenhaltigen 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 Kühlschmierstoff- 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 besitzen nach dem Konditionieren schon die erforderlichen Spanräume.

Metallische Bindungen sind entweder gesintert und bestehen aus Bronze, Stahl oder Hartmetall oder sie können auch durch einen galvanischen Abscheidungsprozess aufgebracht werden. Für einlagig belegte hochharte Schleifscheiben wird eine galvanisch aufgebrachte Nickelschicht verwendet. Metallische Bindungen lassen sich schwerer konditionieren und müssen nach der Herstellung des Profils oft noch geschärft werden. Einlagig belegte Schleifscheiben lassen sich nicht mehr konditionieren. Sie werden gegebenenfalls mit den Konditionierwerkzeugen touchiert, um die Werkstückrautiefe bei Bedarf zu reduzieren.

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 Zeitspanungsvolumen 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 Finishschleifaufgaben 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. Die Schleifscheiben werden gemäß der jeweiligen Schleifaufgabe dimensionell ausgelegt.

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

Gefüge
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
offenes Gefüge
geschlossenes Gefüge

Körnung				
grob	6	8	...	24
mittel	30	36	...	60
fein	70	80	...	180
sehr fein	220	280	...	1200

Bindungstyp	
V	Keramische Bindung
S	Silicatbindung
R	Gummibindung
RF	Gummibindung faserstoffverstärkt
B	Kunstharzbindung
BF	Kunstharzbindung faserstoffverstärkt
E	Schellackbindung
M	Magnesitbindung

Härtegrat				
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	

Bild 4-100
Schleifscheibenspezifikation nach DIN ISO 525 für konventionelle Schleifscheiben.

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.

Aus der Bezeichnung können die Abmessungen, die Schneidkornart, die Härte, das Gefüge, die Bindungsart und die zulässige Umfangsgeschwindigkeit entnommen werden. Die grundsätzlichen Bezeichnungen sind im Bild 4-100 zusammengestellt.

Nach FEPA ist die Bezeichnung für die Schneidkorngröße durch die Anzahl der quadratischen Siebmaschen auf einem Zoll (25,4mm) gegeben. Um die mittlere Schneidkorngröße zu ermitteln, muss die Diagonale der Masche berechnen 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.

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 Kunstharzbindung gekennzeichnet.

Die letzte Spezifikationsangabe gibt Auskunft über die größte zulässige Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s 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, Kunstharz, Aluminium oder seit neuestem auch aus

Faserverbundwerkstoff aufgebaut werden. Dieser zweiteilige Aufbau wird vorwiegend aus Kostengründen gewählt, weil die Schneidkörner aus CBN und Diamant deutlich teurer sind als die konventionellen Schneidkörner. 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, Bild 4-101.

1A1-500-15-2-305-B 151-KSS-TYB-V240

Schleifscheibenform	1A1	**Korngröße**	151
Außendurchmesser	500	**Bindungstyp**	KSS
Belagsbreite	15	**Bindungshärte**	T
Belagshöhe	2	**Einsatzgebiet**	Y
Bohrungsdurchmesser	305	**Grundkörper**	B
Kornart	B	**Konzentration**	V240

Kornart	
Diamant	D
CBN	B

Bindungshärte	
sehr hart	T
hart	R
mittel	N
weich	J

Korngröße				
46	91	181	356	711
54	107	213	426	851
64	126	251	501	1001
76	151	301	601	1181

Grundkörper	
Aluminum	A
Kunstharz	B

Bindungstyp		
Diamant	BZ	Bronze
	G	Galv. Metall
	M	Sintermetall
	K	Kunstharz
CBN	GSS	Galv. Metall
	KSS	Kunstharz
	MSS	Sintermetall
	VSS	Keramik

Konzentration		
Bezugssystem I	Bezeichnung	Kt/cm³
	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
Bgs. II	Bezeichnung	Vol. %
	V 120	12
	V180	18
	V240	24

Bild 4-101
Schleifscheibenspezifikation nach DIN ISO 6104 für hochharte CBN- und Diamantschleifscheiben

Die Schneidkorngröße wird direkt in Mikrometern angegeben und muss nicht mehr berechnet oder aus Tabellen entnommen werden. Zur Anwendung kommt vorwiegend der Bereich von 91 µm bis 181 µm. Die Angabe über die Bindungshärte ist nur noch grob unterteilt von sehr hart bis weich. Interessant für die Anwendung ist die Angabe der Schneidkornkonzentration. Damit kann eingeschätzt 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 besitzen bezüglich der Aufspannbohrung eine gewisse Toleranz, so dass sie problemlos aufgeschoben werden können. 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, so dass keine wechselnden Kräfte die Spindellagerung beeinträchtigen. Dies kann durch Massenverschiebung erfolgen, was heute schon automatisch durch elektromotorische Verstellung der Auswuchtgewichte am Spindelkopf geschieht. Eine andere Möglichkeit auszuwuchten ist es, das Kühlmittel in Schlitze im hinteren Flanschteil einzuspritzen. Auch dieser Vorgang läuft automatisiert ab. Letzter Arbeitsgang vor dem Schleifen ist dann in jedem Fall das Konditionieren der Schleifscheibe.

4.7.1.3 Der Schleifprozess

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. Zu diesen Anforderungen muss das Schleifverfahren und die Schleifscheibe ausgewählt werden. Die Schleifscheibe selbst hat dabei einen viel höheren Einfluss als die Einstellgrößen des Schleifprozesses. Wird zum Beispiel eine falsche Schneidkorngröße gewählt, kann trotz Konditionierens und veränderten Schnittparametern die erforderliche Rautiefe nicht geschliffen werden.

Die Schleifscheibe verändert sich kontinuierlich mit zunehmender Bearbeitungszeit. So kommt es durch den fortschreitenden Schleifscheibenverschleiß eben-

Bild 4-102
Ermittlung der Rauheitskennwerte R_a; R_z und R_t

falls dazu, dass die vorgegebene Werkstückqualität nicht mehr erreicht wird. Dann ist ein erneutes Konditionieren der Schleifscheibe erforderlich. Erst wenn der nutzbare Teil der Schleifscheibe aufgebraucht ist, muss sie gewechselt werden.

Rauheit

Oberflächenbeschaffenheiten in der spanenden Bearbeitung lassen sich nach DIN 4760 in unterschiedliche Gestaltabweichungen einteilen. Die Norm ist in sechs unterschiedliche Ordnungen gegliedert, wobei in der Schleifbearbeitung vor allem die Rauheit, die in der 3. bis zur 6. Ordnung beschrieben wird, als wichtigste Oberflächenkenngröße gilt. Die gängigsten Rauheitskenngrößen sind die maximale Rautiefe R_{max}, der arithmetische Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z, Bild 4-102. Für die Bestimmung von R_z wird die Auswertelänge l_m 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 (Bild 4-103), auch Materialanteilkurve genannt, 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 Schnitthöhe aufgetragen. An diese Materialanteilkurve wird in einem zweiten Schritt eine Se-

Bild 4-103
Abbott-Kurve bzw. Materialanteilkurve.

kante mit einer Länge von 40 % der Materialanteilkurve und einer kleinstmöglichen Steigung angelegt. Durch Verlängern dieser Gerade wird R_k bestimmt. Als nächstes kann der kleinste (größte) Materialanteil M_{r1} (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_{r1} (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) erfasst. Durch das Abtasten der Oberfläche mit Hilfe einer Tastnadel ist die Erstellung eines Profilschnittes möglich, anhand dessen die Rauheitskennwerte ermittelt werden können. Es werden heute aber auch optische Messverfahren wie die Laserinterferometrie eingesetzt. Sie ermöglichen ganze Oberflächentopografien in einer hohen Auflösung darzustellen und zu vermessen.

Die Rauheit wird bei einem Rundschleifprozess neben dem zu zerspanenden Werkstoff und der Beschaffenheit der Schleifscheibe vor allem durch den Geschwindigkeitsquotienten aus Schleifscheiben- und Werkstückumfangsgeschwindigkeit $q=v_s/v_w$ bestimmt. Bei hohen Geschwindigkeitsquotienten, die durch eine Erhöhung der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s oder einer Verminderung der Werkstückumfangsgeschwindigkeit v_w erzielt werden können, wird durch die Überlagerung der Schneidprofile eine Reduzierung der Rauheit bewirkt. Als Richtwerte für q werden beim Außenrundschleifen der Wertebereich 60 bis 80, beim Pendelschleifen 50 bis 450 und beim Tief- oder Vollschnittschleifen 1.000 bis 250.000 angesehen. Des Weiteren hat das Zeitspanvolumen Q_w ebenfalls einen Einfluss auf die Rauheit. Je größer das Zeitspanvolumen ist, desto schlechtere Rauheitskennwerte werden erzielt. Wird der Vorschub am Ende der Oberflächenbearbeitung ausgesetzt, spricht man vom Ausfunken, wodurch die Rauheit reduziert werden kann.

Schleifscheibenverschleiß

Die Schleifscheibentopografie verändert sich durch die Beanspruchung beim Schleifen. Dabei sind die Einstellbedingungen wie das Zeitspanvolumen, die Schnittgeschwindigkeit, die Zustelltiefe und der Vorschub maßgeblich für den späteren Schleifscheibenverschleiß. Generell nimmt der Schleifscheibenverschleiß mit höherem Zeitspanungsvolumen zu. Es ist wichtig, die Konditionierbedingungen 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 Selbstschärfeffekt. Für einfache Profilgeometrien ist dieser Zustand erwünscht. Beim Profilschleifen kann jedoch sehr schnell ein Formfehler entstehen, weshalb dort der Selbstschärfeffekt 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 (Bild 4-104).

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.

Bild 4-104
Makroverschleiß der Schleifscheibe (CIRP Keynote STC-G 2011).

Bild 4-105
Mikroverschleißmechanismen (CIRP Keynote STC-G 2011).

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 (Bild 4-105).

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:

$$G = \frac{V_w(t)}{V_s(t)} = \frac{zerspantes\ Werkstückvolumen}{Scheibenverschleißvolumen} \quad [4\text{-}57]$$

Der Verschleißquotient liegt im Bereich von G = 20–60 bei Edelkorund und Siliziumkarbid und bei über 500 für hochharte Schleifscheiben.

Konditionieren von Schleifwerkzeugen
Die Aufgabe des Konditionierens ist, dem Schleifwerkzeug die für das Schleifen erforderliche Profilgenauigkeit und Schnittfähigkeit wiederzugeben. Es wird unterteilt in Abrichten und Reinigen der Schleifscheibe. Das Abrichten umfasst sowohl das Profilieren, als auch das Schärfen der Schleifscheibe. Das Profilieren beinhaltet die Herstellung der Makrogeometrie und des Profils in axialer und radialer Richtung. Neben Formfehlern wird so auch der Rundlauffehler reduziert. Schärfen ist erforderlich, um die Mikrogeometrie der Schleifscheibe an den Prozess anzupassen. Dies erfolgt, indem die Bindung zurückgesetzt wird, so dass verschlissene Körner entfernt und neue Schneidkanten freigelegt werden. Die Reinigung der Schleifscheibe hat die Aufgabe, Zusetzungen der Schleifscheibe durch Späne zu entfernen, ohne die Bindung und die Schneidkörner zu beeinflussen (Bild 4-106).

Bild 4-106
Konditionieren (CIRP Keynote STC-G 2011).

Der Abrichtprozess bestimmt die Wirkrautiefe R_{tso} der Schleifscheibe und damit das Prozessverhalten. Um die Wirkrautiefe zu bestimmen, kann ein besonderer Schleifprozess (nach *Palitzsch*) durchgeführt werden, bei dem die Oberflächentopografie der Schleifscheibe auf einem Werkstück abgebildet wird. Alternativ kann heute 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, da sich die Schleifscheibe aufgrund der Zentrifugalkraft, abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit, unterschiedlich stark ausdehnt.

Konditionieren konventioneller Schleifscheiben
Konventionelle Schleifscheiben sind Schleifscheiben mit Körnungen aus Korund oder Siliziumkarbid in keramischer Bindung oder Kunstharzbindung. Das

Bild 4-107
Kinematik häufig eingesetzter Abrichtverfahren.

Quelle: Fa. Ernst Fr. Weinz WEKA GmbH & Co

Bild 4-108
Übersicht stehender Abrichtwerkzeuge (1 Abrichtrad, 2 Abrichtrolle, 3 Abrichtigel, 4 Abrichtplatte).

Profilieren und Schärfen keramischer Bindungen erfolgt in der Regel in einem Prozessschritt, der entweder mit einem stehenden oder rotierenden Werkzeug ausgeführt wird (Bild 4-107).

Bild 4-109
Schnittquotienten beim Abrichten (CIRP Keynote STC-G 2011).

Bei den stehenden Abrichtwerkzeugen werden Einkornabrichter, Abrichtplatten und Vielkornabrichter unterschieden (Bild 4-108). 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 (Bild 4-109). Diese ist abhängig von der Wirkbreite des Abrichters b_d, der Zustellung des Abrichters a_{ed} und dem Vorschub des Abrich-

ters f_{ad} und wird über den Überdeckungsgrad U_d definiert. Er beinhaltet die aktive Zustellbreite a_{pd} und den Abrichtvorschub f_{ad}.

$$U_d = \frac{a_{pd}}{f_{ad}} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{2 \cdot r_p \cdot a_{ed}}}{f_{ad}} \qquad [4\text{-}58]$$

Durch Einsetzen der folgenden Gleichungen für die aktive Zustellbreite a_{pd} und die Wirkbreite b_d des Abrichtwerkzeugs:

$$a_{pd} = \frac{1}{2} \cdot (b_d + f_{ad}) \qquad [4\text{-}59]$$

$$b_d = \sqrt{8 \cdot r_p \cdot a_{ed}} \qquad [4\text{-}60]$$

und unter der Annahme, dass die Schnittbreite gleich der Wirkbreite ist, ergibt sich für den Überdeckungsgrad:

$$U_d = \frac{b_d}{f_{ad}} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{8 \cdot r_{pd} \cdot a_{ed}}}{f_{ad}} \qquad [4\text{-}61]$$

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 µm bis 30 µm betragen. Sind höhere Zustellungen erforderlich, um die geforderte Formgenauigkeit zu erreichen, so 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.

Als rotierende Abrichtwerkzeuge werden vorwiegend einschichtig oder mehrschichtig belegte Diamantrollen eingesetzt. Das Abrichtergebnis bei Verwendung rotierender Abrichter wird 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:

$$q_d = \frac{v_{rd}}{v_{cd}} \qquad [4\text{-}62]$$

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 Schruppbearbeitung sollte hingegen ein positiver Abrichtgeschwindigkeitsquotient gewählt werden, da hierdurch die Schleifkräfte reduziert werden und die Schleifscheibe aufgrund der höheren Wirkrautiefe schnittfreudiger ist (Bild 4-110).

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 Diamant-

Bild 4-110
Einfluss des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses auf die Abrichtkraft, Schleifkraft und Wirkrautiefe der Schleifscheibe (CIRP Keynote STC-G 2011).

Bild 4-111
Formabrichten (a) und Profilabrichten (b).

Bild 4-112
CD-Schleifen bzw. kontinuierliches Abrichten.

anteils 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 (Bild 4-111).

Zum Abrichten mit Diamantabrichtrollen 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 reduzierter Lebensdauer der Abrichtrollen.

Konventionelle Schleifscheiben können auch während des Schleifprozesses kontinuierlich abgerichtet werden. Dieses Verfahren wird als Continous Dressing (CD) bezeichnet. Es ist besonders geeignet, um schwer zerspanbare Werkstoffe, wie z.B. Nickelbasislegierungen, wirtschaftlich schleifen zu können und wird daher vorwiegend in der Fertigung von Turbinenschaufeln eingesetzt. Durch den kontinuierlichen Abrichtervorschub verringert sich der Schleifscheibendurchmesser stetig. Die Kompensation des dadurch entstehenden Fehlers in der Schleifscheibenzustellung wird in der Maschinensteuerung berücksichtigt (Bild 4-112).

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 verschleißen.

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, Bild 4-113. 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, die die Zerspanung der Schleifscheibenbindung unterstützen. 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 Kühlschmierstoff 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 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.

Bild 4-113
Schärfprozesse mit gebundenem Korn (CIRP Keynote STC-G 2011).

Schleifkraft und Schleifleistung

Die Schleifkräfte entstehen bei der Zerspanung und setzen sich aus verschiedenen Komponenten der Reibung, Scherung und Umformung zusammen. Die einzelnen Anteile lassen sich kaum quantifizieren. Sicher ist, dass ein Großteil der aufgewendeten Zerspanarbeit in Wärme umgewandelt und nur etwa 10 % für die Zerspanung benötigt wird. Die Schleifkraft kann rechnerisch in Normal- und Tangentialkraft aufgeteilt werden (Bild 4-114). 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. Die thermische Wechselbelastung, durch die Kühlung unterstützt, führt zu Schneidkornsplitterung. Wenn dieses Absplittern zu groß wird, können sich die Schneidkörner nicht mehr in der Bindung halten und brechen aus. Falls ganze Schneidkornverbände ausbrechen, ist die Bindungsfestigkeit durch die Schleifkraft überschritten.

Komponenten der Schleifkraft sind die Normal-, die Tangential- und die Vorschubkraft, Bild 4-114. 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 quotientmäßig klein.

Bild 4-114
Schleifkräfte und ihre Verteilung a) Plan-Umfangsschleifen, b) Planseitenschleifen, c) Außenrund-längsschleifen und d) Außenrundeinstechschleifen.

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:

$$F'_t \approx k_{cgrind} \cdot A_D \qquad [4\text{-}63]$$

$$F'_t \approx h_{eq} \cdot k_{cgrind} \qquad [4\text{-}64]$$

Mit der schon bekannten Beziehung für die äquivalente Spandicke ergibt sich:

$$h_{eq} \approx \frac{v_{ft} a_e}{v_c} \approx \frac{Q_w'}{v_c} \qquad [4\text{-}65]$$

so gilt:

$$F'_t \approx \frac{Q_w'}{v_c} \cdot k_{cgrind} \qquad [4\text{-}66]$$

Für die energetische Beurteilung des Schleifprozesses wird die Schnittleistung P_c herangezogen. Sie berechnet sich aus der Tangentialkraft und der Schnittgeschwindigkeit:

$$P_c = F_t \cdot v_c \qquad [4\text{-}67]$$

Zur Auslegung der Arbeitsspindel kann mit der Schnittleistung die erforderliche Motorleistung P_M berechnet werden, wenn der Wirkungsgrad η bekannt ist:

$$P_M = \frac{P_c}{\eta} \qquad [4\text{-}68]$$

Eine wichtige Kenngröße für den Schleifprozess ist der Schleifkraftquotient:

$$\mu = \frac{F_n}{F_t} = \frac{F'_n}{F'_t} \qquad [4\text{-}69]$$

Allgemein liegt der Kraftquotient zwischen μ = 2 und μ = 3. Wird er bei gleichbleibender Normalkraft kleiner, ist das ein Indiz für eine schnittfreudige Schleifscheibe.

Schleiftemperatur und Kühlung

Beim Schleifen tritt ein hoher Anteil an Reibung zwischen den Körnern und dem Werkstück, der Bindung und dem Werkstück sowie innere Reibung im Werkstück auf. Daher werden bis zu 90 % der Leistung P_c, die für das Schleifen benötigt werden, in Wärme umgewandelt. Ein großer Teil dieser Energie fließt in das Werkstück und kann so zu Gefügeumwandlungen und thermischen Schädigungen führen. Daher sollte ein möglichst hoher Anteil der Wärme über den Kühlschmierstoff und die Späne abgeführt werden.

Insbesondere beim Tiefschleifen mit hohen Zustellungen besteht die Gefahr der thermischen Schädigung. Wird mit identischem, bezogenen Zeitspanvolumen im Pendelschliff mit geringen Zustellungen geschliffen, ist die Temperatur zwar ebenfalls hoch, aber die Dauer der Wärmeeinwirkung ist deutlich geringer und damit auch die thermische Belastung des Werkstücks. Eine thermische Schädigung des Werkstücks kann bereits aufgetreten sein, ohne dass es zu Brandflecken kommt, die optisch erfasst werden können. Daher werden Messverfahren eingesetzt, um Gefügeschädigungen zu detektieren. Ein einfaches Verfahren, dass direkt in der Maschine eingesetzt werden kann, ist z.B. die Messung des *Barkhausen*-Rauschens. Die Ergebnisse sind hierbei stark abhängig von der Anpresskraft des Testkopfs sowie des Winkels, so dass die Messung möglichst automatisiert erfolgen sollte.

Je nach Anwendungsfall werden als Kühlschmierstoffe meist Mineralöl oder Öl-in-Wasser-Emulsionen oder Lösungen auf Wasserbasis eingesetzt. Die Hauptaufgaben des Kühlschmierstoffs sind:

- Reduktion der Reibung zwischen Korn und Werkstück,
- Späneabfuhr,
- Werkstückkühlung,

Bild 4-115
Maximale Schleiftemperatur in Abhängigkeit von der Zustelltiefe und verschiedenen Kühlungsarten nach König.

- Schleifscheibenreinigung,
- Korrosionsschutz.

Durch eine Reduktion der Reibung werden die Schleifkraft und die Schleiftemperatur reduziert. Dies führt auch zu einem geringeren Werkzeugverschleiß und es können zudem geringere Rauheiten erzielt werden. Die höchste Reibungsreduktion wird bei Einsatz von Öl erreicht, dadurch sind auch die Schleiftemperaturen geringer, obwohl Emulsion eine höhere Kühlwirkung hat (Bild 4-115). 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 verzichten zu können.

Die Kühlschmierstoffzuführung ist von besonders hoher Bedeutung für den Schleifprozess. Nur bei einer optimalen Düsenauslegung und -ausrichtung wird gewährleistet, dass ein leistungsfähiger Prozess bei guter Oberflächenqualität des Werkstücks durchgeführt werden kann. Die erforderliche Kühlschmierstoffmenge beträgt ca. 2 l/min pro 1 mm Schleifscheibenbreite. Der Druck sollte so gewählt werden, dass die Kühlschmierstoffaustrittsgeschwindigkeit etwa der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit entspricht und damit das Luftpolster, das sich auf dem Schleifscheibenumfang bildet, durchbricht. Da es in der Kühlschmierstoffzuleitung eine Reihe von Verluststellen gibt, sollte die Durchflussmenge und -geschwindigkeit möglichst dicht am Düsenaustritt gemessen werden.

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, weshalb auch der Schleifscheibenverschleiß reduziert wird. 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 wird daher bei dieser Einstellungsveränderung nicht bewirkt.

Das bezogene Zeitspanvolumen

$$Q_w' = v_w \cdot a_e = v_{ft} \cdot a_e \qquad [4\text{-}70]$$

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.

Das Planschleifen erlaubt die Erhöhung des Zeitspanvolumens sowohl über die Werkstückgeschwindigkeit als auch über die Zustelltiefe. Große Zustelltiefen und geringe Vorschubgeschwindigkeiten werden als Tiefschleifen, geringe Zustelltiefen mit hohen Vorschubgeschwindigkeiten als Pendelschleifen bezeichnet. Das Pendelschleifen mit sehr hohen Vorschubgeschwindigkeiten wird als Schnellhubschleifen bezeichnet. In diesem Fall können höchste Zeitspanvolumina ohne thermische Schädigung des Werkstücks gefahren werden.

Die Schleifscheiben müssen speziell für das Tiefschleifen aufgebaut sein, weil große Schleifkräfte entstehen und ein hohes Spanvolumen transportiert werden muss. Die Schleifscheiben müssen also über ein großes Porenvolumen verfügen und gleichzeitig gute Bindungskräfte aufweisen, damit sie nicht zu schnell verschleißen.

Mehrstufiger Schleifprozess

Bei großem Zeitspanvolumen wird in kurzer Zeit viel Werkstoff zerspant. Allerdings ist die Werkstückrautiefe bei dieser Vorgehensweise sehr hoch, so dass es sich empfiehlt, dass Aufmaß in mehreren Schritten zu zerspanen. Idealerweise wird zwei- oder dreistufig gearbeitet (Bild 4-116). 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.

Bild 4-116
Mehrstufiger Schleifprozess.

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 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

Bild 4-117
Einteilung und Bewegungsabläufe der Schleifverfahren.

Regelung auf eine Schleifprozesskenngröße (Kraft, Zeitspanvolumen, usw.) abgestimmt wird, so handelt es sich um eine ACC-Regelung (Adaptiv Control Constraint).

4.7.1.4 Schleifverfahren

Die Schleifverfahren mit rotierendem Werkzeug wurden in der DIN 8589-1 zusammengestellt. Es kann in Rund- und Planschleifen sowie in Außen- und Innenschleifen unterschieden werden. In Kombination mit der Relativbewegung zwischen Spindelachse und Schleifscheibe ergeben sich die Verfahrensbezeichnungen (Bild 4-117). Beim Seitenschleifen bildet die Planseite der Schleifscheibe mit dem Werkstück die Kontaktzone. In diesem Fall ist es besonders schwierig, das Kühlmittel in den gesamten Kontaktbereich zu fördern. Dieses Schleifverfahren wird auf Maschinen mit vorwiegend vertikaler Spindelanordnung durchgeführt.

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.

Planschleifen

Von den Planschleifverfahren werden hier das Längs-Umfangs-Planschleifen und das Längs-Seiten-Planschleifen näher vorgestellt (Bild 4-117). Die Vorschubbewegung ist beim Längs-Umfangs-Planschleifen translatorisch und kann sowohl durch die Schleifscheibe als auch durch das Werkstück ausgeführt werden. In den meisten Fällen erfolgt dies über die Tischbewegung der Schleifmaschine und damit über das Werkstück. Das Längs-Seiten-Planschleifen kann mit translatorischer oder rotatorischer Vorschubbewegung durchgeführt werden. Beide Möglichkeiten, Längstischbewegung und Rundtischbewegung, stehen maschinenseitig zur Verfügung.

Wie der Name Umfangsschleifen schon ausdrückt, wird beim Längs-Umfangs-Planschleifen mit der Umfangsfläche der Schleifscheibe geschliffen. Je nach Drehrichtung der Schleifscheibe zur Tischvorschubgeschwindigkeit wird im Gegenlauf (Vorschub- und Schnittrichtung auf der Werkstückoberfläche gegensinnig) oder im Gleichlauf (Vorschub- und Schnittrichtung auf der Werkstückoberfläche gleichsinnig) geschliffen. Der Schleifspan nimmt beim Gegenlaufschleifen langsam bis zu einem Maximum zu und kommt nach der vollständigen Abscherung nicht mehr in Kontakt mit der geschliffenen Werkstückoberfläche. Der Schleifkraftvektor ist bei dieser Anordnung aus dem Tisch heraus

Berechnungsgröße	Quer-Umfangs-Außen-Rundschleifen	Längs-Umfangs-Außen-Rundschleifen
Eingriffsquerschnitt A_D (mm²)	$A_D = a_e \cdot a_p = f_r \cdot b_w$	$A_D = a_e \cdot a_p = f_a \cdot a_e$
Zeitspanvolumen Q (mm³/s)	$Q = A_d \cdot v_{ft} = f_r \cdot b_w \cdot d_w \cdot \pi \cdot n_w$	$Q = A_d \cdot v_{ft} = a_e \cdot d_w \cdot \pi \cdot f_a \cdot n_w$
mittl. Zeitspanvolumen $\bar{Q}$ (mm³/s)		$\bar{Q} = \frac{l_w \cdot Q}{l_h} \cdot v_{fa} = \text{konst}$
Hauptzeit t_h (s)		$t_h = \frac{z_w \cdot b_h(2)}{a_p \cdot a_e \cdot n_w} \cdot v_{fa}$
Schleifzeit t_c (s)	$t_c = \frac{V_w}{Q} = \frac{z_w}{b_w \cdot f_r}$	$t_c = \frac{z_w \cdot l_w}{a_e \cdot f_a \cdot n_w}$

Bild 4-118
Gleichungen zur Berechnung von Eingriffsquerschnitt, Zeitspanvolumen, Haupt- und Schleifzeit für das Außenrundschleifen (in Klammern Faktor 2, wenn nach jedem Doppelhub zugestellt wird).

ausgerichtet. Das Gleichlaufschleifen verursacht zu Schnittbeginn den größten Spanquerschnitt der dann immer kleiner wird bis zur vollständigen Abscherung. Es besteht die Möglichkeit, dass der Span noch mit der geschliffenen Werkstückoberfläche in Kontakt kommt. Die Schleifkraftrichtung wirkt auf den Tisch. Es existieren widersprüchliche Empfehlungen zum Einsatz von Gegen- oder Gleichlaufschleifen. Überwiegend wird das Schruppschleifen im Gegenlauf und das Schlichtschleifen im Gleichlauf ausgeführt.

Rundschleifen zwischen Spitzen

Das **Außenrundschleifen** wird unterteilt in Längs-Umfangs-Außen-Rundschleifen, Quer-Umfangs-Außen-Rundschleifen, Längs-Seiten-Außen-Rundschleifen und Quer-Seiten-Außen-Rundschleifen, wobei die beiden ersten am häufigsten verwendet werden.

Beim Längs-Umfangs-Außen-Rundschleifen 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 Leerhübe ohne Zustellung beim sog. Ausfunken, 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 Quer-Umfangs-Außen-Rundschleifen, auch bezeichnet als Einstechschleifen, erfolgt eine kontinuierliche, radiale Zustellung der Schleifscheibe ohne Längsvorschub. In diesem Verfahren können auch (über den Einsatz profilierter 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.

Berechnungsgröße	Einstechschleifen	Längsschleifen
Eingriffsquerschnitt A_e (mm²)	$A_e = a_e \cdot a_p = l_w \cdot f_r$	$A_e = a_e \cdot a_p = a_e \cdot f_a$
Zeitspanvolumen Q (mm³/s)	$Q = A_e \cdot v_{ft} = f_r \cdot l_w \cdot d_w \cdot \pi \cdot n_w$	$Q = A_e \cdot v_{ft} = a_e \cdot f_a \cdot d_w \cdot \pi \cdot n_w$
mittlleres Zeitspanvolumen $\bar{Q}$ (mm³/s)		$\bar{Q} = Q \cdot \frac{l_w}{l_H}$
Hauptzeit t_h (s)	$t_h = \frac{z_w}{a_e \cdot n_w}$	$t_h = t_c \cdot \frac{l_H}{l_w}$
Schleifzeit t_c (s)	$t_c = t_h$	$t_c = \frac{z_w \cdot d_w \cdot \pi \cdot l_w}{Q}$

Bild 4-119
Gleichungen zur Ermittlung von Eingriffsquerschnitt, Zeitspanvolumen, Haupt- und Schleifzeit für das Innenrundschleifen.

Um die Prozessdauer zu verkürzen, kann das Schruppen in mehreren Quer-Umfangs-Außen-Rundschleifprozessen ausgeführt werden und das Finishen als Längs-Umfangs-Außen-Rundschleifprozess. Die Formeln zur Berechnung von Eingriffsquerschnitt, Zeitspanvolumen, Haupt- und Schleifzeit können Bild 4-118 entnommen werden.

Das Schräg-Außen-Profilschleifen wird eingesetzt, um eine Stirnfläche und Umfangsfläche zeitgleich zu bearbeiten. Die Vorschübe in radialer und axialer Richtung können hierfür unabhängig voneinander eingestellt werden. Häufig werden dabei schräggestellte Schleifscheiben eingesetzt, die das Gegenprofil des Werkstücks aufweisen.

Moderne Rundschleifmaschinen erlauben auch die Bearbeitung von unrunden Geometrien, wie z.B. Nocken oder Stempel. Hierfür erfolgt eine Synchronisation der Werkstückspindelposition mit der radialen Position der Schleifscheibe.

Beim **Innenrundschleifen** werden das Längs-Umfangs-Innenrundschleifen und das Quer-Umfangs-Innen-Rundschleifen unterschieden. Am häufigsten werden 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 einer gesteigerten Gefahr der thermischen Schädigung des Werkstücks führt. Zudem ist die Zuführung des Kühlschmierstoffs 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 Prozesskräfte eine Ausbiegung des Schleifdorns, die zu Form- und Maßfehlern führen kann. Üblicherweise sollten die Durchmesser von Schleifscheibe d_s und Werkstück d_w den Quotienten $d_s/d_w = 0{,}65$ bis 0,75 aufweisen. Die Formeln zur Berechnung von Eingriffsquerschnitt, Zeitspanvolumen, Haupt- und Schleifzeit können Bild 4-119 entnommen werden.

Bild 4-120
Spitzenloses Außenrundschleifen, a) Seitenansicht, b) Ansicht in Achsenrichtung.

Spitzenlosschleifen
Das Spitzenlosschleifen eignet sich sehr gut für die Massenfertigung, da hohe Zerspanraten und große Stückzahlen bei geringen Durchlaufzeiten erreicht werden. Beim Spitzenlosschleifen ist das Werkstück nicht gespannt, sondern liegt auf einer Auflageschiene. Es wird dann zwischen Auflageschiene, Schleifscheibe und Regelscheibe geführt. Der Abstand zwischen der Schleifscheibe und der Regelscheibe, die im Gleichlauf rotieren, bestimmt den Werkstückdurchmesser. Die Regelscheibe weist eine zylindrische Form für das Quer-Umfangs-Schleifen und eine hyperbolische Form für das Durchlaufschleifen auf. Sie besteht in der Regel aus Hartgummi oder Kunstharz.

Das Durchlaufschleifen kann nur für glatte, zylindrische Werkstücke eingesetzt werden. Das Quer-Umfangs-Spitzenlos-Schleifen wird eingesetzt, wenn zylindrische Werkstücke mit Ansätzen, Bunden oder Profilen gefertigt werden sollen.

Für das Durchlaufschleifen ist die Regelscheibe schräg gestellt, so dass eine Axialkraft resultiert, durch die das Werkstück nach vorne geführt wird. Der Winkel der Schrägstellung bestimmt daher die Durchlaufgeschwindigkeit. Die Regelscheibe rotiert etwas langsamer als die Schleifscheibe und bremst das Werkstück damit ab, so dass eine Spanabnahme entsteht. Beim Quer-Umfangs-Spitzenlosschleifen ist das Werkstück kürzer als die Schleifscheibenbreite und die Regelscheibe führt neben der Rotation auch noch eine Zustellbewegung aus (Bild 4-120).

Das Spitzenlosschleifen ist besonders dann von Vorteil, wenn lange, zylindrische Bauteile zu fertigen sind, da auch ohne Einsatz von Lünetten keine Durchbiegung des Werkstücks erfolgt. Zudem entfällt das Einspannen und Zentrieren der Bauteile.

Wälzschleifen
Oberflächenrauheit und geometrische Genauigkeit werden für die Herstellung von Zahnrädern nur durch die Schleifbearbeitung erreicht. Dabei ist das Wälzschleifen die effektivste Schleifbearbeitung von größeren gerad- und schrägverzahnten Außenstirnrädern. Das Schleifscheibenprofil besitzt das Negativprofil des Werkstücks. Während des Schleifens wälzt das Schleifscheibenprofil auf der Werkstückoberfläche ab.

Es gibt sowohl diskontinuierliche Wälzbewegungen mit Teilung als auch kontinuierliche Wälzbewegungen ohne Teilung, Bild 4-121.

Das Teilwälzverfahren (*Maag*-Schleifverfahren) arbeitet mit Teller- oder Doppelkegelscheiben. Die Schleifscheiben sind normalerweise unter 15° oder 20° geschwenkt. 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 Schleifbewegung aus. Ist der Zahn fertiggeschliffen, dann wird zum nächsten weiter geteilt.

Beim kontinuierlichen Wälzschleifen (*Reishauer*-Schleifverfahren) kämmt eine Schleifschnecke mit einem Werkstück ähnlich dem Wälzfräsen. Während der synchronisierten Wälzbewegung von Werkstück und Werkzeug wird die Schleifschnecke in Richtung der Werkstückachse verschoben.

Bild 4-121
Wälzschleifen.

Profilschleifen
Für das Profilschleifen wird vor der Schleifbearbeitung das Negativprofil in die Schleifscheibe durch Profilabrichten eingebracht. Dies kann mit Formdiamanten, Diamantformrollen und Diamantprofilrollen erfolgen. Profile müssen sowohl in rechteckige als auch in runde Werkstücke eingeschliffen werden. 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* Schleifen etabliert. Hier 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, dann muss wieder profiliert werden.

Schleifscheiben mit CBN- oder Diamantschneidkörnern können das Profil länger halten 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 Tiefschliff als auch im Pendelschliff erfolgen. Der Tiefschliff 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.

	Kenngröße	Sensorsystem
In-Prozess	Temperatur Schleifkräfte Acousitc Emission Schwingungen Scheibenverschleiß	Thermokamera, Pyrometer Piezosensor Kombisensor (AE/Kraft) Piezosensor Radarsensor
Prozessnah	Schleifrisse Scheibenverschleiß Maß, Form, Lage	Wirbelstromsensor Laserscanner Induktive Taster
Post-Prozess	Maß, Form, Lage Rauheit Scheibenverschleiß Härte, Brand, ...	Koordinatenmessmaschine Tastnadel Profilprojektor Gefügeschliffe

Bild 4-122
Auswahl an Kenngrößen und Sensorsystemen für die Schleifbearbeitung.

4.7.2 Einsatz von Sensoren in Schleifmaschinen

Der Einsatz von Messtechnik trägt zur Prozessüberwachung und zur Sicherung der Endqualität der Werkstücke bei. Die verwendete Sensorik dient dabei zur Ermittlung von Werkzeug- und Werkstückkennwerten sowie zur Erfassung der Maschinenfunktionalität und der Einflüsse äußererer Störgrößen. Neben den unterschiedlichen Messprinzipien lassen sich die Verfahren durch ihre örtliche und zeitliche Anordnung in In-Prozess, Prozessnah und Post-Prozess unterteilen. Bild 4-122 listet eine Auswahl an Kenngrößen und Sensorsystemen auf, die in den einzelnen Phasen des Prozesses eingesetzt werden.

Sensoren der In-Prozess-Variante liefern Daten zu den Prozesskräften, Schwingungen oder aber zum Schleifscheibenverschleiß. Sie müssen besonders robust und unempfindlich gegen äußere Einflüsse (z.B. Kühlschmierstoffe) gebaut sein. Prozessnahe Verfahren finden direkt im Anschluss an das Bearbeitungsverfahren statt und dienen in erster Linie, wie auch die zeitlich und örtlich versetzte Erfassung im Post-Prozess, zur Beurteilung der Werkstücke.

Neben der Überwachung der Maschinenzustände und der Beurteilung der Werkstücke dienen die Daten der Sensoren in der In-Prozessmessung auch zur Prozessregelung. Ziel dieser AC-Systeme (Adaptive Control) ist die Reduzierung der Prozesszeit sowie

Bild 4-123
Regelkreis zur Überwachung und Regelung des Schleifscheibenverschleißes mit einem Klein-Radar-Sensor nach Lange.

die Sicherung und Verbesserung der Werkstückqualität. Bild 4-123 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 Vorschubgeschwindigkeit 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. Der Kontaktverlust hat zur Folge, dass die Konditionierrolle ihre Wirkung verliert. Um dies auszuschließen besteht die Möglichkeit, mit Hilfe eines Radarsensors berührungslos den Abstand zur Schleifscheibenoberfläche bzw. die Durchmesserveränderung der Schleifscheibe zu ermitteln. Je nach Verschleißverhalten kann durch ein Regelsystem der Abrichtvorschub v_{frd} so angepasst werden, dass ein permanenter Konditionierenvorgang möglich ist.

4.7.3 Ansätze zur Miniaturisierung

In den letzten Jahren hat sich das Einsatzgebiet von Mikrosystemen stetig vergrößert. Ungebrochen wächst die Anzahl an mikrotechnischen Produkten in unserem Alltag. Die Herstellung von Strukturen mit Abmessungen im Mikrometerbereich ist die Voraussetzung für miniaturisierte Produkte für mechanische, fluidische, magnetische, optische und chemische Anwendungen. Unterschiedlichste Werkstoffe müssen hierfür bearbeitet werden. Die Strukturabmessungen von einigen Mikrometern und die geforderte Oberflächenrauheit im Submikrometerbereich stellen hohe Anforde-

Bild 4-124
Schleifwerkzeuge für das Mikroschleifen.

rungen an die Fertigungsverfahren. Für kleinste Strukturen in spröden und harten Werkstoffen eignet sich beispielsweise hervorragend das Verfahren Mikroschleifen.

