

Wolfgang Weißbach

Werkstoffkunde

Aus dem Programm
Grundlagen Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Klausurentrainer Technische Mechanik
von J. Berger

**Lehrsystem Technische Mechanik mit Lehrbuch,
Aufgabensammlung, Lösungsbuch sowie Formeln
und Tabellen**

von A. Böge und W. Schlemmer

Vieweg Handbuch Maschinenbau
herausgegeben von A. Böge

Technische Strömungslehre
von L. Böswirth

Festigkeitslehre und Werkstoffmechanik in 2 Bänden
von R. Bürgel

Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik
von R. Bürgel

Tribologie-Handbuch
von H. Czichos, K.-H. Habig, E. Santner und M. Woydt

Thermodynamik für Ingenieure
von K. Langeheinecke, P. Jany und G. Thieleke

Technologie der Werkstoffe
von J. Ruge und H. Wohlfahrt

**Aufgabensammlung Werkstoffkunde
und Werkstoffprüfung**
von W. Weißbach und M. Dahms

Wolfgang Weißbach

Werkstoffkunde

Strukturen, Eigenschaften, Prüfung

16., überarbeitete Auflage

Mit 287 Abbildungen und 245 Tabellen

Unter Mitarbeit von Michael Dahms

Viewegs Fachbücher der Technik



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

Das Buch erschien bis zur 15. Auflage unter dem Titel *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*
im gleichen Verlag.

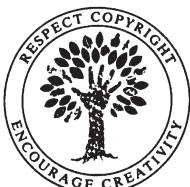
1. Auflage 1967
- 2., berichtigte Auflage 1970
- 3., unveränderte Auflage 1972
- 4., vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage 1974
- 5., durchgesehene Auflage 1975
- 6., durchgesehene Auflage 1976
- 7., verbesserte Auflage 1979
- 8., verbesserte und erweiterte Auflage 1981
- 9., verbesserte Auflage 1988
- 10., verbesserte und erweiterte Auflage 1992
- 11., verbesserte Auflage 1994
- 12., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage 1998
- 13., neu bearbeitete Auflage 2000
- 14., verbesserte Auflage Januar 2002
- 15., überarbeitete und erweiterte Auflage Juli 2004
- 16., überarbeitete Auflage 2007

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007

Lektorat: Thomas Zipsner / Imke Zander

Der Vieweg Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.vieweg.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes
ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere
für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und
die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Technische Redaktion: Hartmut Kühn von Burgsdorff, Wiesbaden

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Satz: Zerosoft, Temesvar

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Těšínská Tiskárna, a.s., Tschechien

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in the Czech Republic

ISBN 978-3-8348-0295-8

Vorwort

Die Werkstofftechnik sieht ihre Aufgabe im Umsetzen wissenschaftlicher Erkenntnisse in technische Anwendungen, z. B. bei der Entwicklung und Erzeugung marktfähiger, d. h. auch innovativer Produkte.

Am Lebenslauf eines technischen Erzeugnisses von der Entwicklung über seine Fertigung mit Qualitätssicherung, der späteren Nutzung mit Wartung und evtl. Regeneration bis hin zum Recycling, wird die zentrale Stellung des Werkstoffes deutlich. In all diesen Phasen müssen Sachbearbeiter ihre Maßnahmen auf die Eigenart der verwendeten Werkstoffe abstimmen.

Ein einführendes Lehrbuch der Werkstofftechnik darf dabei den theoretischen Hintergrund für Eigenschaften und das Verhalten der Materie bei technischen Verfahren nicht vernachlässigen und muss gleichzeitig die Verflechtungen mit den Bereichen Konstruktion und Fertigungstechnik aufzeigen und Werkstoffanwendungen an Beispielen belegen.

Das vorliegende Lehrbuch vertritt diese Richtung, die im ersten Abschnitt als Einführung und Motivation dargelegt wird. Es wird das Prinzip „Eigenschaften sind eine Funktion der Struktur“ erläutert und Überlegungen zur optimalen Werkstoffwahl vorgestellt. Es schließt mit einem Überblick über die Vielfalt der Fertigungsverfahren. Der eigentliche Lehrtext ist in den darauf folgenden Abschnitten zu finden.

Das Buch ist mit seiner Stoffauswahl und sprachlichen Gestaltung für Studienanfänger der Fach- und Fachhochschulen angelegt und für alle Fachrichtungen, bei denen Werkstoffeigenschaften und Werkstoffverhalten bei technologischen Prozessen eine wichtige Rolle spielen.

Nach vier Jahrzehnten erscheint nun die 16. Auflage unter dem neuen Titel

Werkstoffkunde – Strukturen, Eigenschaften, Prüfung

Damit wird auf zahlreiche Leserzuschriften eingegangen, die den kleinen Anteil der Werkstoffprüfung am Ganzen beanstandeten.

In der Neuauflage wurden Normen aktualisiert und einige Bilder größer dargestellt. Auf zahlreichen Seiten wurde die unterbrochene Zweisprältigkeit des Layouts hergestellt und Verbesserungen am Text vorgenommen.

Der Abschnitt Stoffeigenschaft ändert ergänzungen zu den Thermomechanischen Verfahren. Überarbeitet und an die Neue DIN EN ISO-Norm angepasst wurde der Abschnitt Korrosion und Korrosionsschutz. Ebenso im Abschnitt Nichteisenmetalle die Beiträge zu Magnesium und Titan.

Erweitert wurde auch der Abschnitt Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe.

Um dem Leser noch mehr weiterführende Informationen zu Werkstoffen und deren Eigenschaften an die Hand zu geben, haben wir bei dieser Auflage auf die CD-Beilage verzichtet. Der Leser findet dazu bei dem Materialinformationssystem FORMAT als umfangreiche Datenbank unter www.werkstoffe.de wichtige Hinweise und benötigte Informationen für die Praxis und Ausbildung.

Autoren und Verlag danken Firmen und Instituten für Unterlagen und den Benutzern für kritische und konstruktive Anmerkungen und Vorschläge. Wir werden auch weiterhin bemüht sein, diese zu realisieren.

Braunschweig, im August 2007

Wolfgang Weißbach

Michael Dahms

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlegende Begriffe und Zusammenhänge	1
1.1 Gegenstand und Bedeutung der Werkstoffkunde	1
1.1.1 Das Fachgebiet Werkstoffe	1
1.1.2 Stellung und Bedeutung der Werkstoffkunde in der Technik	3
1.2 Entwicklungsrichtungen der Werkstofftechnik	5
1.2.1 Leichtbau zur Reduktion des Werkstoff- und Energieverbrauches	6
1.2.2 Oberflächenbehandlungen, Nanotechnologie	6
1.2.3 Energieeinsparung und bessere Nutzung	7
1.2.4 Innovative Werkstoffanwendung	7
1.3 Wie lassen sich die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe erklären ? ..	8
1.3.1 Was bedeutet Struktur der Werkstoffe ?	8
1.3.2 Unterteilung der Struktur und Einflussmöglichkeiten zur Veränderung ..	10
1.3.3 Atombau (Atommodelle nach Bohr u.a.)	10
1.3.4 Kristallgitter und Bindungsart	12
1.3.5 Einflussnahme auf das Kristallgitter	14
1.3.6 Gefüge und Änderungsmöglichkeiten	14
1.4 Auswahlprinzip für Werkstoffe	15
1.4.1 Anforderungsprofil	15
1.4.2 Eigenschaftsprofil	16
1.4.3 Auswahlgrundsatz	17
1.4.4 Maßnahmen zur Verbesserung nichtausreichender Eigenschaftsprofile ..	17
1.5 Überlegungen zur Werkstoffwahl	18
1.5.1 Eine komplexe Optimierungsaufgabe	18
1.5.2 Vereinfachte Direktwahl	20
1.5.3 Allgemeine, indirekte Wahl	21
1.5.4 Einfluss des Fertigungsweges auf die Werkstoffwahl	21
1.5.5 Integral- oder Differenzialbauweise	22
1.5.6 Einfluss der Bauteilmerkmale auf den Fertigungsweg	23
1.5.7 Vergleich einiger Fertigungsverfahren	24
1.6 Übersicht, Einteilung der Fertigungsverfahren DIN 8580/03	25
2 Metallische Werkstoffe	31
2.1 Metallkunde	31
2.1.1 Vorkommen	31
2.1.2 Metallische Bindung	31
2.1.3 Metalleigenschaften	33
2.1.4 Die Kristallstrukturen der Metalle (Idealkristalle)	36
2.1.5 Entstehung des Gefüges und seine Ausrichtungen	40
2.1.6 Verformung am Idealkristall (Modellvorstellung)	44
2.2 Struktur und Verformung der Realkristalle	49
2.2.1 Kristallfehler	49

2.2.2	Verformung der Realkristalle und Veränderung der Eigenschaften	53
2.3	Verfestigungsmechanismen	53
2.3.1	Kaltverfestigung (auch Verformungs- oder Versetzungsverfestigung)	53
2.3.2	Mischkristallverfestigung	54
2.3.3	Korngrenzenverfestigung (Feinkorn)	55
2.3.4	Teilchenverfestigung	56
2.4	Vorgänge im Metallgitter bei höheren Temperaturen	57
2.4.1	Allgemeines	57
2.4.2	Kristallerholung und Rekristallisation	59
2.4.3	Kornvergrößerung (-wachstum)	61
2.4.4	Warmumformung	62
2.4.5	Diffusion	63
2.4.6	Werkstoffverhalten bei höheren Temperaturen unter Beanspruchung	65
2.5	Legierungen	69
2.5.1	Begriffe	69
2.5.2	Zustandsdiagramme, Allgemeines	73
2.5.3	Zustandsdiagramm mit vollkommener Mischbarkeit der Komponenten	73
2.5.4	Allgemeine Eigenschaften der Mischkristall-Legierungen	75
2.5.5	Eutektische Legierungssysteme (Grundtyp II)	76
2.5.6	Allgemeine Eigenschaften der eutektischen Legierungen	77
2.5.7	Ausscheidungen aus übersättigten Mischkristallen	79
2.5.8	Zustandsdiagramm mit intermetallischen Phasen	80
2.5.9	Übung: Auswertung eines Zustandsdiagrammes, Abkühlverlauf einer Cu-Zn-Legierung (64,5 % Cu)	81
2.5.10	Vergleich von homogenen und heterogenen Legierungen	82
2.5.11	Übersicht über Phasenumwandlungen im festen Zustand	83
3	Die Legierung Eisen-Kohlenstoff	84
3.1	Abkühlkurve und Kristallarten des Reineisens	84
3.2	Erstarrungsformen	86
3.3	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD)	88
3.3.1	Erstarrungsvorgänge	88
3.3.2	Die Umwandlungen im festen Zustand	89
3.4	Einfluss des Kohlenstoffs auf die Legierungseigenschaften	96
3.4.1	Mechanische Eigenschaften	96
3.4.2	Technologische Eigenschaften	97
3.5	Einfluss von Legierungselementen auf das EKD	98
3.5.1	Elemente, die das Austenitgebiet erweitern	98
3.5.2	Elemente, die das Austenitgebiet verkleinern	98
3.5.3	Wirkung mehrerer Elemente	99
3.6	Stahlerzeugung	100
3.6.1	Allgemeines	100
3.6.2	Die Wirkung der Eisenbegleiter auf Gefüge und Eigenschaften der Stähle	100
3.6.3	Rohstahlerzeugung	103
3.6.4	Sekundärmetallurgie	104
3.6.5	Vergießen und Erstarren des Stahles	105

4 Stahlsorten – Normen und Verwendungsgruppen	107
4.1 Der Werkstoff Stahl.....	107
4.1.1 Begriffe und Einteilung.....	107
4.1.2 Einfluss der Legierungselemente auf das Gefüge	108
4.2 Stähle für allgemeine Verwendung	110
4.2.1 Anforderungsprofil	110
4.2.2 Baustähle nach DIN EN 10025	111
4.3 Baustähle höherer Festigkeit.....	113
4.3.1 Die Erhöhung der Festigkeit	113
4.3.2 Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, nicht vergütet.....	114
4.3.3 Vergütete schweißgeeignete Feinkornbaustähle	115
4.4 Stähle mit besonderen Eigenschaften	115
4.4.1 Wetterfeste Baustähle.....	115
4.4.2 Kaltzähe Stähle	115
4.4.3 Austenitische Stähle	116
4.4.4 Ferritische Stähle.....	117
4.4.5 Stähle für Einsatz bei hohen Temperaturen	118
4.5 Stähle für bestimmte Fertigungsverfahren.....	120
4.5.1 Automatenstähle.....	120
4.5.2 Stähle zum Kaltumformen	121
4.5.3 Weitere Stahlsorten für bestimmte Fertigungsverfahren.....	124
4.6 Stähle für bestimmte Bauteile.....	125
4.6.1 Wälzlagerstähle	125
4.6.2 Federstähle	125
4.7 Werkzeugstähle	127
4.7.1 Allgemeines	127
4.7.2 Kaltarbeitsstähle	129
4.7.3 Warmarbeitsstähle.....	130
4.7.4 Kunststoff-Formenstähle.....	131
4.7.5 Schnellarbeitsstähle (HS-Stähle).....	132
4.8 Stahlguss	133
4.8.1 Allgemeines	133
4.8.2 Stahlguss für allgemeine Verwendung.....	134
4.8.3 Weitere Stahlgusswerkstoffe, Übersicht	134
5 Stoffeigenschaft ändern	136
5.1 Allgemeines	136
5.1.1 Einteilung der Verfahren.....	136
5.1.2 Zeit-Temperatur-Folgen	137
5.1.3 Austenisierung (ZTA-Schaubilder)	138
5.2 Glühverfahren	140
5.2.1 Normalglühen.....	140
5.2.2 Glühen auf beste Verarbeitungseigenschaften	141
5.2.3 Spannungarmglühen.....	143
5.2.4 Diffusionsglühen.....	144
5.2.5 Rekristallisationsglühen	145
5.3 Härteln und Vergüten	145

5.3.1	Allgemeines	145
5.3.2	Austenitzerfall.....	146
5.3.3	Martensit, Struktur und Bedingungen für die Entstehung	147
5.3.4	Härtbarkeit der Stähle	149
5.3.5	Verfahrenstechnik.....	151
5.3.6	Härteverzug und Gegenmaßnahmen	156
5.3.7	Zeit-Temperatur-Umwandlung-Schaubilder (ZTU-Diagramme)	157
5.3.8	Vergüten.....	160
5.4	Aushärten.....	164
5.4.1	Allgemeines	164
5.4.2	Innere Vorgänge	165
5.4.3	Verfahren	166
5.4.4	Bedeutung und Anwendung der Aushärtung.....	166
5.4.5	Unterschied zum Härteten und Vergüten.....	168
5.5	Thermomechanische Verfahren.....	168
5.5.1	Allgemeines	168
5.5.2	Austenitformhärteten	169
5.5.3	Thermomechanische Behandlung TM	170
5.6	Verfahren der Oberflächenhärtung.....	171
5.6.1	Überblick	171
5.6.1	Randschichthärteten.....	171
5.6.3	Einsatzhärteten.....	174
5.6.4	Nitrieren, Nitrocarburieren	180
5.6.5	Weitere Verfahren (Auswahl).....	184
5.6.6	Mechanische Verfahren	185
6	Eisen-Gusswerkstoffe	187
6.1	Übersicht und Einteilung.....	187
6.1.1	Vorteile der Gusskonstruktionen	187
6.1.2	Einteilung der Gusswerkstoffe.....	189
6.2	Allgemeines über die Gefüge- und Graphitausbildung bei Gusseisen	190
6.2.1	Gefügeausbildung	190
6.2.2	Graphitausbildung.....	191
6.3	Gusseisen mit Lamellengraphit	192
6.4	Gusseisen mit Kugelgraphit	194
6.5	Temperguss	196
6.6	Gusseisen mit Vermiculargraphit	199
6.7	Sonderguss	200
7	Nichteisenmetalle	203
7.1	Allgemeines.....	203
7.2	Bezeichnung von NE-Metallen und -Legierungen.....	203
7.2.1	Übersicht.....	203
7.2.2	Werkstoff	204
7.2.3	Zustandsbezeichnungen	204
7.2.4	Knetlegierungen.....	205
7.2.5	Gusslegierungen.....	205

7.3	Aluminium.....	206
7.3.1	Vorkommen und Gewinnung.....	206
7.3.2	Einteilung der Al-Knetwerkstoffe.....	207
7.3.3	Unlegiertes Aluminium, Reihe 1000.....	208
7.3.4	Nicht aushärtbare Legierungen	209
7.3.5	Aushärtbare Legierungen	210
7.3.6	Aluminium-Gusslegierungen	211
7.3.7	Aushärten der Aluminium-Legierungen	212
7.3.8	Neuentwicklungen	214
7.4	Kupfer.....	215
7.4.1	Unlegiertes Kupfer.....	215
7.4.2	Eigenschaften, Verwendung	216
7.4.3	Normen für Kupfer und Kupferlegierungen.....	217
7.4.4	Niedriglegiertes Kupfer.....	218
7.4.5	Allgemeines zu den Kupfer-Legierungen	218
7.4.6	Kupfer-Zink-Legierungen.....	219
7.4.7	Kupfer-Zinn-Legierungen.....	221
7.4.8	Kupfer-Aluminium-Legierungen	222
7.4.9	Kupfer-Nickel-Legierungen	223
7.4.10	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	224
7.5	Magnesium	224
7.5.1	Vorkommen und Gewinnung.....	224
7.5.2	Eigenschaften von Magnesium	225
7.6	Titan.....	229
7.6.1	Metallgewinnung	229
7.6.2	Eigenschaften und Anwendung	229
7.6.3	Titanlegierungen (DIN 17 851/90)	230
7.7	Nickel (DIN 17743).....	232
7.8	Druckgusswerkstoffe	232
8	Anorganisch – nichtmetallische Werkstoffe	236
8.1	Einteilung und Abgrenzung.....	236
8.2	Struktur und Eigenschaften keramischer Stoffe	236
8.3	Bearbeitung der Werkstoffe.....	238
8.4	Werkstoffsorten	239
8.4.1	Oxidische Werkstoffe	239
8.4.2	Nichtoxidische Werkstoffe	240
8.5	Neue Verfahren zur Herstellung der Pulver-Ausgangsstoffe	244
8.6	Vergleich einiger nichtmetallisch anorganischer Werkstoffe	245
9	Kunststoffe (Polymere)	246
9.1	Allgemeines	246
9.1.1	Entwicklung und Bedeutung.....	246
9.1.2	Begriffe und Einteilung der Polymere	246
9.1.3	Polymereigenschaften und ihre Prüfung	248
9.2	Monomere Stoffe und Entstehung der Polymere.....	250
9.2.1	Kohlenstoffatome	250