Zur Strukturierung unterschiedlicher sprödharter Werkstoffe stehen sowohl miniaturisierte Umfangsschleifscheiben als auch Schleifstifte zur Verfügung, Bild 4-124. 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 Abrasivkörnern in einer Kunstharz-, Sintermetall- oder Nickelbindung. Die bei der Mikrobearbeitung zum Einsatz kommenden Abrasivkörner haben mittlere Korndurchmesser im Bereich zwischen 2 µm und 45 µm. Die Breite der Schleifscheiben variiert zwischen 20 µm und 1 mm. Während sich Mikroschleifscheiben vorwiegend für geradlinige Strukturen eignen, bieten Mikroschleifstifte die Möglichkeit, geschlossene Strukturen beliebiger Form herzustellen. Darüber hinaus ist mit ihnen die Herstellung kleinster Bohrungen möglich.

Konventionelle Mikroschleifstifte sind heute bis zu einem minimalen Durchmesser von 0,2 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 µm verwendet. Bei sehr kleinen Schleifstiftdurchmessern steigt die Bruchgefahr, auch bei geringen Schleifkräften. CVD-beschichtete Hartmetallschleifstifte eröffnen hier jedoch die Möglichkeit, eine weitere Reduzierung des Werkzeugdurchmessers zu erreichen. Die CVD-Diamantschicht zeichnet sich durch eine raue und schneidfreudige Struktur aus. Aufgrund der geringen Schichtdicke ist es hier möglich, Schleifstiftdurchmesser von minimal 60 µm zu realisieren (Bild 4-125). Neben dem Vorteil der kleineren Werkzeugdurchmesser bietet die freie und flexible Formgebung des Grundkörpers eine Fülle von denkbaren Schleifgeometrien. Die raue Diamantschicht ist etwa 10 µm dick und besitzt Strukturkorngrößen zwischen 1 µm bis 10 µm. Mit dieser kleinen Strukturkorngröße ist allerdings auch der Spanraum des Werkzeuges sehr gering, was zum Zusetzen der Schleif-

Bild 4-125
Kleinster Diamant-Mikroschleifstift (REM-Aufnahmen: Fraunhofer Institut Braunschweig).

Bild 4-126
Profilieren von Mikroschleifwerkzeugen.

stifte 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 im Gegensatz zu den Schleifstiften wie konventionelle große Schleifscheiben vor ihrem Einsatz konditioniert werden. Hierfür wird mit den Mikroschleifscheiben in einen Schärfstein eingeschliffen, um durch die abrasive Wirkung des Schärfsteins die metallische Bindung zurückzusetzen und damit den Kornüberstand sowie den Spanraum zu vergrößern. Schärfsteine bestehen meist aus gesintertem Siliciumcarbid oder Korund, ihre Härte und Dichte wird in Abhängigkeit von dem zu spanenden Werkstoff und den Prozessbedingungen gewählt. 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 verschleißen.

Mikroschleifscheiben erlauben die Herstellung gerader Nuten oder Trennschliffe. Das Querschnittprofil der erzeugten Nuten hängt von der Schleifscheibenform ab. Neben einem rechteckigen Profil werden gelegentlich auch Schleifscheiben mit V-Profil verwendet. Um dieses V-Profil zu erzeugen, müssen die rechteckigen Schleifscheiben profiliert werden. Als Konditionierwerkzeuge kommen Siliciumkarbid-Topfschleifscheiben oder Diamantprofilrollen zum Einsatz. Mit diesem Verfahren können derzeit Flankenwinkel mit einer Genauigkeit von 1° sowie minimale Spitzenradien an den Schleifscheiben von 10 µm erzeugt werden.

Das Profilieren der empfindlichen und filigranen Werkzeuge für das Mikroschleifen erfordert eine stabile, schwingungsarme Konditioniervorrichtung.

Bild 4-126 zeigt eine experimentelle Konditioniervorrichtung 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 Werkzeugspannung der Mikroschleifwerkzeuge erfolgt über Präzisionsspannzangen und eine Hohlschaftkegelaufnahme, beides stellt einen reproduzierbaren Werkzeugwechsel sicher. Das Profilieren der Mikroschleifwerkzeuge wird wegen des geringen Zerspanungsvolumens in dieser Vorrichtung ohne Kühlschmierstoff durchgeführt.

Die sog. duktile Zerspanung ermöglicht beim Mikroschleifen über die Fertigung von hohen Oberflächengüten und kleinsten Kantenausbrüchen hinaus eine Vermeidung der Beeinflussung der Werkstücksrandzone durch Mikrorisse und Versatz. Die duktile Zerspanung hat somit einen entscheidenden Einfluss auf das erreichbare Bearbeitungsergebnis. So ist es möglich, Mikrostrukturen mit Abmessungen von 5 µm bis 6 µm in einkristallines Silizium

Bild 4-127
Optimierte Prozessparameter für die Mikrostrukturierung.

und Hartmetall zu schleifen. Der bei diesen Strukturgrößen erzielbare Aspektquotient s_e liegt bei etwa 15:1. Eine weitere Reduzierung der Strukturgröße ist derzeit aufgrund der mechanischen Belastung durch die Schleifkräfte noch nicht möglich.

Für das Erreichen eines bestmöglichen Schleifergebnisses ist aber immer eine auf den Werkstoff bezogene Prozessoptimierung erforderlich, wie Bild 4-127 beispielhaft zeigt. Die für einen duktilen oder spröden Zerspanungsmodus erforderliche Spandicke kann über die gewählten Einstellgrößen variiert werden. Beim Mikroschleifen mit Umfangsschleifscheiben liegen die gewählten Schnittgeschwindigkeiten im Bereich von v_c = 60 m/s bis 100 m/s. Die Vorschubgeschwindigkeiten sind dagegen sehr klein. Die Zustellungen sind im Quotient zur Schleifscheibenbreite relativ hoch. Daher handelt es sich beim Mikroschleifen im Allgem. um einen Tiefschleifprozess.

Zusammengefasst ist das Mikroschleifen ein gutes Beispiel für den Einsatz von konventionellen Fertigungsverfahren zur Herstellung von verschiedenartigen Mikrostrukturen und Mikrobauteilen. Abhängig von der Bearbeitungsaufgabe stehen unterschiedliche Umfangsschleifscheiben und Schleifstifte zur Verfügung, die eine qualitativ hochwertige Bearbeitung von spröden und harten Werkstoffen ermöglichen.

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 kleinster 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. Hier besteht ebenfalls ein großer Entwicklungsbedarf.

4.7.4 Honen

Beim Honen wird mit einem Werkzeug aus gebundenem Korn unter ständiger Flächenberührung Werkstückstoff zerspant. 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 Kühlschmierstoffe sind fast alle technisch relevanten Werkstoffe heutzutage honbar.

4.7.4.1 Kinematik beim Honen

Die Kinematik des Honverfahrens setzt sich aus einer axialen, einer tangentialen und einer radialen 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. Anhand der Kinematik lässt sich das Honen in Außenrund-, Innenrund- und Planhonen (auch als Flachhonen bezeichnet) unterteilen, Bild 4-128. Nach der Länge der Hubbewegung werden auch das Langhub- und das 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 (Bild 4-129):

$$v_c = \sqrt{v_a^2 + v_t^2} \qquad [4\text{-}71]$$

Bild 4-128
Kinematik und Verfahren beim Honen.

Bild 4-129
Geschwindigkeiten und Kräfte beim Langhubhonen.

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:

$$\alpha = 2 \arctan \frac{v_a}{v_t} \qquad [4\text{-}72]$$

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:

$$F_c = \sqrt{F_a^2 + F_t^2 + F_n^2} \qquad [4\text{-}73]$$

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 (Bild 4-130). Durch den Konuswinkel γ findet auch eine Kraftübersetzung statt, so dass der Honleistenanpressdruck in Abhängigkeit der Zustellkraft angegeben werden kann:

$$p_n = \frac{F_z}{m \cdot l_h \cdot b_h \cdot \tan \gamma} \qquad [4\text{-}74]$$

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 (Bild 4-131). 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 kraftgeregelt erfolgen.

Bild 4-130
Schnittdarstellung eines Honwerkzeugs zur Bohrungsbearbeitung.

Die erreichbare Zylinderformgenauigkeit hängt beim Honen von der korrekten Auslegung der Honleistenlänge l_h, der Honleistenbreite b_h und der oberen und unteren Überlauflänge $l_{ü1}$ und $l_{ü2}$ ab (siehe Bild 4-129 links unten). Der mittlere Bereich der Bohrung wird bei einer vorgegebenen Anzahl von Umdrehungen öfter übergehont, als der obere und der untere Bereich (siehe Bild 4-129 rechts unten). Dies allein hätte einen tonnenförmigen Formfehler zur Folge. Durch die obere und untere Überlauflänge 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, Bild 4-132. Zusätzlich müssen Länge und Breite der Honleiste ausreichend groß dimensioniert sein, um vorhandenen Formfehlern nicht nachzulaufen, sondern diese 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.

Bild 4-131
Kraft- und formschlüssige Zustellsysteme

Bild 4-132
Einfluss des Honleistenüberlaufs auf die Bohrungsform (nach Flores).

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 Bohrungsachse können ausgeglichen werden. Sind Werkzeug und Werkstück starr gelagert, kann durch das Honen auch eine Korrektur der Bohrungsposition er-

Bild 4-133
Prinzipieller Aufbau eines Dornhonwerkzeugs mit konischer Schneidenzone (nach Kappmeyer).

Bild 4-134
Verschleißmechanismen an Honleisten (nach Flores).

folgen. 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 1.000 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 Schneidleisten (vgl. Bild 4-130) zum Einsatz kommen. Bei kleineren Bohrungen kommt oft das sog. Dornhonen zum Einsatz. Hierbei wird ein vollflächig mit Schneidbelag besetztes Werkzeug, das eine konische Schneidenzone und eine auf den Solldurchmesser eingestellte zylindrische Kalibrierzone aufweist eingesetzt, Bild 4-133. Da sich der auftretende Schneidbelagverschleiß direkt auf das Endmaß der Bohrung auswirkt, weisen 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

Bild 4-135
Kornsplitterung und -ausbruch an D213 Diamanthonleiste.

Zerspanungsarbeit bereits beim ersten Abwärtshub geleistet wird. Ebenfalls zu den nicht aufweitbaren Honwerkzeugen gehören die für das (Flach-/) Planhonen verwendeten Honräder sowie die für das Verzahnungshonen eingesetzten Honringe.

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, Bild 4-134. 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 Selbstschärfeffekt 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 (Bild 4-135).

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 gehonte Oberflächen meist Funktionsoberflächen darstellen. So können Fehler in der Prozessführung beim Honen der Zylinderlaufbahnen von Verbrennungsmotoren z.B. zu unzulässig hohem Ölverbrauch oder schlimmstenfalls sogar zu Motorschäden führen. Daher ist das Wissen um 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 (erreichbare Taktzeit) und den Honleistenverschleiß zu bewerten. Die Eingangsgrößen des Honprozesses können nach Einstellgrößen, Werkzeugeigenschaf-

Bild 4-136
Systemdarstellung des Honprozesses nach v. See.

ten, Werkstückeigenschaften und Kühlschmierung unterteilt werden (Bild 4-136).

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 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. Sowohl die konstruktiven Eigenschaften, wie die Zustellkraftübersetzung durch den Konuswinkel oder Reibungsverluste durch die mechanischen Kraftübertragungselemente, als auch die Beschaffenheit der Honleiste wirken sich auf das Honergebnis aus. Neben der bereits erwähnten Selbstschärfung müssen die Honleisten eine auf den zu honenden Bohrungsdurchmesser abgerichtete Geometrie aufweisen, um die geforderte Maß- und Formgenauigkeit mit hoher Prozesssicherzeit zu erzielen.

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. Durch die Geometrie und die damit verbundenen lokalen Nachgiebigkeiten des Werkstücks können über die Bearbeitungsfläche unterschiedliche Anteile zerspankraftbedingter elastischer Verformungen wäh-

Bild 4-137
Schnittdarstellung durch ein Honwerkzeug für pneumatische Durchmessermessung.

rend des Honens auftreten. Mögliche Folgen sind Maß- und Formfehler des gehonten Werkstücks.

Des Weiteren kann das Honergebnis 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 Kühlfunktion eine untergeordnete Rolle. Die Hauptaufgabe des Kühlschmierstoffes besteht somit in der Schmierung und der Späneabfuhr, um ein Zusetzen der Honleiste 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. Emulsionen kommen häufig in der Großserienfertigung 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 (Bild 4-137). Hierdurch kann der Honprozess bei Erreichen eines definierten Solldurchmessers automatisch abgebrochen werden.

Bei der Honbearbeitung von Graugusswerkstoffen kann es bei hohen Anpressdrücken zu Verquetschungen und Verschmierungen der Grafitlamellen kommen. Dieser sog. „Blechmantel“ tritt auf, wenn bei zunehmender Kornabstumpfung der Werkstückstoff nicht mehr sauber getrennt, sondern zunehmend plastisch verformt wird. Insbesondere bei Zylinderlaufflächen muss die Bildung eines Blechmantels durch die Wahl geeigneter Prozessparameter verhindert werden, da offene Grafitlamellen für gute Notlaufeigenschaften des Motors notwendig sind. Ein weiteres Problem stellen Aufwürfe an den Bearbeitungsriefen der gehonten Oberfläche dar. Dieser sog. „Flitter“ wird in der Praxis häufig durch ein vor der letzten Honstufe durchgeführtes Hochdruckwasserstrahlen entfernt.

Bild 4-138
Schematischer Profilschnitt beim Plateauhonen nach Vor- und Fertighonen.

Bild 4-139
Radiale Deformation der Zylinderlaufbahnen nach Wiens (Vierzylinder-Reihenmotor der Oberklasse).

4.7.4.4 Anwendungsbeispiele

Im Folgenden werden zwei Beispiele für die Anwendungen des Honverfahrens aus der Fertigung von Verbrennungsmotoren erörtert.

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 des Motors erzielt. Die plateauartige Topografie wird durch das Vorhonen mit einer grobkörnigen Diamanthonleiste (z.B. D 150) und das anschließende Fertighonen mit einer feinkörnigen Honleiste erreicht. Beim Vorhonen wird zunächst eine raue Oberfläche erzielt, deren Rauheitsspitzen durch das Fertighonen entfernt werden (Bild 4-138).

Formhonen

Das Formhonen stellt eine Weiterentwicklung des konventionellen Honverfahrens für die Bearbeitung von Zylinderkurbelgehäusen von Verbrennungsmotoren dar. Wie bereits erwähnt, eignet sich das Honen vorzüglich, um hohe Zylinderformgenauigkeiten zu erreichen. 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 (Bild 4-139). 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 Betriebs-

punkt des Motors eine ideal zylindrische Form der Lauffläche ein.

4.7.5 Läppen und Feinschleifen mit Läppkinematik

Bei Werkstücken, an die höchste Anforderungen hinsichtlich Oberflächenqualität sowie Form- und Maßgenauigkeit gestellt werden, wird in der Regel das Läppen oder immer häufiger auch das Feinschleifen mit Läppkinematik eingesetzt.

4.7.5.1 Läppen

Grundlagen

Beim Läppen wird im Gegensatz zum Honen und Schleifen mit losem Korn gearbeitet. Es können nahezu alle Werkstoffe bearbeitet werden, z.B. alle Metalle, Keramiken, Gläser, Naturstoffe, Halbleiter und Kunststoffe, aber auch andere Stoffe wie z.B. 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 arithmetischen Mittenrauwert R_a = 0,02-16 µm, einer Planparallelität zwischen 1-2 µm und einem Ebenheitsfehler unter 0,6 µm.

Hauptvorteile des Verfahrens sind die Werkstückbearbeitung ohne Einspannung, die Möglichkeit auch kleinste Bauteile mit einer Dicke unter 0,1 mm (z.B. Wafer) zu fertigen sowie die Vermeidung von Wärme- und Spannungsverzug an der geläppten 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 4-24 µm verfestigt wird. Dadurch versprödet der Werkstoff bis zur Überschreitung der Werkstofftrennfestigkeit und kleine Partikel platzen ab.

Die Einteilung der Läppverfahren in Planläppen, Rundläppen, Schraubläppen, Profilläppen und Wälzläppen erfolgt nach DIN 8589. Zusätzlich existieren Sonderläppverfahren, durch die jedoch nur die Oberflächenqualität verbessert werden kann, während die Maß- und Formgenauigkeit nicht beeinflusst wird.

Am häufigsten werden die Verfahren Planläppen, Außenrundläppen mit Linienberührung und Innenrundläppen eingesetzt.

Einfluss von Prozesskenngrößen auf das Läppergebnis

Neben der Läppscheibe, dem Läppmittel und dem Werkstückstoff wird das Läppergebnis auch 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 zwischen 0,1-0,5 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 Läppflüssigkeit sowie die zugeführte Menge an Läppmittel das Zerspanverhalten. Das Mischungsverhältnis sollte etwa zwischen 150-200 g/l betragen. Ein zu dicker Läppfilm bei kleinen Körnungen würde eine Werkstoffzerspanung verhindern, so dass hier eine dünnflüssigere Läppsuspension erforderlich ist.

Am häufigsten werden Läppkörner mit einem mittleren Korndurchmesser unter 20 µm eingesetzt. Es existieren jedoch auch Körnungen zwischen 0,1 µm für feinste Oberflächen und bis zu 150 µm für die Schruppbearbeitung. 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 Korn-

werkstoff eingesetzt, aber auch Diamant und Bornitrid finden Anwendung, wenn harte Werkstoffe wie Keramiken oder Hartmetall bearbeitet werden sollen (Tabelle 4-4).

Tabelle 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 (Silzium, Germanium), Grauguss
Siliziumkarbid	Vergütete und legierte Stähle, Grauguss, Glas, Porzellan
Borkarbid	Hartmetalle, technische Keramiken
Diamant	Hartmetalle, technische Keramiken

Bild 4-140
Rauheit in Abhängigkeit vom Läppdruck und mittleren Korndurchmesser (nach Lichtenberg).

Insbesondere bei weichen Werkstoffen führen große Läppkörner und höhere Läppdrücke zu großen Riefen und tiefen Eindrücken auf der Oberfläche und damit auch zu einer höheren Rauheit (Bild 4-140). 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 einer reduzierten Rauheit, da der Anteil an gesplitterten Körnern zunimmt und der Korndurchmesser sinkt.

Eine Steigerung des Läppdrucks führt nicht nur zu einer erhöhten Rauheit, sondern auch zu einem gesteigerten Zeitspanvolumen, bis ein Grenzläppdruck erreicht ist, bei dem der Läppfilm abreißt und die Körner stark splittern. 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 (Bild 4-141).

Die Läppflüssigkeit sorgt für die erforderliche Schmierung und Kühlung im Läppprozess, um eine Randzonenschädigung der Werkstücke zu verhindern.

Bild 4-141
Einfluss der Läppkorndichte auf das Zeitspanvolumen (nach Lichtenberg).

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 Scheiben die Läppkörner vorwiegend in

Bild 4-142
Prinzip des Läppens.

Bild 4-143
Bahnkurven der Werkstücke beim Läppen (nach Ardelt).

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 die Nutung zu einem gesteigerten Zeitspanvolumen.

Läppverfahren

Planläppen

Am häufigsten wird das Läppen ebener Bauteile auf Ein- und Zweischeibenmaschinen durchgeführt. Dabei liegen die Werkstücke in sog. Käfigen, die wiederum von Laufringen gehalten werden, die wie die Planeten eines Planetengetriebes 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 (Bild 4-142).

Die Zweischeibenmaschinen 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 zykloidische Bahnformen der Werkstücke (Bild 4-143). Die Drehrichtung und Rotationsgeschwindigkeit der Läuferringe müssen daher so an die Läppscheibengeschwindigkeit angepasst werden, dass ein möglichst gleichmäßiger Läppscheibenverschleiß auftritt und die Läpp-

scheiben eben bleiben. So kann gewährleistet werden, dass die Werkstücke eine hohe Planparallelität und Maßgenauigkeit aufweisen. Das Abrichten der Läppscheiben erfolgt beim Zweischeibensystem über ein Einläppen beider Scheiben aufeinander oder durch Abdreheinrichtungen.

Rundläppen
Das Außenrundläppen wird äquivalent zum Planläppen auf Zweischeibenmaschinen 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.

Kugelläppen
Auch das Läppen von Kugeln erfolgt auf Zweischeibenmaschinen, wobei die untere Läppscheibe mehrere Rillen aufweist und die obere glatt ist. Hieraus resultiert eine Dreipunktberührung, die dazu führt, dass sich die Kugel in der Rille dreht und das Werkstoff gleichmäßig entfernt wird.

4.7.5.2 Polieren

Das Polieren unterscheidet sich vom Läppen nur in der verwendeten Korngröße und ist daher nicht als eigenständiges Verfahren in der Norm aufgeführt. Daher können auch dieselben Werkstoffe bearbeitet werden wie beim Läppen.

Die Trägerkörper beim Polieren sind ausschließlich nachgiebig, so dass die losen Körner eingebettet werden und nicht auf dem Trägerkörper abrollen wie beim Läppen. Die scharfen Körner führen zu einer spanabhebenden Bearbeitung der Werkstücke. Die Einebnung der Oberfläche wird dann durch abgerundete Körner erreicht. Zwischen dem Werkstück und dem Trägerkörper erfolgt eine starke Reibung, die zu Temperaturen von 200°C bis 600°C führt. 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 haben den Vorteil, dass sie gleichmäßiger aufgetragen werden können und somit der Verbrauch reduziert wird. Zudem ist die Automatisierung der Bindemittelzufuhr für flüssige Medien einfacher.

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 Polierdauer 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

Feinschleifen mit Läppkinematik unter Verwendung von Schleifscheiben
In den vergangenen beiden Jahrzehnten wurde das Läppen zunehmend durch das Feinschleifen mit Läppkinematik verdrängt. Läppen wird heute nur noch dann eingesetzt, wenn eine gleichmäßige Oberflächentextur ohne Riefen gefordert ist. Trotzdem ist das Feinschleifen mit Läppkinematik noch nicht in die Normung aufgenommen, so dass noch weitere Bezeichnungen wie z.B. Flachhonen, Läppschleifen oder Planschleifen mit Planetenkinematik verwendet werden. Die ersten Maschinen zum Feinschleifen mit Läppkinematik waren Läppmaschinen, bei denen die Läppscheibe gegen eine Schleifscheibe

Bild 4-144
Maschinenkonzept zur Verwendung von Folienwerkzeugen für das Feinschleifen mit Läppkinematik

ausgetauscht wurde. Die Zerspanung erfolgt wie bei anderen Schleifprozessen unter Einsatz eines Kühlschmiermittels.

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 zudem charakterisiert durch einen kühlen Schliff und geringe Randzonenschädigungen. Die erreichbaren Rauheiten liegen unter $R_z = 1$ µm und die Ebenheiten und Planparallelitäten liegen unter 2 µm. Gegenüber dem Läppen fallen wesentlich geringere Entsorgungskosten an und der Reinigungsaufwand der bearbeiteten Werkstücke ist deutlich reduziert. Ein Spannen der Bauteile ist wie beim Läppen nicht erforderlich, sondern lediglich eine Führung der Werkstücke in Transportscheiben.

Als Kornwerkstoff werden vorwiegen Diamant und CBN eingesetzt, da sie eine hohe Verschleißbeständigkeit haben und das Abrichten der Schleifscheiben (mit Durchmessern bis zu 1500 mm), sehr aufwändig ist. Die Korngrößen liegen je nach Anwendungsfall bei bis zu 180 µm für hohe Zerspanraten und unter 20 µm bei Rauheitsanforderungen unter $R_z = 1$ µm. 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.

Entsprechend zum Läppen werden die Drehzahlen von Läuferringen und Schleifscheiben so eingestellt, dass ein möglichst gleichmäßiger Verschleiß der Schleifscheiben erfolgt und die Abrichtintervalle möglichst lang sind. Während im 3-Schichtbetrieb früher alle 2 Arbeitstage ein Abrichten erfolgen musste, konnten die Abrichtintervalle heute durch den Einsatz einer selbstschärfenden Schleifscheibenbindung auf 10 Tage erhöht werden. Neue Maschinentechniken zum Feinschleifen mit Läppkinematik erlauben heute Drehzahlen bis zu 2000 1/min, so dass die Schleifdauer deutlich reduziert werden kann.

Feinschleifen mit Läppkinematik unter Verwendung von Folienwerkzeugen

Ein weiterer Ansatz zum Feinschleifen mit Läppkinematik ist der Einsatz von Folienwerkzeugen anstelle von Schleifscheiben. Das wird beim Maschinenkonzept „Fine Grinder“ verwirklicht. Auf diese Weise wird die rauheitsbestimmende Komponente, die Schleiffolie, von der formbestimmenden Komponente, der Trägerplatte getrennt. Es tritt kein Formverschleiß des Werkzeugs auf. Die Schleiffolie wird mit konstantem Vorschub über die Trägerplatte geführt und befindet sich in einem Kasset-

Bild 4-145
Verfahrensvergleich Läppen, Feinschleifen mit Schleifscheiben und Feinschleifen mit Folienwerkzeugen (Fine Grinder).

tensystem, 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 Anpresstempel 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 (Bild 4-144).

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 konstante Werkstückhöhenreduktion erreicht wird (Bild 4-145).

4.7.6 Gleitschleifen

Beim Gleitschleifen bewegen sich viele einzelne Schleifkörper, so genannte Chips, relativ zur Werkstückoberfläche und führen dabei zu einer Spanabnahme. Eine wasserlösliche Chemikalienmischung (Compound) ergänzt die spanende Wirkung der Schleifkörper.

Die Maß- und Formgenauigkeit des Werkstücks kann durch dieses Verfahren nicht mehr verbessert werden. Es wird daher hauptsächlich zum Entgraten, Entzundern, Entrosten, Reinigen sowie zum Glätten und Polieren eingesetzt. Ein wesentlicher Anwendungsfall ist die Vorbehandlung von Oberflächen vor einer galvanischen Beschichtung, z.B. Verchromen. Neben allen Metallen können auch Holz und Kunststoffe bearbeitet werden.

Es kommen unterschiedlichste Werkstoffe als Schleifkörper zum Einsatz. Die einfachsten sind gebrochene Natursteine, wie z.B. Basalt oder Dolomit sowie gebrochene synthetische Schleifkörper, die hohe Zerspanraten zulassen. Zudem existieren vorgeformte synthetische Schleifkörper mit unterschiedlichsten Geometrien (z.B. Kugeln, Zylinder, …) in keramischer oder metallischer Bindung und organisch gebundene Körper. Welcher Schleifkörper eingesetzt wird hängt davon ab, welcher Werkstoff bearbeitet werden soll, wie der Ausgangszustand ist und welche Anlage zur Verfügung steht.

Die Compoundlösung hat die Aufgaben, die Schleifwirkung zu verstärken sowie die Chips und Werkstücke zu reinigen. Zudem sorgt sie für den Korrosionsschutz. Dabei sollte sie abwassertechnisch neutral sein und eine einfache Reinigung der Werkstücke zulassen.

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

Bild 4-146
Drehbare Trommel mit Werkstücken und Schleifkörpern, schematisch.

(z.B. Bearbeitung langer Bauteile) kann ein Mischquotient von 10:1 erforderlich sein.

Abhängig von der Erzeugung der Relativbewegung wird zwischen dem Trommel-, Vibrations- und Fliehkraftverfahren unterschieden.

Beim Trommelverfahren werden die Schleifkörper und Werkstücke durch die Rotation mitgenommen, bis die Schwerkraft zu einem Abgleiten führt. Die Umfangsgeschwindigkeit bestimmt die Gleitbewegung, während die Schleifkraft von der Schwerkraft bestimmt wird. Bei steigender Umfangsgeschwindigkeit tritt neben dem Gleiten auch noch ein Rollen auf (Bild 4-146).

Bild 4-147
Fliehkraftverfahren: feststehender Behälter mit rotierendem Boden.

Um beim Vibrationsschleifen die Relativbewegung zu erzeugen, wird über eine drehbar gelagerte Unwuchtmasse oder einen direkt angebrachten Schwingungsmotor eine Schwingung erzeugt. Es werden sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung Schwingungen aufgebracht, die zu einer Umwälzbewegung 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.

Um höhere Zeitspanvolumina zu erreichen, wird das Fliehkraftverfahren eingesetzt, bei dem die Zentrifugalkraft genutzt wird. 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, Bild 4-147.

4.8 Abtragende Verfahren

Abtragen ist Fertigen durch Abtrennen von Stoffteilchen von einem festen Körper auf nichtmechanischem Wege. Das Abtragen bezieht sich hierbei sowohl auf das Entfernen von Werkstoffschichten als auch auf das Trennen von Werkstückteilen. Diese Verfahren treten zunehmend in Konkurrenz zu spanenden Fertigungsverfahren. So sind z. B. die chemischen bzw. elektrochemischen Abtrageverfahren für Mikrobearbeitungen von höchster Genauigkeit unersetzlich (Herstellung von Leiterplatten, in der Präzisionsmechanik und in der Luftfahrttechnik).

Die Gruppe 3.4 der abtragenden Verfahren unterteilt sich nach DIN 8590 in die Untergruppen 3.4.1 Thermisches Abtragen, 3.4.2 Chemisches Abtragen und 3.4.3 Elektrochemisches Abtragen (siehe auch Bild 4-1).

4.8.1 Thermisches Abtragen

Hierzu gehören das thermische Abtragen durch Gas (Brennhobeln, Brennschneiden), Abtragen durch Funkenentladung (Erodieren) und Abtragen durch Strahl (Licht, Laser, Elektronen). Die Verfahren des thermischen Schneidens (Autogenes Brennschneiden, Plasmaschneiden, Laserschneiden) haben eine so große Bedeutung für die Blechteilherstellung und für die Fugenvorbereitung beim Schmelzschweißen erlangt, dass sie in einem eigenen Abschnitt (Abschn. 4.9) behandelt werden. Das gilt ebenso für das Wasserstrahlschneiden (Abschn. 4.10) als in der industriellen Praxis erprobtes abrasives Abtragverfahren.

Funkenerosives Abtragen (Erodieren)
Beim Erodieren (EDM: Elektro Discharge Machining) werden elektrisch leitende Werkstücke durch elektrische Funkenentladungen in einem Dielektrikum (z. B. Petroleum) bearbeitet. Die dielektrische Flüssigkeit dient zum Ladungsaustausch und gleichzeitig als Spülmittel zum Abtransport der abgetragenen Teilchen. Die aufeinanderfolgenden, zeitlich getrennten, meist nichtstationären Entladungen entstehen durch Funkenspannungen von ca. 20 V. Je nach Abstand der Elektroden und der Durchschlagfestigkeit des Dielektrikums bildet sich dabei ein energiereicher Plasmakanal, der ein Schmelzen bzw. Verdampfen eines kleinen Materialvolumens bewirkt.

Bild 4-148
Varianten der funkenerosiven Bearbeitung EDM (nach J. Flimm, Hanser-Verlag).
a) funkenerosives Senken, b) Senken mit überlagerter Bewegung, c) Schneiden mit ablaufender Drahtelektrode

Bild 4-149
Funkenerosive Fertigungsanlage, schematisch (nach W. König und F. Klocke).

Bild 4-150
Abtragrate und rel. Verschleiß beim Senkerodieren (nach W. König und F. Klocke).

Die Verfahren der Funkenerosion können eingeteilt werden in (Bild 4-148):

- funkenerosives Senken, Bohren und Gravieren,
- funkenerosives Senken mit überlagerter Bewegung,
- funkenerosives Schneiden mit Draht oder Blatt.

Für jedes Senkerodieren ist eine spezielle Werkzeugelektrode erforderlich, die ihre Oberflächenkontur im Werkstück abbildet. Die Vorschubbewegung wird meist in der *z*-Achse durch die an der Pinole befestigte Elektrode ausgeführt. Den Aufbau einer funkenerosiven Fertigungsanlage zeigt Bild 4-149. Den größten Einfluss auf die Abtrag- und Verschleißkennwerte beim Senkprozess hat die Entladeenergie W_e, die durch den Entladestrom i_e (10 bis 500 A) und die Entladedauer t_e (10 bis 2000 µs) variiert werden kann. Bild 4-150 zeigt die Abtragrate V_w am Werkstück (max. 3000 mm³/min) in Abhängigkeit von der Impulsdauer t_i. Der Abfall nach den Maxima wird auf eine erhöhte Wärmeableitung durch die Ausdehnung des Entladekanals bei Impulsdauerwerten größer als t_{opt} zurückgeführt.

Der relative Verschleiß von Kupferelektroden steigt mit dem Entladestrom ebenfalls an, sinkt aber mit der Impulsdauer ab.

Grafitelektroden haben eine andere Verschleißkennlinie als metallische Werkstoffe. Während der relative Verschleiß von Elektrolytkupfer mit steigendem

Bild 4-151
Geometrische Alternativen beim konischen Schneiden (nach AGIE).

Entladestrom (Impulsdauer = konst.) wächst, nimmt er bei Grafit ab. Daher sind Grafitelektroden sehr gut für Schrupparbeiten bei hohem Entladestrom und langer Impulsdauer einzusetzen. Da die Wärmeausdehnung nur 1/4 von Kupfer beträgt, ist auch die Bearbeitungsgenauigkeit höher.

Die geringere Dichte wirkt sich bei Elektroden mit großem Volumen positiv aus. Bei der Verwendung von Feinstkorngrafit (Korngröße < 5 µm) können die Oberflächenwerte $Ra = 0{,}8$ µm erreichen.

Das funkenerosive Schneiden mit Draht hat sich bei der Herstellung zylindrischer bzw. konischer Durchbrüche in der Industrie weitgehend durchgesetzt. Besonders in der Stanzereitechnik können Schneidwerkzeuge (Stempel und Matrize) mittels Drahterosion aus gehärtetem Halbzeug kostengünstig hergestellt werden. Eine Drahterosionsanlage besteht aus einem Gestell mit den Drahtführungen, 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 in x- und y-Richtung beliebige zylindrische oder konische Konturen erzeugt werden können (Bild 4-151).

Die für das Drahtschneiden verwendeten Impulsgeneratoren arbeiten mit Spannungen bis 400 V und Strömen bis ca. 250 A. Als Dielektrikum wird meist entionisiertes Wasser verwendet. Da der relativ dünne Draht nicht sehr hoch beansprucht werden kann, wird die Impulsdauer auf 0,2 bis 4 µs begrenzt. Die Pausendauer beträgt dagegen das 20fache, so dass ein hoher Entladestrom bei niedriger Amperebelastung entsteht. Um die elektrischen Verluste so klein wie möglich zu halten, liegen die Schleifkontakte in der Drahtführung dicht an der Wirkfuge.

Oft wird dem Voll- oder Schnellschnitt, bei dem die Hauptkontur mit einer möglichst hohen Schnittrate erzeugt werden soll, ein Fein- oder Schlichtschnitt nachgeschaltet. Dadurch kann eine wesentlich bessere Oberflächengüte erzeugt werden.

Als Leistungskenngröße wird beim funkenerosiven Schneiden die sog. Schnittrate V_w verwendet: $V_w = v_f\, h$, wobei die Vorschubgeschwindigkeit v_f des Drahts senkrecht zur Ablaufrichtung mit der Werkstückhöhe h verknüpft ist. 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, Bild 4-152.

Als Elektrodendraht wird Messing (CuZn37) verwendet, da Zink großen Einfluss auf die Bedingungen in der Wirkfuge hat. Es verdampft während der Entladung und verbessert die Zündfähigkeit im Spalt. Da es sich mit einem Oxidfilm überzieht, wird ein Aneinanderhaften der Partikel erschwert.

Bild 4-152
Abhängigkeit der Schnittrate V_w von der Impulsfrequenz und Drahtart (Quelle: WZL, TH Aachen).

Als weitere Anwendungsgebiete neben den Schneidwerkzeugen kommt für das Drahterodieren der Bau von Extrudier- und Strangpresswerkzeugen und die Herstellung von Spritz- und Druckgussformen in Betracht. Moderne Schneidanlagen weisen eine Positioniergenauigkeit von < 1 µm und eine Umrisstoleranz von ± 3 µm auf. Durch die hohen Schnittraten > 300 mm²/min bei der Bearbeitung von Stahlwerkstoffen wird das Drahterodieren auch in der Serienfertigung eingesetzt. Ein Beispiel geht aus Bild 4-153 hervor, das eine funkenerosiv geschnittene Statorschaufel zeigt, bei der keine Nacharbeit nötig ist.

Die Oberfläche erodierter Werkstücke wird charakterisiert durch die Überlagerung einzelner Entladekrater, sie ist daher narbig und weist keine gerichteten Bearbeitungsspuren auf. Zur überschlägigen Beurteilung bzw. Klassifizierung wurde vom VDI ein *Oberflächennormal* geschaffen. Die Rauheit der Oberfläche wird durch die Größe der einzelnen Krater und damit durch die Entladeenergie bestimmt. Größere Erosionskrater führen zu einer größeren Rauheit (Bild 4-154). Für die Rauheitskennwerte *Ra* und *Rz* gilt bei funkenerosiv erzeugten Oberflächen (fast unabhängig von Werkstoffpaarung und Einstellparametern): $Rz = 5\ Ra$.

Bild 4-153
Funkenerosiv geschnittene Statorschaufel (nach AGIE).

Bild 4-154
Oberflächenrauheit in Abhängigkeit von der Entladungsenergie beim Erodieren (Quelle: WZL, TH Aachen).

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

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 Korngrenzenätzung unter dem Metall- oder Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) sichtbar machen.

Ein weiteres Beispiel für chemisches Abtragen ist das Ätzen von Glas, um Ornamente und Beschriftungen aufzubringen oder eine mattierte Oberfläche zu erzeugen. Als Ätzmittel wird Flusssäure (Fluorwasserstoff) HF verwendet. Es entstehen das flüchtige Siliciumtetrafluorid und Wasser:

$$SiO_2 + 4\ HF \rightarrow SiF_4 + H_2O. \qquad [4\text{-}75]$$

Zuvor werden alle Partien, die nicht mit dem Ätzmedium in Berührung kommen sollen, mit Wachs, Paraffin oder Harzschichten abgedeckt. Man kann natürlich auch die Schriften, Ornamente usw. in die

Schutzschichten einritzen. 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.

4.8.2.2 Thermisch-chemisches Entgraten (TEM)

Bei der Thermischen Entgrat-Methode (TEM) werden in einer mit einem Sauerstoff-Brenngasgemisch gefüllten Kammer die am Werkstück befindlichen Grate verbrannt (Bild 4-155). Der eigentliche Verbrennungsvorgang dauert nur wenige Millisekunden, so dass die Werkstücke nur unwesentlich erwärmt werden (ca. 100 °C bis 190 °C je nach Wärmekapazität des Werkstückes).

Durch den schlagartigen Temperaturanstieg, der je nach Gasgemisch und Gasmenge bis zu 3000 °C betragen kann, werden alle Werkstückpartien überhitzt, die ein großes Oberflächen/ Volumenverhältnis haben. Dies sind in aller Regel die Grate. Aufgrund ihrer großen Oberfläche absorbieren sie sehr viel mehr Strahlungswärme, als über die relativ kleinen Gratquerschnitte abgeführt werden kann. Infolgedessen kommt es zu einem Wärmestau im Grat, der das Anzünden und anschließende Verbrennen mit freiem Sauerstoff ermöglicht.

Bild 4-155
Druckkammer für das Thermische Entgraten und Werkstückbeispiel mit Grat.

Die Anlage besteht aus einem Maschinengestell, in dem die als Glocke ausgebildete zylindrische Entgratkammer eingebaut ist. Ein Rundschalttisch, auf dem je nach Anlagenmodell 2, 5, oder 6 Schließteller lagern, ist in die Maschine integriert. Die Schließteller dienen gleichzeitig als Werkstückauflage oder als Auflage für vielleicht erforderliche Werkstückhaltevorrichtungen. Sie werden außerhalb der Arbeitszone be- und entladen und schwenken unter die Entgratkammer. Der Schließteller wird hydraulisch oder mechanisch von unten gegen die Entgratkammer gepresst und schließt dort gasdicht ab.

Die für die jeweilige Entgrataufgabe erforderliche Gasmenge wird in Gaszylindern abgemessen und hydraulisch in die Entgratkammer eingeschoben. In einem vorgeschalteten Mischblock werden die Gase gleichmäßig gemischt und nach dem Verschließen der Gasventile durch eine Zündkerze gezündet.

Als Brenngase können Erdgas, Methan oder Wasserstoff verwendet werden.

Stahl- und Graugussteile lassen sich von scharfkantig gratfrei bis zu kleinen Kantenverrundungen problemlos entgraten, Bild 4-156.

Zink- und Aluminiumteile werden bei Zerspangraten scharfkantig gratfrei, während Formteilungsgrate mit dickem Gratfuß bei Druckguss bis auf kleine Aufwürfe reduziert werden können.

Messingteile lassen sich scharfkantig gratfrei bis zu einem kleinen Kantenbruch bearbeiten.

Mit **Thermoplasten** lassen sich lösliche Schwimmhäute in Hohlkörpern oder Armaturenteilen entgraten, die evtl. durch Werkzeugverschleiß auftreten. Kanten werden dabei nicht angegriffen.

Bild 4-156
Entgratbeispiel (Fa. Benseler Entgratungen GmbH).

4.8.3 Elektrochemisches Abtragen

Das elektrochemische Abtragen (ECM) beruht auf der Auflösung eines als Anode gepolten metallischen Werkstoffs in einem elektrisch leitenden Medium. Der dazu nötige Stromfluss wird meist durch eine äußere Spannungsquelle bewirkt. Nach DIN 8590 wird zwischen dem
- elektrochemischem Profilabtragen, dem
- Oberflächenabtragen und dem
- elektrochemischen Ätzen unterschieden.

Das EC-Profilabtragen wird mit hoher Wirkstromdichte bis 10 A/cm^2 durchgeführt. Der Elektrolyt strömt mit hoher Geschwindigkeit durch einen engen Spalt (ca. 0,1 mm) zwischen Werkstück und Werkzeugelektrode hindurch und entfernt dabei den Abtrag aus der Fuge. 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). Wichtiger ist das EC-Senken, das besonders im Flugzeug- und Automobilbau eingesetzt wird.

Man kann damit komplizierte geometrische Profile in schwer zerspanbare Werkstoffe einbringen. Die Werkzeugelektroden sind weitestgehend verschleißfrei, es treten keine thermischen Gefügebeeinflussungen auf, das Werkstück ist gratfrei und weist eine gute Oberflächenbeschaffenheit auch bei hoher Abtragleistung auf.

Bild 4-157
Vorrichtung für das elektrochemische Senken (nach W. König und F. Klocke).

EC-Senkanlagen bestehen grundsätzlich aus der Elektrolytversorgung, der Bearbeitungsmaschine und dem Gleichstromgenerator, der die geregelte Arbeitsspannung zwischen 20 und 30 V liefert. Eine Vorschubeinheit sorgt für die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeugelektrode, wobei die Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 0,1 und 20 mm/min liegen können. Als Elektrolytpumpen werden häufig Kreiselpumpen eingesetzt (mit Förderleistungen zwischen 100 und 800 l/min und Förderdrücken von 10 bis 50 bar). Die Abtragprodukte in Form von Metallhydroxiden müssen ständig aus dem Elektrolytkreislauf durch Separatoren oder Zentrifugen entfernt werden.

Der Prozess wird vorwiegend durch die aufwändige ECM-Vorrichtung beeinflusst (Bild 4-157). Die Vorrichtung muss außer dem Spannen und Ausrichten des Werkstücks auch die Kontaktierung sicherstellen. Die Teile, die mit dem Elektrolyten in Berührung kommen, sind besonders korrosionsgefährdet und werden daher aus Kupfer, Messing oder rostfreiem Stahl angefertigt. Die Abtragprodukte und die *Joule*sche Wärme müssen schnell abgeführt werden, was eine kurze Strömungslänge des Elektrolyten im Arbeitspunkt bedingt. In der Praxis ist die äußere Zuströmung mit Elektrolytabfuhr durch das Werkzeug einfacher zu handhaben als die innere. Als gebräuchliche Elektrolyte kommen NaCl- und $NaNO_3$-Lösungen in Frage, deren Leitfähigkeit zwischen 50 und 300 mS/cm liegt.

Zur Ermittlung der elektrochemischen Bearbeitbarkeit wurde ein Normversuch entwickelt, um u. U. umfangreiche Vorversuche einzusparen. Dadurch können für einen bestimmten Werkstoff Angaben gemacht werden über das Abtragverhalten, die Spaltausbildung und die Oberflächengüte. Bild 4-158 zeigt für zwei verschiedene Werkstoffe die im Normversuch ermittelte Abhängigkeit des Mittenrauwerts *Ra* von der Stromdichte *J*. Der hyperbolische Verlauf bestätigt, dass mit zunehmender Bearbeitungsgeschwindigkeit die Oberflächengüte besser wird. Die im Diagramm aufgeführten (auf der Stirnseite gemessenen) Spaltweiten s_{90} = 0,3 bis 1 mm haben keinen signifikanten Einfluss. Als nachteilig kann angemerkt werden, dass im Seitenspaltbereich die Oberflächengüte bei den dort herrschenden kleinen Stromdichten schlechter ausfällt.

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*, die im Vergleich zu denen spangebender Bearbeitungsverfahren außerordentlich grob erscheinen, erlauben also die Herstellung erstaunlich 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

Bild 4-158
Einfluss der Stromdichte auf die Oberflächengüte beim elektrochemischen Abtragen (nach W. König und F. Klocke).

– Verbrennen,
– Schmelzen oder (und)
– Verdampfen

des Werkstoffs. 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 Wärme[39] ermöglicht eine fortlaufende Verbrennung durch den Schneidsauerstoffstrahl. Der Reaktionsprozess setzt sich in die Tiefe *und* in die Richtung des sich in Schneidrichtung bewegenden 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 Gasschweißen, siehe Abschn. 3.3. 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 i. Allg. zentrisch angeordneten Kanal auf die erhitzte Werkstückoberfläche geleitet wird.

Bild 4-159 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. T_z ist diejenige Temperatur, oberhalb der der Werkstoff 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. Anderenfalls schmilzt der Werkstoff, verliert also seine feste Form und verbrennt erst dann.

[39] Die Verbrennungswärme von Eisen beträgt etwa 54 kJ/cm³.

Eine auch nur annähernd brauchbare Schnittfläche ist nicht erzeugbar. Bestenfalls ist diese Qualität für »Schrottschnitte« akzeptabel. 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. Damit ist die Grenze der Brennschneidbarkeit gekennzeichnet.

– Die bei der Verbrennung entstehenden Oxide müssen einen niedrigeren Schmelzpunkt besitzen als der Werkstoff [40]. Sie sollten so dünnflüssig sein, dass sie vom Schneidsauerstoffstrahl ausreichend leicht ausgetrieben werden können.
– Die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes sollte möglichst klein, seine Verbrennungswärme möglichst groß sein.

Bild 4-159
Vorgänge beim Brennschneiden, schematisch:
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.

Danach erfüllen nur die üblichen un- bzw. niedriglegierten Stähle und trotz der Hinweise in Fußnote 40) auch Titan die Voraussetzungen für die Brennschneidbarkeit. Insbesondere durch Chrom und Molybdän wird sie erheblich beeinträchtigt. Stähle mit Cr > 1,5 % oder Mo > 0,8 % sind bereits nur noch bedingt brennschneidbar. Die Ursache ist die sehr hohe Schmelztemperatur der Cr- bzw. Mo-Oxide, d. h. auch der Schneidschlacken.

[40] Der Schmelzpunkt der Titanoxide ist um etwa 300 °C höher als der des Titans (etwa 1670 °C). Die Voraussetzungen für die Brennschneidbarkeit der Metalle sind daher nicht als prinzipiell gültig anzusehen.

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.

Die Härte im Bereich der Schmelzschicht hängt im Wesentlichen vom Kohlenstoffgehalt, in geringerem Umfang von der Schneidgeschwindigkeit, der Heizflammengröße und der Werkstückdicke ab. Bei höhergekohlten Stählen (C > 0,3 %) muss wegen der Härterissgefahr die aufgekohlte Zone der Brennschnittfläche in einer Breite von maximal 0,5 mm bis 1 mm abgearbeitet werden. Während bei schweißgeeigneten Stählen keinerlei zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind, müssen aufhärtende Stähle (höhergekohlt und (oder) legiert) wärmevor- bzw. -nachbehandelt werden. Die Abkühlgeschwindigkeit wird dadurch auf Werte begrenzt, die eine Martensitbildung nicht mehr zulassen.

Bild 4-160 zeigt exemplarisch die Härteverteilung senkrecht zur Brennschnittfläche (gemessen an der Werkstückoberfläche) an einem Vergütungsstahl (C 60).

Bild 4-160
Einfluss des Vorwärmens auf die Härte der Brennschnittfläche, Werkstoff C60, Wanddicke 10 mm.

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, Bild 4-161. Kennzeichnendes Merkmal ist die im Brenner erfolgende Mischung Brenngas/Sauerstoff durch das Injektorprinzip. Genauere Hinweise zur Funktionsweise sind in Abschn. 3.3.4 zu finden.

Die **Brennschneiddüsen** sind das eigentliche »Werkzeug«. Ihre Art und Bauweise bestimmen entscheidend die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens, die maximale Schneidgeschwindigkeit und die Schnittflächengüte. Die Auswahl der für die jeweiligen Aufgabe »optimalen« Brennschneiddüse sollte daher mit großer Sorgfalt vorgenommen werden.

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. Bild 4-162 zeigt einige typische Düsenbauarten.

Die Wirksamkeit und Qualität der Brennschneiddüsen werden von zahlreichen Faktoren bestimmt, von denen einige zzt. nur unzureichend quantitativ beschreibbar sind. Die Aufgabe dieses »Werkzeugs« 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.

Bild 4-162
Schematische Darstellung verschiedener Düsenbauarten:
a) einteilige Düse (Blockdüse)
b) Maschinenschneidbrenner mit einteiliger gasemischender Düse
c) mehrteilige Düse (Schlitzdüse)

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 Beschädigungen, deformierter Querschnitt, festhaftende Spritzer usw.) eine wesentliche Voraussetzung. Gereinigt wird am zweckmäßigsten »nass« (wässerige Lösung von speziellen Düsenreinigungspulvern) oder mit geeigneten mechanischen Hilfsmitteln (Düsennadel). Die Verwendung von Draht, Nägeln oder anderen »Werkzeugen« führt zu einer schleichenden Qualitätsverschlechterung der

Bild 4-161
Querschnitt eines Handschneidbrenners (Saugbrenner).

Brennschnittflächen. Nur durch eine entsprechende Ausbildung des Brennschneiders – vor allem die des Bedieners stationärer Brennschneidmaschinen, dessen Bedeutung und dessen erforderliche Kenntnisse häufig unterschätzt werden – kann die Wirtschaftlichkeit und die Qualität des Brennschneidens erreicht werden.

Der Brennschnitt kann mit *handgeführten*, tragbaren oder mit stationären **Brennschneidmaschinen** ausgeführt werden, die in vielfältigsten Bauarten angeboten werden. Der Nachteil der handgeführten Maschinen ist, dass die für den auszuführenden Schnitt erforderlichen Informationen auf dem Blech aufgezeichnet werden müssen. Die Schnittqualität hängt also von der Genauigkeit der »Zeichnung« und der manuellen Geschicklichkeit des Brennschneiders ab. Der Verarbeiter muss beachten, dass zum Herstellen hochwertiger, formgenauer Bauteile die Brennschneidmaschinen im Aufbau, in der Stabilität und der Qualität der Führungseinrichtungen mit Werkzeugmaschinen vergleichbar sein müssen. Dieser häufig nicht genügend beachtete Umstand beruht sicherlich z. T. auf der Fehleinschätzung, nach der das Werkzeug »Flamme« keine Reaktionskräfte auf das Schneidgut ausübt. Diese Vorstellung berücksichtigt nicht die erheblichen durch Temperaturdifferenzen entstehenden Kräfte und die Notwendigkeit einer möglichst ruckfreien, kontinuierlichen Brennerbewegung.

Bild 4-163
Unterschiedliche Bauweisen der Kreuzwagen-Brennschneidmaschinen, nach Hermann:
a) Ausleger
b) Portal
c) Kombination aus Ausleger und Portal

Das wichtigste Bauprinzip ist das **Kreuzwagensystem** mit Längs- und Querantrieb (praktisch immer als Koordinatenantrieb), das in drei grundsätzlichen Bauweisen realisiert wird, Bild 4-163:
– Ausleger,
– Portal,
– Kombination aus Ausleger- und Portalbauweise.

Bild 4-164
Mechanische Grundlagen des Koordinatenantriebs:
a - a' = Verlauf der Bahnkurve, v = Vektor der Schnittgeschwindigkeit

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 einfach und technisch elegant erfüllen. Hierbei wird der Kreuzwagens in x- und y-Richtung mit jeweils einem Servo-Motor bewegt. Die Schneidgeschwindigkeit v ist konstant und unabhängig von der Bahnkurve des Schneidbrenners – das ist die nachzufahrende Kontur des Bauteilumrisses – wenn zwischen v und den Geschwindigkeitskomponenten in x- und y-Richtung die Beziehung besteht, Bild 4-164:

Bild 4-165
Werkstück mit Gewindebohrungen a) und zugeordneter Abtastplan b), in dem die Mittelpunkte der Ansenkungen miteinander verbunden sind (nach Messer Griesheim).

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 = v^2 \cdot (\sin^2\alpha + \cos^2\alpha) = \text{konst.} \qquad [4\text{-}76]$$

Die Bewegung der Servomotore wird also von der Lage der Koordinaten auf dem Schneidtisch bestimmt. 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 (Abschn. 4.9.1.5), dass Nacharbeit des Schneidgutes erforderlich ist. Dieser Nachteil lässt sich durch die automatische **Eckenverzögerung** beseitigen. Vor Erreichen einer scharfen Umlenkung wird die Geschwindigkeit soweit verringert, dass der Rillennachlauf vernachlässigbar ist.

Ein weiterer die Schnittqualität bestimmender Faktor ist der richtige und gleichbleibende Abstand der Schneiddüse von der Werkstückoberfläche. Bei der unvermeidbaren Welligkeit der Bleche und der beim Schneiden vor allem der dünnwandigen Bauteile entstehenden Verwerfungen ist eine automatische **Brennerhöhenverstellung** eine große Hilfe. Für senkrechte Formschnitte hat sich die *kapazitive Brennerhöhenverstellung* bestens bewährt. Der Abstand wird durch die Änderung der Kapazität eines Kondensators geregelt, dessen »Platten« aus einem am Brenner befestigten Metallstück und dem Werkstück besteht. Der eingestellte Düsenabstand kann innerhalb ±1,5 mm konstant gehalten werden, bei größerem apparativen Aufwand sind auch ± 0,5 mm möglich. Diese Werte sind z. B. für die Herstellung von Schweißfugen (Schrägschnitte!) erforderlich.

Mit Hilfe spezieller Einrichtungen lässt sich durch Zusammenfassen der drei wichtigsten Bearbeitungsverfahren Brennschneiden, **Anreißen**, und **Ansenken** bzw. **Bohren** die Blechbearbeitung in großem Umfang rationalisieren. Pneumatisch arbeitende Körn- oder Ansenkwerkzeuge erzeugen gut sichtbare Körnungen/Senkungen in der Blechoberfläche. Für einen mechanisierten Ablauf werden bei fotoelektrisch gesteuerten Brennschneidmaschinen sog. Abtastzeichnungen verwendet [41], bei denen die Mittelpunkte der Ansenkungen/Bohrungen durch eine Linie verbunden sind, die Codes in Form von Verdickungen enthält, Bild 4-165. Beim Erreichen einer derartigen Markierung schaltet der Abtastkopf auf Schleichganggeschwindigkeit um, an ihrem Ende hält die Maschine an, und es wird angesenkt. Die Positioniertoleranz ist dabei kleiner als ± 0,5 mm.

In vielen Fällen sind auf dem Bauteil festhaftende Markierungen, Schweißpositionen, Teile- bzw Positionsnummern usw. anzubringen. Hierfür ist das **Pulvermarkieren** hervorragend geeignet. Mit Hilfe eines Pulvermarkierbrenners wird Zinkpulver zusammen mit Sauerstoff auf das Blech geblasen und hier durch die Heizflamme angeschmolzen. Es entstehen festhaftende, deutlich begrenzte etwa 1 mm breite Linien.

[41] Bei nummerisch gesteuerten Brennschneidmaschinen ist keine Abtastzeichnung erforderlich. Sie fahren im Eilgang jeweils zu der nächsten Position.

Die **Steuerung** der Brennschneidmaschinen, d. h. , die Führung des Schneidbrenners entlang der Kontur des auszuschneidenden Bauteils, erfolgt in vielfältiger Weise. Neben der *nummerischen* ist die *fotoelektrische* die wichtigste Steuerungsart der modernen Brennschneidmaschinen. Bei dieser werden die Mitten ca. 1 mm dicker Linien *(Strichmittenabtastung)* oder aber die Kanten der Bauteilsilhouette abgetastet, die auf dem schwarzen Grund des Zeichnungsauflagetisches liegt *(Strichkantenabtastung)*. Bei der Strichmittenabtastung ist das Einzeichnen von Verbindungslinien im Schablonenträger erforderlich, wenn mehrere Bauteile ausgeschnitten werden sollen. Eine Lageänderung der Brennteile ist im Gegensatz zur Strichkantenabtastung nicht möglich. Der Schablonenträger muss in diesem Fall neu gezeichnet werden.

Die Informationsträger sind kunststoffkaschierte und somit in bestimmtem Umfang temperatur- und feuchtigkeitsempfindliche Folien. Ihre Größe sollte daher 2 m^2 bei einem Maßstab von 1:1 nicht überschreiten. Verkleinerte Zeichnungen (1:5 bzw 1:10) können mit entsprechenden Hilfsmitteln in einer Genauigkeit von ± 0,1 mm hergestellt werden. Obwohl bei Stationierung der »Gebermaschinen« in klimatisierten Räumen bei einer Arbeitsfeldgröße von 3 m mal 10 m die Übertragungsgenauigkeit im Bereich von ±1,5 mm liegt, verwendet man für derartige Aufgaben zunehmend Brennschneidmaschinen mit nummerischen Steuerungen.

Brennschneidmaschinen mit computergestützten nummerischen Steuerungen (CNC) erfordern höhere Investitionskosten, die sich aber erfahrungsgemäß bei Jahresleistungen von etwa 40 000 Schnittmetern amortisieren. Sie besitzen eine Reihe wichtiger Vorteile:

- Sämtliche Bearbeitungsvorgänge laufen automatisch ab. Manuelle Eingriffe des Bedienungspersonals im Hinblick auf Eilgangsbewegungen, Schaltfunktionen und Bearbeitungsbewegungen sind nicht erforderlich. Die bei fotoelektrisch gesteuerten Brennschneidmaschinen erreichbare Nutzungsdauer von ca 35 % (nur Abfahren der gezeichneten Kontur erfolgt automatisch!) kann auf 70 % erhöht werden.
- Maßfehler durch Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse der Vorlage entfallen. Die Genauigkeit der Bauteile wird deutlich größer.
- Der Tafelnutzungsgrad wird mit Hilfe optimierter »Schachtelpläne« erheblich verbessert. Diese können mit entsprechender Software relativ einfach hergestellt werden, Bild 4-166.
- Für den weiteren Arbeitsfortschritt und -ablauf notwendige Daten lassen sich einfach auf Lochstreifen speichern und verfügbar machen.
- Maschinenwartung und Systemdiagnose sind effektiver, schneller und einfacher möglich. Die Verbindung der Service-Zentrale mit der Steuerung (z. B. Akustikkoppler), erleichtert die Fehlerdiagnose im Hard- und Softwarebereich durch Starten von Prüfroutinen ganz erheblich.

Bild 4-166
Mit einem Rechnerprogramm automatisch erzeugter Brennschneidplan (»Schachtelplan«), nach Messer Griesheim.

Aus verschiedenen Gründen (näheres s. Abschn. 4.9.1.4) ist das Anschneiden innerhalb der Blechtafel dem Anschnitt von der Kante vorzuziehen. Für diese Aufgabe wird bei stationären Brennschneidmaschinen die **Lochstechautomatik** verwendet. Auf die auf Entzündungstemperatur erwärmte Werkstückoberfläche strömt mit geringerem Druck (geringer als der Schneidsauerstoffdruck!) der Schneidsauerstoff, der den Verbrennungsvorgang einleitet und den Maschinenvorschub einschaltet. Nach Ablauf einer maschinenintern gespeicherten Zeit wird der Schneidsauerstoffdruck auf den für die Schneiddicke erforderlichen Wert erhöht.

Das Brennschneiden von Werkstücken mit geringerer Wanddicke (1 mm bis 6 mm) führt wegen der folgenden Tatsachen meistens zu Schwierigkeiten, die Nacharbeit und z. T. erhebliche zusätzliche Kosten verursachen:

- Verzug in der Blechebene, d. h., aufwendige Richtarbeiten sind erforderlich
- Entstehen festhaftender Schlacke an der Schnittunterseite (»Bartbildung«).

Wenn nicht andere Trennverfahren verwendet werden können (siehe Abschnitte 4.9.2 und 4.9.3), sind diese Probleme mit speziellen Brennschneiddüsen und konzentrisch um diese angeordnete **Pressluftduschen** hinreichend wirksam zu bekämpfen.

Bild 4–167
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

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 absolute Voraussetzungen für hochwertige Schnitte, Bild 4-167.

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 Regel und grundsätzliche Empfehlung gilt, dass das Bauteil möglichst lange mit der Blechtafel verbunden bleiben muss. Dadurch können sich die Rand- bzw. Abfallbereiche frei bewegen, die Lage des festen Bauteils relativ zur Lage des Informationsträgers (z. B. Schablone, Zeichnung) bleibt aber weitgehend unverändert. Daraus ergeben sich einige wichtige Folgerungen, Bild 4-168:

Bild 4-168
Technik des Anschneidens:
*a) **Falsch:** das angeschnittene Bauteil bewegt sich sofort nach dem Anschneiden, weil es mit der Blechtafel nicht solange wie möglich 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) Anschnitt im Tafelinneren verringert die Möglichkeit der Bauteilbewegung noch weiter, daher zu bevorzugende Anschnitttechnik, 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 tangentialen Einlauf achten, um Bildung von Kerben zu vermeiden (sonst Nacharbeit erforderlich)

- Ein Anschneiden im Blechinneren ist dem Kantenanschnitt vorzuziehen.
- Der Anschnitt soll senkrecht zur Blechkante erfolgen. Der Verzug der Bereiche neben der Schnittfuge wird so am kleinsten.
- Innenausschnitte bei Formteilen immer zuerst schneiden. Hierbei ist wegen der Gefahr einer Kerbbildung auf tangentialen Schnitteinlauf zu achten.

Die Qualität der Brennschnittflächen wird sehr wesentlich von den Verfahrensparametern (Schneidgeschwindigkeit, Heizflammeneinstellung, Schneidsauerstoffdruck) bestimmt. Eine praxiserprobte Empfehlung besagt:

Einstellwerte sollen nach der Schneidtabelle des Brennschneidmaschinenherstellers gewählt werden. Das gilt insbesondere für die Schneidgeschwindigkeit und den Schneidsauerstoffdruck.

Allerdings wird die Schneidgeschwindigkeit für sog. Trennschnitte, bei denen keine oder nur sehr geringe Anforderungen an die Schnittflächenqualität gestellt werden, erheblich erhöht.

Die Reinheit des Sauerstoffs beträgt i. Allg. 99,5 %. Verringert sich dieser Wert z. B. auf 99 %, dann sinkt die maximale Schneidgeschwindigkeit um etwa 10 %, die Schlackenablösung ist erschwert, und die Schnittfuge wird etwas breiter.

Der Schneidsauerstoffdruck ist abhängig von der Düsenbauart. Er beträgt bei den üblichen, noch weit verbreiteten Düsen 3 bar bis 6 bar, bei Hochleistungsdüsen 6 bar bis 12 bar und bei den Hochdruckdüsen 10 bar bis 20 bar.

Bild 4-169
Erreichbare gemittelte Rautiefe Rz bei verschiedenen Fertigungsverfahren (nach DIN 4766-1).

4.9.1.5 Qualität brenngeschnittener Erzeugnisse

Die Güte brenngeschnittener Teile hängt wie die jedes technischen Erzeugnisses von einer Reihe qualitätsbestimmender Faktoren ab:
- Bestimmte Form- und Lagetoleranzen,
- Schnittflächenqualität und
- Maßtoleranzen.

Häufig ist die wirtschaftlich vertretbare und technisch sinnvolle Qualitätssicherung brenngeschnittener Erzeugnisse aus den verschiedensten Gründen nicht einfach zu realisieren.

Form- und Lagetoleranzen

Nach DIN ISO 1101 definiert eine Form- oder Lagetoleranz eines Elements (z. B. Fläche, Achse, Mittelebene) die Zone, innerhalb der 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. Man beachte, dass in den Maßtoleranzen die Form- und Lagetoleranzen *nicht* enthalten sind.

Schnittflächenqualität

Die Qualität der Brennschnittflächen kann durchaus mit der beim Bohren und Hobeln erreichbaren konkurrieren. Bild 4-169 zeigt die möglichen Rautiefen *Rz* 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*. Sie entspricht inhaltlich der bisherigen Kenngröße Unebenheit. *u* 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 (Bild 4-170).

– Die *gemittelte Rautiefe Rz5*. Sie wird nach DIN EN ISO 4288 aus den Einzelrautiefen (Z_1 bis Z_5) fünf aneinandergrenzender Einzelmessstrecken ermittelt (Bild 4-171).

Bild 4-170
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)

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 12584 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 *Rz5* eine je Meter Schnitt.

Bild 4-170 zeigt die *Rechtwinkligkeits-* und *Neigungstoleranz u*. Das sind bezogene Richtungstoleranzen, d. h., sie erfordern für ihre korrekte Beschreibung einen Bezug A. Sie werden bei brenngeschnittenen Teilen nicht einzeln angegeben, weil sich ihre Größe nicht mit einem vertretbaren Aufwand bestimmen lässt. Außerdem soll die geometrische Beschaffenheit eines brenngeschnittenen Teils aus wirtschaftlichen Gründen mit nur einer Messung feststellbar sein.

Die weniger wichtigen Kenngrößen *Rillennachlauf n* und *Anschmelzung r* können zur visuellen Beurteilung mit herangezogen werden, Bild 4-172. 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 überzubewerten. Tatsächlich ist die Bedeutung eher gering, wenn die Rillentiefe klein und die Schnittfläche hinreichend eben ist.

Bild 4-171
Ermittlung der gemittelten Rautiefe Rz5 (nach DIN EN ISO 4288).

l_n	*Gesamtmessstrecke*
Z_{t1} *bis* Z_{t5}	*Einzelrautiefen*
l_r	*Einzelmessstrecke (= 1/5 von l_n)*

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 Bereich 1 bis Bereich 4 (5), Bild 4-173. Bei Bedarf können zusätzliche Qualitäten *vereinbart* werden, wobei die Felder in der Reihenfolge *u* und *Rz5* angegeben werden. Wird bei der Qualitätsfestlegung auf die Angabe eines Wertes verzichtet, ist eine Null zu setzen.

Bild 4-172
Erklärung einiger Qualitätsmerkmale von Brennschnittflächen: Rillentiefe c, Rillenbreite f, Rillennachlauf n, Anschmelzung r (nach DIN EN ISO 9013).

Die Genauigkeit der Bauteilabmessungen wird von den Maßtoleranzen der Nennmaße (Zeichnungsmaße) bestimmt. Die für die Funktion vieler Werkstücke wichtigeren Form- und Lagetoleranzen, müssen getrennt von den Maßtoleranzen angegeben werden. Je nach Toleranzklasse (z. B. 1 und 2) sind bestimmte Grenzabmaße zulässig (Tabelle 4-5), die für Maße ohne Toleranzangaben gelten, wenn z. B. auf Zeichnungen auf die Norm DIN EN ISO 9013 verwiesen wird. Nach dem älteren Tolerierungsgrundsatz, der

Bild 4-173
Zur Definition und Beschreibung der Qualität von Brennschnittflächen, nach DIN EN ISO 9013:
a) Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz u in mm
b) Zulässige gemittelte Rautiefe Rz5 in µm

aber in der Schweißtechnik noch weitgehend angewendet wird, müssen die Form- und Lagetoleranzen kleiner gleich der Maßtoleranz sein.

Die geforderte Schnittqualität und die Toleranzklasse müssen auf einem Symbol nach DIN EN ISO 1302 wie folgt angegeben werden:

❶ Angabe der Hauptnummer dieser Norm (DIN EN ISO 9013),
❷ Angabe der Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz *u*, Bild 4-173),
❸ Angabe der gemittelten Rautiefe *Rz5*, Bild 4-173),
❹ Angabe der Toleranzklasse, Tabelle 4-5.

4.9.1.6 Anwendung des Brennschneidens

Das Brennschneiden ist das universellste thermische Schneidverfahren für un- und niedriglegierte Stähle. Die schneidbare Werkstückdicke liegt zwischen 2 mm und 3000 mm, die in der Brennschneidpraxis übliche im Bereich 10 mm bis 300 mm. Bei geringeren Werkstückdicken (1 mm 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 (auch Tulpennähte sind mit einer speziellen Brenneranordnung und Schneidtechnik erzeugbar) können mit dem Brennschneidverfahren wirtschaftlich hergestellt werden. Man schätzt, dass 75 % aller Schweißfugen mit diesem Verfahren erzeugt werden. In der Bundesrepublik Deutschland werden in der metallverarbeitenden Industrie pro Jahr ungefähr 750 000 km Brennschnitte hergestellt. Die Investitionskosten für die apparative Einrichtung sind i. Allg. gering, die Betriebsstoffe preiswert und leicht verfügbar.

Für Gusseisen und andere nicht brennschneidbare Werkstoffe (z. B. hochlegierte Cr-Ni-Stähle, Aluminium) existieren Sonderverfahren, deren Anschaffungskosten deutlich niedriger sind als die des z. B. hierfür wesentlich besser geeigneten Plasmaschneidens. Beim *Pulverbrennschneiden* wird die kinetische Energie des Schneidsauerstoffstrahls durch Zugaben von Spezialsand (SiO_2) soweit erhöht, dass die Oxide und Schneidschlacken ausgetrieben werden können.

Die künftige Entwicklung ist – bedingt durch die Konkurrenzsituation – gekennzeichnet durch den Zwang zu einer weitgehenden Mechanisierung und Technisierung. Die ständig sinkenden Preise auf dem Computersektor machen die CNC-Steuerungen besonders für den Großmaschinen- und Schiffbau attraktiv. Rüst- und Nebenzeiten lassen sich damit ebenfalls deutlich verringern, d. h. technische Wertigkeit und Wirtschaftlichkeit nehmen zu.

Tabelle 4-5. Grenzabmaße für Nennmaße (DIN EN ISO 9013) in Abhängigkeit von der Toleranzklasse. Diese gelten nur für Teile, deren Seitenverhältnis (*l:b* = Länge:Breite) höchstens 4:1 beträgt.

Toleranzklasse	Werkstückdicke	Grenzabmaße für Nennmaße in mm			
	mm	10 bis < 35	35 bis < 125	125 bis < 315	315 bis < 1000
1	> 3,15 bis 6,3	± 0,4	± 0,4	± 0,5	± 0,5
	> 6,3 bis 10	± 0,6	± 0,6	± 0,7	± 0,7
	> 10 bis 50	± 0,6	± 20,7	± 0,8	± 1,0
	> 50 bis 100	± 1,3	± 1,3	± 1,4	± 1,7
	> 100 bis 150	± 1,9	± 2,0	± 2,15	± 2,3
	> 150 bis 200	± 2,6	± 2,7	± 2,7	± 3,0
2	> 3,15 bis 6,3	± 0,8	± 0,9	± 1,1	± 1,2
	> 6,3 bis 10	± 1,1	± 1,3	± 1,4	± 1,5
	> 10 bis 50	± 1,8	± 1,8	± 1,9	± 2,3
	> 50 bis 100	± 2,5	± 2,5	± 2,6	± 3,0
	> 100 bis 150	± 3,2	± 3,3	± 3,4	± 3,7
	> 150 bis 200	± 4,0	± 4,0	± 4,1	± 4,5

Beispiel:
Schnittdicke a = 60 mm, Abmessungen des auszuschneidenden Bauteils (Rechteck): l = 400 mm, b = 100 mm, Toleranzklasse 1. Die Grenzabmaße des geschnittenen Teils betragen: l = 400 ± 1,7 mm, b = 100 ± 1,3 mm. Bei einer geforderten Qualität der Schnittfläche (»Bereich 2«) darf nach Bild 4-173 u maximal 0,95 mm, die Rautiefe Rz5 maximal 120 µm betragen.

4.9.2 Plasmaschneiden

Die Verfahrensgrundlagen sind in Abschn. 3.3.3.3.2 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. Ein typischer Unterschied zum Brennschneiden ist der Ursprung der erforderlichen Energie. Beim Plasmaschneiden wird die Schnittfuge ausschließlich durch die von außen zugeführte Energie erzeugt, die konduktiv vom Plasma auf die Schnittfläche übertragen wird. Durch die kinetische bzw. thermische Energie des Plasmastrahls wird der Werkstoff geschmolzen (und/oder verdampft) und herausgeschleudert. Anders als beim Brennschneiden entsteht *keine* zusätzliche Verbrennungswärme. Daraus ergeben sich zwei wichtige Verfahrenskennzeichen der Plasmaschneidverfahren:

- 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 (s. Bild 3-50a)). Plasmaschneiden 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 Plasmaschneiden wird bevorzugt zum Trennen aller *nicht* brennschneidbaren Werkstoffe eingesetzt. In erster Linie sind das die NE-Metalle wie Aluminium und Aluminiumlegierungen, Kupfer und die hochlegierten Stähle. Aber auch zum Schneiden unlegierter Stähle ist das Verfahren sehr geeignet, insbesondere bei Anwendung bestimmter Verfahrensvarianten und Schneidgase.

Allerdings ergeben sich auch eine Reihe bemerkenswerter Nachteile, deren Auswirkungen aber erheblich von der Verfahrensvariante abhängen:
- Hohe Arbeitsgeräusche, bis ca. 105 dB(A),
- verfahrenstypische leicht V-förmige Schnittfugen sind unvermeidbar,
- starke UV-Strahlung,
- erhebliche Rauch- und Gasentwicklung (Ozon, Stickoxide, Metallstäube).

In den meisten Fällen sind also für den gefahrlosen Betrieb aufwändige 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. Diese Einschränkungen sind z. T. durch die Verfahrensvariante und das Schneidgas beeinflussbar.

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, d. h. dessen Fähigkeit, den flüssigen Werkstoff aus der Schnittfuge zu treiben. Hinsichtlich der Schnittflächenqualität und der erreichbaren Schneidgeschwindigkeit ist ein Ar-H_2-Gemisch mit 60 % Ar und 40 % H_2 optimal. H_2-Gehalte über 50 % können zu Instabilitäten des Plasmastrahles führen und sind daher grundsätzlich nicht zu empfehlen. Schneiden mit reinem Argon ergibt zwar sehr hohe Schnittflächenqualitäten, es wird aber wegen der sehr geringen Schnittgeschwindigkeit in der Praxis nur selten verwendet. N_2-Zusätze (Ar-N_2- bzw. Ar-H_2-N_2-Gemische) erweisen sich aus folgenden Gründen als überwiegend nachteilig:
- Die Schnittflächenqualität nimmt ab.
- Die Ausbildung der Schnittfuge wird merklich V-förmig, parallele Schnittfugen sind nicht erreichbar.
- Die maximale Schnittgeschwindigkeit nimmt ab.
- Starke Rauchentwicklung und die Bildung giftiger Stickoxide erfordern eine aufwändige Absaugung bzw. Entsorgung, die die Verfahrenskosten erheblich erhöhen.
- Die Schnittflächen sind nicht mehr metallisch blank.

Lediglich bei manuellen Schnitten im Dünnblechbereich kann ein Verringern der Schneidgeschwin-

digkeit sinnvoll sein. Außerdem wird durch N_2-Zusatz die Neigung zur Bartbildung an der Schnittflächenunterkante verringert.

4.9.2.1 Verfahrensvarianten

Die konventionelle Ar-H_2-Plasmatechnik, auch Feinstrahl- oder »Spitzenelektrodentechnik« 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. Der Bart ist nur durch zusätzliche Nacharbeit zu beseitigen, das Verfahren daher sehr viel teurer und unwirtschaftlicher.

Plasmapressluftschneiden

Dieses Problem kann durch die Verwendung von trockener, ölfreier Druckluft als Plasmagas beseitigt werden. Die Wirkung wird auf die Anwesenheit von Sauerstoffionen im Plasma zurückgeführt, die offenbar die Schmelzenviskosität verringern. Das Austreiben der jetzt dünnflüssigen, feintropfigen Schmelze an der Materialunterseite wird sehr erleichtert und damit die Bartbildung erschwert. Die leicht temperatursteigernde Wirkung des Luftsauerstoffes sollte nicht überbewertet werden. Gleichzeitig sind die Schnittflächen an Werkstoffen aus unlegiertem Stahl qualitativ hochwertig und die Schneidgeschwindigkeiten außerordentlich groß [42].

Die oxidierende Wirkung des im Plasmagas vorhandenen Sauerstoffs erfordert den Einsatz oxidationsbeständiger, hochschmelzender Elektrodenwerkstoffe (Wolfram scheidet völlig aus). Zirkonium- und Hafniumlegierungen haben sich für diesen Zweck bewährt. Ihre im Vergleich zu Wolfram deutlich geringere Schmelztemperatur zwingt zu einer intensiven Kühlung der flächig ausgebildeten Elektrode (geringere Stromdichte als bei einer »Spitzenelektrode«) und der Kupferdüse. Trotzdem wird durch die hohe thermische Beanspruchung die Brennerleistung auf etwa 30 kW begrenzt.

[42] Unlegierter Baustahl, Schnittdicke 5 mm, kann z. B. mit einer 30-kW-Schneidanlage mit ca. 5m/min geschnitten werden.

Ein entscheidender Nachteil dieser Verfahrensvariante ist die absolute Notwendigkeit, die in großem Umfang entstehenden giftigen Gase Ozon und Stickoxide, durch eine aufwändige 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 erheblich und der Umgang mit diesem Verfahren gewöhnungsbedürftig, weil i. Allg. mit großen Wassermengen gearbeitet wird.

Bild 4-174
Verfahrensprinzip des Plasmawasserinjektionsschneidens, schematisch.

Die Düsenkonstruktion besteht aus einem kupfernen Düsenkörper (D), der als Anode für den Pilotlichtbogen dient, und einem davor angeordneten Keramikteil (K), Bild 4-174. 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 kühlt ihn sehr in-

tensiv. Der Brenneraufbau ist daher relativ unkompliziert, die erreichbaren Standzeiten sind mit keiner anderen Verfahrensvariante erreichbar. Der austretende Wasserstrahl kühlt 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 = *Water-Muffler*) oder
- in einem Wasserbehälter unterhalb der Wasseroberfläche (Bild 4-174). Das Wasserbecken muss dann das größte zu schneidende Werkstück aufnehmen können.

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 Wärmeeinflusszone) sehr gering.

4.9.3 Laserschneiden

Je nachdem, welche Zustandsänderung der die Schnittfuge bildende Werkstoff erfährt, unterscheidet man das Laser-Brennschneiden, Laser-Schmelzschneiden und das Laser-Sublimierschneiden. Die Art des verwendeten Schneidgases und die Leistung der Schneidanlage bestimmen weitgehend die Form der Zustandsänderung. Die letzte Verfahrensvariante ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum realisierbar, da die erforderliche extreme Fokussierung des Laserstrahles noch nicht möglich ist.

Das Verfahren wird überwiegend zum Trennen eingesetzt, zum Schweißen sind deutlich höhere Strahlleistungen erforderlich. Die prinzipiellen Verfahrensnachteile sind die sehr hohen Investitionskosten und der geringe Wirkungsgrad des Laserstrahlers, der beim CO_2-Laser maximal 20 % beträgt[43].