9.2.2	Kettenförmige Kohlenwasserstoffe (Aliphaten oder aliphatische KW)	250
9.2.3	Ringförmige Kohlenwasserstoffe	251
9.2.4	Herstellung synthetischer Makromoleküle, Übersicht	252
9.2.5	Polykondensation	252
9.2.6	Polymerisation	253
9.2.7	Polyaddition	254
9.2.8	Systematische Benennung der Polymere	255
9.3	Strukturen der Makromoleküle.....	256
9.3.1	Bindungskräfte	256
9.3.2	Einfluss der Molekülmasse (Kettenlänge)	256
9.3.3	Gestalt der Makromoleküle.....	257
9.3.4	Kristallisation	259
9.4	Gefügeveränderungen bei Polymeren	260
9.4.1	Polymergemische, Polyblends	260
9.4.2	Zusatzstoffe und Einfluss auf die Eigenschaften	261
9.4.3	Faserverstärkung	261
9.5	Duroplaste	263
9.5.1	Allgemeines	263
9.5.2	Formmassetypen	263
9.5.3	Duroplastverarbeitung.....	265
9.6	Thermoplaste	266
9.6.1	Thermisches Verhalten	266
9.6.2	Langzeiteigenschaften der Kunststoffe	268
9.6.3	Thermoplastverarbeitung	271
9.6.4	Übersicht über die wichtigsten Thermoplaste	272
9.7	Elastomere	280
9.8	Statistische Daten und Eigenschaftsvergleiche	282
10	Verbundstrukturen und Verbundwerkstoffe	284
10.1	Begriffsklärung.....	284
10.1.1	Verbundkonstruktionen	284
10.1.2	Werkstoffverbunde	284
10.1.3	Verbundwerkstoffe	285
10.1.4	Struktur und Einteilung der Verbundwerkstoffe.....	286
10.2	Schichtverbundwerkstoffe	287
10.3	Faserverbundwerkstoffe (FVW).....	288
10.3.1	Faserwerkstoffe und Eigenschaften	288
10.3.2	Faserverstärkte Polymere	289
10.4	Teilchenverbundwerkstoffe	290
10.5	Durchdringungsverbundwerkstoffe.....	291
10.6	Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe MMC	292
10.6.1	Allgemeines	292
10.6.2	Metallmatrix-Faserverbunde	293
10.6.3	Metallmatrix-Teilchenverbunde	293
10.6.4	Metallmatrix-Durchdringungsverbunde	295
10.6.5	Metallschäume	295
10.7	Keramik-Matrix-Verbunde CMC	296

10.7.1	Allgemeines	296
10.7.2	Faserverbundkeramik	296
10.7.3	Durchdringungsverbundkeramik	297
11	Werkstoffe besonderer Herstellung oder Eigenschaften	299
11.1	Pulvermetallurgie, Sintermetalle	299
11.1.1	Überblick und Einordnung	299
11.1.2	Herstellung der Pulver	301
11.1.3	Formgebung und Verdichten	302
11.1.4	Sintern	303
11.1.5	Nachbehandlung der Sinterteile	305
11.1.6	Werkstoffe	305
11.1.7	Klassifizierung, Normung	308
11.1.8	Sprühkompaktieren (Spray Forming)	309
11.2	Schichtwerkstoffe und Schichtherstellung	311
11.2.1	Begriffe, Abgrenzung	311
11.2.2	Verfahrensübersicht	312
11.2.3	Thermisches Spritzen	313
11.2.4	Auftragschweißen und -löten	315
11.2.5	Abscheiden aus der Gasphase	316
11.2.6	Beschichten aus dem ionisierten Zustand	320
11.3	Lager- und Gleitwerkstoffe	321
11.3.1	Allgemeines	321
11.3.2	Lagermetalle	323
11.3.3	Weitere Lagerwerkstoffe	324
11.4	Werkstoffe für Lötungen	324
11.4.1	Allgemeines	324
11.4.2	Weichlote	325
11.4.3	Hartlote	325
11.5	Werkstoffe mit steuerbaren Eigenschaftsänderungen	327
11.5.1	Begriffe	327
11.5.2	Piezokeramik	328
11.5.3	Formgedächtnis-Legierungen (FGL)	328
11.5.4	Flüssigkeiten mit steuerbarer Viskosität	330
12	Korrosionsbeanspruchung und Korrosionsschutz	331
12.1	Einführung	331
12.1.1	Chemische Reaktion	332
12.2	Grundlagen der elektrochemischen Korrosion	332
12.2.1	Die Entstehung von Ionen	332
12.2.2	Ursache der Ionenleitfähigkeit von H_2O	333
12.2.3	Lösungsdruck:	333
12.2.4	Galvanische Spannungsreihe	334
12.2.5	Galvanisches Element	334
12.2.6	Korrosionselemente	335
12.3	Korrosionsarten	337
12.3.1	Korrosionsprodukte	337

12.3.2 Korrosionsarten und -erscheinungen	337
12.4 Korrosionsarten mit zusätzlichen Beanspruchungen.....	339
12.4.1 Korrosion und Festigkeitsbeanspruchung.....	339
12.4.2 Korrosion unter Tribo-Beanspruchung	340
12.4.3 Korrosion und thermische Beanspruchung	341
12.5 Korrosionsschutz.....	341
12.5.1 Trennung von Metall und Korrosionsmittel durch Schutzschichten.....	342
12.5.2 Korrosionsschutz durch Werkstoffwahl oder Eigenschaftsänderung	343
12.5.3 Änderung der Reaktionsbedingungen.....	345
13 Tribologische Beanspruchung und werkstofftechnische Maßnahmen	347
13.1 Allgemeines	347
13.1.1 Begriffsklärung	347
13.1.2 Das tribologische System.....	348
13.1.3 Der Bereich der Tribologie	348
13.2 Reibung und Reibungszustände	349
13.2.1 Reibkraft und Reibungszustände	349
13.2.2 Reibungszustände	350
13.2.3 Stribeck-Kurve	351
13.3 Schmierstoffe.....	353
13.3.1 Allgemeines	353
13.3.2 Eigenschaften und Kenngrößen	353
13.3.3 Öle	356
13.3.4 Fette	358
13.3.5 Festschmierstoffe	359
13.4 Verschleiß.....	360
13.4.1 Verschleißmechanismen	360
13.4.2 Verschleißarten	360
13.4.3 Verschleißmessung und -kenngrößen	362
13.4.4 Verschleißschutz	363
14 Werkstoffprüfung	367
14.1 Aufgaben, Abgrenzung	367
14.2 Prüfung von Werkstoffkennwerten	368
14.3 Messung der Härte.....	369
14.3.1 Härteprüfung nach Brinell	369
14.3.2 Härteprüfung nach Vickers	372
14.3.3 Härteprüfung nach Rockwell	372
14.3.4 Vergleich der Härtewerte	374
14.3.5 Dynamische Härteprüfung nach Shore	374
14.4 Prüfung der Festigkeit bei statischer Belastung	375
14.4.1 Der Zugversuch	375
14.4.2 Allgemeines Bruchverhalten	380
14.4.3 Zeitfestigkeiten	382
14.5 Prüfung der Festigkeit bei dynamischer Belastung	383
14.5.1 Allgemeines Verhalten.....	383
14.5.2 Dynamische Belastung.....	384

14.5.3 Dauerschwingfestigkeiten	386
14.5.4 Dauerschwingversuche	386
14.5.5 Dauerfestigkeitsschaubild	388
14.5.6 Dauerfestigkeit und Einflussgrößen	389
14.6 Prüfung der Zähigkeit	389
14.6.1 Spannungszustände	390
14.6.2 Kerbschlagbiegeversuch	391
14.6.3 Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve	392
14.7 Prüfung von Verarbeitungseigenschaften	393
14.8 Untersuchung des Gefüges	395
14.8.1 Mikroskopische Untersuchungen	395
14.8.2 Makroskopische Untersuchungen	396
14.9 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Qualitätskontrolle	396
14.9.1 Allgemeines	396
14.9.2 Eindringverfahren	397
14.9.3 Magnetische Prüfungen	397
14.9.4 Magnetinduktive Prüfung	398
14.9.5 Ultraschallprüfung	398
14.9.6 Röntgen-/Gamma-Strahlen-Prüfung	400
Anhang A: Die systematische Bezeichnung der Werkstoffe	403
A.1 Kennzeichnung der Stähle	403
A.1.1 Bezeichnungssystem für Stähle	403
A.1.2 Aufbau des Kurznamens DIN EN 10027-1	403
A.1.3 Stähle für den Stahlbau	404
A.1.4 Stähle für Druckbehälter	404
A.1.5 Stähle für den Maschinenbau	404
A.1.6 Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus höherfesten Stählen zum Kaltumformen	405
A.1.7 Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus weichen Stählen zum Kaltumformen	405
A.1.8 Nach der chemischen Zusammensetzung bezeichnete Stähle	405
A.1.8.1 Unlegierte Stähle mit mittlerem Mn-Gehalt < 1 %	405
A.1.8.2 Niedriglegierte Stähle (mittlerer Gehalt der LE < 5 %)	405
A.1.8.3 Hochlegierte Stähle	406
A.1.8.4 Schnellarbeitsstähle	406
A.1.9 Nach der chemischen Zusammensetzung bezeichnete Stähle	407
A.2 Bezeichnung der Eisen-Guss-Werkstoffe	409
A.3 Bezeichnung der NE-Metalle	410
A.3.1 Allgemeines	410
A.4 Bezeichnung der Kunststoffe	412
Bildquellenverzeichnis	414
Sachwortverzeichnis	415