4.9.3.1 Verfahrensprinzip

Für schweißtechnische Anwendungen ist vor allem der CO_2-Gaslaser wegen der großen erreichbaren Ausgangsleistungen (größer 1000 W) und des sehr guten Wirkungsgrades (15 % bis 20 %) von Bedeutung[44]. Der Mechanismus des Lasereffekts[45] ist kompliziert. Er soll im Folgenden nur sehr pauschal beschrieben werden.

Das Medium der Festkörperlaser besteht aus einem Festkörper (Kristall oder Glas) und der in ihm eingelagerten aktiven Substanz (Dotierung, z. B. Cr^{+++}). Beim CO_2-Laser ist das aktive Medium ein strömendes Gemisch aus CO_2-He-N_2. Der grundlegende Vorgang des Lasereffektes ist die *Anregung*

[43] Der Wirkungsgrad von Festkörperlasern ist noch erheblich geringer. Er beträgt z. B. beim Rubinlaser nur etwa 1 %.

[44] Außer den Gaslasern werden noch Festkörperlaser verwendet. Die wichtigsten sind der Rubinlaser und der Neodym-Yttrium-Aluminium-Granatlaser (YAG).

[45] Das 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.

des aktiven Mediums durch äußere Energiezufuhr, z. B. durch eine Gleichspannung beim CO_2-Laser. Die dadurch auf äußere Bahnen (höhere Energieniveaus!) gehobenen Elektronen kehren nach etwa 10^{-8} Sekunden wieder auf ihre Grundbahnen zurück, wobei die absorbierte Energie in Form von Licht wieder abgestrahlt wird. Dieser Vorgang ist normalerweise spontan, d. h. , das emittierte Licht ist inkohärent, nicht in Phase und wird in alle Richtungen regellos abgestrahlt. Der statistische Emissionsprozess geht von einer Vielzahl von Atomen ungeordnet und unabhängig voneinander aus. Diese Vorgänge sind z. B. charakteristisch und bestimmend für die Funktion der Glühbirne.

Das Laserprinzip erfordert die 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*, Bild 4-175. Die Anregung des im Resonator strömenden CO_2-N_2-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 sichtbar [46]. 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 CO_2-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 Infrarotoptik (Gallium-Arsenid-Halbleiter) auf das Werkstück fokussiert. Er erzeugt hier einen Brennfleck von 0,1 mm 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.

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 *Gaußsche Amplitudenverteilung* ist z. B. Voraussetzung für eine gleiche Schneidgeschwindigkeit in *jeder* Richtung.

4.9.3.2 Verfahrensmöglichkeiten und Grenzen

Die große Leistungsdichte des Laserstrahles ($8 \cdot 10^8$ bis $10 \cdot 10^8$ W/cm²) macht das Laserschneiden besonders geeignet zum Trennen von Blechen mit geringen Wanddicken (< 1 mm bis 4 mm). In diesem Wanddickenbereich ist eine konzentrierte, punktförmige Wärmequelle ein entscheidender Verfahrensvorteil. Die Schnittfugenbreite beträgt nur etwa 0,1 mm bis 0,5 mm, die Schnittflächengüte ist hervorragend und der Verzug der geschnittenen Bauteile sehr gering. Das Verfahren füllt damit bei metallischen Werkstoffen im Wanddickenbereich der Fein- und Dünnbleche (≤ 4 mm) eine Anwendungslücke. Mit anderen Verfahren lassen sich Halbzeuge dieser Dicke nicht oder nur unwirtschaftlich trennen. Bild 4-176 zeigt die Anwendungsgrenzen verschiedener thermischer und mechanischer Trennverfahren. Im Dünnblechbereich – als typischer Anwendungsbereich kann stellvertretend die Automobilindustrie genannt werden – konkurriert das Laserschneiden sehr erfolgreich mit dem Nibbeln (und dem Wasserstrahlschneiden). Je komplizierter die zu schneidenden Konturen sind, desto wirtschaftlicher ist das

[46] Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegt im Bereich zwischen 0,4 µm und 0,8 µm.

Bild 4-175
Schematischer Aufbau eines CO_2-Gaslasers mit gefaltetem Resonator und Bearbeitungskopf zum Schneiden bzw. Schweißen (nach Messer Griesheim).

Bild 4-176
Anwendungsgrenzen thermischer und mechanischer Trennverfahren zum Formschneiden metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe (nach Messer Griesheim).

Bild 4-177
Erreichbare Schneidgeschwindigkeiten verschiedener thermischer Schneidverfahren.

– – – – – Stahl, – – – – austenitischer Cr-Ni-Stahl.
a) CO_2-Laserschneiden (1 kW)
b) Plasmaschneiden (50 A bis 500 A)
c) autogenes Brennschneiden

Verfahren. Es bietet eine Reihe wesentlicher Vorteile gegenüber herkömmlichen Methoden:

– Es sind keine i. Allg. sehr teuren Werkzeuge erforderlich.
– Nacharbeit der Schnittflächen kann in den meisten Fällen entfallen.
– Die Schneidgeschwindigkeiten sind sehr hoch, Bild 4-177. Mit einem 500 W-CO_2-Laser beträgt die Schneidgeschwindigkeit an einem 2 mm dicken Stahlblech etwa 2500 mm/min.
– Damit ergeben sich deutlich geringere Bearbeitungszeiten.
– Die Arbeitsgeräusche sind verglichen mit mechanischen Trennverfahren sehr gering, d. h. gesundheitlich unbedenklich.

Bild 4-178
Schematische Darstellung des Hochdruckpumpensystems zum Wasserstrahlschneiden.

Eine entscheidende Voraussetzung für hochwertige Schnitte sind ruckfreie, mechanisch und elektrisch hochwertige Koordinatenantriebe, die möglichst mit einer nummerischen Bahnsteuerung ausgerüstet sind. Als Führungsmaschine wird häufig die sehr stabile Portalmaschine eingesetzt.[47]

4.10 Wasserstrahlschneiden

4.10.1 Einleitung

Die verschiedenen Trenntechnologien wie Sägen, Scheren, Stanzen, thermische Trennverfahren (autogenes Brennschneiden, Plasma-, Laserschneiden) werden seit vielen Jahren in der Produktionstechnik angewendet. Seit einigen Jahren findet das *Wasserstrahlschneiden* aufgrund seiner vielen Vorteile verstärkt Eingang in die Praxis.

Flüssigkeitsstrahlen als Schneidwerkstoff wurden bereits seit mehr als hundert Jahren zum Abtragen von Werkstoffen, z. B. zum Abbau von Kies- und Tonablagerungen eingesetzt, aber 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 Wasserdrücken 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 1968/70 trennte ein amerikanischer Flugzeughersteller die besonders auf hohe Temperaturen, Drücke und spanende Bearbeitung kritisch reagierenden Faserverbund-, Waben- und Schichtwerkstoffe mit dem Wasserstrahlschneiden. Mit anderen konventionellen Verfahren wird beim Trennen die Struktur (d. h. die Gebrauchseigenschaften) dieser Werkstoffe bis zur Unbrauchbarkeit zerstört. Der entschei-

[47] Laserstrahlschweißen und -schneiden mit Industrierobotern. www.wissensfloater.de

dende Durchbruch gelang um 1980 mit der Beimischung von Feststoffpartikeln (Wasserstrahl-Abrasiv-Schneiden) zum Druckwasserstrahl.

Mit dieser Verfahrensvariante lassen sich die kompakten, harten und spröden Werkstoffe (sämtliche Metalle, Glas, Keramik, Gestein, Faserverbundwerkstoffe, Holz, Kunststoffe) 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. Ganz ähnlich wie bei dem »Werkzeug« Brennschneidstrahl kommt es auch hier zu einer ausgeprägten Riefenstruktur und einem mit zunehmender Werkstückdicke größer werdenden »Rillennachlauf«. Für die folgenden Hinweise 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

$$P = \rho \cdot A \cdot \frac{v^3}{2}. \qquad [4\text{-}77]$$

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 offenkundig.

Setzt man für die Querschnittsfläche des Strahls den Düsenquerschnitt ein und die Strahlgeschwindigkeit annähernd nach der *Bernoulli-Beziehung* an, dann erhält man die Strahlleistung P

$$P = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot d_0^2 \cdot p^{1,5}. \qquad [4\text{-}78]$$

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 der Druckerzeuger aufbringen.

Prinzipiell lassen sich alle pumpbaren Flüssigkeiten verwenden. Aufgrund seiner hohen Verfügbarkeit, seiner geringen Kosten und seiner physiologischen Unbedenklichkeit wird überwiegend Wasser verwendet. Lediglich in der Lebensmittelindustrie werden manchmal spezielle Öle eingesetzt.

4.10.2.2 Technologische Grundlagen

Der Druckerzeuger muss einen regelbaren Flüssigkeitsstrom mit einem konstanten an den Anwendungsfall anpassbaren Druck liefern, der im Fall des Wasserstrahlschneidens zwischen 1000 bar und 4000 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 4500 bar) werden mit hydraulisch angetriebenen Kolbenpumpen realisiert. Bild 4-178 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 µm beseitigt. Dieser große Aufwand ist erforderlich, weil die genannten Fremdstoffe die Lebensdauer der teuren Hochdruckkomponenten und der Schneiddüse sehr stark beeinträchtigen.

In der Hochdruckpumpe treibt ein Elektromotor eine selbstregelnde Ölpumpe an und erzeugt im Hydrauliköl etwa 200 bar, mit dem die Primärseite des Druck-

übersetzers beaufschlagt wird. Entsprechend dem Flächenverhältnis (etwa 20:1) wird das Schneidwasser auf der kleineren Sekundärseite auf etwa 4000 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.

Bild 4-179
Prinzip des reinen Wasserstrahlschneidens.

Wasserstrahlschneiden mit Reinwasser

Mit diesem mit Reinwasser arbeitenden Verfahren werden weiche Werkstoffe (Kunststofffolien, Textilien, Elastomere, Thermoplaste, Papier, Faserstoffe, Schaum- und Dämmstoffe, Lebensmittel) mit Vorschubgeschwindigkeiten bis zu 200 m/min getrennt (Bild 4-179). 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, das die Bahnsteuerung für den Gesamtablauf übernimmt.

Aufgrund der kleinen Schnitt- und Reaktionskräfte sind zeit- und gerätetechnisch nur wenig aufwändige Spann- und Fixiermaßnahmen für den zu trennenden Werkstoff bzw. die auszuschneidenden Teile erforderlich. Im Wesentlichen müssen die Tafeln/Schnittteile gegen 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.

Bild 4-180
Prinzip des Wasserstrahl-Abrasiv-Schneidens.

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, toxische 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 zugesetzt, wodurch eine Mikrozerspanung erfolgt (Bild 4-180). 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 Laminate 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 Schneidtechnolgie 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 ebensowenig entstehen wie oxidierte Schnittflächen und »wärmebehandelte« 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 (Laminate).
- Der Wasserstrahl ist ein sich selbst freischneidendes »Werkzeug«, ein Verklemmen im Schnittspalt ist daher 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 Luftverschmutzung erzeugt wird.
- Kostengünstige Programmerstellung durch den direkten Import der erforderlichen Dateien [z. B. »dxf« der Firma AutoDesk (Autocad)].

4.10.3 Einsatz und Anwendung

Das Werkzeug »Wasserstrahl« ist beim Wasserstrahlschneiden flexibel und verformbar. Die Makrogeometrie der Schnittfuge wird daher durch die Stellgrößen sowie werkstück- und werkstoffabhängige Bedingungen beeinflusst. Die Folgen sind unkontrollierbare Einflüsse, die die Schnittflächenqualität stark beeinträchtigen. Die Änderung der Stellgrößen wirkt sich auf der Werkstückoberseite wesentlich stärker aus als auf der Unterseite. Die Schnittflächenqualität im Bereich des Strahleintritts ist deutlich besser als die auf der Unterseite.

Die Maschine muss mit Hilfe geeigneter Regeleinrichtungen *(»Controller«)* die Schneidgeschwindigkeit abhängig vom Schnittweg, dem Werkstoff und der Werkstückdicke so bestimmen können, dass mit den berechneten Einstellwerten (PC-gestützte Berechnung) die geforderte Schnittflächenqualität erreicht wird. Die Schneidgeschwindigkeit und die notwendigen negativen/positiven Beschleunigungen beim Erreichen/Verlassen von Krümmungen im Schnittpfad werden bei modernen Regeleinrichtungen wegen der weiter unten beschriebenen auftretenden typischen »Fehler« mehrere 100 Mal pro Zentimeter Schnittlänge an die Erfordernisse und Vorgaben des Schnittpfads bzw. an die geforderte Schnittqualität angepasst.

Bild 4-181
Schneidbare Werkstückdicken verschiedener Werkstoffe bei einigen bekannten Trennverfahren.

Die wichtigsten die Schnittflächenqualität bestimmenden Geometrieabweichungen sind:

❒ **Rillennachlauf (»Schleppfehler«)**
Er nimmt mit der Schneidgeschwindigkeit zu. Bei geraden Schnitten ist der Einfluss des Schleppfehlers auf die konstruktiven und bauteilbedingten Erfordernisse i. Allg. vernachlässigbar. Mit abnehmender Krümmung des Schnittpfads nimmt sein Einfluss (unbrauchbare untere Ränder im Bereich des Radius bzw. der Ecke) kontinuierlich zu. Jetzt ist es notwendig, die Schneidgeschwindigkeit soweit zu verringern, dass der Rillennachlauf auf zulässige Werte verringert wird. Nach Passieren der Krümmung wird die Schneidgeschwindigkeit erneut auf die Geometrie des nun vorhandenen Schnittpfads eingestellt.

❒ **V-förmige Schnittflächen**
Ähnlich wie beim Plasmaschneiden 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. Bei bestimmten dazwischenliegenden Geschwindigkeiten tritt dieser Fehler nicht mehr auf, d. h., die Schnittflächen verlaufen parallel.

❒ Der Winkelfehler der Schnittflächen nimmt i. Allg. ab mit:
- abnehmendem Abstand der Düse von der Werkstückoberfläche;
- zunehmender Härte des zu trennenden Werkstoffs;
- zunehmender Qualität des Abrasivsands;
- abnehmender Werkstückdicke;
- zunehmender Fokussierfähigkeit der Schneiddüse. Nur die geometrisch exakte Form der »Düsenbohrung« erlaubt die Bildung eines kohärenten, zylindrischen Flüssigkeitsstrahls. Das ist die entscheidende Voraussetzung für die Erzeugung von Schnitten in dickwandigen Werkstoffen mit qualitativ hochwertigen Schnittflächen. In aus Diamant bestehenden Düsen können wegen verschiedener Eigenheiten seines kristallinen Aufbaus sehr schwer (teuer) die erforderlichen kreisrunden Durchbrüche exakt hergestellt werden. Daher werden überwiegend Rubin- bzw. Saphirdüsen verwendet.

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 besonders vorteilhaft zum Schneiden aller reflektierender und gut wärmeleitenden Materialien (wie z. B. Kupfer, Aluminium, Silber) einsetzen. Der Schneidprozess erfolgt oberhalb bestimmter Werkstückdicken schneller als mit jedem anderen Verfahren. Stillstandszeiten für einen »Werkzeugwechsel« entfallen, weil keine Schneiden vorhanden sind, die zu schärfen oder auszuwechseln sind. Ebensowenig müssen Vorrichtungen und Anlagen zum Beseitigen von Staub oder toxischen Rückständen, die besonders bei der Bearbeitung umweltbelastender Werkstoffe entstehen, vorgesehen werden.

Bild 4-181 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.

Bild 4-182
Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit von der Werkstückdicke für Aluminium. Angegeben sind die Werte für das Laserstrahl- und das Wasserstrahlschneiden (nach Hunzicker-Jost).

Die Schneidgeschwindigkeiten beim Wasserstrahlschneiden sind im Bereich *kleinerer* Werkstückdicken (≤ 5 bis 10 mm) i. Allg. geringer als bei den konkurrierenden Trennverfahren Plasma- und Laserstrahlschneiden (Bild 4-182). Für größere Werkstückdicken ist das Wasserstrahlschneiden (neben den Möglichkeiten einer i. Allg. sehr viel teureren spangebenden Bearbeitung) oft das einzig mögliche, weil wirtschaftliche Trennverfahren.

Die Maßtoleranzen und die Beschaffenheit der Schnittflächen sind im Wesentlichen von der Höhe des Wasserdrucks, dem Abrasivmittel und in erheblichem Umfang von der Schneidgeschwindigkeit abhängig. Nach VDI 2906 Blatt 10 werden die Merkmale der Schnittflächenqualität wasserstrahlgeschnittener Bauteile gemäß Bild 4-183 bestimmt.

Üblicherweise werden in der Praxis drei (noch nicht genormte) Schnittqualitäten unterschieden:

Q1: Grob- oder Trennschnitt
Angaben über Toleranzen entfallen.

Q2: Normal- oder Mittelschnitt
– *Maßtoleranz*
± 0,1 mm an der Teileoberkante,
– *Oberflächenrauigkeit Rz* = 20 bis 50 µm,
– *Winkelabweichung:* 1 ° bis 3 °.

Q3: Qualitätsschnitt
– *Maßtoleranz*
± 0,05 mm an der Teileoberkante,
– *Oberflächenrauigkeit Rz* = 10 µm,
– *Winkelabweichung:* 0,5 ° bis 1 °.

Die Schnittflächenbreite ist abhängig vom Düsendurchmesser, dem Wasserdruck, der Abrasivart und -körnung und dem Abstand Düsenunterkante zu Werkstückoberfläche. Ein guter Näherungswert der Schnittflächenbreite ist etwa 1 mm.

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. Bild 4-184 zeigt in einer zusammenfassenden Darstellung die wichtigsten Anwendungsgebiete des Hochdruckwasserstrahls.

Abschließend sollen lediglich einige Anmerkungen zum *Wasserstrahlen* (ohne und mit Abrasivzusatz!) gemacht werden, das mit Strahldrücken zwischen 350 bar und 800 bar arbeitet. Die Bedeutung dieses

Verfahrens wird künftig zunehmen. Es konkurriert direkt mit dem *Sandstrahlen*, das (noch) preiswerter, schneller und leichter verfügbar ist. Andererseits ist der Reinigungseffekt des Wasserstrahlens deutlich besser. Es kann Oberflächenschichten rückstandslos entfernen und ist wesentlich umweltfreundlicher als das Sandstrahlen, das große Mengen nur aufwändig zu entsorgender Sandrückstände erzeugt.

Ein besonderer Vorteil des Wasserstrahlens ist die Fähigkeit, auch Salzablagerungen zu beseitigen, wie z. B. die farblosen Eisenchloride oder Eisensulfate. Korrosionszellen können sich dann nicht mehr bilden. Die Erzeugung fehlerfreier Beschichtungen und Anstriche wird dadurch sehr erleichtert.

b_O Breite der strahlbeeinflussten Zone
r_E Kantenradius (Strahleintrittseite)
h_S Glattschnitt
h_R Restflächenhöhe
h_S/s Glattschnittanteil
M Messbereich zum Bestimmen von u und α
R_S Schnittflächenrauheit
h_R/s Restflächenanteil
R_R Restflächenrauheit
b_G Gratbreite
h_G Grathöhe
u Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz
α Flankenwinkel
s Werkstückdicke
Δs = 0,1 s für s < 2 mm
= 0,2 mm für $s \geq 2$ mm

[1] Gemittelte Rautiefe *Rz,DIN*, gemessen bei 0,5 s für s < 2 mm. Ist eine durch eine wellenartige Struktur gekennzeichnete Restfläche vorhanden, dann sollte R_S bei $\Delta h = 0{,}5\,h_S$ und R_R bei $\Delta h = 0{,}5\,h_R$ gemessen werden.

Bild 4-183
Kenngrößen an Schnittflächen von abrasiv-wasserstrahlgeschnittenen Werkstücken in Anlehnung an DIN EN ISO 9013, nach VDI 2906 Blatt 10.

Hochdruckwasserstrahlbearbeitung

	Wasserstrahlen	Gussputzen	Entgraten	Schneiden
Druckbereich	> 350 bar	80 – 700 bar	200 – 1000 bar	1000 – 4000 bar
Anwendung	Säubern von Oberflächen aller Art	Kern- und Formreste komplexer Geometrie beseitigen	Schwer zugängliche Bearbeitungsgrate entfernen	Faserverbundwerkstoffe, Kunststoffe, Dämmstoffe, Textil, Gummi, Steine
Vorteile	Reinigen/Beseitigen: Flugrost, Salzlösungen, Beschichtungen, Korrosionszellen	Staubfrei, kurze Bearbeitungszeit, beschädigungsfrei, flexibel einsetzbar	Kurze Bearbeitungszeit, gleichzeitige Reinigung, flexibel einsetzbar, automatisierbar	Staubfrei, »kalter« Schnitt, geringe Schnittkraft, schmale Trennfuge, beliebige Schnittrichtung
Verfahrensgrenzen	Toträume	Toträume	Werkstofffestigkeit, Gratdicke	Werkstofffestigkeit, Schnitttiefe, Schnittqualität

Bild 4-184
Anwendungsgebiete des Hochdruckwasserstrahls (erweitert nach König).

4.11 Gestaltung von Schnittteilen

4.11.1 Werkstoffausnutzung

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-185

Bild 4-185
Schnittteile sind mit möglichst kleinem Flächeninhalt A_W zu entwerfen. Bei der Gestaltung ist darauf zu achten, dass sie 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 $y = A_W/A_{St}$.

Bild 4-186

Bild 4-186
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).

Bild 4-187

Bild 4-187
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.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-188

Bild 4-189

Bild 4-190

Bild 4-188 bis Bild 4-190
Durch abschnittgerechtes Gestalten können Ausschnitte durch Abschnitte ersetzt werden, die ein lückenloses Aneinanderreihen gestattet.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-191

Bild 4-191
Wirtschaftlichere Ausschnittsformen lassen sich auch durch Ändern der Schnittteilform 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 Flächenschluss möglich.

Bild 4-192
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 (Bild 4-186).

Bild 4-192

4.11.2 Fertigung

Bild 4-193
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.

Bild 4-193

Bild 4-194
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).

Bild 4-194

Bild 4-195
Aufteilen der Schneidstempel in einfache, gut schleifbare Querschnitte mit scharfkantigen Übergängen ermöglicht ein einfaches Fertigen.

Bild 4-195

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-196

Bild 4-196
Stempelecken sollten abgeschrägt und nicht abgerundet werden, um ein einwandfreies Zusammentreffen der Schnittlinien zu gewährleisten.

Bild 4-197

Bild 4-197
Kräftig ausgebildete Stempelecken bewirken einen geringeren Werkzeugverschleiß und eine größere Sicherheit gegen Werkzeugbruch.

4.11.3 Genauigkeit

Bild 4-198

Bild 4-198
Bei nacheinander abgeschnittenen Kanten ist ein tangentiales Einmünden zu vermeiden und durch Ecken zu ersetzen ($R > B/2$).

Bild 4-199

Bild 4-199
Ein Lochversatz fällt optisch bei geradlinigen Begrenzungskanten weniger auf als bei runden Kanten.

Bild 4-200

Bild 4-200
Beim schrägen Abschneiden eines Werkstücks 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.

Bild 4-201

Bild 4-201
Man sollte keine unterschiedlichen Ecken und Rundungen am gleichen Teil vorsehen (Bild links). Mit $a = a_1 = a_2$ und $b = b_1 = b_2$ erspart man das Vorlochen und nutzt den Werkstoff vollständig aus.

Bild 4-202
Bei Umgrenzungen, die im Folgeschnitt gefertigt sind, kann Versatz entstehen, der durch Streifentoleranzen, Führungsfehler oder den Stempelversatz bedingt ist. Bei geraden Kanten im Schnittwerkzeug können solche Fehler vermieden werden.

Bild 4-202

4.11.4 Beanspruchung

Bild 4-203
Bei Blechdicken $s \geq 3$ mm verhindern abgeschrägte Stempelformen eine Eckendeformation des Werkstücks.

Bild 4-203

Bild 4-204
Bei Schnittteilen, die anschließend gebogen werden, ist die Biegekante rechtwinklig zur Außenkante zu legen, da sonst die Gefahr des Einreißens beim Biegen besteht.

Bild 4-204

Bild 4-205
Ausreichende Steg- und Randbreiten vermindern die Rissgefahr beim Ausschneiden bzw. Lochen (siehe VDI 3367).

Bild 4-205

Bild 4-206
Man sollte einen minimalen Lochdurchmesser $d_{min} = s$ nicht unterschreiten, da sonst eine erhöhte Bruchgefahr für das Werkzeug besteht. Bei günstigen Bedingungen kann $d_{min} \approx 0{,}4\,s$ erreicht werden (Beratung mit dem Werkzeugkonstrukteur erforderlich).

Bild 4-206

4.12 Gestaltung spanend herzustellender Werkstücke

4.12.1 Allgemeines

Das fertigungsgerechte Gestalten von Werkstücken, die spanend bearbeitet werden sollen, erfordert die Beachtung einiger Grundsätze, die unabhängig vom Fertigungsverfahren gelten:

- Geometrisch einfache Grundkörper wählen,
- das Zerspanvolumen gering halten,
- auf Spannmöglichkeit für die Bearbeitung achten,
- nach Möglichkeit in einer Aufspannung fertig bearbeiten,

- ebene Bearbeitungsflächen möglichst parallel oder senkrecht zur Aufspannfläche legen,
- die zu bearbeitenden Flächen müssen für das Werkzeug gut zugänglich sein,
- Werkzeugauslauf (nach DIN 509) vorsehen,
- den Einsatz genormter Werkzeuge vorsehen,
- Drehen und Bohren bevorzugen gegenüber Fräsen und Hobeln,
- Oberflächengüten und Toleranzen auf das unbedingt Nötige beschränken,
- Allgemeintoleranzen (DIN ISO 2768) beachten.

Nachstehend folgen ausgewählte Gestaltungshinweise für die Fertigungsverfahren Drehen, Bohren, Senken, Reiben, Fräsen, Hobeln, Stoßen, Räumen und Schleifen.

4.12.2 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 seien drei Beispiele für Ursachen von Formabweichungen und ihre jeweiligen Auswirkungen angeführt:

Bild 4-207
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.

Bild 4-208
Wird ein Drehteil einseitig eingespannt, so tritt als Folge der Kraft *F* des Drehmeißels ebenfalls ein Biegemoment auf, welches zur dargestellten Formabweichung führt.

Bild 4-209
Wird ein Rundmaterial in ein Futter eingespannt, um eine Bohrung auszudrehen, so ergibt sich in dieser eine Rundheitsabweichung infolge der Spannkräfte.

Bild 4-207

Bild 4-208

Bild 4-209

Gestaltungsbeispiele Drehen

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-210
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.

Bild 4-210

Bild 4-211
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.

Bild 4-211

Bild 4-212
Wellen mit einem Bund erfordern einen großen Zerspanungsaufwand. Ein Stellring 1 oder ein aufgeschrumpfter Ring 2 können u. U. den Bund ersetzen.

Bild 4-212

Bild 4-213
Beim Kegeldrehen soll der Drehmeißel auslaufen können. Der Anschnitt sollte daher nicht wie bei 1 angeordnet sein, sondern wie bei 2 freiliegen.

Bild 4-213

Bild 4-214
Abgesetzte lange und dünne Drehteile sind zu vermeiden. Wirtschaftlicher ist das Herstellen aus zwei Teilen unter Verwendung von Halbzeugen.

Bild 4-214

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-215
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.

Bild 4-215

Bild 4-216
Ausreichend breite Spannflächen sind besonders bei Teilen vorzusehen, die im Dreibackenfutter gespannt werden, um ein sicheres Spannen und eine große Spanabnahme zu ermöglichen.

Bild 4-216

Bild 4-217
In Richtung zur Einspannung ansteigende Durchmesser ermöglichen auf Drehautomaten gleichzeitiges Drehen und Bohren.

Bild 4-217

Bild 4-218
Bei gleichzeitigem Plandrehen mehrerer Wellenabsätze auf Drehautomaten hängt die Bearbeitungszeit von der größten Durchmesserdifferenz ab. Daher sollte $b_1 = b_2 = b_3$ sein.

Bild 4-218

4.12.3 Gestaltung für das Bohren, Senken, Reiben

Bild 4-219
Grundlöcher mit ebenem Bohrungsgrund sind zu vermeiden. Bei geforderter ebener Auflagefläche ist vorzubohren und nachfolgend zu senken (2, 3).

Bild 4-219

Bild 4-220
Bei abgesenkten Bohrungen ist der Einsatz genormter Zapfensenker zu ermöglichen (d_1, d_2; s. hierzu DIN 373, DIN 375).

Bild 4-220

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-221
Wie beim Kegeldrehen (Bild 4-213) 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.

Bild 4-221

Bild 4-222
Nicht nur ein schräger Anschnitt, sondern auch ein schräger Auslauf von Bohrungen kann zum Verlaufen oder zum Abbrechen des Bohrers führen.

Bild 4-222

Bild 4-223
Bohrungen in Wellen sind sowohl für den Anschnitt als auch für den Auslauf mit Flächen senkrecht zur Bohrungsachse vorzubereiten oder sie sind mittig zu führen. Die Vorbereitung kann durch Senken, besser durch Fräsen erfolgen, aber sie verteuert die Fertigung.

Bild 4-223

Bild 4-224
Beim gleichzeitigen Bohren unterschiedlich harter Werkstoffe, wie z. B. für das Verstiften, besteht die Gefahr des Verlaufens und Abbrechens des Bohrers.

Bild 4-224

Bild 4-225
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.

Bild 4-225

Bild 4-226
Die Bearbeitung ist auf die Funktionsflächen zu begrenzen. Man achte dabei auf den Werkzeugauslauf.

Bild 4-226

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-227

Bild 4-227
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.

Gestaltung von Gewinden

Bild 4-228

Bild 4-228
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.

Bild 4-229

Bild 4-229
Freistiche für Innengewinde sind nach DIN 76-1 bis 3 ausreichend lang vorzusehen, um den Werkzeugauslauf zu sichern.

Bild 4-230

Bild 4-230
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.

Bild 4-231

Bild 4-231
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.

Bild 4-232

Bild 4-232
Gewindedurchgangsbohrungen für Stiftschrauben müssen in ausreichendem Abstand von Wandungen angeordnet werden, da sonst der Gewindebohrer einseitig beansprucht wird und verläuft (Bruchgefahr).

4.12.4 Gestaltung für das Fräsen

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-233
Für das Fräsen eines Vierkants ist ein Absatz 1 oder 3 vorzusehen, damit die Stirnfläche 2 vor dem Fräsen fertiggedreht werden kann.

Bild 4-233

Bild 4-234
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-Verrundung.

Bild 4-234

Bild 4-235
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.

Bild 4-235

Bild 4-236
Die eben verlaufende Grundfläche 1 der Gabel erfordert einen langen Fräsweg. Die gewölbte Grundfläche 2 erfordert nur das kürzere Eintauchen des Fräsers.

Bild 4-236

Bild 4-237
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.

Bild 4-237

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-238

Bild 4-238
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.

Bild 4-239

Bild 4-239
Passfedernuten sind bei geringen Durchmesserunterschieden abgesetzter Wellen mit gleichen Abmessungen *(b × h)* auszuführen. Sie sollten aus fertigungstechnischen Gründen in einer Flucht liegen.

4.12.5 Gestaltung für das Hobeln und Stoßen

Bild 4-240

Bild 4-240
Hobeln und Stoßen gegen eine Kante ist nicht möglich. Der Meißel 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. Der nötige Vorlauf ist größer, als die Höhe der Schneide über der Meißelaufspannfläche. Aber auch seitlich neben der Bearbeitungsfläche (mindestens auf der Seite des Vorschubbeginns) muss mehr Raum freigehalten werden als der Meißel breit ist.

Bild 4-241

Bild 4-241
Unterbrochene Flächen, die durch Hobeln oder Stoßen zu bearbeiten sind, sollen möglichst in einer Ebene liegen.

Bild 4-242

Bild 4-242
Auflageflächen an Gehäusen und dgl. sind so zu gestalten, dass der Meißel nicht die gesamte Grundfläche mit der Vorschubgeschwindigkeit überstreichen muss. Im Beispiel ist die umlaufende Auflagefläche durch zwei Auflageleisten ersetzt.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-243
Nicht senkrecht zueinander liegende Bearbeitungsflächen erschweren die Bearbeitung und erfordern u. U. Spannvorrichtungen.

Bild 4-243

4.12.6 Gestaltung für das Räumen

Bild 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 verlaufen kann.

Bild 4-244

Bild 4-245

Bild 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.

Bild 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.

Bild 4-246

Bild 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.

Bild 4-247

Bild 4-248
Räumnadel und Werkstück werden bei 1 einseitig belastet. Das bedeutet Gefahr des Verlaufens oder des Werkzeugbruchs. Mehrfachsymmetrische Profile wie in 2 sind vorzuziehen.

Bild 4-248

Bild 4-249
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, auch wenn sie unterschiedliche Tiefen haben, mit derselben Räumnadel geräumt werden.

Bild 4-249

4.12.7 Gestaltung für das Schleifen

Bild 4-250
Übergangsrundungen 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 oder geschliffen werden, wobei gleichzeitig die Stirnfläche des Absatzes geschliffen werden kann.

Bild 4-250

Bild 4-251
Auch beim Innenschleifen muss Raum für den Schleifscheibenauslauf vorhanden sein.

Bild 4-251

Bild 4-252
Das Längs-Rundschleifen von Teilen, die beidseitig durch einen Bund begrenzt sind, ist teurer als das Schleifen mit axial ungehindertem Anstellen der Schleifscheibe.

Bild 4-252

Bild 4-253
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.

Bild 4-253

Bild 4-254
Wenn es die Genauigkeitsforderungen erlauben, sollte Einstechschleifen ermöglicht werden. Dafür müssen die zu schleifenden Profillängen kleiner als die zu verwendende Schleifscheibenbreite sein.

Bild 4-254

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 4-255
Mehrere (möglichst alle) Formelemente sollten mit dem gleichen Schleifscheibenprofil schleifbar sein.

Bild 4-256
Für das Einstech-Profil-Rundschleifen sollen möglichst kurze Profillängen angestrebt werden. Die maximalen Schleifbreiten sind nicht nur durch die verwendbaren Scheibenbreiten, sondern auch durch die Nachgiebigkeit des Werkstücks und seiner Einspannung begrenzt; je dünner das Werkstück, um so kürzer ist die zulässige Profillänge.

Bild 4-257
Es sind möglichst gleiche Kegel an einem Werkstück vorzusehen. Man achte auf den Schleifscheibenauslauf.

Bild 4-258
Verdeckt liegende Flächen können nicht mit geraden Schleifscheiben oder Topfschleifscheiben erreicht werden. Die Anwendung möglichst großer Schleifkörper erlaubt ein wirtschaftliches Schleifen.

Bild 4-259
Konturen, die über die Bearbeitungsfläche hinausragen, behindern in der Regel das Flachschleifen. Auch bei ausreichendem Werkzeugauslauf sollten Überstände vermieden werden.

Ergänzendes und weiterführendes Schrifttum

Ardelt, T.: Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik. Berlin: IPK, 2001.

Bernard, P., u. *G. Schreiber:* Verfahren der Autogentechnik. Fachbuchreihe Schweißtechnik, DVS-Verlag, Düsseldorf 1973.

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 1997.

Cinar, M.: Einsatzvorbereitung und Verschleißentwicklung Keramisch Gebundener CBN-Schleifscheiben, Dissertation, Universität Bremen, 1995

DIN 1416: Räumwerkzeuge; Gestaltung von Schneidzahn und Spankammer, 11/1971.

DIN 2310: Thermisches Schneiden.
Teil 6: Einteilung, Prozesse, 6/2003.

DIN 4760: Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem

DIN 6580: Begriffe der Zerspantechnik; Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges, 10/1985.

DIN 69111: Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel; Einteilung, Übersicht

DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung, 9/2003.

DIN 8589: Fertigungsverfahren Spanen.
Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 9/2003.
Teil 1: Drehen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. 9/2003.
Teil 2: Bohren, Senken, Reiben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 9/2003.
Teil 3: Fräsen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 9/2003.
Teil 4: Hobeln, Stoßen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 9/2003.
Teil 5: Räumen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 9/2003.

DIN EN 12584: Unregelmäßigkeiten an Brennschnitten, Laserstrahlschnitten und Plasmaschnitten – Terminologie, 6/1999.

DIN EN ISO 1101: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf, 2/2006.

DIN EN ISO 13565: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften

DIN EN ISO 9013: Thermisches Schneiden – Einteilung thermischer Schnitte – Geometrische Produktspezifikation und Qualität, 7/2003.

DIN ISO 1832: Wendeschneidplatten für Zerspanwerkzeuge – Bezeichnung, 11/2005.

DIN ISO 513: Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden – Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen, 11/2005.

DIN ISO 525: Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel – Allgemeine Anforderungen, 8/2000.

DIN ISO 6104: Schleifwerkzeuge mit Diamant oder Bornitrid - Rotierende Schleifwerkzeuge mit Diamant oder kubischem Bornitrid - Allgemeine Übersicht, Bezeichnung und Benennungen in mehreren Sprachen (ISO 6104:2005)

DIN 51385: Schmierstoffe; Kühlschmierstoffe; Begriffe, 6/1991.

DIN 8590: Fertigungsverfahren Abtragen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 9/2003.

DIN 9812: Säulengestelle mit mittig stehenden Führungssäulen, 12/1981.

Degner, W., H. Lutze, u. *E. Smejkal:* Spanende Formung, Hanser-Verlag, München, Wien, 15. Aufl. 2002.

F. Klocke, u. *W. König:* Fertigungsverfahren. Bd. 1: Drehen, Fräsen, Bohren. 8. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2008.

Flimm, J.: Spanlose Formgebung, 7. Aufl . Carl-Hanser-Verlag, München, Wien 1996.

Flores, G.: Grundlagen und Anwendungen des Honens. Vulkan-Verlag. Essen 1992

Fritz, A. H., J. Sternberg, u. *W. Kühnlein:* Geräuschminderung beim Schweißen und Brennschneiden. EG-Forschungsbericht Nr. 7257-73-78/376/01. Berlin: TFH/ILFA-Institut 1988.

Guo, N.-S.: Schneidprozeß und Schnittqualität beim Wasserabrasivstrahlschneiden. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Fertigungstechnik Nr. 328. VDI-Verlag, Düsseldorf 1994.

Gäbler, J., L. Schäfer, A. Wenda, u. H.-W. Hoffmeister: Development and application of CVD diamond micro tools for milling and grinding, Proceedings of the 1st international conference and general meeting of the european society for precision engineering and nanotechnology, Bremen, 31. Mai – 4. Juni 1999, S. 434-438.

Haasis, G.: Möglichkeiten der Optimierung beim Honen. Werkstatt und Betrieb 108 (1975), H. 2, S. 95/107.

Hermann, F.-D.: Thermisches Schneiden. Die Schweißtechnische Praxis, DVS-Verlag Düsseldorf 1979.

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

Hoffmeister, H-W., u. *M. Hlavac:* Profilieren von CBN-Mikroschleifscheiben mit Diamantprofilrollen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Lappen und Polieren, 63. Ausgabe. Vulkan-Verlag, Essen 2007, S 220/230.

Hoffmeister, H.-W. u. *Hahmann, W.-C.:* Influence of Machining with Lapping Foils on Surface Integrity of Hardened Steel, 1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), Bremen, Deutschland, Elsevier, 2012

Hoffmeister, H.-W., u. *M. Hlavac:* Schleifen von Mikrostrukturen. Tagungsband, 10. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium, Braunschweig, 7. bis 9. Oktober 2002.

Horowitz, J.: Oberflächenbehandlung mittels Strahlmitteln. Bd. 1 und 2. Foster-Verlag AG, Zürich 1976.

ISO 3002: Grundbegriffe für das Zerspanen und Schleifen; Teil 1: Geometrie am Schneidteil spanender Werkzeuge; Allgemeine Begriffe, Bezugssysteme, Werkzeug, Spanbrecher und Wirkwinkel, 8/1982.

Klink, U.: Honen. Jahresübersichten in der VDI-Z.

König, W., u. *F. Klocke:* Fertigungsverfahren. Bd. 2. Schleifen, Honen, Lappen. 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.: Kühlschmierstoffe für die Metallzerspanung. verlag moderne industrie, Landsberg/Lech 1999.