Hinweise für den Benutzer des Lehrbuches

Die meisten Seiten des Buches sind zweispaltig gesetzt. Beide Spalten stehen absatzweise miteinander in Beziehung:

Linke Spalte:	Hier steht der erläuternde Text , daneben die Bildbeschreibungen und auch Merksätze .	Rechte Spalte:	Standort für die meisten Bilder , für Beispiele zur Veranschaulichung, Hinweise auf andere Buchstellen. Begriffe werden erläutert und Analogien zum Verständnis und als Merkhilfen angeboten.
---------------	--	----------------	--

Größere ZahlenTabellen oder Zusammenfassungen am Ende eines Abschnitts gehen teilweise über die ganze Satzspiegelbreite. Die Symbole für die am meisten gebrauchten Werkstoffkennwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Ihre Definition und Ermittlung ist im Abschnitt 14 Werkstoffprüfung zu finden.

Tabelle: Symbole für Werkstoffkennwerte

Symbol	Kennwert	Einheit	Symbol	Kennwert	Einheit
R_m	Zugfestigkeit		A	Bruchdehnung	%
R_e	Streckgrenze		Z	Brucheinschnürung	%
$R_{p0,2}$	0,2 %-Dehngrenze	MPa	HB	Brinellhärte	J
R_{p1}	1 %-Dehngrenze	=	HV	Vickershärte	---
G	Gleitmodul	N/mm ²	HRC	Rockwellhärte C	---
E	Elasizitätsmodul		KV	Kerbsschlagarbeit (A_v)	J
$\sigma_{b,W}$	Biegewechselfestigkeit		T_m	Schmelztemperatur	K, °C
W_{kf}	Fließspannung		T_R	Rekristallisationstemperatur	K, °C

In der Literatur werden häufig Abkürzungen für lange Begriffe gebraucht und teilweise auch in diesem Buch verwendet. Dann sind sie beim ersten Gebrauch jeweils in der rechten Spalte unter „Begriff“ erläutert, später nicht mehr. Eine Zusammenfassung gibt die folgende Tabelle.

Tabelle: Abkürzungen

Abk.	Bedeutung	Abk.	Bedeutung
AAS	Atomabsorptions-Spektroskopie	CVD	Chemical Vapour Deposition, chem. Beschichtung aus der Dampfphase
AES	Augerelektronen-Spektroskopie	DESU-	Druck-Elektro-Schlacke-Umschmelz-Verfahren
AMK	Austausch-Mischkristall	Eht	Einhärtetiefe
AF-	Coating: Anti-Frikitions-Beschichtung	EKD	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm
ARRM	Akustische Reflexionsraster-Mikroskopie	EMK	Einlagerungs-Mischkristall
At	Aufkühlungstiefe	EN	Elektronegativität
BMC	Bulk Moulding Compound, faserverstärkte, duroplastische Pressmasse	ESU	Elektro-Schlacke-Umschmelzen
CBN	Kubisches Bornitrid, (auch PKB)	EZ	Elementarzelle
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff	FEM	Finite-Elemente-Methode
CIP	Kaltisostatisches Pressen	FPM	Fachverband Pulvermetallurgie
CMC	Ceramic-Matrix-Compound	GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff

Abk.	Bedeutung	Abk.	Bedeutung
GMT	Glasmattenverstärktes, flächiges Thermoplast-Halbzeug	MPI	Max-Plank-Institut
hdP	Hexagonal dichteste Packung	Nht	Nitrierhärtetiefe
HIP	Heißisostatisches Pressen	near net	Endkonturnah
HSC	High Speed Cutting, Hochgeschwindigkeitsspanen	shape	
KZ	Koordinationszahl	ODS	Oxid-Dispersion-Strengthened, oxidteilchenverstärkt
LC-	Liquid-Crystal Polymer, Flüssigkristall-Kunststoff	PM	Pulvermetallurgie
IBAD	Ion-Beam-Aided Deposition, Ionenunterstützte Beschichtung	PVD-	Physical Vapour Deposition. phys. Beschichtung a.d. Gasphase
LE	Legierungselement	PKD	Polykristalliner Diamant
IM	Ingotmetallisch, schmelzmetallurg.	REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
IP	Intermetallische Phase	Rht	Randhärtetiefe
MD	Multidirektional, in vielen Richtungen liegende Fasern	RSP	Rapid Solidification Processing, schnelle Erstarrung von Tröpfchen
MIM	Metall-Injektions-Moulding, Metall-Spritzgießen	RT	Raumtemperatur
MMC	Metal-Matrix-Compound, Metall-Verbundwerkstoff	SMC	Sheet Moulding Compound, flächiges faserverstärktes Duroplast-Halbzeug
MK	Mischkristall	TEM	Transmissions-Elektronenmikroskopie
		TM	Thermomechanisches Umformen
		DU	Unidirektional, in einer Richtung verlegte Fasern
		WEZ	Wärmeeinflusszone beim Schweißen

Das Internet bietet viele Informationen zu Werkstoffen und Verfahren. Für den Zugriff sind in den Literaturhinweisen und z. T. im Text Direktadressen von Verbänden und Firmen angegeben. Darüber hinaus können werkstofftechnische Begriffe über Suchmaschinen abgefragt werden.

Tabelle: Haltepunktsbezeichnungen und Linien im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Linien-zug	Haltepunkte und Vorgänge beim (Index c) Wärmen		Haltepunkte und Vorgänge beim (Index r) Abkühlen	
	GSK	A_{c3}	Ar₃	Beginn der Ferritausscheidung (γ-α-Umwandlung)
PSK	A_{c1}	Auflösung des Perlits, Umwandlung zu Austenit	Ar₁	Austenitzerfall = Perlitbildung
ES	A_{c_{cm}}	Einformung des Sekundärzementits ist beendet	Ar_{cm}	Beginn der Ausscheidung von Sekundärzementit

Tabelle: Kurzzeichen für Werkstoffe (im Anhang A)

Werkstoffe	Seite	Werkstoffe	Seite	Werkstoffe	Seite
Stähle, Kurznamen	xxxxx	NE-Metalle allgemein	xxxxx	Polymere	xxxxx
Stähle, Werkstoffnummern	xxxxx	Aluminium u. -legierungen	xxxxx	Sintermetalle	xxxxx
Eisen-Gusswerkstoffe	xxxxx	Kupfer u. -legierungen	xxxxx	Siliciumkeramik	xxxxx

1 Grundlegende Begriffe und Zusammenhänge

1.1 Gegenstand und Bedeutung der Werkstoffkunde

Der Abschnitt will dem Einsteiger in das Gebiet Bedeutung und Verflechtung mit anderen Fachgebieten aufzeigen und auf Entwicklungsrichtungen hinweisen.

1.1.1 Das Fachgebiet Werkstoffe

Werkstoffe sind jener Teil der Materie, die der Mensch zur Herstellung von Gütern aller Art benutzt, um seine Bedürfnisse zu befriedigen. Dazu gehören auch die Maschinen zu ihrer Herstellung.

Das Buch beschränkt sich auf Werkstoffe, die in der Maschinentechnik, im Fahrzeugbau und in der Feingerätetechnik verwendet werden.

Werkstoffkunde ist der Name für ein Lehrfach, das die Erkenntnisse der Werkstoffwissenschaft benutzt, um Stoffeigenschaften und Vorgänge in Stoffen bei der Verarbeitung zu erklären. Mit Hilfe von Modellvorstellungen versucht sie, das Unsichtbare zu veranschaulichen.

Werkstofftechnik ist der moderne Name für dieses Fachgebiet. Sie versteht ihre Aufgabe im Umsetzen der wissenschaftlichen Erkenntnisse in technische Anwendungen, z.B. bei der Erzeugung von Produkten, die sich auf den Märkten behaupten können. Ihre Ziele sind:

- Werkstoffeigenschaften verbessern,
- neue Werkstoffe entwickeln,
- zugehörige Fertigungsverfahren erproben.

Sie ist dabei auf die Methoden der *Werkstoffprüfung* angewiesen, mit denen sich Strukturen erkennen und Eigenschaften ermitteln lassen. Das ist auch für die *Qualitätssicherung* wichtig.

Ein Lehrbuch für Einsteiger in dieses Fach muss anwendungsbezogene Darstellungen mit den werkstoffkundlichen Erklärungen verknüpfen.

Beispiele: Andere Bereiche sind z.B.: Luftfahrtwerkstoffe, Werkstoffe der E-Technik und Elektronik, Baustoffe für Hoch- und Tiefbau, Werkstoffe für Textilien und Bekleidung, Dentalwerkstoffe.