Linke, B.: Wirkmechanismen beim Abrichten keramisch gebundener Schleifscheiben, Dissertation, RWTH Aachen, 2007

Malkin, S. u. *Guo, C.:* 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. Jahrbuch: 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 Riegger Diamantwerkzeuge GmbH, 1999

Mushardt H.: Modellbetrachtungen und Grundlagen zum Innenrundhonen. Reihe 2 Fertigungstechniken Nr 117. VDI Verlag. 1986

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.

Saljé, E., u. *E. Westkämper (Hrsg.):* Jahrbuch Schleifen, Honen, Lappen und Polieren. Vulkan-Verlag, Essen 1993.

Saljé, E., u. *G. Rohde:* Rundschleifmaschinen. VDI-Z. 124 (1982), Nr. 23/24.

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, 2012.

Tamaschke, W.: Schneiden von Stahlblech mit CO_2-Laser. Zeitschrift für industrielle Fertigung 72 (1982), S. 323/26.

Tschätsch, H. u. *J. Dietrich:* Praxis der Zerspantechnik. Vieweg Verlag 2011.

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.: Werkzeugmaschinen, Bd. 2. Konstruktion und Berechnung. 6. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1997.

Wegener, K., Hoffmeister, H.-W., Karpuschewski, B., Kuster, F., Hahmann, W.-C., Rabiey, M.: Conditioning and monitoring of grinding wheels, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 60, Elsevier-Verlag, 2011

Wiens, A.: Formhonen von Zylinderlaufbahnen. Vulkan-Verlag. 2011

Witt, G.: Taschenbuch der Fertigungstechnik. Hanser Verlag, München, Wien 2006.

www.wissensfloater.de – Visuelle Kurzeinführung zum Drehen (BZI Remscheid)

5 Umformen

5.1 Einteilung und Vorteile der Umformverfahren

Unter Umformen versteht man gemäß DIN 8580, eine gegebene Roh- oder Werkstückform in eine bestimmte andere Zwischen- oder Fertigteilform zu überführen. Dabei werden die Stoffteilchen so verschoben, dass der Stoffzusammenhalt 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.

Bild 5-1 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 Werkzeuggeometrie 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 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 gemäß Bild 5-2 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 Rohlings [48].

Umformverfahren, bei denen sowohl kalt als auch warm umgeformt wird, sind z. B. das Walzen, Fließpressen und Prägen. Eine Einteilung der Umform-

[48] Als 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.

Bild 5-1
Unterteilung der Fertigungsverfahren der Umformtechnik in Untergruppen nach DIN 8582.

A. H. Fritz, G. Schulze (Hrsg.), *Fertigungstechnik,* Springer-Lehrbuch
DOI 10.1007/978-3-642-29786-1_5, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

verfahren 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 Entnahmevorrichtungen 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 Endbearbeitungsverfahren. Mit einigen Umformverfahren lassen sich sehr kleine Toleranzen einhalten. Zum Beispiel kann beim Fließpressen eine Wanddickenabweichung bei 600 mm Durchmesser von bis zu ± 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 preiswertere Stähle mit geringerer Festigkeit als Rohling eingesetzt werden.

Bild 5-2
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.

– Eine höhere Gestaltfestigkeit und eine verringerte Kerbwirkung lassen sich bei Umformteilen mit nicht angeschnittenem Faserverlauf erreichen.

5.2 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* (Bild 5-3). In Metallen findet man meist drei Grundformen: 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 Bild 5-4.

Bild 5-3
Anordnung von Atomen in einer kubisch-raumzentrierten Elementarzelle (Gitterabstand bei α-Eisen: $a = 287 \cdot 10^{-9}$ mm).

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 im Bild 5-5. Die Ebenen sind bei kubisch-raumzentrierten (krz) Metallen (z. B. α-Eisen, Wolfram, Chrom) die Flächen des sog. Rhomben-Dodekaeders. 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[49].

Bei einem Vielkristall, der aus zahlreichen Kristalliten mit unregelmäßigen Korngrenzen besteht, ha-

[49] Genauer lassen sich diese Vorgänge nur mit dem Versetzungsbegriff beschreiben, dessen Erklärung in diesem Zusammenhang aber zu weit führen würde.

a) *b)*

Bild 5-4
Aus Kristalliten aufgebautes Gefüge eines Metalls: a) Vielkristall im Ausgangsgefüge, b) Gefüge nach der Umformung.

Bild 5-5
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)

ben die Gleitebenen unterschiedliche Orientierung (Bild 5-4). 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.

Für das Berechnen der Umformvorgänge hat man *Kenngrößen der Formänderung* definiert. Während des Umformvorgangs bleibt das Volumen des umgeformten Körpers annähernd gleich. Wird ein Quader mit den Ausgangsabmessungen h_0, b_0 und l_0 auf die Endabmessungen h_1, b_1 und l_1 gemäß Bild 5-6 gestaucht, so gilt die Beziehung

$$V = h_0\, b_0\, l_0 = h_1\, b_1\, l_1 = \text{konst.} \qquad [5\text{-}1]$$

Die Größe von Formänderungen kann in verschiedener Weise angegeben werden:

Bild 5-6
Gestauchter Quader mit idealisierter Geometrie nach dem Umformen.

– 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):

$$\varepsilon_h = \frac{h_1 - h_0}{h_0};\quad \varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0};\quad \varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0}.$$

– Das **Formänderungsverhältnis** ist das Verhältnis der geometrischen Abmessungen vor und nach dem Umformen (Stauchgrad, Breitungsgrad, Streckgrad):

$$\gamma = \frac{h_1}{h_0};\quad \beta = \frac{b_1}{b_0};\quad \lambda = \frac{l_1}{l_0}.$$

– Der **Umformgrad** ist das logarithmische Verhältnis:

$$\varphi_h = \ln\frac{h_1}{h_0};\quad \varphi_b = \ln\frac{b_1}{b_0};\quad \varphi_l = \ln\frac{l_1}{l_0}.$$

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 erforderlichen Kraftbedarfs ist stets der Ver-

gleichsumformgrad 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:

$$\varphi_h + \varphi_b + \varphi_l = 0. \qquad [5\text{-}2]$$

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 dreiachsigen Spannungszustand kann in Anlehnung an *Mohr* ohne Berücksichtigung der mittleren Hauptnormalspannung die *Fließbedingung* definiert werden:

$$\sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\,\tau_{max} = \sigma_v \qquad [5\text{-}3]$$

mit σ_v als der einachsigen Vergleichsspannung. Diese wird nach unterschiedlichen *Festigkeitshypothesen (Fließbedingungen)* berechnet und zwar nach der Normalspannungshypothese, der Schubspannungshypothese nach *Tresca* (s. Gl. [5-3]) 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 Bild 5-7 hervor. Darin sind die *Mohrschen 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 wird ein größeres Umformvermögen erreicht als unter Zugspannungszuständen. Im Grenzfall können mehrachsige Zugspannungen verformungslose Trennbrüche auslösen.

Im Spannung-Dehnung-Schaubild nach Bild 5-8 tritt beim Werkstoff Stahl (mit verhältnismäßig wenig Kohlenstoff) eine ausgeprägte obere Streckgrenze

Bild 5-7
Mohrsche Spannungskreise und Grenzfestigkeiten für unterschiedliche Hauptnormalspannungszustände.
τ_B *Schubfestigkeit*
τ_F *Schubfließgrenze*
τ_{max} *maximale Schubfestigkeit*

Bild 5-8
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*

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 gemäß Bild 5-9 heißt Fließkurve und ist für unterschiedliche Werkstoffe von der Höhenlage und dem Verfestigungsanstieg abhängig. Für die meisten in der Umformtechnik angewendeten Metalle und Metalllegierungen 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 näherungsweise erfasst werden. Zwischen φ und ε besteht der Zusammenhang [50]

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon). \qquad [5\text{-}4]$$

Bild 5-9
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 $k_f = 620$ N/mm².

[50] Nach Definition ergibt sich die wahre Dehnung oder der Umformgrad φ aus:

$$\varphi = \int_{l_0}^{l_1} \frac{\mathrm{d}l}{l} = \ln\frac{l_1}{l_0} = \ln\frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1+\varepsilon).$$

Für kleine Werte von $|\varepsilon| < 0{,}2$ 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

$$k_f = C\,\varphi^n. \qquad [5\text{-}5]$$

Für die Konstanten C und n gelten nach *Reihle* folgende Zusammenhänge:

$$C = R_m\,(\mathrm{e}/n)^n, \qquad [5\text{-}6]$$

$$n = \varphi_{gl}. \qquad [5\text{-}7]$$

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. [5-5] annähern lassen, sind in doppellogarithmischer Darstellung der Fließspannung k_f in Abhängigkeit vom Umformgrad φ eine Gerade. Der *Verfestigungsexponent n* ergibt sich als tan α 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:

$$n = \varphi_{gl} = \ln(1 + A_{gl}) = \ln(1 + 2\,A_{10} - A_5). \qquad [5\text{-}8]$$

Aus vorverfestigten Proben, die z. B. durch Walzen oder Drahtziehen zu mehr als $\varphi \approx 0{,}4$ umgeformt wurden, lässt sich im Zugversuch die Fließspannung ermitteln. Die Spannung-Dehnung-Schaubilder solcher Zugproben zeigen fast keinen Dehnungsbereich mehr, so dass 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 Bild 5-10 aus: Kurze Zylinderproben nehmen Tonnenform an, schlanke Proben bauchen an den En-

den aus. Dadurch kann keine homogene Umformung erfolgen, der Spannungszustand ist nicht mehr einachsig. 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 Reibschubspannungen aufheben. Dies ist der Fall, wenn zwischen dem Neigungswinkel α der Kegelflächen und der Reibungszahl μ die Beziehung

$$\mu = \tan \alpha \qquad [5\text{-}9]$$

besteht. Für Stahl bei Raumtemperatur und bei guter Schmierung gilt $\alpha = 1{,}5\,°$; hierbei kann man den Umformgrad noch mit guter Näherung aus der mittleren Probenhöhe errechnen.

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

$$k_f = \frac{F}{A_0} \cdot e^{\varphi}; \qquad [5\text{-}10]$$

hierbei bedeuten F die gemessene Umformkraft, A_0 die Fläche vor der Umformung und

$$\varphi = \ln \frac{l_1}{l_0} \text{ bzw. } \varphi = \ln \frac{h_1}{h_0}.$$

Bild 5-10
Ausbauchung bei zylindrischen Stauchkörpern:
a) kurze Probe mit $h_0/d_0 = 1{,}0$
b) schlanke Probe mit $h_0/d_0 = 2{,}5$

Mit Hilfe der Fließkurven können *Umformkräfte* und *Umformarbeiten* berechnet werden.

Nach Lösungsansätzen der elementaren Plastizitätstheorie ergibt sich zum verlustfreien Umformen eines nicht verfestigten Werkstoffs die ideelle Umformarbeit zu

$$W_{id} = V \int_0^{\varphi_1} k_f \, d\varphi = V \, k_f \, \varphi_1. \qquad [5\text{-}11]$$

Hierin bedeutet:
V umgeformtes Werkstoffvolumen,
k_f Fließspannung des Werkstückstoffs,
φ Umformgrad.

Bei verfestigten Werkstoffen ist eine mittlere Fließspannung k_{fm} als Integralwert einzusetzen:

$$k_{fm} = \frac{1}{\varphi_1} \int_0^{\varphi_1} k_f \, d\varphi. \qquad [5\text{-}12]$$

Näherungsweise kann auch der arithmetische Mittelwert der Fließspannungen vor und nach der Umformung aus der Fließkurve berechnet werden:

$$k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{f1}}{2}. \qquad [5\text{-}13]$$

Bei den Umformverfahren in der Praxis bewirken zusätzliche Verluste durch Reibung, innere Schiebungen im Werkstoff, Biegung u. ä. eine im Vergleich zu Gl. [5-11] größere Umformarbeit:

$$W_{ges} = \frac{W_{id}}{\eta_F}. \qquad [5\text{-}14]$$

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:

$$\eta_F = \frac{F_{id}}{F_{ges}}. \qquad [5\text{-}15]$$

Diese Beziehung gilt allerdings nur für stationäre Vorgänge; bei allen anderen Umformvorgängen muss statt mit F_{ges} mit einer mittleren Kraft gemäß

$$\overline{F} = W_{ges} / s \qquad [5\text{-}16]$$

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 A_1 erforderliche ideelle Umformkraft F_{id}:

$$F_{id} = A_1 \, k_f . \qquad [5\text{-}17]$$

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 Tiefziehen, muss zusätzlich der Umformgrad berücksichtigt werden:

$$F_{id} = A_1 \, k_{fm} \, \varphi_1 . \qquad [5\text{-}18]$$

In dieser Gleichung ist A_1 der Endqerschnitt, 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 Bild 5-11 zeigt. Je höher die Umformtemperatur ist, desto niedriger ist die (Warm-)

Bild 5-11
Warmfließkurven bei verschiedenen Temperaturen für den Stahl C45, Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi} = d\varphi/dt$ in s^{-1} (nach H.-G. Müller).

Fließspannung bei konstanter Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi} = \mathrm{d}\varphi/\mathrm{d}t$, 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 Temperaturführung kann auch ein bestimmtes Gefüge erzielt werden (z. B. feinkristallines Grobblech).

Während beim Kaltumformen vor allem der Umformgrad φ die Form der Fließkurve beeinflusst, 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. Bild 5-12 zeigt als Beispiel für den Umformgrad $\varphi = 0{,}3$ die Fließspannungen k_f für den Stahl C45 (nach *H.-G. Müller*). Je höher die Umformtemperatur ist, desto steiler verläuft die Kurve.

Bei $\dot{\varphi} = 10\ \mathrm{s}^{-1}$ fließt der Stahl C 45 bei einer Umformtemperatur von 1100 °C erst bei der dreifachen Fließspannung im Vergleich zu $\dot{\varphi} = 0{,}01\ \mathrm{s}^{-1}$. Das Werkstück hat bei dem schnelleren Umformvorgang eine höhere Festigkeit als ein gleiches Werkstück bei 900 °C, das langsam umgeformt wird ($\dot{\varphi} = 0{,}01\ \mathrm{s}^{-1}$).

Der Einfluss der Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ auf die Fließspannung kann mit sogenannten *Plastometern* ermittelt werden. Diese Maschinen erlauben z. B. ein Stauchen mit konstanter Umformgeschwindigkeit. Da $\dot{\varphi}$ bei homogener Umformung nach der Gleichung

$$\dot{\varphi} = \mathrm{d}\varphi/\mathrm{d}t = v_{\mathrm{wz}}/h \qquad [5\text{-}19]$$

von der Werkzeuggeschwindigkeit v_{wz} und der augenblicklichen Probenhöhe h abhängt, wird bei Plastometern die Stauchbahngeschwindigkeit hydraulisch oder mechanisch nach entsprechenden Kurvenscheiben gesteuert.

5.3 Druckumformen

Bei den Verfahren für das Druckumformen wird der plastische Zustand im Werkstoff durch ein- oder mehrachsige Druckspannungen hervorgerufen. Nach

Bild 5-12
Fließspannung k_f für den Stahl C45 in Abhängigkeit von der Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$.

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).

5.3.1 Walzen

5.3.1.1 Definition und Einteilung nach DIN 8583

Das Verfahren ist definiert als stetiges oder schrittweises Druckumformen mit sich drehenden 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 Schrägwalzen, wie die Übersicht Bild 5-13 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 Bild 5-14 angedeutet.[51]

Nach diesen Walzverfahren können auch Hohlkörper hergestellt werden. Hervorzuheben sind das Walzen von Vierkantrohren und die Rohrherstellung nach dem Pilgerschrittverfahren.

[51] Walzen von Schienen, Fa. Voestalpine AG. www.wissensfloater.de

Bild 5-14
Walzenausführungen beim Längswalzen.

Bild 5-15
Pilgerschrittwalzen zum Erzeugen nahtloser Rohre (Mannesmann-Verfahren).

Das *Pilgerschrittwalzen* dient zum Erzeugen dünnwandiger nahtloser Rohre. Hierbei erfolgt das Umformen abschnittweise durch Strecken der dickeren Rohrwand über einem Dorn gemäß Bild 5-15. Üblicherweise wird beim Warmwalzen ein zylindri-

Bild 5-13
Einteilung der Walzverfahren nach DIN 8583.

scher 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 Bild 5-16, 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. Bild 5-17 zeigt die Arbeitsweise. Zwei angetriebene Walzköpfe

Bild 5-16
Reckwalzen zum Erzeugen von Formteilen (Massenverteilung für Gesenkschmiede-Rohlinge).

Bild 5-17
Planetenwalzverfahren für Vielkeilwellen (Grob-Verfahren).

Bild 5-18
Querwalzen von Vollkörpern für das Glattwalzen im Einstechverfahren.

Bild 5-19
Querwalzen von Hohlkörpern für das Walzen von Eisenbahnrädern.

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, so dass 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 gemäß Bild 5-18 und von Hohlkörpern entsprechend Bild 5-19.

Beim *Walzen von Ringen* werden geschlossene Hohlkörper hergestellt, deren Umfang sich ständig vergrößert.

Zum Profil-Querwalzen von Vollkörpern gehört das *Gewindewalzen,* das Bild 5-20 zeigt. Falls die Genauigkeitsanforderungen nicht zu hoch sind, ist das Walzen von Gewinden häufig wirtschaftlicher als eine spanende Gewindeherstellung. Es wird als Kaltumformverfahren mit Werkstoffen durchgeführt, deren Zugfestigkeit R_m unter 1200 N/mm² 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,
- pressblanke Oberfläche,
- erhöhte Dauerfestigkeit,
- ausreichende Genauigkeit,
- erhebliche Werkstoffeinsparung gegenüber dem Spanen,
- minimale Fertigungszeit auf Automaten.

Bild 5-20
Profil-Querwalzen von Vollkörpern für das Gewindewalzen im Einstechverfahren.

Bild 5-21
Härteverteilung nach dem Gewindewalzen (Gewinde M8, vergüteter Chrom-Vanadium-Stahl; Kernhärte 340 HV 0,1).

Die vom Kern in Richtung der äußeren Randzonen ansteigende Härteverteilung eines gewalzten Gewindes geht aus Bild 5-21 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 gemäß Bild 5-22. Der Schraubenrohling wird zwischen

Bild 5-22
Flachbackenwerkzeuge für das Erzeugen von Gewinden oder Vielkeilwellen (Roto-Flo-Verfahren).

Bild 5-23
Gewindewalzen mit einseitiger radialer Zustellung.
e = Exzentrizität des Werkstückmittelpunktes.

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 Bild 5-23 verdeutlicht. Dabei liegt das 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 radialen 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 **Schrägwalzen** sind die Walzenachsen entsprechend Bild 5-24 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, so dass das Werkstück schraubenförmig in Vorschubrichtung über die Stopfenstange bewegt wird. Infolge des Kegelwinkels verengt sich der Walzspalt; dies führt zu einer Stauchung des Werkstoffs 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.

Bild 5-24
Schrägwalzen mit doppelkegeligen Walzen (Stopfenwalzwerk zur Rohrherstellung).

Bild 5-25
Schräggestellte Glättwalze zum Einebnen von Drehriefen; erreichbare Rauheit Rz ≈ 0,5 µm.
l = Länge der Eindruckmarke.

Bild 5-26
Schräggestellte Profilwalzen zur Gewindeherstellung (Durchlaufverfahren für Endlosgewinde).

Schrägwalzverfahren werden auch mit scheiben- und kegelförmigen Walzen bei der Rohrherstellung sowie mit zylinderförmigen Walzen beim *Glattwalzen* von Rohren und Stäben gemäß Bild 5-25 eingesetzt. Beim Gewindewalzen im Durchlaufverfahren können schräggestellte Profilwalzen mit in sich

geschlossenen Gewindefurchen eingesetzt werden; dies verbilligt die Werkzeugherstellung. Bild 5-26 zeigt das Prinzip.

5.3.1.2 Verhältnisse im Walzspalt

Zur Konstruktion von Walzwerken und deren Antrieben ist es notwendig, die Walzkräfte, Walzmomente, den Arbeitsbedarf und die Walzleistungen vorauszuberechnen. 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 Bild 5-27 hervorgeht.

Bild 5-27
Walzenanordnung in Walzgerüsten (schematisch).

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 gemäß Bild 5-28 zu erkennen:

- Der *Walzspalt* ist der Raum zwischen den Walzen, der durch die Verbindungslinien 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').
- Als *gedrückte Länge* l_d bezeichnet man die Projektion des Walzbogens $\widehat{EA}$ 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 $b_m = (b_0 + b_1)/2$.

Bild 5-28
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*

– 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 Bild 5-28 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 5-28 sind die *Spannungsverhältnisse* im Walzspalt dargestellt. Der Walzdruck entspricht dem Walzspaltein- und 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. Bild 5-29a) 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

$$\tan \alpha = \mu \leq \tan \rho, \qquad [5\text{-}20]$$

mit dem Walzwinkel $\alpha \approx \sqrt{\Delta h/R}$.

Das Greifvermögen ist abhängig von der
– *Walzguttemperatur*, d. h. mit steigender Temperatur ϑ sinkt die Reibungszahl, z. B. von $\mu = 0{,}5$ bei 700 °C auf $\mu = 0{,}25$ bei 1200 °C, der
– *Walzengeschwindigkeit* (von $\mu = 0{,}6$ bei 1,75 m/s auf $\mu = 0{,}5$ bei 3,5 m/s für $\vartheta = 700$ °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 Bild 5-29b) 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 *Coulombschen* Reibgesetzes $F_R = \mu F_N$ die Beziehung

$$\tan \alpha/2 \leq \mu = \tan \rho. \qquad [5\text{-}21]$$

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 Walzgutanfang anzuspitzen, oder das Walzgut zu beschleunigen, um Greifen zu erzwingen. Auch durch partielle Kühlung kann die Reibungszahl am Walzgutanfang 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

Bild 5-29
Winkelverhältnisse im Walzspalt beim Flachwalzen:
a) Greifen des Walzgutes
b) Durchziehen des Walzgutes

– die Reibung, z. B. gilt für das Walzen von Stahl im Bereich $\vartheta = 700\,°C$ bis $\vartheta = 1200\,°C$:

$$\mu = 1{,}05 - 0{,}5 \cdot \frac{\vartheta}{1000} - 0{,}056 \cdot v_u. \qquad [5\text{-}22]$$

Die Reibung beeinflusst beim Warmwalzen ebenfalls erheblich die *Kinematik des Stoffflusses*. Dies verdeutlicht Bild 5-30. 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.

Bild 5-30
Geschwindigkeitsverteilung im Walzspalt nach Pawelski; Warmbandwalzung bei $\vartheta = 1000\,°C$, Eintrittshöhe $h_0 = 20\,mm$, Austrittshöhe $h_1 = 9{,}8\,mm$, Walzenradius $R = 325\,mm$, abgeplatteter Radius $R' = 335\,mm$.
v = Walzengeschwindigkeit, u = Walzgutgeschwindigkeit

Bild 5-31
Verlauf der Fließspannung k_f und der Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ längs des Walzspalts, Warmbandwalzung (nach K.-H. Weber).

Mit $\omega = 2\,\pi\,n_w/60$ lässt sich aus der Walzendrehzahl n_w und dem Walzwinkel α die mittlere Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_m$ ermitteln, nach der die gültige Warmfließkurve (Bild 5-11) ausgesucht werden muss:

$$\dot{\varphi}_m = \frac{\omega}{\alpha} \cdot \varphi_1 \text{ in } s^{-1}. \qquad [5\text{-}23]$$

Beim Warmwalzen von Grobblechen gilt $\dot{\varphi}_m = 0{,}1\ s^{-1}$, beim Blockwalzen $\dot{\varphi}_m = 1\ s^{-1}$ bis $10\ s^{-1}$, beim Bandwalzen $\dot{\varphi}_m = 10\ s^{-1}$ bis $300\ s^{-1}$ und beim Drahtwalzen $\dot{\varphi}_m = 1000\ s^{-1}$.

In Bild 5-31 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.

5.3.1.3 Kraft- und Arbeitsbedarf beim Walzen

Die vertikal ansetzende Walzkraft F_w, die als Resultierende der Normalspannungen über dem den Werkstoff stauchenden Walzenbogen wirkt, greift mit dem Hebelarm a vom Walzenmittelpunkt an, Bild 5-32. Sie wird berechnet aus:

Bild 5-32
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

$$F_w = A_d\, k_w = A_d \frac{k_f}{\eta_F}. \qquad [5\text{-}24]$$

Die gedrückte Fläche A_d ergibt sich aus der mittleren Breite b_m und der sog. gedrückten Länge l_d zu

$$A_d = b_m\, l_d = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot \sqrt{R\,\Delta h}. \qquad [5\text{-}25]$$

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 Bild 5-28 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 (Bild 5-14b)),
$a = 0{,}7\, l_d$ für geschlossene Kaliber gemäß Bild 5-33.

Mit der vertikalen Walzkraft ist das Moment jeder Walze $M = F_w\, a$ und die Leistung P

$$P = 2\, M\, \omega = b_m\, \Delta h\, v_u \frac{k_f}{\eta_F}. \qquad [5\text{-}26]$$

5.3.2 Schmieden

Schmieden gehört zu den Warmumformverfahren; die wichtigsten Verfahrensvarianten sind das *Freiformen* und das *Gesenkformen*. 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-raumzentrierten 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.

5.3.2.1 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 Gesenkschmieden angewendet. Für bestimmte Arbeiten der Einzelfertigung ist es noch heute gebräuchlich.

Bild 5-33
Geschlossenes Kaliber ohne Möglichkeit der Gratbildung.

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, Schroten.

Das *Stauchen* ist der einfachste Schmiedevorgang (Bild 5-10). 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* gemäß Bild 5-34. 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 gemäß Bild 5-35a) viele kleine Einzelstauchungen 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 Bild 5-35b) 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 Bild 5-36 erkennbare flache Rillenstruktur 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.

Bild 5-34
Elektrostauchen von Rundstäben.
a Stauchplatte
b Klemmelektrode
c Stangenabschnitt (Rohling)
d Stauchstempel
e Endform des Werkstückes
f Widerstandsheizung

Dickwandige Rohre werden nicht ausgebohrt, sondern durch Strecken über einem Dorn hergestellt. Dabei geht man von einem zylindrisch vorgeschmiedeten Rohling aus, der nach dem Warmlochen auf einen Dorn genommen wird. Bild 5-37 verdeutlicht das Verfahren. Der Dorn wirkt als Amboss, und das senkrecht zur Dornachse angeordnete schmale Werkzeug bewirkt ein Verlängern des Werkstücks. Eine erwünschte Aufweitung des Rohrs wird anschließend in einem Arbeitsgang mit parallel zur Dornachse eingesetzter Hammerbahn gemäß Bild 5-38 bewirkt. Nach jedem Schlag oder Pressvorgang wird der Dorn mit dem Rohr etwas gedreht.

Bild 5-35
Streckschmieden:
a) Recken
b) Glätten

Beim *Lochen* wird in das erwärmte Schmiedestück ein Volldorn getrieben; dies ist aus Bild 5-39 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 gegengelocht. Höhere Werkstücke können mit einem Hohldorn entsprechend Bild 5-40 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 eingeschrotet und anschließend auf die gewünschte Dicke geschmiedet.

Weitere Verfahren beim Freiformen sind das *Biegen* und das *Verdrehen*.

Als *Arbeitsschritte* ergeben sich beim Freiformschmieden
- das Erwärmen des Rohblocks im Schmiedeofen,
- das Abtrennen des Blockkopfes mit Lunker und Seigerung, mitunter auch des Blockfußes gemäß Bild 5-41,
- das Stauchen und Durchschmieden des Rohblocks,
- die spezielle Formgebung in den vorgesehenen Umformstufen etwa entsprechend Bild 5-42, evtl. mit Zwischenerwärmung,
- das Abkühlen des Rohlings in der Kühlgrube
- und die Wärmebehandlung.

Bild 5-36
Breiten eines Vierkantquerschnitts durch Freiformen.

Bild 5-37
Streckschmieden von Rohren über Dorn.

Bild 5-38
Aufweiten von Rohren (Vergrößern des Umfangs).

Bild 5-39
Lochen mit Volldorn.

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 Durchwärmen 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.

Mit Luft angetriebene Hämmer sind wegen ihrer einfachen Bauart und der guten Steuermöglichkeit weit verbreitet. Die maximale Bärmasse kann bis zu 1,6 t betragen. Bild 5-43 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 Hämmer bevorzugt Schmiedepressen eingesetzt.

Schmiedepressen können wasser- oder ölhydraulisch 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 *Arbeitsablauf* ist wie folgt vorzusehen:

- 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.

Bild 5-40
Lochen mittels Hohldorn.

Bild 5-41
Blockeinteilung beim Freiformschmieden.

Bild 5-42
Einzelschritte beim Schmieden einer großen Kurbelwelle.

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.

5.3.2.2 Gesenkschmieden

Gesenkschmieden ist Umformen von vorgewärmten 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 zusätzlche 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.

Gesenkschmiedestücke können Massen von einigen Gramm bis zu mehreren Tonnen haben. Typische Werkstückarten sind
- Maschinenteile (Scheiben, Naben, Achsschenkel, 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 dem einem Ende auf Schmiedetemperatur erhitzt und im Gesenk geschmiedet. Die Umformstufen sind in Bild 5-44 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. Bild 5-45 lässt erkennen, dass aus einem Grobblechabschnitt die Ausgangsform durch Flächenanschluss nahezu verlustlos als Spaltstück abgeschnitten wird. Der Faserverlauf bleibt nicht ungestört erhalten, dies kann u. U. für die Biegewechselfestigkeit 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. Bild 5-46 erläutert dies im Einzelnen. Das *Stauchen* ist ein Verringern der Anfangshöhe bei geringer Breitung ohne große Gleitvorgänge an den Gesenkwänden.

Bild 5-43
Aufbau eines Schmiedehammers.

Bild 5-44
Gesenkschmieden von der Stange.

Bild 5-45
Spaltstückherstellung für Gesenkschmiedeteile.

Bild 5-46
Gesenkschmieden vom Stück (mit Haupt-Arbeitsgängen).

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 Gratdicke s und das Gratverhältnis b/s nach Bild 5-47 richten sich nach der Projektionsfläche A_s im Gesenk und dem jeweiligen Arbeitsvorgang. Richtwerte für die Gratausführung sind in Tabelle 5-1 enthalten.

Zwecks einwandfreier Abgratung soll der Grat immer an der Linie des größten Werkstückumfangs liegen, wie Bild 5-48 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 Nachbearbeiten ist dann vielfach nur noch Schleifen erforderlich. Als Rohlinge werden Profilwalzstahl, Strangpressmaterial oder gezogene 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. Bild 5-49 zeigt einen Werkzeugaufbau zum Genauschmieden von Zahnrädern. Der überschüssige Werkstoff kann im mittleren Teil des Obergesenks (sog. *»Kompensator«*) aufsteigen und wird durch Lochen entfernt.

Tabelle 5-1 Richtwerte für die Gratausführung (nach *K. Lange*).

Schmiedestück-Projektionsfläche in Gratebene (ohne Gratbahn) A_s	Gratdicke s	Gratverhältnis (b = Breite des Gratsteges, Bild 5-47) b/s		
mm²	mm	Stauchen	Breiten	Steigen
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

5.3.2.3 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.

Bild 5-47
Gratgesenk mit Gratrille zur Aufnahme von überschüssigem Werkstoff.
s Gratdicke
b Breite des Gratsteges

Bild 5-48
Entgraten und gleichzeitiges Lochen eines Gesenkschmiedestücks (Auswerferstifte nicht gezeichnet).

Die zum Schmieden erforderliche Umformkraft ist

$$F = A_d\, k_{we}. \qquad [5\text{-}27]$$

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 Gleichung [5-27] 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

$$F = A_d\, k_f \left(1 + \frac{\mu\, l}{2\, h} + \frac{h}{4\, l}\right). \qquad [5\text{-}28]$$

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 zwölfmal so hoch sein wie der Anfangswert. Dies ist abhängig von der

Bild 5-49
Werkzeug zum Genauschmieden von Zahnrädern ohne Grat.

Bild 5-50
Nomogramm zur Ermittlung des Arbeitsbedarfs W für rotationssymmetrische Schmiedeteile aus niedriglegiertem Stahl (nach K. Lange).

Beispiel: 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 $\upsilon = 6{,}66\,m/s$, die Anfangshöhe $h_0 = 60\,mm$ sowie $h_1 = 22\,mm$.

Lösung: Die anfängliche Umformgeschwindigkeit beträgt $\dot{\varphi}_0 = (6660\,mm/s)/(60\,mm) = 111\,s^{-1}$. Nach 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 $\dot{\varphi}_m = 0{,}9 \cdot 111\,s^{-1} = 100\,s^{-1}$.

Aus Feld 1 ergibt sich damit ein Peilstrahl ins Feld 2; aufgrund der Form 6 wird hier ein mittlerer Umformwiderstand von $k_{wm} = 400\,N/mm^2$ 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 $V = \frac{\pi}{4} d_0^2 \cdot h_0 \approx 40\,000\,mm^3$ ist $W = 16\,kNm$.

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 verschieden gestaltete Formen Arbeitsschaubilder gemäß Bild 5-50 erstellt, aus denen man den Kraft- und Arbeitsbedarf ermitteln kann.

Die erforderliche Umformarbeit muss für das Gesenkschmieden auf arbeitsgebundenen Maschinen (Hämmer, Pressen mit Schwungrad) bekannt sein, damit der Arbeitsschritt vollständig durchgeführt werden kann. Berechenbar ist die Umformarbeit W aber nur für das Stauchen zwischen ebenen Bahnen (Freiformen):

$$W = V\,\varphi_h\,k_{fm}/\eta_F. \qquad [5\text{-}29]$$

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 Bild 5-50 unerlässlich.

5.3.3 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 *Hohl-* vom *Vollprägen*. Beim ersteren Verfahren bleibt die Werkstückdicke annähernd gleich, beim zweiten wird sie gezielt verändert, wie Bild 5-51 zeigt.

Tabelle 5-2 Formänderungswiderstand k_{we} am Ende des Prägevorgangs.

Werkstoff	Hohlprägen k_{we}	Vollprägen k_{we}
	N/mm²	N/mm²
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

Bild 5-51
Prägewerkzeuge und Rohlinge:
a) Hohlprägen ohne Dickenänderung (z. B. für Nummerierung von Karosserieblechen)
b) Vollprägen mit Führungsring (z. B. für das Münzprägen)

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 beseitigt. Ein Beispiel hierfür zeigt Bild 5-52. 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 ±0,025 mm erreichbar. Bei ringförmigen Werkstücken ist die ISO-Qualität IT 8 zu erzielen.

Die Umformkraft ergibt sich nach Gl. [5-27]. Anhaltswerte für den Umformwiderstand k_{we} am Ende des Prägevorgangs gehen aus Tabelle 5-2 hervor. Je schärfer die Kanten ausgeprägt werden sollen, desto

Bild 5-52
Maßprägen an einem entgrateten Gesenkschmiedeteil.

höher ist der Wert für k_{we} anzusetzen. Beim Vollprägen legierter Stähle werden die Gesenke bis nahe an ihre Zugfestigkeit belastet.

Bild 5-53
Kalteinsenken zur Herstellung eines Hohlgesenks.

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 ölhydraulischen Einsenkpressen wird ein Einsenkstempel mit sehr geringer Geschwindigkeit in das Werkstück eingedrückt, wie Bild 5-53 verdeutlicht. Das seitliche Ausweichen des Werkstoffs verhindert man durch einen Haltering.

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 Molybdändisulfid (MoS_2) geschmiert. Nach der Richtlinie VDI 3170 beträgt die erforderliche Druckspannung das 4,5fache der Fließspannung k_f. Dieser Wert wird der jeweiligen Fließkurve bei maximalem Umformgrad φ_{max} entnommen. Die Größe φ_{max} kann näherungsweise berechnet werden:

$$\varphi_{max} = 0{,}33\frac{t}{d} - 0{,}01; \qquad [5\text{-}30]$$

t ist die *Einsenktiefe* und d der Stempeldurchmesser in Millimeter. Die zum Kalteinsenken erforderliche Druckkraft beträgt

$$F = 4{,}5\,k_f\,\frac{\pi}{4}\,d^2. \qquad [5\text{-}31]$$

Zu den Eindrückverfahren mit geradliniger Bewegung gehört außer den eben besprochenen auch das

Bild 5-54
Einprägen mittels Prägestempel.

Körnen mittels Körnerspitze, *Lochen mittels Hohldorn* (Bild 5-40) und das Einprägen von Zeichen mittels Prägestempel entsprechend Bild 5-54.

Bild 5-55
Eindrücken mit umlaufender Werkzeugbewegung:
a) Walzprägen,
b) Rändeln,
c) Gewindefurchen von Innengewinden

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 Bild 5-55.

Durch *Warmeinsenken* können die Verfahrensgrenzen des Kalteinsenkens erheblich erweitert werden. Beispielsweise kann die Einsenkgeschwindigkeit von 0,003 mm/s bis 0,2 mm/s beim Kalteinsenken auf 2,5 mm/s bei Schmiedepressen erhöht werden. Oft lassen sich auch Schmiedehämmer ($v = 4$ m/s bis $v = 6$ 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.

5.3.4 Durchdrücken

Durchdrücken ist Druckumformen eines Werkstücks durch formgebende Werkzeugöffnungen hindurch. Die wichtigsten Verfahren sind das Strangpressen und das Fließpressen.

5.3.4.1 Strangpressen

Beim *Strangpressen* wird ein aufgeheizter Block in einem Presszylinder (Blockaufnehmer) durch

Bild 5-56
Voll-Vorwärts-Strangpressen mit Schale.
F Presskraft
α halber Öffnungswinkel der Matrize
v_1 Austrittsgeschwindigkeit des Strangs

Bild 5-57
Durch Strangpressen hergestellte Profile:
a) runde und eckige Vollprofile
b) symmetrische und unsymmetrische Winkelprofile
c) offene und geschlossene Hohlprofile
d) komplizierte Profilrohre

Bild 5-58
Hohl-Vorwärts-Strangpressen.
F Presskraft
α halber Öffnungswinkel der Matrize
v_1 Austrittsgeschwindigkeit des Hohlprofils

Bild 5-59
Strangpresswerkstoffe mit den Bereichen üblicher Verarbeitungstemperaturen.

einen Stempel unter hohen Druck gesetzt, wie es Bild 5-56 zeigt. Der Werkstoff beginnt zu fließen und tritt durch die Matrizenöffnung als Strang mit der Austrittsgeschwindigkeit v_1 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 abgeschert.

Mittels Strangpressen können Halbzeuge bis 20 m Länge hergestellt werden. Die Möglichkeiten zum Herstellen unterschiedlicher *Profilformen* sind sehr zahlreich, wie Bild 5-57 erkennen lässt. Im Gegensatz zum Walzverfahren sind auch hinterschnittene Querschnitte und Hohlprofile herstellbar. Aus Bild 5-58 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 Bild 5-59.

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 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* gemäß Bild 5-60 ausgehen. Danach werden Presse und Aufnehmer sowie Matrizentyp ausgewählt. Für die Festlegung des Presszylinder-Durchmessers d_z gilt der Maximalwert für den profilumschreibenden Kreis

$$d_{u\,max} = 0{,}85\ d_z. \qquad [5\text{-}32]$$

Als vorteilhaftester Wert gilt aber $d_u = 0{,}6\ d_z$.

Aus wirtschaftlichen Gründen wird oft mehrsträngig gepresst, wie Bild 5-61 andeutet. Mit Rücksicht auf einen möglichst gleichmäßigen *Werkstofffluss* bevorzugt man symmetrische Anordnungen. Da die Matrizendurchbrüche so angeordnet sein sollen, dass der Flächenschwerpunkt in der Matrizenmitte liegt, werden bei unsymmetrischen Profilstangen häufig runde Abfallstangen mitgepresst. Das Ziel dieser

Bild 5-60
Zur Festlegung von Matrize und Presszylinder.
d_u Durchmesser des profilumschreibenden Kreises.

Bild 5-61
Matrize für unsymmetrische Profilstangen sowie runde Abfallstangen zum Ausgleich des Stoffflusses.

Maßnahme ist es, möglichst gerade austretende Stränge zu erhalten.