Werkstoffwissenschaft ist ein Fachgebiet der Ingenieurwissenschaften. Es besteht fächerübergreifend aus Inhalten von Chemie, Physik, Kristallographie, Maschinenbau und Biowissenschaften. Es wird in der BRD an ca. 20 Universitäten und Hochschulen gelehrt, wo auch Grundlagenforschung betrieben wird.

Forschungsinstitute sind weiterhin: Max-Planck-Gesellschaft; Fraunhofer Gesellschaft; BAM, Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin; Kernforschungsanlagen Jülich und Karlsruhe; Deutsche Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrtforschung DVLRF Köln und Braunschweig.

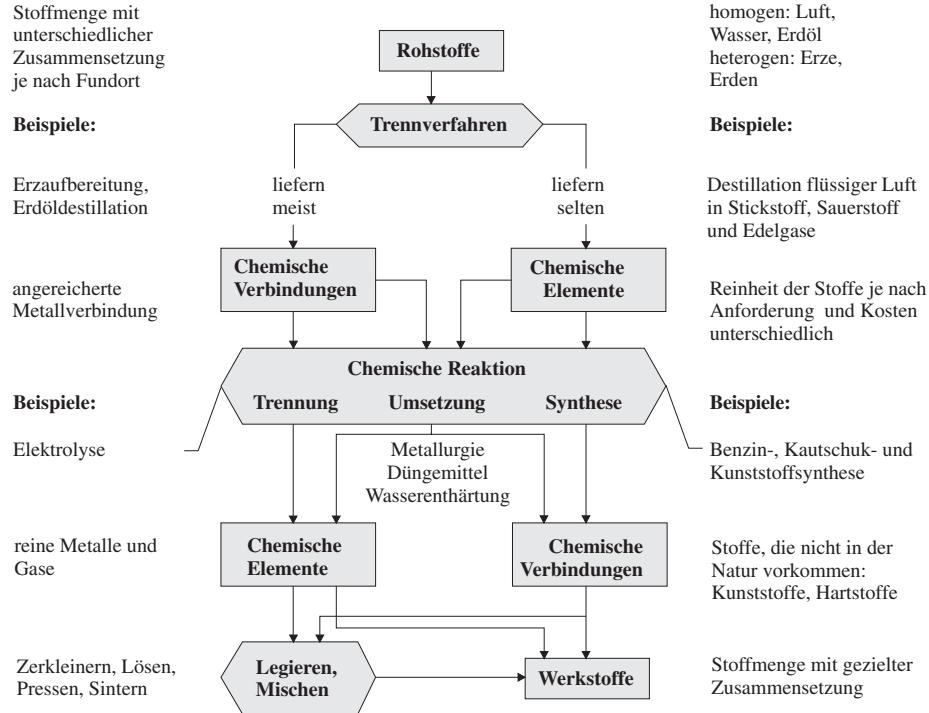
Entwicklungs- und Forschungsanstalten der metall-, kunststoff- und keramik-erzeugenden Industrie, der Auto-, Flugzeug-, Energie- und Elektrotechnik und einer Versicherung.

Technisch-Wissenschaftliche Vereine:
 DGM: Dt. Gesellschaft für Materialkunde,
 DGO: Dt. Gesellschaft für Oberflächentechnik,
 DVM: Dt. Verband für Materialprüfung,
 VDI-W: VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik,
 VDEh: Verein Deutscher Eisenhüttenleute.

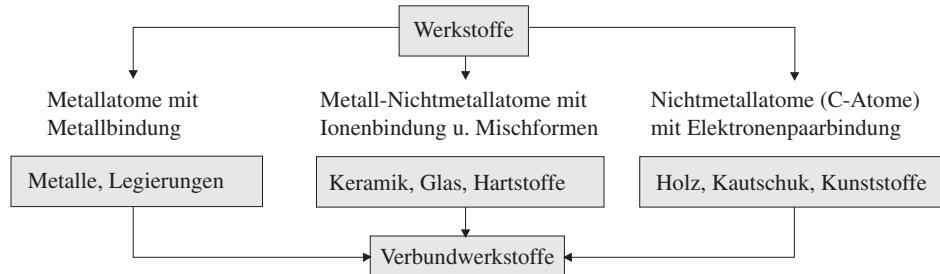
Zu den Werkstoffen zählen alle Stoffe für Bauteile in Maschinen, Geräten und Anlagen, ebenso das Material für die Werkzeuge zu ihrer Fertigung und Hilfsstoffe zur Herstellung

(z.B. Gase, Salzbäder) sowie zur störungsfreien Funktion (z.B. Schmierstoffe). Tabelle 1.1 zeigt den umständlichen Weg vom natürlich vorkommenden Rohstoff zum Werkstoff.

Tabelle 1.1: Vom Rohstoff zum Werkstoff, Übersicht



Jede Wissenschaft muss als Erstes ihre Gegenstände ordnen, hier also die Vielzahl der Werkstoffe in Gruppen einteilen. Das kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen, z.B. eine Grobgliederung nach Art der kleinsten Teilchen und ihrer Bindungsart:



Eine häufig benutzte Zweiteilung ist die nach der Verwendungsart:

Strukturwerkstoffe geben dem Bauteil die geometrische Form und Steifigkeit gegenüber den angreifenden Kräften, z.B.: Stahl, Al- und Titanlegierungen für große Bauteile, Strukturkeramik für z.B. Abgasturbinenläufer. Kunststoffe für kleinere Teile.

Funktionswerkstoffe übernehmen, meist örtlich begrenzt, spezielle Aufgaben aufgrund ihrer besonderen chemisch-physikalischen Eigenschaften, z.B.: Metalle zum Oberflächenschutz, Lagerwerkstoffe, Funktionskeramik für elektronische Bauelemente u.a.

1.1.2 Stellung und Bedeutung der Werkstoffkunde in der Technik

In der Produktionstechnik sind Ingenieure und Techniker an irgendeiner Stelle des folgenden Aufgabenkomplexes tätig:

Bauteile müssen so **entworfen**, wirtschaftlich **hergestellt** und in **Funktion erhalten** werden, dass sie eine hohe, dabei sinnvolle **Lebensdauer** erreichen. Der Werkstoff ist entsprechend auszuwählen. Dabei muss der Fertigungsweg vorgedacht werden, einschließlich der Verfahren, die seine Eigenschaften den Anforderungen anpassen und der Sicherung der Qualität dienen.

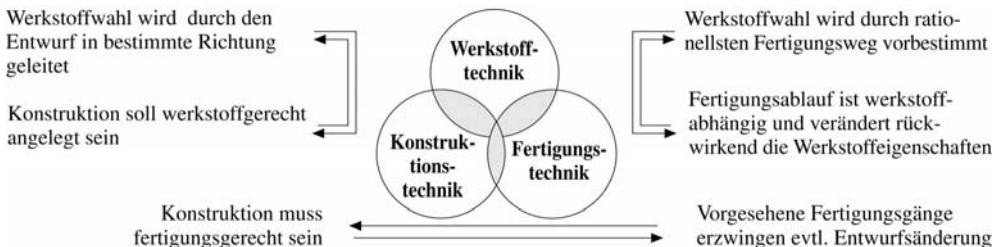
Als Lebensdauer ist die Zeit anzusehen, in der das Bauteil seine Aufgabe (Funktion) voll erfüllt (d.h. funktioniert).

Beispiele Lebensdauerbegriff:

- Standmenge, Standzeit von Werkzeugen,
- Laufleistung von Reifen, Motoren,
- Lastspiele von Federn.

Qualitätssicherung heißt: Bei allen Fertigungsstufen vorbeugende Maßnahmen zu treffen, um Ausschussteile zu vermeiden. Ziel ist die Null-Fehler-Produktion.

Die Verflechtung der *Werkstofftechnik* mit *Konstruktion* und *Fertigung* sowie ihr Einfluss auf die Kosten eines Bauteils sind dem Studienanfänger meist nicht klar. Nachfolgender Lebenslauf eines Bauteils soll die gegenseitigen Abhängigkeiten aufzeigen und auf die Schwierigkeit des Problems „optimale“ Werkstoffwahl weisen.



Schema: Wechselwirkungen zwischen Werkstoff, Konstruktion und Fertigungsablauf

Im Lebenslauf der Bauteile ist in allen Phasen der Einfluss des Werkstoffes auf die zu fällenden Entscheidungen erkennbar:

Konstruktion: d.h. Entwurf von Gestalt und Abmessungen des Bauteiles nach Methoden der Konstruktions- und Festigkeitslehre mit Beachtung des späteren Fertigungsverlaufes. Dieser bestimmt meist die Werkstoffart mit Rückwirkung auf die Gestalt.

Fertigung: d.h. Festlegung der Arbeitsgänge, ihre Durchführung und die Kontrollen zur Qualitätssicherung. Die Arbeitsgänge müssen die

Beispiele: Wechselwirkungen

Bauteil stark verrippt: typische Gusskonstruktion

→ Gusswerkstoff

Bauteil dünnwandig mit etwa konstanter Wanddicke: günstig für Blechkonstruktion

→ Blech oder Kunststoff, je nach Bauteilgröße

Querschnitts- und Querschnittsübergänge richten sich nach den Werkstofffestigkeiten.