Je nach Strangpresswerkstoff und Profilform stehen verschiedene Matrizentypen zur Auswahl. Am häufigsten verwendet man die Flachmatrize mit einem Öffnungswinkel $2\alpha = 180°$. Für NE-Schwermetalle und Stahl werden konische Matrizen (Bild 5-56 und 5-58) eingesetzt (Öffnungswinkel $2\alpha = 90°$).

Der Stofffluss beim *Voll-Vorwärts-Strangpressen* führt bei Flachmatrizen ($2\alpha = 180°$) zu vier unterschiedlichen Fließtypen. Bild 5-62 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 große Reibung. Im letzten Pressdrittel ergeben sich meist Werkstofftrennungen durch das unterschiedliche Fließverhalten.

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. Eloxal-Qualität). Kratzer und Riefen in den Reibflächen der Matrizendurchbrüche, d. h. eine oxidierte Aluminium-Oberfläche sowie ungenügendes Beseitigen der festklebenden Pressrückstände führen zu erheblichen Oberflächenmängeln.

Fließtyp	S	A	B	C
Werkstoff-art	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

Bild 5-62
Einteilung der Fließtypen beim axial-symmetrischen Voll-Vorwärts-Strangpressen (nach Dürrschnabel).

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 Bild 5-63 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.

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:

$$F_u = A_0 \frac{k_f}{\eta_F} \varphi_{ges}. \qquad [5\text{-}33]$$

Der Gesamtumformgrad beträgt $\varphi_{ges} = \ln|(z A_1/A_0)|$ 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

$$F_R = \mu\, k_{fo}\, d_z\, \pi\, h. \qquad [5\text{-}34]$$

Dabei ist d_z der Zylinderdurchmesser und h die jeweilige Blockhöhe. Die Gesamtkraft ergibt sich aus $F_{ges} = F_U + F_R$ zu

$$F_{ges} = A_0 \frac{k_f}{\eta_F} \cdot \varphi_{ges} + \mu\, k_{fo} d_z\, \pi\, h. \qquad [5\text{-}35]$$

Wird mit Schale gepresst, dann muss die Reibspannung $\mu\, k_{f0}$ zwischen Block und Aufnehmerwandung durch die Schubfließspannung $k = k_{f0}/2$ 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 Bild 5-64 verdeutlicht. Zum Einsetzen eines neuen Blocks muss der Fertigungsprozess kurz unterbrochen werden.

5.3.4.2 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 die-

Bild 5-63
Schematischer Kraft-Weg-Verlauf beim Strangpressen:
a) Voll-Vorwärts-Strangpressen
b) Voll-Rückwärts-Strangpressen

Bild 5-64
Quer-Strangpressen zum Herstellen von ummantelten Tiefseekabeln (schematisch).

nen Scheiben, Stangenabschnitte oder Vorpresslinge, die durch Ändern des Querschnitts ihre Form erhalten.

Das *Kalfließpressen* hat sich aus der Verarbeitung von Tuben und Hülsen entwickelt. 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 gemäß Bild 5-65 unterscheiden:

Bild 5-65
Prinzipdarstellung der wichtigsten Fließpressverfahren nach DIN 8583.
a) Napf-Rückwärts-Fließpressen
b) Voll-Vorwärts-Fließpressen
c) Gemischt-Fließpressen

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 (Bild 5-65a)).

Vorwärts-Fließpressen ist gleichläufiges Umformen eines Werkstücks in Bezug auf die Maschinenwirkrichtung. Der Werkstoff fließt in Richtung der Stempelbewegung (Bild 5-65b)). Es können axialsymmetrische Voll- und Hohlkörper erzeugt werden.

Gemischt-Fließpressen ist die Kombination beider genannter Verfahren. Der Werkstoff fließt mit und entgegen der Stempelbewegung (Bild 5-65c)). In einem Arbeitsgang können daher komplizierte

Bild 5-66
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

Formen, etwa entsprechend Bild 5-66, hergestellt werden, auch mit unterschiedlichen Wanddicken.

Als *Fließpress-Werkstoffe* eignen sich die meisten Nichteisenmetalle sowie niedriggekohlte und niedriglegierte Stähle (Cr, CrMn). Stähle mit Korngrößen von 9 bis 7 nach der ASTM-Korngrößen-Richtreihe [52] 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 µm bis 10 µm) bewährt. Als Schmierstoff können dann Natronseife, Molybdändisulfid 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 $Rz = 6{,}3$ µm 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 beanspruchte Teile eingesetzt werden, ohne dass vergütet werden muss.

[52] ASTM: American Society of Testing Materials.

Weitere *Vorteile* des Kaltfließpressens sind die große Stoffeinsparung gegenüber dem Spanen 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 g bis 20 g,
5 000	20 g bis 500 g,
3 000	0,5 kg bis 10 kg.

Die Standzeit der Werkzeuge kann zwischen 10 000 und 20 000 Pressungen liegen. Geometrische Grenzwerte für fließgepresste Hohlkörper sind:

Länge	5 mm bis 1200 mm,
Außendurchmesser	5 mm bis 150 mm,
Wanddicke	0,5 mm bis 50 mm,
Mindestwanddicke bei Aluminium.	≥ 0,1 mm.

Der *Werkstofffluss* beim Fließpressen kann durch Versuche mit geteilten Rohlingen und an Hand der auf der Teilungsebene eingebrachten Liniennetze gemäß Bild 5-67 ermittelt werden. Es ist vorteilhaft, wenn die Rohteile dem Matrizenwinkel entsprechend vorgeformt werden. Der Werkstofffluss wird vorwiegend durch die Werkzeuggeometrie und den Reibzustand beeinflusst.

Bild 5-67
Werkstofffluss beim Hohl-Vorwärts-Fließpressen bei verschiedenem Neigungswinkel α (Matrizenöffnungswinkel = 2 α).

Bild 5-68
a) Zur Kraftwirkung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen
b) Berechnungsbeispiel zum Voll-Vorwärts-Fließpressen.

Gegeben:

Ausgangsdurchmesser	D_0	$= 50$ *mm*
Enddurchmesser	D_1	$= 30$ *mm*
Ausgangshöhe	h_0	$= 25$ *mm*
Endhöhe	h_1	$= 45$ *mm*
Neigungswinkel	α	$= 60° \approx 1$ *(im Bogenmaß)*
Reibungszahl	μ	$= 0{,}1$ *(geschätzt)*
Kopfhöhe	h_k	$= 5$ *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 (Bild 5-9) wird die dazugehörige Fließspannung $k_{f1} = 670$ N/mm² entnommen. Mit dem Wert $k_{f0} = 270$ N/mm² ergibt sich aus der grafischen Mittelung $k_{fm} = 580$ N/mm². Somit ist die Umformkraft nach Gl. (5-36)

$$F_{ges} = 1963{,}5 \cdot 580 \cdot 1{,}02 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{1{,}02} + \frac{0{,}1}{0{,}5 \cdot 0{,}87} \right) N +$$
$$+ \pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot 0{,}1 \cdot 270\ N =$$
$$= 1{,}16 \cdot 10^6 \cdot (1 + 0{,}65 + 0{,}23)\ N + 21205{,}75\ N$$
$$= 22\ MN.$$

Die *Kraftwirkungen* beim Voll-Vorwärts-Fließpressen lassen sich an Hand von Bild 5-68 erläutern: Der Stangenabschnitt wird von der Querschnittsfläche A_0 auf den Austrittsquerschnitt A_1 vermindert. Der größte Umformgrad, bei dessen Betrag die Fließspannung k_f der Fließkurve entnommen wird, ist

$$\varphi_g = |\ln (A_1/A_0)|.$$

Die Umformkraft 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:

$$F_{ges} = F_{id} + F_{Sch} + F_R + F'_R =$$
$$= A_0\, k_{fm}\, \varphi_g \left(1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\varphi_g} + \frac{\mu}{\alpha} \right) + \qquad [5\text{-}36]$$
$$+ \pi\, D_0\, h_k\, \mu\, k_{f0}.$$

Die Umformarbeit lässt sich über die Umformleistung berechnen:

$$\dot{W} = F_{ges} \cdot v_{Stempel} \quad \text{bzw.} \quad W = \dot{W} \cdot t. \qquad [5\text{-}37]$$

Beim Rückwärts-Fließpressen kann der für die Pressenauswahl und Auslegung der Werkzeuge benötigte Kraftbedarf zweckmäßigerweise nach Bild 5-69 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:

$$F_{Stauch} = \frac{\pi}{4} D_1^2\, k_{f1} \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{D_1}{h_1} \right). \qquad [5\text{-}38]$$

In einem zweiten gedachten Schritt wird der Ringzylinder auf seine Wanddicke s umgeformt. Hierfür gilt:

$$F_{Zylinder} = \frac{\pi}{4} D_1^2 k_{f2} \left[1 + \frac{n_1}{s} \left(0{,}25 + \frac{\mu}{2} \right) \right]. \qquad [5\text{-}39]$$

Die Gesamtkraft für das Hohl-Rückwärts-Fließpressen beträgt dann:

$$F_{ges} = F_{Stauch} + F_{Zyl} =$$
$$= A_1\, k_{f1} \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{D_1}{h_1} \right) + \qquad [5\text{-}40]$$
$$+ A_1\, k_{f2} \left[1 + \frac{h_1}{s} \left(0{,}25 + \frac{\mu}{2} \right) \right].$$

Im Vergleich zu Warmumformverfahren sind die Beanspruchungen der Werkzeuge beim Kaltfließpressen besonders hoch. Bild 5-70 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

Bild 5-69
Berechnungsbeispiel für das Napf-Rückwärts-Fließpressen.

Gegeben: $D_0 = 50\ mm$
$D_1 = 35\ mm$
$h_0 = 28\ mm$
$h_1 = 10\ mm$
Napfhöhe $H = 45\ mm$

Wanddicke $s = \dfrac{50-35}{2}\,mm = 7{,}5\ mm,$

Reibbeiwert $\mu = 0{,}1$ *(geschätzt).*

Lösung: Der Umformgrad unter dem Stempelboden beträgt:

$$\varphi_1 = ln\frac{h_o}{h_1} = ln\,2{,}8 = 1{,}03.$$

Für diesen Wert müsste die Fließspannung k_f der Fließkurve entnommen oder aber berechnet werden. Für C10E (Ck 10) ergibt eine Berechnung nach Gl. [5-5]:

$k_f = C \cdot \varphi^n = 690 \cdot \varphi^{0{,}2519}\ N/mm^2$. *Das ergibt mit* φ_1*:*

$k_{f1} = 695\ N/mm^2$.

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

$k_{f2} = 690 \cdot \varphi_2^{0{,}2519}\,N/mm^2 = 780\ N/mm^2$.

Somit ist die Gesamtkraft gemäß Gl. [5-40]

$$F_{ges} = 962 \cdot 690\left(1+\frac{1}{3}\cdot 0{,}1\frac{35}{10}\right)N +$$
$$+\,962 \cdot 780\left[1+\frac{10}{7{,}5}\left(0{,}25+\frac{0{,}1}{2}\right)\right]N$$
$$= 1791\ kN = 1{,}8\ MN.$$

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 vorgespannte Werkzeugsätze verwendet, etwa wie Bild 5-71 zeigt. Als Richtwerte für die Anzahl der Armierungsringe kann angegeben werden:

Innendruck p_i N/mm²	**Anzahl der Ringe**	**Durchmesserverhältnis 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; Bild 5-72 zeigt eine Auswahl. Flache Stempel sind zwar am einfachsten herzustellen, bewirken aber wegen des Werkstoffgleitens unter hohen Flächenpressungen höhere Reibkräfte. Stempel mit kegeliger Wirkseite (Bild 5-72b) und 5-72c)) zeigen je nach ihrem Kegelwinkel 2α geringere bezogene Stempelkräfte. Wegen der geforderten kleinen Unterschiede in der Bodendicke des Produktes wird mit Kegelwinkeln von $2\alpha = 160°$ bis $2\alpha = 170°$ gearbeitet. Stempel mit ku-

Bild 5-70
Werkzeugsatz für das Napf-Rückwärts-Fließpressen; Matrizenausführung ohne Schrumpfring.

Bild 5-71
Beispiele für die Pressbüchsengestaltung mit Schrumpfring beim Napf-Rückwärts-Fließpressen.

geliger 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 Bild 5-73 hervorgeht. Beim Stempel mit festem Dorn (Bild 5-73b)) 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 (Bild 5-73c)) 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.

Bild 5-72
Stempel-Wirkseitenformen für das Hohl-Rückwärts-Fließpressen a) flach, b) kegelig, c) Kegelstumpf, d) kugelig.

Bild 5-73
Stempelformen für das Vorwärts-Fließpressen.

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 meist nicht wirtschaftlich einsetzbar.

5.4 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 angewendet. 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 aufwändige Fugenvorbereitung bei elliptischen Schnitten kann entfallen.

5.4.1 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. das Zieheisen gemäß Bild 5-74 – vom *Walzziehen,* bei dem der Ziehring durch ein drehbar gelagertes Ziehrollenpaar ersetzt wird (vgl. Bild 5-14b), 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 entzundert und an einem Ende angespitzt. An dieser sog. Angel greift die Ziehzange an.

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.

Bild 5-74
Zieheisen (aus chromlegiertem Stahl) zum stufenweisen Reduzieren des Drahtdurchmessers. Der Innenraum des Werkzeugs heißt Ziehhol.

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 höhergekohltem Stahldraht mit hohen Ziehgeschwindigkeiten und Umformgraden erlangt.

Als **Schmierstoff** selbst werden Petroleum, Rüböl, Mineralöle, Seifenemulsionen, teilweise mit MoS_2- 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.

Bild 5-75
Ziehstein aus Hartmetall mit Schrumpfring aus Stahl.
d_0 *Ausgangsdurchmesser des Drahts*
d_1 *Enddurchmesser des Drahts*
α *halber Kegelwinkel des Ziehhols*
F_Z *Ziehkraft*
F_D *Druckkraft*

Für Stahl-Ziehringe beträgt die Standmenge etwa 2000 kg Draht je Durchgang. Bei *Hartmetallwerkzeugen* kann sie auf das 30- bis 200fache gesteigert werden. Ziehsteine aus Hartmetall – Bild 5-75 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 danach 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 Bild 5-76 erläutert ist.

Der Ziehvorgang erfolgt in mehreren Stufen. Die mögliche Formänderung je Stufe ist durch die Belastbarkeit des Kraft-Einleitungsquerschnitts A_1 begrenzt [53]. 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 weit verbreitet, die mit einhakbarem Kettenwagen arbeitet. Ziehmaschinen mit zwei gegenläufig 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 Bild 5-77.

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.

[53] Die Ziehkraft F_Z soll aus Sicherheitsgründen 70 % des Wertes $A_1 \cdot R_m$, der Abreissbedingung bei mittelbarem Kraftangriff, nicht überschreiten.

Nach *Siebel* und *Kobitzsch* kann nach der elementaren Plastizitätstheorie ausreichewnd genau eine adiabatische mittlere Temperaturerhöhung in °C für homogen umgeformte Volumenelemente angegeben werden:

$$\Delta T = k_{fm} \frac{1}{c\,\rho} \ln \frac{A_0}{A_1}. \qquad [5\text{-}41]$$

Hierin sind:
c spezifische Wärmekapazität des Werkstoffs,
ρ Dichte des Werkstoffs.

Bild 5-76
Arbeitsgänge am Diamant-Ziehstein (nach O. Fritsch).
❶ *Bearbeitung chemisch (Ausbrennen mit Sauerstoff)*
❷ *mechanisch-elektrisch*
❸ *elektrolytisch*
❹ *elektrisch durch Funkenerosion*
❺ *mechanisch-elektrisch*

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.

Bild 5-77
Schematische Darstellung einer Mehrfach-Drahtziehmaschine (Block-Ziehmaschinen).

Der *Kraftbedarf* beim Draht- und Stabziehen ist am einfachsten für den Fall des runden Vollstrangziehens herzuleiten. Die Zugkraft F_Z in Bild 5-75 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

$$F_{id} = A_1 k_{fm} \varphi \text{ in N.} \qquad [5\text{-}42]$$

Die mittlere Fließspannung k_{fm} muss berücksichtigt werden, weil in Richtung auf den Ziehholaustritt eine zunehmende Verfestigung auftritt. Den Wert für $k_{f\,max}$ 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

$$F_R = \mu F_N \approx \mu k_{fm} A_1 \varphi. \qquad [5\text{-}43]$$

Die Ziehkraft muss die axiale Komponente der Reibkraft überwinden:

$$F'_R = \mu F_N \frac{1}{\tan\alpha} = \mu k_{fm} A_1 \varphi \frac{1}{\tan\alpha}. \qquad [5\text{-}44]$$

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

$$F_S = k_{fm} A_1 \frac{2}{3} \tan\alpha. \qquad [5\text{-}45]$$

Da die Winkel an Ziehdüsen verhältnismäßig klein sind ($\alpha = 10°$ bis $\alpha = 15°$), kann näherungsweise $\tan\alpha$ dem Bogenmaß α gleichgesetzt werden.

Damit ergibt sich die Gesamtziehkraft zu

$$F_{ges} = F_{id} + F'_R + F_S = \\ = k_{fm} A_1 \left[\varphi\left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right) + \frac{2}{3}\alpha\right]. \qquad [5\text{-}46]$$

Daraus lässt sich nach *Siebel* der optimale Neigungswinkel berechnen:

Bild 5-78
Umformkraft F in Abhängigkeit vom Neigungswinkel α (nach K. Grüning).

Berechnungsbeispiel für das Gleitziehen eines Stahlrohrs aus dem Stahl Ck 10 mit den Abmessungen 20 x 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 $F_{ges\,1} = 22{,}2$ kN, $F_{ges\,2} = 20{,}3$ kN und $F_{ges\,3} = 11{,}1$ kN.

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{2}{3}\mu\varphi}. \qquad [5\text{-}47]$$

Er ergibt sich auch aus der graphischen Darstellung der Kräfte gemäß Bild 5-78.

5.4.2 Gleitziehen von Rohren

Rohre können nach zwei Verfahren, dem Hohl-Gleitziehen und dem Gleitziehen über festen Stopfen entsprechend Bild 5-79 gefertigt werden. Beim Hohl-Gleitziehen befindet sich im Inneren des Rohres kein Werkzeug, so dass 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

$$\sigma_z - \sigma_t = k_f. \qquad [5\text{-}48]$$

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.

Bild 5-79
Gleitziehen von Rohren über festen Stopfen mit Verringern von Durchmesser und Wanddicke. α Neigungswinkel der Ziehringöffnung.

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 (Bild 5-79). Es handelt sich also um eine Kombination des Hohlgleitziehens mit dem Stopfengleitziehen.

Zur Berechnung der Umformkräfte kann der Umformgrad durch Abstrecken $\varphi_{max\,G}$ ungefähr dem Umformgrad der Wanddicke φ_s gleichgesetzt werden:

$$\varphi_{max\,G} \approx \varphi_s = \ln\frac{s_0}{s_1}. \qquad [5\text{-}49]$$

Der Gesamtumformgrad setzt sich aus der Wanddickenänderung und der Durchmesseränderung zusammen:

$$\varphi_{ges} \approx \varphi_s + \varphi_d. \qquad [5\text{-}50]$$

Zwecks weiterer Vereinfachung der Kraft- und Arbeitsberechnung kann angesetzt werden, dass die mittlere Fließspannung beim Gleitziehen und beim Hohlziehen gleiche Werte erreicht.

5.4.3 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 Bild 5-80 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 Maß 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 kleinerem α auch die Umformkraft F_{St} zu, die damit verbundene Erhöhung der Radialspannung erfordert die Verwendung armierter Ziehringe mittels eines Schrumpfverbandes. Als Vorteile des Abstreckgleitziehens gegenüber dem Fließpressen ergeben sich kleinere Umformkräfte und geringe Werkzeugspannungen. Die *Wanddickengenauigkeit* ist sehr groß. Allerdings können Dickenunterschiede, die von der Vorform her vorhanden sind – z. B. die *Zipfelbildung* infolge Anisotropie des Werkstoffs – 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 (zzt. 800 bis 1200 Dosen je Minute in Mehrfachlinien).

Bild 5-80
Abstreckziehen von Hohlkörpern.
α *Abstreckwinkel*
F_{St} *Stempelkraft*
F_{RSt} *Stempelreibkraft*
F_{RR} *Ringreibkraft an der Matrize*
F_B *Bodenkraft*

Vielfach wird mit kombinierten Werkzeugen gleichzeitig tiefgezogen und abgestreckt. Bild 5-81 zeigt die Arbeitsweise. Bei der Getränkedosenherstellung befinden sich beispielsweise im Tiefziehwerkzeug unter dem eigentlichen Ziehring drei weitere Abstreckringe mit kleinerem Durchmesser, so dass der Außendurchmesser 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

$$F_{AZ} = \frac{k_{fm}}{\eta_F} A_Z \, \varphi_s . \qquad [5\text{-}51]$$

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 [$\varphi_s = 1\text{n}\,(A_1/A_2)$].

Bild 5-81
Werkzeug zum kombinierten Tiefziehen bzw. Abstreckziehen (nach G. Oehler und F. Kaiser).
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*

5.4.4 Tiefziehen

Das Tiefziehen zählt zu den wichtigsten Verfahren des Blechumformens. Es bildet die Grundlage für die Massenfertigung von Werkstücken für die verschiedensten Anwendungsgebiete, 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 Bild 5-82 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:

$$F_{St} \leq F_{Br}. \qquad [5\text{-}52]$$

Die dazugehörigen Spannungen ergeben sich nach Division durch den fiktiven Zargenquerschnitt $A_Z = \pi\,(d_0 + s_0)\,s_0$ zu

$$\sigma_z = \frac{F_{St}}{A_Z} \leq \frac{F_{Br}}{A_Z} = \sigma_{Br}. \qquad [5\text{-}53]$$

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 Ziehringrundung:

$$\sigma_z = \sigma_{id} + \sigma_R + \sigma_{rb}. \qquad [5\text{-}54]$$

Damit kann der *Umformwirkungsgrad* für das Tiefziehen berechnet werden:

$$\eta_F = \frac{dW_{id}}{dW_{ges}} = \frac{F_{id}}{F_{St}} = \frac{\sigma_{id}}{\sigma_z}. \qquad [5\text{-}55]$$

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 (Bild 5-82). 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 Ziehspannung $\sigma_{z\,max}$, die an der Ziehringrundung umgelenkt wird, gemäß Bild 5-83 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 Druck-

Bild 5-82
Tiefziehen im Erstzug und schematische Darstellung des Spannungsverlaufs in der Umformzone (Flanschbereich).
F_{St} *Stempelkraft*
F_N *Niederhalterkraft*
d_0 *Stempeldurchmesser*
D_0 *Zuschnittdurchmesser (Ronde)*
D *augenblicklicher Flanschdurchmesser*
r_s *Stempelradius* ($\approx 0{,}15 \cdot d_0$)
r_M *Ziehringradius* ($\approx 8 \cdot s_0$)

spannung 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

$$F_N = A_N \sigma_N = A_N \frac{R_m}{400}\left[(\beta_0 - 1)^2 + \frac{d_0}{200 \cdot s_0}\right]. \quad [5\text{-}56]$$

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 *Panknin* wird die *maximale Ziehkraft* $F_{St\,max}$, die aus dem Diagramm Bild 5-84 entnommen werden kann, mit Hilfe des Umformwirkungsgrads η_F berechnet:

$$F_{St\,max} = \pi d_m s_0 \left[1{,}1 \frac{k_{fm}}{\eta_F}\left(\ln\frac{D_0}{d_0} - 0{,}25\right)\right]. \quad [5\text{-}57]$$

Hierin sind:
d_m mittlerer Napfdurchmesser mit Berücksichtigung der Wanddicke s_0,
k_{fm} 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

$$F_{Br} \approx \pi d_m s_0 R_m. \quad [5\text{-}58]$$

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. 5.5.4). Je höher der *R*-Wert, desto größer ist β_{max}. Eine Folge der ebenen Anisotropie *R* 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 Tabelle 5-3 angegeben.

Bild 5-83
Auf ein Volumenelement im Flansch einwirkende Spannungen beim Tiefziehen.
σ_N *Niederhalter-Druckspannung*
σ_t *tangentiale Druckspannung*
σ_r *radiale Zugspannung*
$\sigma_{z\,max}$ *maximale Zugspannung in der Zarge*

In Bezug auf die *Umformgrade* im Tiefziehteil muss die Kontinuitätsbedingung erfüllt sein:

$$\varphi_r + \varphi_t + \varphi_n = 0. \quad [5\text{-}59]$$

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 Streckziehen unterworfen; hierbei erfolgt zusätzlich noch eine Biegung um die Rundung des Stempels r_s und den Ziehringradius r_M (Bild 5-82).

Der Umformgrad φ_n in Blechdickenrichtung nimmt am Napfboden stets negative Werte an, wie aus dem Diagramm Bild 5-85 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).

Bild 5-84
Kraft-Weg-Verlauf sowie Umformgrad und dazugehörende Fließspannung beim Tiefziehen im Anschlag.
D_0 Ausgangsdurchmesser der Ronde
D jeweiliger äußerer Flanschdurchmesser

Bild 5-85
Verlauf der örtlichen Umformung über der Abwicklung eines Tiefziehteils.

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 zwei Formänderungen an dieser Stelle ermittelt werden. Die dritte Formänderung kann aber auch nach der Kontinuitätsbedingung (s. Blechprüfung, Abschn. 5.5.4) ermittelt werden.

Beim *Tiefziehen im Weiterzug* entsprechend Bild 5-86 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 $F_{St\,max}$ muss wiederum kleiner sein als die Bodenabreißkraft, die wie beim Erstzug berechnet werden kann. Bodenreißer lassen sich vermeiden, wenn die Ziehverhältnisse nach Tabelle 5-3 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 (Bild 5-82) das fünf- bis zehnfache der Blechdicke 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 Ziehspalt u_z setzt man

$$u_z = s_0 + a\sqrt{10\,s_0}. \qquad [5\text{-}60]$$

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 Ziehspalt wird das Werkstück abgestreckt, es kommt öfter zu Bodenreißern.

Relativ dicke Blechteile mit $d_0/s_0 < 25$ haben genügend Eigensteifigkeit, so dass 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 *traktrixförmiger*[54] Ziehring verwendet. Wegen der fehlenden Niederhalterreibung und der geringeren Biegeverluste erhöht sich das Grenzziehverhältnis.

[54] Eine Traktrixkurve ist z. B. die spiralähnliche Kurve, die bei einer vom Hund geschleppten Kette entsteht.

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 Tabelle 5-3.

5.4.4.1 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 *rotationssymmetrischen Ziehteilen* außer dem Volumen auch die Oberfläche von Platine 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

$$D_0 = \sqrt{d^2 + 4dh}. \qquad [5\text{-}61]$$

Tabelle 5-3. Werkstoffe zum Tiefziehen; erreichbares Ziehverhältnis β_0 und übliche Schmierstoffe (nach *Dubbel,* Taschenbuch für den Maschinenbau, 14. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, New-York, Heidelberg).

Werkstoff	$R_{p0,2}$	R_m	Erreichbares Ziehverhältnis			Schmierstoff
			Erstzug	1. Weiterzug		
				ohne	mit	
	N/mm²	N/mm²		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	Wasser-Grafit-Brei oder dickere Mischung aus Leinöl-Bleiweiß mit 10 % Schwefel, Natrium-Palmitat.
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	
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	

Bild 5-86
Tiefziehen im Weiterzug zum Reduzieren des Hohlkörper-Durchmessers.

Die so berechneten Platinendurchmesser D_0 für häufig vorkommende rotationssymmetrische Ziehteile sind in Bild 5-87 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. Anderenfalls 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 Zuschnittform grob vorzubestimmen. Nach der Erprobung im Werkzeug wird die Platine 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 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.

Zum Tiefziehen werden mechanische weggebundene oder hydraulische *Pressen* benutzt. Um eine zu hohe Auftreffgeschwindigkeit des Stößels zu vermeiden, arbeiten große Karosserieziehpressen 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.

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 Platinen 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.

	$D_0 = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h}$		$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4\, d_1 \cdot h}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$		$\sqrt{d_2^2 + 4\left(h_1^2 + d_1 \cdot h_2\right)}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot \left(d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2\right)}$		$\sqrt{d_1^2 + 2\, s\left(d_1 + d_2\right)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h + 2\, f\left(d_1 + d_2\right)}$		$\sqrt{d_1^2 + 2\, s\left(d_1 + d_2\right) + d_3^2 - d_2^2}$
	$\sqrt{2 \cdot d^2} = 1{,}414 \cdot d$		$\sqrt{d_1^2 + 6{,}28\, r \cdot d_1 + 8\, r^2}$ oder $\sqrt{d_2^2 + 2{,}28\, r \cdot d_2 - 0{,}56\, r^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$		$\sqrt{d_1^2 + 6{,}28\, r \cdot d_1 + 8\, r^2 + 2\, f\left(d_2 + d_3\right)}$ oder $\sqrt{d_2^2 + 2{,}28\, r \cdot d_2 + 2\, f\left(d_2 + d_3\right) - 0{,}56\, r^2}$

Bild 5-87
Berechnung des Zuschnittdurchmessers D_0 nach Schuler GmbH (Hrsg.): Handbuch der Umformtechnik, Springer-Verlag 1996.

Das Einlegen, Herausnehmen und Transportieren der Werkstücke erfolgt teil- oder vollautomatisch durch Zangen- oder Greifervorrichtungen und ist zzt. Gegenstand von Rationalisierungsinvestitionen mit Robotersystemen.[55]

5.4.5 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 Blechzuschnitte. Sie werden mit einer Andrückscheibe 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, Bild 5-88. Für Großserien setzt man Drückmaschinen mit hydraulisch betätigtem Schlitten und automatischer Programm-Nachformsteuerung ein. Für sehr große Blechteile im Raketen- und Behälterbau sind Sondermaschinen 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 (St 13)] 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,

Bild 5-88
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*

z. B. bei der Herstellung größerer Waschmaschinentrommeln und Kochkessel für Großküchen. Bei noch größeren Durchmessern, wie sie z. B. bei Parabolspiegeln, Radarreflektoren, Kümpelböden für Großkessel oder bei sehr langen Teilen im Flugzeug- und Raketenbau vorliegen, ist das Drücken praktisch das einzig 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, Bild 5-89. 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:

$$s_1 = s_0 \sin \alpha. \qquad [5\text{-}62]$$

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,

[55] Tiefziehen in der Kfz- und Metalltechnik. IFU Universität Stuttgart. www.wissensfloater.de

– Lampen- und Scheinwerfer-Reflektoren,
– 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.

Bild 5-89
Projizierstreckdrücken eines kegeligen Hohlkörpers.
D_0 Rondendurchmesser
d_1 Innendurchmesser (Boden)
s_0 Ausgangsblechdicke
h Höhe des kegeligen Mantels
α halber Kegelwinkel

5.4.6 Kragenziehen (Bördeln von Öffnungen)

Dieses Verfahren hat den Zweck, an Hohlkörpern Kragen aufzurichten, um daran Gewinde schneiden, Bolzen einpressen oder Rohre einlöten oder einschweißen zu können. Dabei taucht ein Stempel in ein vorgeschnittenes Loch und weitet es auf. Es erfolgt eine Durchmesservergrößerung bei gleichzeitiger Wanddickenabnahme. Bild 5-90 zeigt diesen Vorgang. Druckspannungen wirken im Kragen in radialer und axialer Richtung, Zugspannungen in Umfangsrichtung. Bei weiten Borden ($d_i > 5\,s_0$), engem Spalt ($u_z \approx s_0$) und kleiner Ziehringrundung R_R ergibt sich die Kragenhöhe zu

$$h = \tfrac{1}{2}(d_R - d_0). \qquad [5\text{-}63]$$

Bei großer Ziehringrundung oder weitem Spalt gilt

$$h = \tfrac{1}{2}(d_m - d_0) + 0{,}43 \cdot R_R + 0{,}72 \cdot s_0. \qquad [5\text{-}64]$$

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.

Bild 5-90
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
$h = (d_R - d_0)/2$ Kragenhöhe für einen engen Spalt ($u_z \approx s_0$)

5.5 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*.

5.5.1 Längen

Längen ist Zugumformen eines Werkstücks durch eine von außen aufgebrachte, in der Werkstücklängsachse 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, so dass 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.

5.5.2 Weiten

Weiten ist Zugumformen durch eine im Werkstück radial nach außen wirkende Kraft. Die Verfahren zum Weiten werden bei der Herstellung von Gehäusen, Trommeln, Karosserieteilen und großen Blechformteilen angewendet. Außer runden und ovalen können auch vieleckige 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 ausgebaucht 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 Reißens 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. 5.7 *Innenhochdruckumformen, IHU*).

Bild 5-91
Hohlprägen mit elastischem Wirkmedium (Verfahren des Tiefens nach DIN 8585-4).

5.5.3 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, Bild 5-91).

Das wichtigste Tiefungsverfahren mit starrem Werkzeug ist das *Streckziehen*. Entsprechend Bild 5-92 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.

Bild 5-92
Streckziehen von Blechteilen über einen Formklotz.

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 Beschneiden 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.[56]

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 Reißern 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;
- Einschnürung im Scheitelbereich: Beanspruchungsgrenze gemäß den Grenzformänderungsschaubildern.

5.5.4 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. *Lü-*

[56] Streckziehen von Bus- und Flugzeugteilen. IFU Uni Stuttgart. www.wissensfloater.de

ders-Linien. Zum Beurteilen von Werkstoffen für das Streckziehen werden die Ergebnisse des Zugversuchs herangezogen: Die Gleichmaßdehnung ε_{gl}, die Bruchdehnung A_{Br}, die *Erichsen*tiefung *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 Werkstoffs und entspricht bei unlegierten und niedriglegierten Stählen der Steigung der Fließkurve in doppelt logarithmischer Auftragung:

$$n = \varphi_{gl} = \ln(1 + \varepsilon_{gl}). \qquad [5\text{-}65]$$

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:

$$R = \frac{|\varphi_b|}{|\varphi_s|} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_1}}{\ln \frac{s_0}{s_1}} \qquad [5\text{-}66]$$

Danach kann das Grenzziehverhältnis gemäß Bild 5-93 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:

$$\Delta R = \tfrac{1}{2}(R_{0°} + R_{90°} - 2R_{45°}). \qquad [5\text{-}67]$$

Bild 5-93
Einfluss der senkrechten Anisotropie R auf das Grenzziehverhältnis β_{omax}.

5.5.4.1 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

Bild 5-94
Werkzeug zum Durchführen des Erichsen-Tiefungsversuchs nach DIN EN ISO 20482, für Bleche und Bänder mit einer Dicke von 0,2 mm bis 2 mm.

zum eintretenden Riss (Bild 5-94). Als Kennwert wird der Tiefungswert *IE (IE = **E**richsen cupping **I**ndex)* 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. Blechdickenunterschiede – unter Umständen auch Änderungen in den Schmierverhältnissen – sind die häufigsten Fehlerquellen bei der *Erichsen*-Prüfung.

5.5.4.2 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 aufwändig und wird daher vorwiegend als Modellversuch mit einem konstanten Stempeldurchmesser von $d_0 = 33$ 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 (Bild 5-95). Die großen Karosserieteile sind wegen der relativen Dünnwandigkeit d_0/s_0 wesentlich empfindlicher, dies ist besonders auf die Reibung am Niederhalter zurückzuführen.

Bild 5-95
Grenzziehverhältnis β_{max} in Abhängigkeit vom bezogenen Stempeldurchmesser d_0/s_0 für verschiedene Werkstoffe.

5.5.4.3 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 beein-

Bild 5-96
Formänderungen von Kreisrastern je nach Beanspruchung.
φ_1 Längenumformgrad
φ_2 Breitenumformgrad
φ_3 Dickenumformgrad: $\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2)$

flussen und nach dem Umformen noch gut erkennbar sein. Die beste geometrische Form zum Erkennen von Verzerrungen an der Blechoberfläche ist der Kreis (Bild 5-96). Durch den Ziehvorgang werden die Kreise auf dem Werkstück 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 (Bild 5-96). 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.

Bild 5-97
Grenzformänderungsschaubild (Forming Limit Diagram) für Blechformteile (nach Keeler und Goodwin).

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* (Bild 5-97). 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 Blechen 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.

5.6 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 sehr 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 Blechdicken 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.

5.6.1 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 Bild 5-98 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 $M_b = 1/4\ w \cdot F_b$ 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 die Kanten zuvor angebördelt werden, ergibt sich ein offenes Schlitzrohr, das mittels Unterpulver-Schweißverfahren verschweißt wird.

Beim Biegeumformen mit drehender Werkzeugbewegung gemäß Bild 5-99 wird eine schwenkbare Biegewange eingesetzt. Das mittels Spannpratze gehaltene Blech wird bis zur Anlage an die Auflagewange gebogen *(Schwenkbiegen)*.

Bild 5-98
Biegegesenk in V-Form.
F_b Biegekraft
w Gesenkweite
b Breite des Biegeteils (im Bild nicht sichtbar)
s Blechdicke

Bild 5-99
Biegen mit drehender Werkzeugbewegung.

Ähnlich arbeitet das *Rundbiegen* entsprechend Bild 5-100. 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

Bild 5-100
Werkzeuganordnung für das Rundbiegen.

Bild 5-101
Herstellen von langen abgewinkelten Werkstücken (Profilschienen) mittels Profilwalzen.

Biegen mittels Profilwalzen hergestellt werden. Das Prinzip verdeutlicht Bild 5-101. Das Werkstück wird durch den Formschlitz 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 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.

Bild 5-102
Herstellen von Falzen an Blechbehältern durch mehrmaliges Umbiegen:
a) einfacher Falz
b) Doppelfalz

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 gemäß Bild 5-102a) 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, wie Bild 5-102b) 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.

5.6.2 Biegespannungen, Verformungen und Kräfte

Beim Umformen durch Biegen unterscheidet man nach Bild 5-103 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 Bild 5-104 ermittelt werden. Das ist das Verhältnis aus dem geforderten 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 Bild 5-105 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 Tabelle 5-4 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 geringerem Dehnvermögen. Nach DIN 6935 liegen die Werte für r_{min} um 0,5 *s* höher als beim Biegen senkrecht zur Walzrichtung.

Bild 5-104
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 $k = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{r_{i1} + 0,5\,s}{r_{i2} + 0,5\,s} < 1$

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 entgraten«.

Bild 5-103
Biegezone bei Werkstücken mit einem Biegewinkel von 90° (nach König u. Klocke: Fertigungsverfahren. Bd. 5. Blechumformung).
s Blechdicke
r_i *Innenradius*
r_a *Außenradius*

Bild 5-105
Rückfederungsdiagramm für verschiedene Werkstoffe (nach J. Flimm, Hanser Verlag).

Ein weiteres Problem bei Biegeteilen ist die *Randverformung*. Diese tritt vorwiegend beim Biegen dicker Bleche mit kleinem Biegeradius auf. Der an der inneren Biegekante liegende Werkstoff wird gestaucht und versucht daher seitlich zum Rand hin auszuweichen, Bild 5-106. Die Ausgangsbreite b nimmt dadurch um das Maß $2\,t$ auf $b_i = b + 2\,t$ zu. Die außen liegenden Werkstofffasern verhalten sich umgekehrt: Es entsteht eine Schrumpfung von der Größe $b_a = b - 2\,t$. Nach Versuchen von *Oehler* beträgt die Breitendifferenz im Biegegrund für weichen Baustahl $t = 0{,}4\ s/r_i$. 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 Nacharbeit oder ein vorheriges Freischneiden im Biegebereich erforderlich.

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:

Bild 5-106
Randverformung beim Biegen (nach W. König und F. Klocke)

Tabelle 5-4 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, geglüht**	1,4
CuZn40	0,35	**AlSi, weich**	0,8	**AlCuNi, ungeglüht**	3,5
Aluminium, weich	0,6	**AlSi, hart**	6,0	**MgMn**	5,0

Bild 5-107
Korrekturfaktor z zur Ermittlung der gestreckten Länge (nach K. Grüning, Vieweg Verlag).

$$L_Z = l_1 + l_2 + \frac{\pi\alpha}{180°}\left(r_i + z\frac{s}{2}\right). \qquad [5\text{-}68]$$

Der Korrekturfaktor z zur Berücksichtigung der Verlagerung der neutralen Faser (mit zunehmendem Biegewinkel nach außen hin) kann Bild 5-107 entnommen werden.

Bild 5-108
Beiwert nach Cali und Oehler zur Biegekraftberechnung.