Beispiel: Für größte Stückzahlen sind Verfahren mit aufwändigen Werkzeugen geeignet, die endformnahe oder *endformgetreue* Teile in kurzer Zeit liefern.

Eigenschaften des Werkstoffes berücksichtigen. Keiner ist für alle Fertigungsverfahren geeignet. Für hohe Stückzahlen sind nur wenige Fertigungsverfahren einsetzbar, sie beeinflussen rückwirkend die Werkstoffwahl.

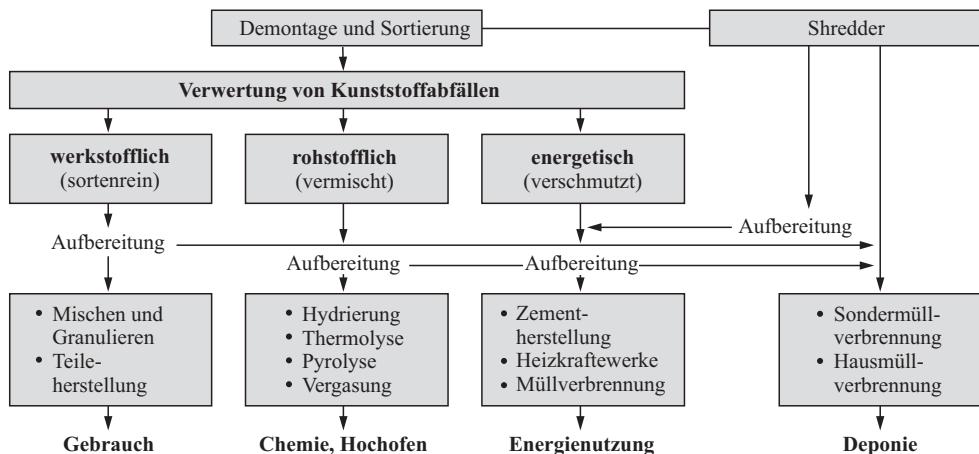
Qualitätssicherung: Das große Ziel einer Null-Fehler-Produktion erfordert vorbeugende Maßnahmen, um unzulässige Änderungen von Bauteil und Werkstoffeigenschaften oder auch Prozessunterbrechungen zu vermeiden. Die FMEA (→) muss dazu alle Verfahrensbedingungen (Prozessparameter) überprüfen.

Betriebsunterhaltung: Das Bauteil übernimmt seine Funktion in einer Maschine im Zusammenspiel mit anderen unter Betriebsbedingungen (Wärme, Staub, feuchte Luft) und muss zur Funktionserhaltung gewartet werden.

Schadensfall: Die Lebensdauer des Bauteiles wird durch Verschleiß oder Korrosion vermindert, evtl. beendet. Überlastung führt zum Gehrungsbrech, Ermüdung zum Dauerbruch.

Regeneration (Aufarbeitung) von verschleißgeschädigten Bauteilen kann günstiger sein als Ersatz durch neu gefertigte (auch unter ökologischen Gesichtspunkten!). Das gilt besonders für größere Bauteile, die nicht Serienteile sind.

Recycling: Schrott und Fertigungsabfälle müssen in miteinander verträgliche Fraktionen sortiert werden, wenn daraus wieder brauchbare Werkstoffe entstehen sollen. Das Schema zeigt die Verwertungskreisläufe für Kunststoffabfälle [1].



Beispiele: Stahlguss GS lässt sich nicht dünnwandig und in verwickelten Formen vergießen. Tempergussarten sind nicht für große Wanddicken und für Teile über ca. 100 kg Masse geeignet.

Begriff: FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) ist die Ausfallmöglichkeits- und Einfluss-Analyse. Sie dient zum Aufdecken von Schwachstellen in allen Phasen der Produktion (System-, Konstruktions- und Prozess-FMEA).

Beispiele: Zur Wartung werden Schmiermittel und Korrosionsschutzmaßnahmen eingesetzt, die auf den Werkstoff abgestimmt sein müssen.

Schadensanalyse versucht die Ursachen zu ermitteln, um zu klären, ob:

- Überbeanspruchung oder
- Werkstoffversagen vorliegt.

Durch Änderungen der Konstruktion, des Werkstoffes oder mittels einer anderen Oberflächenbehandlung können künftige Schäden am Bauteil vermieden werden.

Beispiele: Geschädigte Bauteile können nach zahlreichen Verfahren beschichtet werden. Sie sind z.T. werkstoffabhängig. Auftragschweißen von Radspurkränzen, Hartverchromen von Wellenzapfen, thermisches Spritzen.

Abnehmende Rohstoffvorräte und dadurch zunehmende Rohstoffpreise fördern die Wiederverwertung ausrangerter technischer Produkte. Das ist auch zum Schutz der Umwelt erforderlich. Nach EU-Richtlinien ist für die Zulassung neuer Kfz-Typen ein Nachweis der Eignung zum wirtschaftlichen Recycling erforderlich. Zur Zeit sind es 85 %, ab 2015 sogar 95 %. Wegen der Rücknahmeverpflichtung von Altautos legen die Hersteller dazu umfangreiche Dateien mit Werkstoffbezeichnungen und Zerlegeplänen für die einzelnen Baugruppen an.

Zunehmend wichtiger wird der Einsatz solcher Fertigungsverfahren, die mit geringem Werkstoffverbrauch auskommen und keinen Sondermüll erzeugen (Bild 1.2).

Beispiel: Kühlsmierstoffe für die Zersetzung müssen als *Sondermüll* entsorgt werden. Neue keramische Schneidstoffe arbeiten im Trockenschnitt oder mit Minimalmengenschmierung.

1.2 Entwicklungsrichtungen der Werkstofftechnik

Die Endlichkeit der Rohstoffvorräte auf der Erde lässt Kosten für Werkstoffe und Energie steigen. Das gestiegene Umweltbewusstsein fordert zusätzlich einen sparsameren Umgang mit der Energie und den Rohstoffen (sustainable development →).

Begriff Sustainable Development (nachhaltige Entwicklung) ist eine globale Zielsetzung seit der UN-Konferenz 1992 in Rio.

Die gegenwärtige Gesellschaft darf zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse nicht alle Energie- und Rohstoffquellen (Ressourcen) so ausschöpfen, dass künftigen Generationen nichts mehr übrig bleibt.

Technische Produkte sind dem Druck eines internationalen Wettbewerbs ausgesetzt. Dadurch stehen die Hersteller ständig unter dem Zwang,

- Herstellkosten zu senken oder
- bessere Produkte zu gleichem Preis zu liefern.

Konstruktionen sind heute oft ausgereift, sodass eine Verbesserung nur noch über die Werkstoffe möglich ist. Neben bekannten Werkstoffen, die weiterentwickelt wurden, sind es neue Materialien, deren Entwicklung ständig weitergeht. Sie sind oft nur mit *neuen Fertigungsverfahren* konkurrenzfähig.

WING (Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft). Schwerpunkte sind:

- Nanotechnologische Werkstoffkonzepte
- Schichten und Grenzflächen
- Leichte Werkstoffe und Strukturen
- Intelligente Werkstoffe
- Elektromagnetische Funktionswerkstoffe

(pdf-Datei bei www.bmbf.de)

Alle Industrieländer fördern deshalb Projekte der Forschungsanstalten, Hochschulen und Firmen mit langjährigen Förderprogrammen. Hier ist es das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMFB) mit dem Programm „WING“ mit einer Laufzeit von 2004 bis 2009. Dabei arbeiten jeweils einige Institute zur schnelleren Realisierung „im Verbund“ zusammen.

Das Umsetzen der Forschungsergebnisse zur Herstellung neuer technischer Produkte ist die große Aufgabe der Werkstofftechnik. Dabei lassen sich drei Zielrichtungen erkennen:

- Leichtbau zur Reduktion des Werkstoff- und Energieverbrauches,
- Oberflächenbehandlung als Schutz gegen Verschleiß, Korrosion und zum Erzielen neuer chemisch-physischer Effekte,
- Energieeinsparung durch bessere Nutzung oder höhere Wirkungsgrade.

1.2.1 Leichtbau zur Reduktion des Werkstoff- und Energieverbrauches

Entwicklungsrichtung	Beispiele
Höhere Festigkeit durch Stoffeigenschaft Ändern (Wärmebehandlung)	Thermomechanische Behandlung von Blech (TM), höherfeste Feinbleche für Karosserien in Verbindung mit neuen Fertigungstechniken (Tailored Blanks, tailored tubes → Bild 4.4). Auch bei Federdraht angewandt (Beispiel 2)
Verbundwerkstoffe (Fasern) mit konstruierter Anisotropie	C-Faserverstärkte Kunststoffe für Bauteile, die hohen Beschleunigungen unterliegen: Kardanwellen, Pleuel. Keramik für Werkzeugmaschinenspindeln
Al- und Mg-Legierungen mit höherer Festigkeit entwickeln	Lithium, Li (Dichte 0,534 g/cm ³) in Al- und Mg-Legierungen ergibt ca. 10 % leichtere Werkstoffe mit höheren E-Moduln. Auch durch Teilchenverstärkung mit Oxidpartikeln möglich (→ 10.6.3)
Bauteile mit Metallschaumkern	Karosserieteile im Frontbereich als Crash-Absorber (→ 10.6.5).