Ausgangspunkt für die Berechnung der *Biegekraft* bei Verwendung von *V-förmigen* Gesenken (s. Bild 5-98) 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

$$M_b = \frac{1}{4} w \cdot F_b = k_f \cdot W. \qquad [5\text{-}69]$$

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 $W = b\,s^2/6$. Dieses verschiebt sich mit zunehmender Krümmung (bei fortschreitender Biegung im plastischen Bereich bzw. kleinerem r/s-Verhältnis) zu $W = b\,s^2/4$. Damit lässt sich aus Gl. 5-69 die in der Praxis gebräuchliche Beziehung für die maximale Biegekraft herleiten:

$$F_b = C \cdot b \cdot s^2 \cdot R_m / w. \qquad [5\text{-}70]$$

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 $C = 1 + 4\,s/w$ bestimmt, Bild 5-108.

Bild 5-109
Innenhochdruckumformen eines rohrförmigen Bauteils mit zusätzlichen Lochoperationen (Quelle: Schuler-Handbuch).

5.7 Innenhochdruckumformen (IHU)

5.7.1 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* (Feb. 2005, Aug. 2007).

Das Innenhochdruckumformen gehört zu den Umformverfahren mit einem flüssigen Wirkmedium. Das Rohteil wird dabei durch ein fluides Medium umgeformt, das in einem Hohlraum wirkt, Bild 5-109. Ziel ist die Herstellung von Bauteilen, die durch andere Fertigungsverfahren nicht oder nur sehr aufwändig umformtechnisch hergestellt werden können. Konkrete Anwendungsgebiete sind die Automobil- und Armaturen-Industrie sowie der Anlagenbau, Bild 5-110.

Bild 5-110
Werkstücke, hergestellt durch Rohraufweiten (Quelle: Siempelkamp Pressen Systeme).

Bauteilspezifisch können sich folgende Vorteile gegenüber anderen Fertigungsverfahren ergeben:
- geringeres Gewicht,
- höhere Festigkeit,
- höhere Steifigkeit,
- weniger Einzelteile,
- komplexere Geometrie,
- weniger Fertigungsstufen,
- höhere Genauigkeit.

Als Rohlinge für das Innenhochdruckumformen können Hohlprofile (Rohre, Strangpressprofile usw.) oder Bleche eingesetzt werden. 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 Aufweitstauchen im offenen oder geschlossenen Gesenk,
- Zugspannungen beim Innenhochdruck-Aufweiten oder -Kalibrieren,
- Biegespannungen bei Innenhochdruck-Biegevorgängen,
- Schubspannungen beim Innenhochdruck-Durchsetzen.

5.7.2 Anwendungsgebiete

Die möglichen IHU-Anwendungsgebiete umspannen viele technische Branchen, Tab. 5-5. Im Automobilbau [57] wird das Innenhochdruckumformen bereits seit etwa zwölf 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 Strukturbauteile in Antriebsstrang, Karosserie und Fahrwerk zum Einsatz. Zum anderen dienen sie im Antriebsstrang sowie im Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystem als Medien führende Elemente.

[57] 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, weil sich damit eine bessere geometrische Qualität der Bauteile erzielen ließ.

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.

Folgende Vorteile lassen sich für IHU-Abgassysteme 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, Bild 5-111.

Bild 5-111
Serienfertigung von Abgaskrümmern bei Fa. Arvin Exhaust, Finnentrop (Quelle: Schuler Hydroforming GmbH). Reduzierung der Einzelteile auf 53 %, der Herstellkosten auf 85 %, Erhöhen der Lebensdauer um 50 %.

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, Bild 5-112. Die erste vollautomatisierte IHU-Großserien-Fertigungsanlage der Welt für einen PKW-Motorträger wurde 1997 bei *Opel* in Bochum in Betrieb genommen. Die hier erreichten technisch-wirtschaftlichen Ziele waren:

Branche	Baugruppe	Bauteil (Beispiel)
Automobilindustrie **Fahrzeuge** **– Straße** **– Wasser** **– Luft** **– Schiene**	Fahrwerk Abgas-, Ansaugsysteme Anbauteile, Antrieb Sitze, 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, Dachspriegel, 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	Lichtmasten, Lampenschalen
Optik	Fernrohre, Taschenlampen	Gehäuse

Bild 5-112
BMW 5er Hinterachse, bestehend aus 4 IHU-Teilen: 2 Längsträger, 2 Querträger aus Aluminium-Rohr, geschweißt (Quelle: Siempelkamp Pressen Systeme).

- Werkzeugkosten um 60 % reduziert,
- Gewicht um 30 % eingespart,
- Bauteilepreis um 20 % abgesenkt.

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).

Bild 5-113
Kompletter Motorträger für Opel-Astra / Zafira (Quelle: Schuler Hydroforming).
Reduzierung der Werkzeugkosten um 60 %, der Produktkosten um 20 %, des Gewichtes um 30 % (bezogen auf die bisherige Fertigung).

Karosserie- und Chassisbauteile
In den USA hatte man zeitlich parallel sehr viele Rohr-Hydroform-Anwendungen verwirklicht. Dabei lag der Schwerpunkt bei Strukturbauteilen 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 gewinnen 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, Bild 5-114.

5.7.3 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 Besonderhei-

ten 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, Bild 5-115.

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.

Bild 5-114
Überrollbügel als IHU-Bauteil für Porsche Boxster (Quelle: Schuler Hydroforming).

Der erforderliche Innendruck p_i ergibt sich aus der Fließspannung $k_f (\approx 1{,}25 \cdot R_{eH})$ 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 Bild 5-116 dargestellt.

Bauteilauslegung
Hierzu muss die verfahrensspezifische Technologie berücksichtigt werden. Dazu gehört neben der Verwendung von vorgebogenem Rohr z. B. die Erzeugung von Querschnittsveränderungen, Durchsetzungen, Durchbrüchen, Einfach- und Mehrfachaushalsungen oder die Erzeugung von Schweißzentrierflächen. Für rohrförmige Rohteile gelten nach dem derzeitigen Stand der Technik folgende Grenzwerte:
- maximale Länge $L = 12$ m,
- maximaler Durchmesser $D = 660$ mm,
- Wanddicke $s = 0{,}6$ mm bis 50 mm.

Bild 5-115
Ablaufdiagramm für die Bauteilauslegung.

Die maximal erreichbare Aushalsungshöhe an einem geraden T-Stück ist deutlich höher als an einem Bogen, weil hier das Nachschieben von Werkstoff behindert wird, Bild 5-117.

Eine erhöhte Aushalsung ist dann möglich, wenn sie in der Nähe eines Axialzylinders liegt. Bei der Auslegung eines Bauteiles sollten grundsätzlich scharfe Ecken und Kanten vermieden werden. Radien müs-

Bild 5-116
Erforderlicher Innendruck als Funktion vom Verhältnis r_{min}/s.

sen 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.

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 aufwändige 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 Axialzylinder, 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.

Bild 5-118
Fertigungsstufen für den Opel-Motorträger aus modifiziertem niedriggekohltem Baustahl. Vorrohr: 2600 x 65 x 2mm. (Quelle: Schuler Hydroforming).

Folgende Ergebnisse lassen sich mit einem entsprechend ausgelegten FEM-Programm berechnen:
- Plastische Vergleichsdehnung,
- Vergleichsspannung,
- Dickenverteilung,
- Verteilung der Dehngeschwindigkeiten,
- Hauptdehnungen,
- Abstand der Werkstückaußenwand zur Werkzeugwand.

Bild 5-117
Erreichbare Aushalsungshöhe in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie (nach Schuler-Handbuch).

Mit diesen Ergebnissen lassen sich dann einzelne Fertigungsstufen festlegen, Bild 5-118.

Werkstoffeinsatz
Als Werkstoffe für das Innenhochdruckumformen kommen alle die in Frage, 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 erfolgen. Folgende geometrische Formen kommen zum Einsatz:
– Hohlprofile (gerade, vorgeformt, geschweißt, stranggepresst, Doppelwandrohr),
– Doppel- oder Mehrfachplatinen (eben oder vorgeformt, Tailored Blanks).

Bild 5-119
Prozessfenster im IHU-Arbeitsdiagramm (VDI 3146, Blatt 1).

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 (Bild 5-119). 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.

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).

Tabelle 5-6. 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

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 MoS_2-Basis, Wachsemulsionen, grafithaltige Gleitlacke jeweils

auf Wasserbasis eingesetzt (Tab. 5-6). 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.

5.7.4 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, Bild 5-120,
- Form geben,
- Prozess führen.

Bild 5-120
Typischer Druck-Wegverlauf eines IHU-Aufweitevorgangs.

Mitunter ergibt sich bereits zum Vorformen des Rohteils die Notwendigkeit einer gesteuerten oder geregelten Schließbewegung. Diese Funktionen werden durch eine Schließ- und Zuhalteeinrichtung 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.

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, Bild 5-121. 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. Stößelplatte 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 Bauteils,
- Integration von Zusatzoperationen wie Lochungen,
- Fertigung modifizierter Einsätze.

Dabei beeinflussen folgende Parameter die Auswahl der Werkzeugwerkstoffe sowie deren notwendige Beschichtung bzw. Behandlung der Oberfläche:
- Geometrie des Bauteils,
- Werkstoff des Bauteils,
- maximaler Innendruck,
- Dichtsystem,
- Verwendungszweck (Prototyping oder Serienbetrieb).

5.7.5 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 Formpressteilen auf IHU-Bauteile mit geschlossenem Profil und ausgeprägter Längsachse ist meist nicht sinnvoll. Daher wurde von *F.-U. Leitloff* eine begleitende Qualitätssicherung mit spezieller Messung der Außenkontur 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 Projektphase muss die »Projektbegleitende Qualitätssicherung« mit Kunde und IHU-Entwicklungsingenieur 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 Löchern,
- Anzahl der zu vermessenden Bauteile bei Qualitätsprüfungen,
- Art der Auswertung dieser Messungen.

Ergebnis dieses Vorgehens sollte es sein, die für den Kunden *primär* wichtigen Bauteilbereiche 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, Bild 5-122.

Bild 5-121
Prinzipieller Werkzeugaufbau für das Innenhochdruckumformen (nach Schuler-Handbuch).

Der Entwicklungsingenieur muss die *voraussichtlich* zu erwartenden Toleranzen und Abmessungen des fertigen IHU-Bauteils zunächst abschäzen. 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 Qualitätssicherungs-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 Qualitätssicherungs-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).

Der Kunde bewertet weitere Punkte durch eigene Untersuchungen, z. B. Gewicht und Crashverhalten.

Bild 5-122
Einzelschritte für die Serien-Werkzeugfertigung (nach Leitloff).

Definitionen
Zum Vermeiden von Missverständnissen und zum Schaffen einer gemeinsamen Nomenklatur für Gespräche zwischen Kunde, Qualitätssicherungs-Ingenieur und IHU-Entwicklungsgingenieur 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.

Bild 5-123
Normalverteilung einer Maschinenfähigkeitsuntersuchung.

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 $\bar{\mu}$ und die geschätzte Standardabweichung σ dieser Stichprobe charakterisieren die Fertigungsgenauigkeit der Maschine, Bild 5-123.

Aus diesen Kennwerten der Stichprobe werden die beiden Kennzahlen c_m und c_{mk} nach folgenden Formeln berechnet:

$$c_m = \frac{T}{6 \cdot \sigma} \quad \text{bzw.} \quad c_{mk} = \frac{|\Delta_{krit}|}{3 \cdot \sigma}. \qquad [5\text{-}71]$$

Die Maschine gilt als »fähig«, wenn die Toleranz T mindestens den 8fachen Wert von σ beträgt. Die Maschinenfähigkeitskennzahl c_m erreicht dann den Wert 1,33 oder größer.

Im Automobilbau ist man dazu übergegangen, einen Wert für $\sigma < 0{,}1\ T$ zu fordern. Demzufolge ist eine Maschine erst fähig, wenn ein c_m-Wert von 1,67 oder größer vorliegt.

Bild 5-124
Normalverteilung mit außermittiger Lage im Toleranzfeld.

Der c_m-Wert sagt nun nichts über die Lage der Verteilung innerhalb des Toleranzbereiches T aus, Bild 5-124. 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 weiteren 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, Um-

welteinflüsse, 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 σ und Mittelwert $\overline{\mu}$ analog zu den oben angegebenen Beziehungen die Prozessfähigkeitskennzahlen c_p und c_{pk} gebildet und bewertet.

Bild 5-125
Beispiel für eine Qualitätsregelkarte (Quelle: Schuler Hydroforming GmbH).

Das Bild 5-125 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.

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 Überschreitungsanteile 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 Maschineneinstellungen 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.

Querschnitttoleranz
Möchte der Kunde z. B. ein Stanz-Biegeteil an einem IHU-Bauteilquerschnitt anbringen, so interessiert ihn die so genannte Querschnitttoleranz. 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).

Tabelle 5-7. 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 %

Die Genauigkeit des Werkzeugs entscheidet über die des Bauteils und hängt von folgenden Hauptfaktoren ab:

- Güte der CAD-Bauteil- und CNC-Bearbeitungsdaten (Fräsprogramme),
- 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 Konstruktionswerkstoffs 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 mm bis 0,50 mm,
- Formlinien von ca. 0,40 mm 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 mm bis 0,20 mm,
- Formlinien ca. 0,15 mm 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 > 1 mm 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.

5.7.6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Eine Gegenüberstellung des Innenhochdruckumformens mit anderen Verfahren (z. B. Formpressen und Verbinden von Blechschalenteilen, 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, Tabelle 5-7. 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 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.

Abschließend lässt sich sagen, dass sich durch eine gezielte Gestaltung von IHU-Bauteil und Umformprozess sowohl Energie als auch Material einsparen lassen. Die Entwicklungs- und Produktionszeiten können wesentlich verkürzt werden, was insgesamt zu einer Kostensenkung führt.

5.7.7 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 innerhalb von 5 Jahren eine beachtenswerte Erfolgsgeschichte schrieb, sollen hier einige aktuelle Beispiele für das Innen-Hochdruck-Umformen (IHU) 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 Diagonalstrebe für den BMW E 65, ein Jahr später wurden für Opel die Ladeluftrohre für Dieselmotoren produziert. Im Oktober 2004 wurde eine neue Fertigungslinie für die Land Rover Plattform T5 mit Investitionen von rd. 28 Mio. € eingeweiht, wodurch mehr als 20 neue Arbeitsplätze geschaffen werden konnten, Bild 5-126.

Bild 5-126
Vollautomatisierte Fertigungslinie für Leiterrahmen aus ungewöhnlich langen IHU-Bauteilen, sog. Hydro-Frames. (Werkbild: Finow Automotive GmbH, Eberswalde).

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 Europa dagegen ist dieses Konzept »Integrated Body Frame« erstmalig von Fi-

Bild 5-127
IHU-Längsträger »Rear« für Land Rover T5-Plattform, Typ Discovery und Range Rover.
(Werkbild: Finow Automotive GmbH, Eberswalde)

now 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 Fertigteil 1955 mm lang bei einem Rohrquerschnitt von 100 x 140 mm. Mit einer Länge von ca. 4 m durchläuft der doppelte Längsträger die Produktionslinie, Bild 5-127.

Als Vormaterial wird ein Präzisionsstahlrohr nach ASTM 513 (Werkstoff AISI 1008) mit den Maßen 135 Ø x 3,2 x 4 500 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, Bild 5-128.

Die voll automatisierte Fertigungslinie besteht also aus der Vorformpresse, der Prüfeinrichtung, der IHU-Presse und der Vorrichtung für den Beschnitt der Rohrenden.

In 4 Laser-Zellen werden danach die Aussparungen, Bohrungen und Vierkantlöcher in den Fahrwerkträger eingebracht. Nach der Endkontrolle werden die Fertigteile konserviert und verpackt.

Bild 5-128
IHU-Werkzeug mit Abdichtstempel zur Herstellung von Fahrwerkträgern (Werkbild: Finow Automotive GmbH, Eberswalde).

5.8 Gestaltung von Umformteilen

5.8.1 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, 6/2003.
- DIN EN 10243: Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen – Teil 1: Warm hergestellt in Hämmern und Senkrecht-Pressen, 6/2000.
- DIN EN 10243, Berichtigung 1: Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen.
  Teil 1: Warm hergestellt in Hämmern und Senkrecht-Pressen, 12/2007.
- DIN EN 10243, Berichtigung 2: Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen.
- DIN 7527-1: Schmiedestücke aus Stahl; Bearbeitungszugaben und zulässige Abweichungen für freiformgeschmiedete Scheiben, 10/1971.

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, 11/1994.
- DIN EN 586: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Schmiedestücke, 2/2002.
  Teil 3: Grenzabmaße und Formtoleranzen.
- DIN 7523-2: Schmiedestücke aus Stahl; Gestaltung von Gesenkschmiedestücken; Bearbeitungszugaben, Seitenschrägen, Kantenrundungen, Hohlkehlen, Bodendicken, Wanddicken, Rippenbreiten und Rippenkopfradien, 9/1986.
- VG 81237: Stäbe, Profile, Formschmiedestücke, nahtlos gewalzte Ringe aus nichtmagnetisierbaren Stählen – Technische Spezifikation, 12/2005.

5.8.2 Gestaltung von Gesenkschmiedestücken

Bild 5-129
Lage und Verlauf der Gesenkteilung sind mitbestimmend für Anzahl, Größe, Form und Kosten der Umformwerkzeuge. Vorteilhaft ist i. Allg. eine Teilfuge in halber Höhe des Gesenkschmiedestücks, besonders dann, wenn es in Bezug auf die Gesenkteilung symmetrisch ist:

- Die für die Aushebeschrägen benötigte Werkstoffmenge ist so am kleinsten, dadurch ist der Aufwand bei einer spanenden Bearbeitung am geringsten,
- der Versatz ist leichter zu erkennen,
- die Werkzeugherstellung ist durch die Verwendung nur eines Modells für die Herstellung beider Gesenkhälften billiger.

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 5-129

Bild 5-130
Zur Verbesserung des Werkstoffflusses kann eine andere Lage der Gesenkteilung 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.

Bild 5-130

Bild 5-131
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.

Bild 5-131

Bild 5-132
Unterschneidungen nach Möglichkeit vermeiden, da das Werkstück aus einem einteiligen Werkzeug nicht ausgehoben werden kann. In unvermeidbaren Fällen sind teure, geteilte Werkzeuge einzusetzen.

Bild 5-132

Bild 5-133
Es werden drei Grundformen der Gesenkteilung unterschieden:
– eben,
– symmetrisch gekröpft,
– unsymmetrisch gekröpft.

Bei der ebenen Gesenkteilung ist der Herstellungsaufwand des Werkzeugs am geringsten. Auch schmiedetechnisch ist die ebene Gesenkteilung vorteilhaft, da die Neigung zum Versatz gering ist.

Bild 5-133

Bild 5-134
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.

Bild 5-134

Bild 5-135

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. Dadurch werden die Gesenkblockabmessungen noch größer als bei vergleichbaren Gesenken mit symmetrischer Teilung.

Bild 5-135

Bild 5-136
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, sondern gilt unabhängig und zusätzlich zu diesen. Dies muss beim Bemaßen von Gesenkschmiedestücken, besonders von spanend zu bearbeitenden Flächen, berücksichtigt werden.

Bild 5-136

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 5-137
Beim Hohlfließpressen entsteht ein Versatz durch das Verlaufen des Pressstempels. Er ist um so größer, je kleiner das Verhältnis Durchmesser zu Länge der Innenform ist.

Bild 5-137

Bild 5-138
Um Stahlschmiedestücke aus 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.

Bild 5-138

Bild 5-139
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. Sie werden zweckmäßigerweise an Flächen gelegt, wo sie auch am Fertigteil nicht stören, oder an Flächen, die bearbeitet werden müssen.

Bild 5-139

Bild 5-140
Durch die Veränderung der Gesenkteilung kann sich der Werkzeug- und Fertigungsaufwand sowohl verringern als auch erhöhen. Bei diesem Beispiel erzielt man eine Verringerung der Werkzeugkosten durch eine andere Gesenkteilung.

Bild 5-140

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 5-141
Eine Verringerung des Aufwandes beim Fertigbearbeiten ergibt sich in diesem Beispiel durch die Wahl einer vorteilhaften Gesenkteilung (Vermeiden von Schrägen).

Bild 5-142
Durch eine sinnvolle Führung der Gratnaht – aufgezeigt an zwei Beispielen – können Stichbildungen vermieden werden. Stiche sind Stellen, an denen Werkstoff aus zwei Richtungen gegeneinanderfließt, ohne dass es zu einer Verbindung kommt.

Bild 5-143
Der Werkstoff setzt dem Umformen in den Gesenken Widerstand entgegen, der besonders dann zunimmt, wenn der Werkstoff scharfe Kanten umfließen oder tiefe, enge Gravurteile ausfüllen muss. Daher müssen ausreichende Kantenrundungen und Hohlkehlen vorgesehen werden (DIN 7523-2).

Bild 5-144
Bei zu kleinen Rundungen von Hohlkehlen entstehen Schmiedefehler (Stiche, Bild 5-142).

Bild 5-145
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. Um das Fließen zu erleichtern, sollen sie große Hohlkehlen am Übergang in den Schmiedestückkörper aufweisen. Mindestwerte für die Wand- und Rippendicke enthält DIN 7523-2.

Bild 5-146

Bild 5-146
Bei der Gestaltung von Querschnittsübergängen sollen Rundungshalbmesser stets so groß gewählt werden, wie es ohne Nachteile für die Funktionseigenschaften des Werkstücks möglich ist.

Bild 5-147

Bild 5-147 u. 5-148
Durch Prägen erzielt man bei einzelnen Maßen kleinere Toleranzen und eine hohe Oberflächengüte, so dass in vielen Fällen auf eine spanende Bearbeitung verzichtet werden kann. Maßprägeflächen sollen gegenüber den angrenzenden Formelementen erhaben sein. Um die erforderlichen Presskräfte klein zu halten, werden die notwendigen Flächen durch vertiefte Formelemente verkleinert.

Bild 5-148

Bild 5-149

Bild 5-149
Die Schwierigkeit, schräge Flächen anzubohren, lässt sich dadurch umgehen, dass man eine rechtwinklig zur Bohrerachse stehende Tasche oder einen entsprechenden Ansatz vorsieht.

Bild 5-150
Bearbeitungszugaben für die Stirnflächen langer Schmiedestücke müssen wegen des unterschiedlichen Schwindens ausreichend bemessen werden. Aus diesem Grund sollte man Augen, Zapfen oder Nocken, die bearbeitet werden sollen, oval ausbilden. Bei langen Hebeln mit Augen an beiden Enden sollte nur eines mit vorgeschmiedetem Loch, das andere hingegen massiv ausgeführt werden.

Bild 5-150

Bild 5-151
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. Links erkennt man, dass die beiden Gratlappen übereinanderfließen, und dass sich beim dritten Schlag ein Stich bis in das Werkstück hineinschiebt. Durch eine konstruktive Änderung der Hebelform (rechtes Bild) wird der Stich außerhalb des Schmiedestücks gehalten.

Bild 5-151

5.8.3 Gestaltung von Tiefziehteilen

Bild 5-152
Komplizierte Teile und asymmetrische Grundformen sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Auf normalen Werkzeugmaschinen leicht zu fertigende Umrisslinien sind anzustreben. Die Herstellkosten für verschiedene Werkzeugformen können mit dem Kostenfaktor x abgeschätzt werden. ($x = 2$ bedeutet z. B. doppelt so große Werkzeug-Herstellkosten wie $x = 1$)

Bild 5-152

Bild 5-153
Runde Böden sind schwieriger durch Tiefziehen herzustellen als ebene mit genügend großer Bodenrundung. Die günstigste Bodenrundung (r_{Boden}) entspricht dem 0,15fachen Stempeldurchmesser D_{St}.

Bild 5-153

Gestaltung

unzweckmäßig zweckmäßig

Bild 5-154
Tiefe Teile mit breitem Flansch erfordern einen großen Rondendurchmesser sowie große und teure Werkzeuge. Es kann sehr viel wirtschaftlicher sein, den Flansch nachträglich anzubringen.

Bild 5-154

Bild 5-155
Die Höhen ausgezogener Vertiefungen, Augen oder Stutzen sind niedrig zu halten ($h \leq 0{,}3\ d$) und sollen mit möglichst großer Schräge und großen Radien ausgeführt werden. Sie sind dann meist in einem Zug zu fertigen.

Bild 5-155

Bild 5-156
Senkrechte Zargen sind billiger als Kegelflächen. Eine Außenrolle ist leichter als eine Innenrolle zu fertigen.

Bild 5-156

Bild 5-157
Teile mit Hinterschneidungen sind nicht ziehbar. In diesen Fällen ist das Werkstück so zu teilen, dass einfache Grundformen entstehen.

Bild 5-157

Bild 5-158
Ebene Verschalungsbleche mit Randbördel neigen eher zu Verwerfungen als leicht gewölbte Blechformen.

Bild 5-158

Ergänzendes und weiterführendes Schrifttum

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: Gesenkschmiedeteile aus Stahl – Maßtoleranzen.
Teil 1: Warm hergestellt in Hämmern und Senkrecht-Pressen; Berichtigungen zu DIN EN 10243-1: 2005-07; 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*, 2003-12.

DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch.
Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, 2009-12.

Dahl, W., R. Kopp, O. Pawelski: Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde. Düsseldorf: Verlag Stahleisen und Springer-Verlag, Berlin 1993.

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. 21. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 2005.

Grüning, K: Umformtechnik. Braunschweig, Wiesbaden: Verlag Vieweg & Sohn 1982.

Handbuch der Umformtechnik. Firmenschrift. Schuler GmbH (Hrsg.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1996.

König, W., u. *F. Klocke:* Fertigungsverfahren. Bd. 5. Blechumformung, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1995.

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 1984, 1988, 1990.

Leitloff, F.-U: Die Fertigungslinie für die Längsträger der LandRover T5-Plattform. EFB-Kolloquium, Prag, Februar 2005.

Malle, K: Aufweiten – Stauchen – Expandieren, VDI-Z 137 (1995) 9.

Oehler, G., u. *F. Kaiser:* Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1973.

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.

Schal, W. (Hrsg.): Fertigungstechnik 2., 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 1996.

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.

Siegert, K.: Umformen. In: Betriebshütte 7. Aufl. Bd. 1. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1996.

Spur, G., u. *T. Stöferle:* Handbuch der Fertigungstechnik. München, Wien: Carl Hanser Verl. 1980.

Tschätsch, H: Praxiswissen Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge. Wiesbaden: Vieweg Verlag 1997.

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.

www.wissensfloater.uni-wuppertal.de
- Streckziehen (IFU Uni Stuttgart)
- Thixoforming (IFUM Uni Hannover)
- Tiefziehen (IFU Uni Stuttgart)
- Kaltwalzplattieren (Wickeder GmbH)
- Walzen von Schienen (Voestalpine AG)

6 Sachwortverzeichnis

Symbole

3D-Drucken 112

A

Abbrennstumpfschweißen 210
-, mit Vorwärmung 211
-, ohne Vorwärmung 210
Abgasbauteil (IHU) 466
Abkantpresse 460
Abkühlungsschaubild 16
Abschmelzleistung (*S*) 123, 155, 170
-, Gasschweißen 136
-, MSG (Fülldrahtelektrode) 178
-, UP-Verfahren 184
Abschrägung
-, Schweißen 215
-, Sintern 104
Abstreckziehen 445
-, Getränkedosenfertigung 446
Abtragen 257, 358
-, chemisches 362
  -, durch Ätzen 362
  -, thermisch-chemisches Entgraten (TEM) 363
-, elektrochemisches 364
-, thermisches
  -, Erodieren 359
Abtrennen 257
Aceton 134
Acetylen 133, 134
Acetylen-Sauerstoff-Flamme 133
-, erste Verbrennungsstufe 133
-, zweite Verbrennungsstufe 133
Acetylenzerfall 134
Aggregat 142, 159
Aktivkraft 270
Aluminiumbasislot 231
Aluminiumlegierung 36
Anisotropie, senkrechte 457
Anodenfall 139
Anschmelzung 373
Anschnittquerschnitt 44
Anschnittsystem 70
Apfelsinenhaut 451
Arbeitsbedarf
-, Schmieden 429
-, Walzen 420, 422
Arbeitsebene 267
Arbeitseingriff 267
Arbeitstemperatur (Löten) 220
A-Stabelektrode 149
Aufbauschneide 274
Aufheizgeschwindigkeit 125
Aufschmelzgrad (*AS*) 119
Auftragschweißen 118
-, Aufschmelzgrad 119
-, Bandelektrode (UP) 186
-, Plasma- 168
-, Schweißpanzern 119
-, Schweißplattieren 119
-, von Pufferschichten 119
Auftrieb 11
Auftrieb (Gießen) 11, 85
Ausbringen (Gießen) 74
Ausbringung 155
Ausklinken 257
Ausschneiden 257
Außenlunker 43
Außenräumen 309
Auswerferstift 70

B

Ballen 6, 28, 56
Bandelektrode (UP) 185
Bartbildung (Plasmaschneiden) 377
Basizitätsgrad (UP) 190
Benetzungswinkel (φ) 220
Bentonit 53
Beschneiden 259
Biegegesenk 460
Biegen 459
-, Biegeumformen 459
-, Einteilung der Biegeverfahren 460
-, Rückfederungsfaktor 462
-, Rundbiegen 460
-, Schwenkbiegen 460
Biegeumformen 459
Bindemittel 51
-, kalt-/heißhärtende 51
Bindeton 51
Blaswirkung, magnetische 158
Blechverbindung (Kleben) 251
Blockseigerung 49
Bodenreißer 445
Bohren 296
Bohrverfahren
-, Formbohren 299
-, Planansenken 298
-, Planeinsenken 298
-, Plansenken 298
-, Profilaufbohren 299
-, Profilbohren ins Volle 299

A. H. Fritz, G. Schulze (Hrsg.), *Fertigungstechnik,* Springer-Lehrbuch
DOI 10.1007/978-3-642-29786-1,

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

-, Profilreiben 299
-, Rundbohren 298
-, Rundreiben 299
-, Schraubbohren 299
Bohrverfahren, Einteilung 298
Bohrwerkzeug 299
Bolzenschweißen 218
Bondern 442
Bornitrid 282
Börsenmetall 39
Brandriss 48
Breiten 424
Brennerhöhenverstellung 369
Brennschneiddüse 367
-, Blockdüse 367
-, Schlitzdüse 367
Brennschneiden, autogenes 365
-, Anschmelzung 373
-, Anwendung 375
-, Aufhärtung der Schnittkante 366
-, Brennerhöhenverstellung 369
-, Brennschneiddüse 367
-, Brennschneidmaschine 368
-, Eckenverzögerung 369
-, Form- und Lagetoleranzen 372
-, Koordinatenantrieb 368
-, Lochstechautomatik 371
-, Pulvermarkieren 369
-, Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz 373
-, Rillennachlauf 373
-, Rissbildung an der Schnittkante 366
-, Schachtelplan 370
-, Schneidbrenner 367
-, Schnittflächenqualität 372
-, Technik 371
Brennschneidmaschine 368
-, Auslegerbauweise 368
-, Brennerhöhenverstellung 369
-, CNC-System 370
-, Eckenverzögerung 369
-, Koordinatenantrieb 368
-, Kreuzwagensystem 368
-, Lochstechautomatik 371
-, Portalbauweise 368
-, Pulvermarkieren 369
-, stationäre 368
-, Steuerung der 370
-, Strichkantenabtastung 370
-, Strichmittenabtastung 370
B-Stabelektrode 150
BTA-Verfahren 301
Buckelschweißen 208

C

Calciumcarbid 134
CBN
-, Spanen 283
Cermets 279
CO_2-Gaslaser (Laserschneiden) 378
CO_2-Schweißen (MAGC) 180
CO_2-Verfahren (Gießen) 60
COB (Chip-on-Board-Technologie) 250
Cold-Box-Verfahren 64
Constant Potential, s. Konstantspannungscharakteristik 142
Croning-Verfahren 51
C-Stabelektrode 151
CVD-Verfahren 279

D

Dampfphasenlöten 224
Dauerform 8, 10, 39, 40
Dauermodell 8
Dauerschweißbetrieb (*DB*) 142
Dendrit 22
Diamantschneidstoff 282
-, monokristalliner (MKD) 282
-, polykristalliner (PKD) 282
Diamant-Ziehstein 443
Dichtnaht 207
Diffusionsverschleiß 279, 283
Diffusionszone (Löten) 222
DIN 01547 443
DIN 01688-1 58
DIN 01910-100 117, 121, 199
DIN 02310-6 365
DIN 06580 266
DIN 06935 462
DIN 07523-2 428, 481
DIN 08580 257
DIN 08582 407
DIN 08583 415, 416, 432
DIN 08583-2 453
DIN 08584-1 441, 447
DIN 08586 459
DIN 08589 265
DIN 08589-1 291
DIN 08589-2 299
DIN 08589-3 302
DIN 08589-4 306
DIN 08589-5 308
DIN 08590 358, 364
DIN 51385 284
DIN EN 00439, s. DIN EN ISO 14175
DIN EN 00499, s. DIN EN ISO 2560
DIN EN 00923 238
DIN EN 00993-12 52
DIN EN 01561 26
DIN EN 01562 32
DIN EN 01563 29
DIN EN 01564 30
DIN EN 10002-1 412
DIN EN 10213 34
DIN EN 10243-1 480
DIN EN 10293 33
DIN EN 12345, s. DIN EN ISO 17672 156
DIN EN 12536 136
DIN EN 12584 373

DIN EN 12890 8, 78
DIN EN 22401 155
DIN EN 22553 156
DIN EN ISO 02560 153
DIN EN ISO 03690 152
DIN EN ISO 09013 372
DIN EN ISO 14175 162
DIN EN ISO 14372 152
DIN EN ISO 17672 230, 231
DIN EN ISO 20482 457
DIN-Fachbericht ISO/TR 581 132
DIN ISO 00513 278
DIN ISO 00857-1, s. DIN 1090-100
DIN ISO 01101 372
DIN ISO 01832 295
Doppeldraht-Verfahren (UP) 185
Doppelpunktschweißen 203
Doppelspeiser 7
Drahtelektrode 160
-, Metall-Schutzgasschweißen (MSG) 170
-, Schutzgasschweißen (SG) 160
-, Unterpulverschweißen (UP) 183
-, Widerstandsschmelzschweißen 211
Drahterosion 361
Draht-Pulver-Kombination 183
Drahtvorschubeinrichtung (MSG) 171
Drahtziehen 442
-, Diamant-Ziehstein 443
-, Kraftbedarf 444
Drehverfahren 291
-, HSC (High Speed Cutting) 277, 285
-, Längs-Plandrehen 291
-, Plandrehen 291
-, Quer-Abstech-Plandrehen 292
Drücken 453
Druckgießform 69
Druckgießverfahren 68
Druckguss 10
-, einhaltbare Toleranz 72
-, Formhaltbarkeit 72
-, Nachdrückverfahren 71
-, Vakuumverfahren 71
Druckgusslegierung
-, Aluminium-Silicium- 36
-, Magnesium-Aluminium- 36
-, Schweißverhalten 70
Druckminderventil 135
Druckstelle 50
Druckumformen 415
Dünnblechbereich, Schweißen im 181
Duplexbetrieb 10
Durchdrücken 433
-, Fließpressen 436
-, Kaltfließpressen 437
-, Strangpressen 433
Durchziehbedingung 421
Durchziehen 421
DVS 0957 Technische Regel 152
DVS 2707 Technische Regel 168
DVS 2902-1 Technische Regel 202
DVS 2939 Technische Regel 203

E

Eckenverzögerung 369
Eckenwinkel 269
Eigenspannung 456
Eindrückverfahren 431
-, Maßprägen 431
-, Prägen 431
-, Warmeinsenken 433
Einfalllunker 10
Einschaltdauer (*ED*) 142
-, Dauerschweißbetrieb (*DB*) 142
-, Handschweißbetrieb (*HSB*) 142
-, Nennhandschweißbetrieb (*Nenn-HSB*) 142
Einschneiden 257
Einsenken 431, 432
Einstech-Profil-Rundschleifen 402
Einstellbereich (*E*) 142
Eisengusswerkstoff 24
Ejektorbohrverfahren 301
Elektrodenumhüllung
-, Adsorptionswasser 151
-, Aufgaben 147
-, basische 150
-, metallurgische Wirksamkeit 148
-, rutile 150
-, rutil-saure 150
-, saure 149
-, Umhüllungsdicke 147
-, zellulose 151
Elektronenstrahlschweißverfahren 192
-, Einbrandtiefe 194
-, keyhole 194
-, Schweißeignung der Werkstoffe 196
-, Schweißnahtvorbereitung 194
-, Tiefschweißeffekt 193
-, Vor- und Nachteile 196
-, Wehnelt-Zylinder 192
Elektroschlackeschweißen 211
Elektrostauchverfahren 424
Elementarzelle 20, 409
Energiebilanz 5
Entformen 12
Entgraten 363
Entlastungsloch 451
Entsorgung 3
Erodieren 359
Erstarrung
-, gelenkte 43
Erstarrung, gerichtete 19, 58
Erstarrungsintervall 17
Erstarrungsmodul (*M*) 44
Erstarrungssimulation 45
Erstarrungsverhalten 17
Erstarrungszeit 12
-, nach *Chovrinow* 44
Erstaufnahmefläche 6
EU-Richtlinie
-, RL 2002/95/EG 230
-, RL 2002/96/EG 230

F

Faltenbildung beim Tiefziehen 447
Falzen 461
Fangstift 264
Feinguss 65
Feinkorngefüge 18
Feinschicht 66
Fertigungskosten (Optimierung) 287
Fertigungsverfahren (Ordnungssystem) 257
Fertigungszeitminimum 289
Festigkeitshypothese 411
Feuerfestigkeit (Formstoff) 52
Feuerverzinken 72
Flachwalzen 416
Flammenrückschlag 135
Flammlöten 224
Fließbedingung 411
Fließfigur 456
Fließgrenze 411
Fließkurve 412
Fließpressen 436
-, Umformarbeit 439
Fließscheide 421
Fließspan 273, 274
Fließspannung 412
Fließvermögen (einer Schmelze) 41
Fließwinkel 272
Flussmittel 226
-, Vakuum 228
-, zum Hartlöten von Aluminium und Legierungen 227
-, zum Hartlöten von Schwermetallen 227
-, zum Weichlöten von Leichtmetallen 228
-, zum Weichlöten von Schwermetallen 228
FMEA (Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse) 15
Folgeschneidwerkzeug 263
Folienstumpfnaht 208
Folienüberlappnaht 208
Form
-, Dauer- 8, 10, 39, 40
-, verlorene 8
Formänderung 410
Formänderungsanalyse 458
Formänderungsverhältnis 410
Formbohren 299
Formdrehen 294
Formfehler 261
Formfräsen 304
Formmaschine 8
Formschräge 8
Formseitenschneider 264
Formstoff
-, Bentonit 53
-, Feuerfestigkeit 52
-, Formsand 51
-, Gasdurchlässigkeit 52
-, Maskenformverfahren, nach *Croning* 61
-, tongebundener 51
-, Zementsand 55
Formstoffballen 59
Formteilung 6
Form- und Gießanlage, vollautomatische 57
Formverfahren 50
-, Feingießverfahren 65
-, Handformen 54
- , kastenloses 59
-, mit Dauerform 68
-, Druckgießverfahren 68
-, mit verlorener Form 50, 65
-, Wachsausschmelzverfahren 65
Fräsen 302
-, Form- 304
-, Freiform- 304
-, Gegenlauf- 305
-, Gleich- 305
-, kinematisch-Form- 304
-, Nachform- 304
-, NC-Form- 304
-, Profil- 304
-, Werkzeug zum 305
Fräswerkzeug 305
Freifläche 269
Freiflächenverschleiß 271
Freiformen 415
Freiformfräsen 304
Freiformschmieden 423, 426
Freischneidwerkzeug 262
Freiwinkel 269
Fremdkeim 18
Fügen 117
-, durch Kleben 238
-, durch Löten 220
-, durch Schweißen 220
-, durch Umformen 461
Fugenform 157
Fugenlöten 222
Fülldrahtelektrode
-, SG-Schweißen 178, 181
-, UP-Schweißen 188
Fülldruck, kapillarer (Löten) 221
Funkenerosion 359