Beispiele 1: Hochfester Stahl für Fahrwerksfedern aus 54CrSi6 (→). Das Vormaterial wird bei 850 °C und 750 °C gewalzt, dann gewickelt, martensitisch umgewandelt und angelassen.

Die zweistufige, thermomechanische Behandlung erzeugt ein sehr feinkörniges Gefüge ohne Karbidsäume auf den Korngrenzen. Bei hoher Zähigkeit werden Zugfestigkeiten von > 2300 MPa erzielt. Die Dauerfestigkeit liegt hoch.

Beispiel 2: C-faserverstärktes Epoxidharz (CF-EP) hat höheren E-Modul (Steifigkeit) als Stahl bei geringerer Dichte und liefert Bauteile mit kleinerer Durchbiegung und Wärmedehnung, dadurch höhere Genauigkeit bei Werkzeugmaschinen.

Verwendung: Maschinenspindeln für höchste Drehzahlen, schnell bewegte Werkzeugträger für das „high-speed-cutting“ (→), Roboterarme.

Hinweis: Für die Entwicklung des Verfahrens wurde das Max-Planck-Institut für Eisenforschung mit dem **Stahl-Innovationspreis 2006** Kategorie Forschung und Entwicklung, 3. Preis ausgezeichnet. Dadurch sind Federn mit **15 % weniger Gewicht** möglich. Das Verfahren ist für eine wirtschaftliche Serienfertigung geeignet und ergibt reproduzierbare Eigenschaften.

Begriff: High Speed Cutting = Hochgeschwindigkeitsspanen. Durch höchste Schnittgeschwindigkeiten wird die Schnittzeit so stark reduziert, dass die Nebenzeiten überwiegen. Um schnellere Vorschubbewegungen (mit höheren Beschleunigungen) zu erreichen, müssen die Werkzeugträger **kleinere Massen** haben, Einsatzmöglichkeit für leichte Verbundwerkstoffe.

1.2.2 Oberflächenbehandlungen, Nanotechnologie¹⁾

Maßnahmen	Beispiele
Verschleißschutz für alle Oberflächen	Dünne Schichten (< 20µm) durch CVD- und PVD-Verfahren in vielen Stoffkombinationen, auch mehrschichtig. Diamantartige Strukturen mit hoher Wärmeleitung. Nano-Rußpartikel in der Lauffläche von Reifen erhöhen die Laufleistung
Nanopartikel in der Oberfläche	Anorganische Nano-Partikel, die bei Erhitzung aufquellen und isolieren Nano-Silber ergibt antibakterielle Wirkung auf medizinischen Geräten
Nanostrukturierte Oberflächen	Härtung der Oberfläche von Polymeren bei Erhaltung der Transparenz, Wasseröl- oder schmutzabstoßende Eigenschaften. Ebenso ist ein <i>anziehende</i> Wirkung möglich (hydro- oder oliophob, bzw. hydro- oder oliophil).

¹⁾ Vorsilbe nano = 10⁻⁹ = 1 Milliardstel. Unter Nanotechnologie werden Verfahren zusammengefasst, die sich mit der Erzeugung Verarbeitung und Anwendung von Teilchen und Strukturen in der Größe von < 100 nm befassen.

Beispiel 5: Verzunderungsschutz für die Formhärtung von tragenden Karosseriekomponenten.

Blechteile werden kalt vorgeformt, dann bei 950 °C in der Presse endgeformt und abgekühlt. Die entstehende, z.T. abplatzende Zunderschicht verschmutzt Werkzeug und Bauteil.

Blechwerkstoff ist z.B. 22MnB5, ein borlegierter Vergütungsstahl mit R_m bis zu 1650 MPa.

Der Schutz besteht aus einem 6...7 µm dicken Schutzlack, einem **Nanokomposit** aus Glas, Polymer und Al (Nano-X GmbH).

1.2.3 Energieeinsparung und bessere Nutzung

Maßnahmen	Beispiele
Endformnahe Ur- und Umformen	Dünnbrämmgießen, Gießwalzen von Blechen.
Energieärmere Verfahren	Plasma- und Laserverfahren, Wärmebehandlungen aus der Warmformhitze, induktive Erwärmung.
Höhere Temperaturen in Kraftmaschinen (Wirkungsgrad)	Einsatz keramischer Stoffe und intermetallischer Phasen im Brennraum von Verbrennungsmotoren, Kolben, Ventile, Turbinenschaufeln, Rotoren für Abgasturbinen

Bei Entscheidungen über Fertigungsverfahren werden künftig auch Materialausnutzung und Energieverbrauch von Bedeutung sein (Bild 1.1).

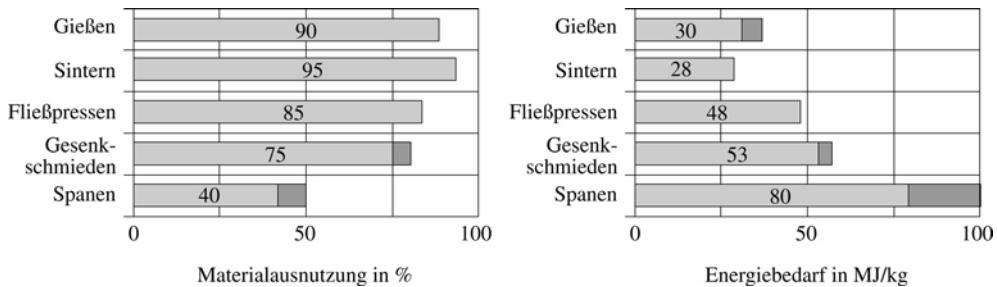


Bild 1.1 Materialausnutzung und Energieaufwand für verschiedene Fertigungsverfahren

1.2.4 Innovative Werkstoffanwendung

Innovative Werkstoffanwendung heißt, die Ergebnisse der Werkstoffforschung nicht nur in den „High-Tech-Produktionen“ (Luft- und Raumfahrt) sondern auch in den anderen Zweigen auf konventionelle Bauteile anzuwenden. Hierzu sind zahlreiche Wettbewerbe eingerichtet (→).

Beispiel 6: Leitrollen in Druckmaschinen. Preis für innovative Werkstoffanwendung des VDI im Jahr 1992 (Thyssen-Guss/Uranit).

Leitrollen dienen in den Druckmaschinen (ca. 100 Stück) zum Umlenken der Bahnen aus Papier oder Textilien. Leitrollen haben keinen Antrieb und laufen nur durch Reibung mit.

Stahl-Innovationspreis

Stahl-Informations-Zentrum, PF 10 48 42
40039 Düsseldorf (www.stahl-online.de)

Innovative Werkstoffanwendung

Preisausschreiben der VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, PF 10 11 39, 40002 Düsseldorf (www.werkstoffwissen.de)

Innovationen in Guss

Zentrale für Gussverwendung (ZGV), im Deutschen Gießereiverband DGV, PF 10 19 61, 40010 Düsseldorf (www.dgv.de)

Anforderungsprofil: Rationeller Betrieb erfordert kurze An- und Auslaufzeiten, das Trägheitsmoment J muss deshalb niedrig sein:

⇒ **minimaler Walzendurchmesser.**

Dadurch tritt abrasiver Verschleiß auf. Sie haben Stützweiten bis zu 4 m. Wenn die Durchbiegung zu groß wird, können Falten in den Bahnen entstehen (Ausschuss).

Bisherige Lösung:

Ausführung als Stahlhohlzylinder. Wegen der geforderten, geringen Durchbiegung durfte ein Mindest-Ø nicht unterschritten werden. Die großen Massen (ca. 250 kg) konnten zum Auswechseln nur mit Hebezeugen bewegt werden.

Innovative Lösungen:

Verbundwerkstoff (VDI-Preis 1992):	Werkstoffverbund (Hybridbauweise), DBPa. ¹⁾
Der Rollenkörper wird aus C-faserverstärktem Epoxidharz gewickelt (sehr leicht, sein hoher E-Modul lässt kleinere Durchmesser zu). Zum Verschleißschutz wird die Oberfläche durch Vakuum-Plasma-Spritzen (VPS) mit Al_2O_3 beschichtet (50...100 μm). Durch Kühlung mit CO_2 erreicht die Oberfläche dabei nur eine Temperatur von ca. 40 °C.	Hohlprofile aus Al-Mantel mit Innenauskleidung aus C-faserverstärktem Epoxidharz. Dabei werden noch weiche UD-Prepregs entsprechend dem Biegemomentenverlauf (mittig mehr Lagen) eingeklebt und ausgehärtet. Der Al-Außenkörper ist mit einer eingefrästen, schraubenförmigen Rille zur Papierführung versehen und wird hartanodisiert. Nach Verschleiß lässt sich die Behandlung wiederholen.

Vorteile der Innovationen: Gegenüber der bisherigen Lösung aus Stahl sind Durchbiegung und Massenträgheitsmoment kleiner. Eine Steigerung der Druckgeschwindigkeit ist möglich. Die kleinere Trägheit führt zu weniger Verschleiß, An- und Auslaufzeiten verkürzen sich. Infolge der kleineren Masse können Rollenwechsel manuell ausgeführt werden.