G

Gasaufnahme 41
Gasblase (Gaslunker) 47
Gaslöslichkeit 47, 124
Gaslunker 47
Gasschweißen 133
-, Anwendung und -Anwendungsgrenzen 136
-, Arbeitsweise 135
-, Betriebsstoffe 134
-, Druckminderventil 135
-, Nachlinksschweißen 136
-, Nachrechtsschweißen 136
-, neutrale Flamme 134
-, Schweißbrenner 135
-, Schweißstab 136
-, Sicherheitsvorlage 135

Gefüge
-, -änderungen beim Schweißen 123
-, anisotropes 32
-, dendritisches 22
-, dichtes 58
-, Feinkorn- 18
-, Grobkorn- 18, 136
-, Guss- 17, 21, 75
-, primäres 18
-, stängelförmiges 123
-, Widmannstättensches 34, 35
Gegenlauffräsen 305
Genauguss 50
Genaugussstück 39
Genauschmieden 428
Gesamtschneidwerkzeug 263
Gesenkformen 415
Gesenkschmieden 427
Gestaltung
-, Bohren, Senken, Reiben 395
-, Drehen 393
-, Anschnitt 394
-, Formabweichung 393
-, Freistich 394
-, Gesenkschmiedestücke 479
-, Werkstoffanhäufung 484
-, Gewinde 397
-, Gewindedurchgangsbohrung 397
-, Gussteil
-, beanspruchungsgerechte 78
-, fertigungsgerechte 88
-, gießgerechte 79
-, Klebverbindung 251
-, Blechverbindung 251
-, Rohrverbindung 253
-, Rundverbindung 253
-, Lötverbindung
-, Blechverbindung 233
-, Bodenverbindung 237
-, Rohrverbindung 235
-, Rundverbindung 233
-, Punktschweißverbindung 218
-, Elektroden 219
-, Räumen 400
-, Schleifen 401
-, Schleifscheibenauslauf 401
-, Schmelzschweißverbindung 213
-, Schräganschluss 215
-, Schweißnahtanhäufung 217
-, Zugänglichkeit 214, 216
-, Schnittteile 388
-, Biegekante 392
-, Flächenschluss 388
-, Lochversatz 391
-, Stempelecke 391
-, Stempelversatz 392
-, Werkstoffausnutzung 388
-, Sinterteil 100
-, fertigungs- und fügegerechtes 103
-, werkstoff- und werkzeuggerechtes 101
-, Umformen 478
Getränkedosenfertigung 446
Gewindedrehen 293
Gewindedurchgangsbohrung 397
Gewindefurchen 420
Gewindeschneiden 277, 293
Gewindestrehlen 293
Gewindewalzen 418
Gießbarkeit 40
Gießeigenschaft 25
Gießen 6
-, Anschnitt 6
-, Ausbringen 74
-, Ballen 6
-, Erstaufnahmefläche 6
-, Fehler-Möglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) 15
-, Formhälfte 6
-, Gasaufnahme 41
-, Grat 8
-, Kern 7
-, Putzarbeit 12
-, Rattenschwanz 41
-, Rheogießen 77
-, Rohteilzeichnung 6
-, Schülpe 41
-, Schwindung 40
-, Stichprobenprüfung 15
-, Thixogießen 77
-, umweltfreundlicher Betrieb 15
-, Warmriss 41
Gießofen 71
Gießspirale 41
Gießverfahren 50
Glattwalzen 419
Gleichlauffräsen 305
Gleitsystem 410
Gleitziehen 442
Goldlot 231
Gratgesenk 429
Grathöhe 261
Gratlage 263
Gratverhältnis 428
Grauerstarrung 25
Greifbedingung 421
Grobkornbildung 49
Grünling 95
Gussbronze 40
Gusseisen 25
-, bainitisches 30
-, Brinellhärte 29
-, Gießeigenschaft 25
-, legiertes 30
-, mit Kugelgrafit 28
-, mit Lamellengrafit 25
-, mit Vermiculargrafit 30
-, Sättigungsgrad 25
-, selbstspeisendes 45
-, Weißeinstrahlung 26
Gussfehler 40
Gusslegierung

-, Aushärtungseffekt 38
-, Kokillen- 38
-, Sand- 38
-, Schwermetall- 39
-, Zinkdruck- 39
Gussmessing 40
Gussstück, druckdicht 23, 36
Gussteil
-, Gestaltung 78, 88
Gussversatz 58
Gusswerkstoff 5, 24
-, austenitischer 30
-, Börsenmetall 39
-, Entstehung des Gefüges 15
-, Gussbronze 40
-, Gusseisen mit Lamellengrafit 25
-, Gusseisen mit Vermiculargrafit 25
-, Gussmessing 40
-, Keimbildung 17
-, Kristallformen 19
-, Kupfer- 40
-, Leichtmetall- 36
-, Nichteisen- 24, 35
-, Warmstreckgrenze 45

H

Haftspannung γ_H (Löten) 220, 221
Hämatit (Gießen) 73
Handlöten 222
Handschweißbetrieb (*HSB*) 142
Handschweißen 120
Hartbearbeitung 285
Hartguss 45
Hartlot 230
-, silberhaltiges 231
-, Vakuum- 231
Hartlöten 228
Hartmetall 278
Hauptnutzungszeit (Drehen) 296
Hauptschneide
-, Bohren 298
-, Drehen 269
Heißkokille 75
Heißpressen (Pulver) 96
Heißriss 128, 192
Herdguss
-, gedeckter 54
-, offener 54
Heuversfaktor 44
Heuverssche Kreismethode 43
Hinterschneidung 65
Hobeln 306
Hobelwerkzeug 308
Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (*HSC*) 285
Hochgeschwindigkeitsdrehen 277
Hochtemperaturlöten 228
Hohl-Gleitziehen 445
Hohlkern 61
Hohlprägen 456
Hohl-Vorwärts-Fließpressen 441
Hohl-Vorwärts-Strangpressen 433
Hot-Box-Verfahren 62
hydraulische Presse 451

I

IHU, s. Innenhochdruckumformen
-, Abgasbauteil 466
Impfen (der Schmelze) 18
Impulslichtbogenschweißen 179
-, MIG-Schweißen 178
-, Stromverlauf (MIG-Schweißen) 179
Impulszündgerät 164
Induktionshartlöten 225
Injektorwirkung (Gasschweißen) 136
Innenhochdruckumformen (IHU) 465
-, Bauteilauslegung 468
-, Fertigungsbeispiele 477
-, IHU-Rohteil 470
-, Machbarkeitsanalyse 469
-, Maschinenfähigkeit 474
-, Prototyping 471
-, Prozessfähigkeit 474
-, Prüfplan 473
-, Qualitätsregelkarte 475
-, Qualitätssicherung 472
-, Rohteil-Geometrie 470
-, Simulation der Formgebung 469
-, Verfahrensgrenzen 470
-, Versagensfall 470
-, Werkstoffe 470
-, Wirtschaftlichkeit 476
Innenlunker 43
Innenräumen 309
innere Regelung 172
Inverterschweißstromquelle 146
ISO 3002 266

K

Kälken 442
Kalteinsenken 433
Kaltfließpressen 437, 438
Kaltharzsand 55
Kaltharzverfahren 64
Kaltkammerverfahren 68, 69
Kaltpressschweißen 118
Kaltriss 22, 45, 128, 129
Kaltschweißstelle 42
Kaltumformen 407
Kantenabzug 261
kapillarer Fülldruck, Löten (p_k) 221
Karosserieteil 451, 458
Kassettenmodellplatte 57
Kastenformerei 56
kastenloses Formen 59
Kathode (Schweißen) 168
Kegelstauchversuch 413

Keilwinkel 269
Keim
-, arteigener 17
-, artfremder 18
Kennlinienfeld 141
Kennlinie, statische 141
Kern 7
Kernauftriebskraft 11
Kerneisen 54
Kernlager 11, 54, 85
Kernsand 51
Kernversatz 50
Kettenräumen 309
Kettenziehbank 443
Kipptiegelgießen 74
Kleben 238
-, Adhäsion 238
-, Anwendungsbeispiele 246
-, Benetzung 239
-, COB-Komponenten 250
-, DIN EN 923 238
-, Herstellung der Klebung 245
-, Klebplastisol 244
-, Kohäsion 238
-, Kontaktklebstoff 244
-, Nachbehandlung 240
-, Oberflächenbehandlung 239
-, Oberflächenspannung 238, 239
-, Polyadditionsklebstoff 244
-, Polykondensationsklebstoff 245
-, Polymerisationsklebstoff 244
-, Reaktionsklebstoff 244
-, Richtlinie VDI 2229 238
-, Schmelzklebstoff 244
Klebplastisol 244
Klemmsystem (Drehmeißel) 295
Klopfdichte 93
Kohabitationsprinzip 153
Kohlensäure-Erstarrungsverfahren 60
Kokille 8, 17
Kokillengießverfahren 73
-, Kipptiegelgießen 74
-, Schwerkraftgießen 74
Kokillenguss 18, 39
Kokillengusseisen 46
Kokillenträger 76
Kolbenlegierung 39
Kolbenweichlöten 223
Kolkverschleiß 271
Konstantspannungscharakteristik 142
Kontaktklebstoff 244
Koordinatenantrieb 368
Kopierdrehen 294
Korngrenzenfilm 45
Kraftwirkung 414
Kragenziehen 454
Kraterfülleinrichtung 165
Kristallform
-, dendritische 22
-, globulare 21
-, stängelartige 21
Kristallisation 16
-, gerichtete 19
-, naheutektische 25
-, warmrissfreie 34
Kristallseigerung 128
Kugelführung 263
Kühlschmierstoff
-, Schleifen 284
-, umweltverträglicher 284
Kupferbasislot 231
Kupfergusswerkstoff 40
Kupolofen 10
Kurzlichtbogen 174
Kurzlichtbogentechnik 180
Kurzschlussstrom 140

L

Lagenaufbau
-, Einfluss auf Eigenschaften 128
-, Mehrlagentechnik 128
-, Pendellagentechnik 128
-, Zugraupentechnik 128
Lamellengrafit 25
Lamellenspan 274
Längen 455
Langlichtbogen 173, 180
Längswalzen 416
Langzeitveredlung 19
Laserschneiden 378
-, Anregung 378
-, CO_2-Gaslaser 378
-, Dotierung 378
-, Resonator, optischer 379
-, Verfahrensmöglichkeiten und Grenzen 379
Laserstrahlschweißverfahren 197
-, CO_2-Laser 197
-, Diodenlaser 197
-, Nd:YAG-Laser 197
-, Vor- und Nachteile 199
Leerlaufspannung 140
Leerlaufverlust 141
Leistungsdichte des Lichtbogens 123
Leistungsfaktor (cos φ) 143, 145
Lichtbogen
-, Anodenfall 139
-, Blaswirkung, magnetische 158
Blaswirkung, magnetische 158
-, Ion 138
-, Pinch-Effekt 139
-, Plasma 138
-, Stoßionisation 138
-, Vorgänge im 138
-, Werkstoffübergang im 139
Lichtbogenhandschweißen 137
-, Anwendung und Anwendungsgrenzen 159
-, Ausführung und Arbeitstechnik 156
-, Fugenform 157
-, Verfahrensprinzip 137
Lichtbogenkennlinie 140

Lichtbogenstabilität 140
Lochen 257, 425
-, mit Hohldorn 432
-, Schmiedestück 428
Lochstechautomatik 371
Lost Foam Process 68
Lot 228
-, Aluminiumbasis- 231
-, Gold- 231
-, Hart- 230
-, Kupferbasislot 231
-, Palladium- 231
-, physikalische Eigenschaften 230
-, Schmierlot 230
-, Steighöhe (h) 221
-, Vakuumhart- 231
-, Weich- 230
Lötbadweichlöten 223
Löteignung 221
Löten 220
-, Arbeitstemperatur 220
-, Benetzung der Oberfläche 220
-, Benetzungswinkel (φ) 220
-, Dampfphasen- 224
-, Diffusionszone 222
-, Flussmittel 226
-, Fugen- 222
-, Grenzflächenspannung 220
-, Grundlagen 220
-, Haftspannung γ_H (Löten) 220
-, Hand- 222
-, Hart- 228
-, Induktionshart- 225
-, kapillarer Fülldruck (p_k) 221
-, Kolbenweich- 223
-, Legierungszone 222
-, Lot 228
-, Lötbadweich- 223
-, Lotformteil 222
-, Lötspalt 221
-, mit Formteilen 222
-, Ofen- 225
-, Reflow- 224
-, SMD-Komponenten 224
-, Vapour Phase Reflow- 224
-, Verschiessen 221
-, Weich- 228
-, Wellenweichlöten 224
-, Wirktemperaturbereich 226
Lotformteil 222
Lötspalt 221
Lötverfahren 223
-, mit festem Körper 223
-, mit Flüssigkeit 223
Lüders-Linie 456
Lunker 22
-, Außen- 43
-, Innen- 43
-, Mikro- 43
-, Schwamm- 47
Lunkerprobe 43
Lunkerung 42

M

Magnetformverfahren 51, 68
MAG-Schweißen 180
-, CO_2-Schweißen (MAGC) 180
-, Mischgas-Schweißen (MAGM) 170
MAK-Wert 64
Maschinenfähigkeit 474
Maschinenformen 56
-, Cold-Box-Verfahren 64
-, Hot-Box-Verfahren 62
-, Kaltharzverfahren 62
Maskenformverfahren 61
-, Phenol-Kresol-Harz 61
Maskenschüttverfahren 62
Masse, poröse 134
Maßprägen 431
Matrizenabzugsverfahren 95
Meehanite-Gusseisen, s. Gusseisen mit Kugelgrafit
Mehrdrahtverfahren (UP) 185
Mehrlagentechnik 128
Messrastertechnik 458
Metall-Lichtbogenschweißen, s. Lichtbogenhandschweißen 137
Metall-Schutzgasschweißen (MSG) 170
-, Anwendung und Möglichkeiten 181
-, Drahtvorschubeinrichtung 171
-, freie Drahtlänge 170
-, Fülldrahtelektrode 178
-, innere Regelung 172
-, Kurzlichtbogen 174, 180
-, Langlichtbogen 180
-, Schutzgas (DIN EN ISO 14175) 174
-, Schweißanlage 171
-, Sprühlichtbogen 173
-, Verfahrensprinzip 170
-, Werkstoffübergang 177
MIG-Schweißen 178
-, Impulslichtbogenschweißen 179
-, Sprühlichtbogen 178
Mikrolunker 23, 43
Mikroplasmaschweißen 169
Mikrozerspanung 286
Mitte, thermische 23
Modellbau 6
Modellgenerierung 107
Modellgüteklasse 8
Modellsand 51
Modelltraube (Modellbaum) 66
Modell, verlorenes 8, 65
Modultheorie 44
Monel 450

N

Nachlinksschweißen 136
Nachrechtsschweißen 136
Nahtformverhältnis (φ) 186
Nassguss 22
Nassgussform 53
Nassgusssand 58
Nassputzverfahren 13
Natursand 52
NC-Formdrehen 294
NC-Formfräsen 304
Near-Net-Shape Technologie 3, 279
Neigungstoleranz 372
Neigungswinkel 270
Nennhandschweißbetrieb (*Nenn-HSB*) 142
Neusilber 432, 450
Nichteisen-Gusswerkstoff 24, 35
Nickelbasislot 231
Niederdruck-Kokillengussverfahren 74
Novolake 62

O

Oberflächenspannung (Kleben) 238
Oberflächenspannung (Löten) 220
Ofenlöten 225
Orthogonalprozess 271
Oxidationsverschleiß 284

P

Palladiumlot 231
Paralleldrahttechnik (UP) 185
Passfedernut 399
Passivkraft 270
Pendellagentechnik 128
Penetration 41, 48
Phasenanschnittsteuerung (Punktschweißen) 202
Phenol-Kresol-Harz 61
Phosphatierverfahren (Bondern) 442
Pilgerschrittwalzen 416
Pilotstift 264
Pinch-Effekt 139
PKD (polykristalliner Diamant) 282
Planansenken 298
Plandrehen 291
Plansenken 298
Plasma 138
Plasmaauftragschweißen 168
Plasmadickblechschweißen 169
-, Schlüssellocheffekt 169
Plasmalichtbogenschweißen (WPL) 168
Plasmapressluftschneiden 377
Plasmapulverauftragschweißen 169
Plasmaschneiden 376
-, Bartbildung 377
-, Plasmapressluftschneiden 377
-, Plasmawasserinjektionsschneiden 377
-, Schnittflächenqualität 376
-, Wärmeleitfähigkeit Schneidgas 376
Plasmaschweißen (WP)
-, Mikroplasmaschweißen 169
-, mit nicht übertragenem Lichtbogen 168
-, mit übertragenem Lichtbogen 168
-, Plasmadickblechschweißen 169
Plasmastrahl-Plasmalichtbogenschweißen (WPSL) 168
Plasmastrahlschweißen (WPS) 168
Plasmawasserinjektionsschneiden 377
-, Vorteile 378
Plastometer 415
Plattenführungsschneidwerkzeug 262
Polyadditionsklebstoff 244
Polykondensationsklebstoff 245
Polymerisationsklebstoff 244
Prägen 431
-, Formänderungswiderstand 431
-, Maß- 431
Präzisionsguss 50, 65
Presse
-, hydraulische 451
Pressen, isostatisches 96
Pressling 93
Pressschweißen 118
Pressstumpfschweißen 209
Primärgefüge 18
Profilaufbohren 299
Profilbohren 299
Profildrehen 294
Profilformen 434
Profilfräsen 304
Profilreiben 299
Profilsenken 299
Profilwalzen 416
Projizierstreckdrücken 453
Prozessfähigkeit 474
Pufferschicht, s. a. Auftragschweißen 119
Pulverbrennschneiden 375
Pulvererzeugung (Sintern) 93
Pulvermarkieren 369
Pulvermetallurgie, s. a. Sintern 92
Pulver, s. Schweißpulver
Punktschweißen, s. Widerstandspunktschweißen
Punktschweißzange 206
Putzöffnung 85
PVD-Verfahren (Schneidstoff) 278

Q

Qualitätsregelkarte 475
Qualitätssicherung (Gießen) 13
Quarzausdehnungsfehler 48
Quer-Plandrehen 291
Querwalzen 417
Quetschnaht 208

R

Rändeln 433
Rapid Manufacturing 107
Rattenschwanz 48
Räumen 308
Raumerfüllung (Sintern) 93
Räumnadellänge 400
Räumwerkzeug 310
Rautiefe
-, gemittelte 285
-, gemittelte (Brennschneiden) 373
-, theoretische 293
Reaktion
-, eutektische 17
Reaktionsklebstoff 244
Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz 373
Reckwalzen 417
Reflowlöten 224
Reibahle 299, 397
Reinigungswirkung (des SG-Lichtbogens) 162
Reißrippe (Feder) 46
Reißspan 274
Rekristallisationstemperatur 407
Resonator, optischer (Laserschneiden) 379
Rheogießen 77
Rillenbreite 374
Rillennachlauf 373
Rippe 78, 81, 83, 87
Rippenkreuz 46
RL 2002/95/EG 230
Rohrverbindung
-, Kleben 253
-, Löten 235
RoHS (Directive on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment) 230
Rollennahtschweißen 206
-, Dichtnaht 207
-, Folienstumpfnaht 208
-, Folienüberlappnaht 208
-, Quetschnaht 208
-, Überlappnaht 207
Rotguss 39
R-Stabelektrode 150
Rückfederung 456
Rückfederungsdiagramm 462
Rückfederungsfaktor (k) 462
Rückwärts-Fließpressen 437
Rundbiegen 460
Rundbohren 298
Runddrehen 293
Rundreiben 299
Rundverbindung
-, Kleben 253
-, Löten 233
Rüttel-Press-Abhebeformmaschine 56
Rüttel-Press-Formmaschine 60

S

Sandform (verlorene Form) 10, 17, 38, 58
Sandgussfehler 50
Sättigungsgrad 25
Sauerstoff zum Gasschweißen 134
Saugbrenner (Injektorbrenner) 135
Säulenführung 262
Säulenführungsschneidwerkzeug 262
Schablonenformen 54
Schälbeanspruchung (Kleben) 252
Schaumstoffmodell 67
Scherschneiden
-, Formfehler 261
-, Schneidspalt 260
-, Schnitteilform 389
-, Verwölbung 261
Scherspan 274
Scherwiderstand 261
Scherwinkel 272
Scherzone 272
Schlesinger-Kriterium 284
Schleudergießverfahren 75
-, *Lavaud*-Kokille 75
Schleuderguss 10
Schlichte 48, 50
Schließkraft 70
Schlitzdüse 367
Schlüssellocheffekt 169
Schmelzbad
-, metallurgische Vorgänge 148
Schmelzbadsicherung 191
Schmelzklebstoff 244
Schmelzlöten 220
Schmelzpulver 189
Schmelzschweißen 118
Schmiedefehler (Stich) 482
Schmiedehammer 426
Schmiedemanipulator 427
Schmieden
-, Arbeitsbedarf 429
-, Freiform- 423
-, Gesenk- 427
-, Streck- 424
Schmiedepresse 426
Schmiedetemperatur 423
Schmierlot (Wischlot) 230
Schmierstoff 442
Schneidbrenner 367
Schneidenecke 269
Schneiden, thermisches 365
-, autogenes Brennschneiden 365
-, Laserschneiden 378
-, Plasmaschneiden 376
-, Wasserstrahlschneiden 381
Schneidgeschwindigkeit
-, autogenes Brennschneiden 369
-, Laserschneiden 379
-, Plasmaschneiden 377
-, Wasserstrahlschneiden 386

Schneidkeramik 280
Schneidkraft 259, 261
Schneidplatte 261, 262
Schneidspalt 260
Schneidstoff 276
-, PVD-Verfahren 278
-, Schnellarbeitsstahl 277
-, Werkzeugstahl 277
Schneidwiderstand 261
Schnellarbeitsstahl 277
Schnellschneidpresse 265
Schnittfläche 260
Schnittflächenqualität
-, Brennschneiden 372
-, Plasmaschneiden 376
-, Scherschneiden 260
-, Wasserstrahlschneiden 385
Schnittkraft 270
-, spezifische 289
Schnittkraftgesetz (*Kienzle*) 290
Schnittleistung 270
Schnittlinie 257
Schnittzeit 296
Schore 55
Schrägwalzen 419
Schraubbohren 299
Schraubdrehen 293
Schraubfräsen 303
Schroten 425
Schrumpfspannung
-, Abkühlen Schmelze 16
-, Schweißen 129
Schrumpfung 42
Schülpe 41, 48
Schüttsintern 95
Schutzgas 160
-, Dichte (r) 160
-, Ionisierungsspannung (U_1) 161
-, Wärmeleitfähigkeit (λ) 161
Schutzgasschweißen (SG) 160, 170
-, Anwendung und Möglichkeiten 181
-, Drahtvorschubeinrichtung 171
-, freie Drahtlänge (f) 170
-, Fülldrahtelektrode 178
-, innere Regelung 172
-, Kurzlichtbogen 174
-, Langlichtbogen 173
-, Metall-Aktivgasschweißen (MAG) 170
-, Metall-Inertgasschweißen (MIG) 170
-, Metall-Schutzgasschweißen (MSG) 170
-, MIG-Schweißen 178
-, Plasmaschweißen 138, 167
-, Reinigungswirkung 162
-, Schutzgas (DIN EN ISO 14175) 175
-, Schweißanlage 171
-, Schweißstromquelle 163
-, Sprühlichtbogen 173
-, Verfahrensprinzip 170
-, Werkstoffübergang 177
-, Wirkung und Eigenschaften der Schutzgase 160
-, Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) 162, 167
-, Wolfram-Plasmaschweißen (WP) 167
Schwammlunker 47
Schweißbarkeit 132
Schweißbrenner 135
-, Flammenrückschlag (Gasschweißen) 135
-, Gasschweißen 135
-, Metall-Schutzgasschweißen (MSG) 171
-, Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) 163
Schweißeignung 132
-, Stahlguss 34
Schweißen 117
-, Aufheizgeschwindigkeit 127
-, Ausbringung 155
-, automatisches 120
-, Hand- 120
-, Sauberkeit der Fügeteile 120
-, teilmechanisches 120
-, vollmechanisches 120
-, Vorwärmen 130
-, werkstoffliche Grundlagen 123
Schweißfolgeplan 212
Schweißgleichrichter 144
-, Glättungsdrossel 144
-, Thyristor 144
-, transistorgeregelte analoge Schweißstromquelle 145
-, Wartungsaufwand 145
Schweißgut
-, B-Stabelektrode 151
-, Gaslöslichkeit 127
-, Kristallseigerung 128
-, Metall-Schutzgasschweißen (MSG) 175
-, Metallurgie (E-Handschweißen) 148
-, Schweißlinse (Punktschweißen) 202
-, UP-Verfahren 190
-, Wasserstoff im 152
-, Wiederaufschmelzriss 128
-, WIG-Schweißen 162
Schweißlinse 201, 202
Schweißmöglichkeit 132
Schweißnahtvorbereitung
-, Gasschweißen 137
-, Metall-Lichtbogenschweißen 156
-, Plasma-Dickblechschweißen 169
-, UP-Schweißen 184, 192
Schweißöse (Gasschweißen) 136
Schweißplattieren 119
Schweißpulver 188
-, agglomeriertes 189
-, Mischpulver 189
-, Schmelzpulver 189
Schweißsicherheit 132
Schweißstab 136
Schweißstoß 156
Schweißstromquelle 140
-, Aggregat 142
-, Arbeitspunkt 141
-, Eigenschaften 145
-, Einschaltdauer (*ED*) 142
-, Einstellbereich (*E*) 142

-, Inverter- 146
-, Konstantspannungscharakteristik 142
-, Kurzschlussstrom 140
-, Leerlaufspannung 140
-, Leerlaufverlust 141
-, Leistungsfaktor (cos φ) 143, 145
-, Regelkreis 144
-, Schweißgleichrichter 144
-, Schweißtransformator 143
-, Schweißumformer 142
-, sekundär getaktete 146
-, statische Kennlinie 141
-, Thyristor 144
-, Transistor 144
-, transistorgeregelte analoge 145
-, VDE-Prüfkennlinie 142
-, Wirkungsgrad 141
Schweißtransformator 143
-, Leistungsfaktor (cos φ) 143
-, Streukern 143
-, Transduktor 143
Schweißumformer 142
Schweißverfahren
-, Abschmelzleistung 123
-, CO_2-Schweißen (MAGC) 180
-, Einteilung (DIN 1910-100, DIN ISO 857-1) 118, 121
-, Elektronenstrahlschweißen 192
-, Gasschweißen 133
-, Laserstrahlschweißen 197
-, Leistungsdichte des Lichtbogens 123
-, MAG-Schweißen 180
-, Metall-Schutzgasschweißen (MSG) 170
-, Schutzgasschweißen (SG) 160
-, Unterpulverschweißen (UP) 183
-, Wahl des 121
-, Widerstandsschweißen 199
-, Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) 162, 167
-, Wolfram-Plasmaschweißen (WP) 167
Schwenkbiegen 460
Schwereseigerung 49
Schwerkraftgießen 10
Schwindung 40, 42
-, Erstarrungs- 43
-, kubische 43
Seigerung 49
-, Block- 49
-, Kristall- 49
-, Schwere- 49
Seitenschneider 263
Sekundärfensteröffnung 205
Senkerodieren 360
Sicherheitsvorlage (Gasschweißen) 135
Sieb-(Filter-)kondensator 164
Sievertssches Gesetz 47
Siliciumcarbid
-, Drehen 281
Sinterlegierung 98
Sintern (Pulvermetallurgie) 92
-, Heißpressen 96
-, Klopfdichte 93
-, Klopfvolumen 93
-, Pressling (Grünling) 93
-, Presstechnik 94
-, Pulver 92
-, Tränkwerkstoff 100
-, Zweiteilchenmodell 97
Sinterschmieden 96
Sinterstahl 98
SMD-Technik 224, 229
Spaltüberbrückbarkeit (Schweißen) 147
Spanart 275
Spanbildung 271
Spanen 265
Spanform 275
Spanformstufe 275, 295
Spannung-Dehnung-Schaubild 411
Spannungskreis, Mohrscher 411
Spannungsverhältnis (Walzspalt) 421
Spannung, thermische 127
Spanraumzahl 311
-, Drehen 275
-, Räumen 311
Spanungsdicke 289, 290
Spanwinkel 269, 272, 273
Speiser (Steiger) 7, 43
Sphäroguss, s. Gusseisen mit Kugelgrafit
Spreizwerkzeug 455
Spritzgießen 9
Sprühlichtbogen 173, 178
Stabelektrode
-, basisch-umhüllte 150
-, Bedeutung des Wasserstoffs 152
-, dick-umhüllte (s) 147
-, diffusibler Wasserstoff 152
-, dünn-umhüllte (d) 147
-, Feuchteresistenz 152
-, mitteldick-umhüllte (m) 147
-, Normung der 153
-, rutil-umhüllte 150
-, sauer-umhüllte 149
-, umhüllte 146
-, Verschweißbarkeitsverhalten 147
-, zellulose-umhüllte 151
Stabziehen 442
Stahlguss 33
-, austenitischer 34
-, Fertigungsschweißen 34
-, Schweißeignung 34
Standgröße 271
Standvermögen 270
Standzeitgleichung 286
Stängelkristall 21, 22
Stanzen 262
Stanzpresse 260
Stanzwerkzeug 265
statische Kennlinie 141
Stauchversuch 412
Steiger 43
Stempelecke 391
Stempelform (Fließpressen) 441

Stempelversatz 392
Stichabnahme 423
Stichlochtechnik, s. a. Schlüssellocheffekt 169
Stirnfräsen 303
Stopfenwalzwerk 419
Stoßart 156
Stoßionisation 138
Stoßkurzschlussstrom 141
Stoßverfahren 306
Strangguss 76, 77
-, Rheogießen 77
Stranggussbramme 420
Strangpressen 415, 433, 436
-, Kraftbedarf 436
-, Profilformen 434
-, *Ugine-Séjournet*-Verfahren 434
-, Voll-Vorwärts- 435
-, von Stahl 434
Streckrichten 456
Streckschmieden 424
Streckziehen 456
Strichkantenabtastung 370
Stromnebenschluss 204
Strukturwinkel 272
Suchstift 264
Syphonabstich 10

T

Tangential-Streckziehen 456
Taylor-Gerade 286
Teilungsgrat 7, 50
Temperaturfeld beim Schweißen
-, Abkühlgeschwindigkeit 126
-, Aufheizgeschwindigkeit 125
-, Maximaltemperatur 126
Temperguss 31
-, schwarzer 32
-, weißer 32
-, Entkohlungstiefe 33
Temperhartguss 32, 46
Textur 457
thermisches Schneiden 365
Thixoforming 77
Thixogießen 77
Thixotropie 77
Thyristor (Schweißstromquelle) 144
Tiefbohren 301
Tiefen (Streckziehen) 456
-, Hohlprägen 456
-, mit elastischem Wirkmedium 456
-, Streckrichten 456
-, Streckziehen 456
-, Tangential-Streckziehen 456
Tiefungsversuch nach *Erichsen* 457
Tiefziehen 447
-, Apfelsinenhaut 451
-, Faltenbildung 447
-, im Erstzug 447
-, im Weiterschlag 447
-, Werkzeuggestaltung 449
-, Zipfelbildung 448
-, Zuschnittermittlung 450
TiN-Beschichtung 278
Titancarbid 278
Titannitrid 278
Topfschleifscheibe 402
Tränkwerkstoff 100
Transduktor 143
Trennen 257
Trockenbearbeitung 285
Tropfenübergang, s. Werkstoffübergang 140

U

Überlappnaht 207
Überlappungslänge 251
Überlaufbohne 70
Ugine-Séjournet-Verfahren 434
Umbördeln 461
Umfangfräsen 305
Umformarbeit 413, 439
Umformen 407
-, Grundlagen 409
-, Kraftwirkung 414
-, Plastometer 415
Umformgeschwindigkeit 415
Umformgrad 410
Umformtemperatur 414
Umformverfahren
-, Einteilung (DIN 8582/87) 407
-, Vorteile 408
Umformwiderstand
-, Schmieden 429
Umformwirkungsgrad 413, 431, 436, 447
-, Abstreckziehen 446
-, Gesenkschmieden 431
-, Tiefziehen 447
-, Warmumformen 436
Unterkühlung 19
Unternahtriss, s. a. Kaltriss 130
Unterpulverschweißen (UP)
-, agglomeriertes Pulver 189
-, Anwendungen und Anwendungsgrenzen 192
-, Aufbau und Eigenschaften der Schweißnaht 186
-, Auftragschweißen 186
-, Bandelektrode 185
-, Basizitätsgrad 190
-, Doppeldrahtverfahren 185
-, Draht-Pulver-Kombination 183, 190
-, Eigenschaften der Schweißnaht 186
-, Heißrissgefahr 192
-, Mehrdrahtverfahren 185
-, Paralleldrahttechnik 185
-, Pendellagentechnik 184
-, Pulverkissen 192
-, Schmelzbadsicherung 191
-, Schmelzpulver 189

-, Schweißpulver 188
-, Verfahrensvarianten 184
-, Zusatzstoff 187
Urformen 5
-, Gießen 5

V

Vakuumgießen 47
Vakuumhartlot 231
Vakuumverfahren 71
Vapour Phase Reflowlöten 224
VDE-Prüfkennlinie 142
VDI-Richtlinie 2229 238
Verbindungsschweißen 118, 165, 168, 178, 211
-, unterschiedlicher Werkstoffe 130
Verbindung, stoffschlüssige 117
Verbundgießen 51
Verbundkonstruktion (Guss-Schweiß-) 29, 35
Verbundwerkstoff 92
Veredeln (der Schmelze) 58
Verfestigungsexponent 412
Vermiculargrafit 25
Versatz
-, Gesenkschmiedestück 479
-, Hohlfließpressen 481
Verschiessen des Lotes 221
Verschleißgröße 286
Verschleißkurve 286
Versetzung 411
Verwölbung (Scherschneiden) 261
Verzahnungsauslauf (Gießen) 105
Vielkristall 409
Vollformgießverfahren 67
Voll-Vorwärts-Strangpressen 435
Vorschubbegrenzung 263
Vorschubkraft 270
Vorschubrichtungswinkel 267
Vorwärmen (zum Schweißen) 130
Vorwärts-Fließpressen 437
VP-Löten, s. Vapour Phase Reflowlöten

W

Wachsausschmelzverfahren 65
Wachsmodell 65
Walzen 416
-, Definition und Einteilung 416
-, Geschwindigkeitsverteilung 422
-, Kraft- und Arbeitsbedarf 422
Walzenvorschubeinrichtung 265
Wälzfräsen 304
Walzspalt 419
Walzstraße 420
Walztheorie 420
Walzverfahrenen, Einteilung 416
Warmbreitbandstraße 420
Wärmeausdehnungskoeffizient (α) 124, 232
Wärmeeinbringen (Q) 123, 127
Wärmeeinflusszone (WEZ) 126
-, Härteverteilung 127
-, Martensitbildung in 130
Wärmeleitfähigkeit (λ) 124
-, Schutzgas (SG-Schweißen) 161
-, Werkstoff (Schweißen) 124
Warmkammerverfahren 68
Warmriss (Gießen) 41, 45
Warmrissneigung 58
Warmumformen 407
Wasserglas 60
Wasserstoff
-, hochreaktiver Werkstoff 167
-, Plasmaschweißen 168
-, Schweißgut (B-Elektroden) 151
-, Schweißgut (Stabelektroden) 147
-, Schweißgut (UP-Verfahren) 190
-, Ursache für Kaltriss 129, 130
Wasserstrahl-Abrasiv-Schneiden 384
Wasserstrahlschneiden 381
-, Einsatz und Anwendung 385
-, mit Reinwasser 383
-, Schneidkopf 383
-, Schneidsystem 382
-, Schnittflächenqualität 385
-, Wasserstrahl-Abrasiv-Schneiden 384
Wechselzeit (Werkzeug) 471
WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) 230
Weichlot 230
Weichlöten 228
Weißeinstrahlung (Gießen) 26
Weißmetall 65
Weiten 455
Wellenweichlöten 224
Wendelbohrer 301
Wendelbohrertyp 301
Wendeschneidplatte 295
Werkstoff
-, physikalische Eigenschaften 124
-, Wirkung der Wärmequelle 123
Werkstoffeigenschaft
-, Gusseisen (Lamellengrafit) 25
-, physikalische (Schweißen) 124
-, Sinterwerkstoff 96
Werkstoffübergang (im Lichtbogen) 139
-, erzwungen (Impulslichtbogen) 179
-, feintropfiger 150
-, kurzschlussbehaftet (Kurzlichtbogen) 180
Werkstückeigenschaft (Gießen) 5
Werkzeugauslauf 78
Werkzeugbezugssystem 269
Werkzeugeinstellwinkel 269
Werkzeugform (Drehen) 295
Werkzeugkosten 287, 390
Werkzeugstahl 277
Werkzeugverschleiß 283
Werkzeugwinkel 269
WEZ, s. Wärmeeinflusszone
Whisker 281, 282

Widerstandspressschweißen 199
-, Doppelpunktschweißen 203
Widerstandspunktschweißen 200
-, Anwendung und Anwendungsgrenzen 206
-, Elektrodeneindruck 204
-, Phasenanschnittsteuerung 202
-, Schweißlinse 202
-, Sekundärfensteröffnung 205
-, Stromnebenschluss 204
-, thermisches Gleichgewicht 204
Widerstandsschmelzschweißen 199, 211
-, Elektroschlackeschweißen 211
Widerstandsschweißen 199
Widmannstättensches Gefüge 34
Wiederaufschmelzriss 128
WIG-Impulslichtbogenschweißen 166
Winkelfehler
-, Plasmaschneiden 376
-, Wasserstrahlschneiden 385
Wirkbewegung 267
Wirkkraft 270
Wirkmedium 456
Wirktemperaturbereich 226
Wirtschaftlichkeit (IHU) 476
Wolframelektrode
-, Plasmaschweißen 168
-, WIG-Schweißen 163, 166
Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) 162, 167
-, Anwendung und Grenzen 166
-, Gleichrichtungseffekt 164
-, Impulszündgerät 164
-, Kraterfülleinrichtung 165
-, praktische Ausführung 165
-, Schweißbrenner 163
-, Sieb- (Filter-)kondensator 164
-, Verfahrensprinzip 162
-, WIG-Impulslichtbogenschweißen 166
-, Wolframelektrode 163
-, Zündhilfe 164
Wolfram-Plasmaschweißen (WP) 167
Wolfram-Schutzgasschweißen (WSG) 162
-, Wolfram-Plasmaschweißen (WP) 167
WPL-Schweißen 168
WPSL-Schweißen 168
WPS-Schweißen 168
Wulststumpfschweißen 210
Wurzel
-, gasgeschweißt 136
-, Kurzlichtbogen 180
-, lichtbogenhandgeschweißt 150
-, Schweißproblem 159
-, UP geschweißt 192
-, WIG geschweißt 165

Z

Zapfensenker 395
Zeitberechnung
-, Bohren 302
-, Drehen 296
-, Fräsen 305
-, Hobeln 308
-, Räumen 312
Zementsand 55
Zerspanbarkeit 271
Zerspankraft 270
Zerteilen 257
Ziehbank 443
Ziehstein 443
Ziehverhältnis 448
Zinkdruckguss-Legierung 39
Zipfelbildung (Tiefziehen) 448
Zug-Druck-Umformen 441
-, Abstreckziehen von Hohlkörpern 445
-, Diamant-Ziehstein 443
-, Gleitziehen von Rohren 445
Zugraupentechnik 128
Zugumformen 454
-, Kennwertermittlung 456
-, Längen 455
-, Näpfchen-Tiefziehprüfung nach *Swift* 458
-, Spreizwerkzeug 455
-, Tiefen (Streckziehen) 456
-, Tiefungsversuch nach *Erichsen* 457
-, Weiten 455
Zündhilfe 164
Zündstelle 130
Zusatzwerkstoff
-, Drahtelektrode (MSG) 175
-, Drahtelektrode (UP) 187
-, Fülldrahtelektrode (UP) 188
-, Schweißstab (Gasschweißen) 136
-, Stabelektrode (Lichtbogenhandschweißen) 146
Zwangslage 122, 166, 212
Zweiteilchenmodell 97