¹⁾ Lippmann, G.: CFK-Hybridbauweise. VDI-Bericht 1151, S. 477

1.3 Wie lassen sich die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe erklären?

Dem Anfänger erscheint die Werkstoffkunde unübersehbar und verwirrend. So muss eine Methode gefunden werden, welche die Eigenschaften der Materie – und ihre Unterschiede – *erklärbar* macht und möglichst veranschaulicht. Dazu verhilft uns der Begriff der *Struktur*, d.h. von Bau und Gliederung der Materie. Die meisten Eigenschaften hängen von der Struktur ab.

1.3.1 Was bedeutet Struktur der Werkstoffe?

Wenn wir Werkstoffe mit immer stärker werdenden Vergrößerungen betrachten, gelangen wir nach entsprechenden Vorbereitungen zunächst zu Bildern, die das Zusammengefügtheitsein des Werkstoffes aus kleineren Körnern – **Phasen** – erkennen lassen. Es ist seine Grobstruktur oder das *Gefüge* (Bild 1.2).

Die Bahnzugkräfte beanspruchen die Rollen auf Durchbiegung, daraus ergibt sich die zweite wichtige Forderung:

⇒ **minimale Durchbiegung**

Beide Forderungen sind gegensätzlich und nicht mit größerem Durchmesser zu verwirklichen. Sie können aber durch einen *leichten* Werkstoff mit *hohem* E-Modul erfüllt werden. Diesen Anspruch erfüllen C-Faser verstärkte Kunststoffe.

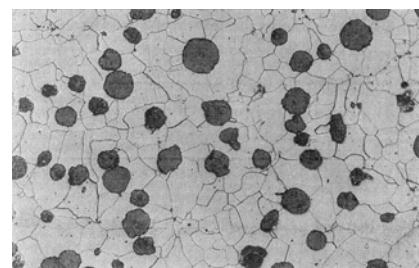


Bild 1.2 Gefüge von Kugelgraphitguss 100:1 Graphitkugeln in ferritischem Grundgefüge

Begriff: Phase, ein in sich homogener Körper mit etwa konstanten Eigenschaften, der durch eine Grenzfläche von andersartigen Phasen unterschieden werden kann.

Das Gefüge der Werkstoffe wird an polierten und chemisch behandelten Oberflächen zugänglich gemacht und kann mikroskopisch betrachtet und fotografiert werden (\rightarrow 15.8).

Damit lassen sich Kristalle und Einschlüsse (z.B. Schlackenteilchen) bis herunter zu 1 mm Teilchengröße erkennen.

Werkstoffe sind meist Stoffgemische. Ihre sichtbaren, kleineren Bestandteile sind überwiegend metallische oder nichtmetallische Kristalle, seltener amorphe Stoffe. Sie werden als *Phasen* bezeichnet.

Das nebenstehende Schema zeigt, wie wir durch immer feiner werdende Betrachtung die Gesamtstruktur weiter unterteilen und gedanklich zu den kleinsten Materiateilchen gelangen können.

Die Struktur der Phasen selbst muss mit durchdringenden Medien, z.B. Röntgenstrahlen, erforscht werden. Sie reagieren physikalisch mit den Teilchen und liefern durch optische Effekte (Beugung und Interferenz) Muster, aus denen der Physiker Abstand und Anordnung der Teilchen – das *Kristallgitter* – findet.

Kristallgitter können wegen ihrer Kleinheit nur als Modelle dargestellt werden.

- **Stäbchenmodelle** lassen die geometrische Struktur (z.B. Würfel, Quader) erkennen, die Teilchen (Atome, Ionen) sind unmaßstäblich kleiner und berühren sich nicht.
- **Kugelmodelle**. Atomdurchmesser und Atomabstände sind etwa maßstäblich, die Teilchen liegen dichter, aber die geometrische Anordnung ist schlechter erkennbar.

Will man die Bausteine der Kristallgitter ermitteln, so gelangen wir mithilfe chemischer Analysen (\rightarrow Spektralanayse) zu Molekülen, Ionen oder Atomen. Von ihnen hängt es letztthin ab, ob der Stoff **Metall**, **Keramik** (anorganisch) oder **Kunststoff** (organisch) ist.

Über den Metall- oder Nichtmetallcharakter eines Elementes entscheidet seine Stellung im Periodensystem, damit der Bau seiner Elektronenhülle (Bild 1.3).

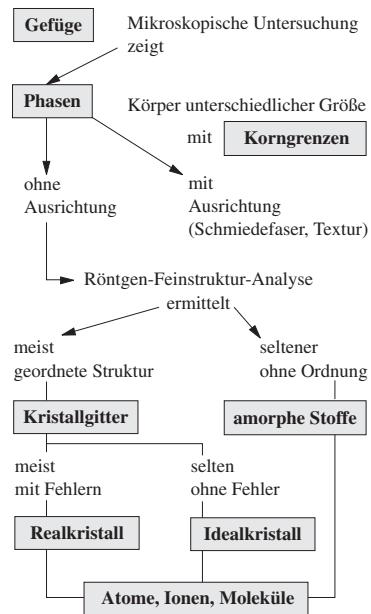
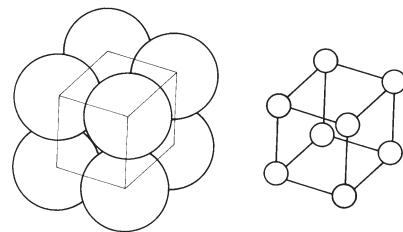


Tabelle 1.2: Unterteilung der Struktur



Kugel- und Stäbchenmodell eines kubisch einfachen Kristallgitters

Spektralanalyse: Röntgenstrahlen regen die Atome an. Dabei gelangen Elektronen in energiereichere Zustände. Bei der Rückkehr in den vorherigen Zustand geben sie eine Strahlung ab, deren Wellenlänge (Frequenz) für jede Atomart charakteristisch ist. Sie kann quantitativ und qualitativ daran erkannt werden.

Stoffeigenschaften sind damit abhängig:

- Primär von der *Teilchenart* (Metallatom, Nichtmetallatom oder Molekül) und der Art ihrer chemischen Bindung (Metall-, Elektronenpaar- oder Ionenbindung).
- Das *Kristallgitter* spielt eine wichtige Rolle, lässt sich in Grenzen verändern (z.B. durch Legieren oder Wärmebehandlung).
- Art und *Mischungsverhältnis* der Phasen sowie eine evtl. Ausrichtung prägen das Gefüge der Stoffe. Allein durch Variation des Mischungsverhältnis der Phasen werden z.B. die Unterschiede in den unlegierten Stählen verursacht, vom C-armen, weichen Stahl mit 0,1 % C bis hin zum C-reicherem, harten Werkzeugstahl mit 1,0 % C.

So können wir für die Werkstofftechnik als Grundsatz für Lehren und Lernen formulieren:

Stoffeigenschaften = f (Struktur)

Das mathematische Zeichen „ f “ (= Funktion von) bedeutet hier: „hängen ab von“. Umgekehrt gilt: Die Struktur prägt die Eigenschaften eines Werkstoffes, Änderungen der Struktur ergeben Eigenschaftsänderungen.

Werkstoffe sind oft in nur einigen Eigenschaften dem Anforderungsprofil nicht gewachsen, sie müssen dann verbessert werden. Das kann durch eine Änderung der Struktur im weitesten Sinne erreicht werden (→).

Deshalb folgt zunächst eine Gliederung der Struktur vom Kleinsten zum Größeren hin.

1.3.2 Unterteilung der Struktur und Einflussmöglichkeiten zur Veränderung

- Atombau (Atommodelle)
- Bindungsart und Kristallgitter (Feinstruktur)
- Gefüge (Grobstruktur)

1.3.3 Atombau (Atommodelle nach Bohr u.a.)

Atome sind die kleinsten beständigen Teile der chemischen Elemente. Die Stellung im PSE (Periodensystem der Elemente, Bild 1.3) ist verknüpft mit der Struktur der äußersten Elektronenhülle eines Atoms. Sie ist für das chemische Verhalten des Elementes maßgebend.

Kristallgitter: (→ 1.4.2) Eigenschaftsunterschied Diamant/Graphit (chemisch gleicher Stoff, ungleiches Kristallgitter)

Beispiel: Härtegrad von Bleistiftminen. Die verschiedenen Härtegrade werden durch das Mischungsverhältnis von Graphit und Tonmehl (gebrannt) eingestellt.

Beispiele: Ausrichtung von Phasen. Glasfaserkunststoff GFK besitzt seine höchste Festigkeit, wenn die Glasfasern genau in einer Richtung als Stränge in das Harz eingebettet sind (→ Bild 10.1). Die geringste Lageabweichung führt zu erheblicher Festigkeitsminderung.

Walzerzeugnisse haben durch Reste nichtmetallischer Teilchen eine Zeilenstruktur in Walzrichtung. Deshalb sind Längs- und Quereigenschaften verschieden (z.B. die Kerbschlagarbeit KV). Durch Umschmelzverfahren wird die Zahl nichtmetallischer Teilchen weiter reduziert und die Quereigenschaften nähern sich stark den Längseigenschaften (isotroper Stahl).

Änderung der Struktur, Möglichkeiten

Struktur	Möglichkeiten
Atombau, Bindung	Änderung bedeutet Wahl eines anderen Stoffes!
Kristallgitter	Legieren, Abschrecken
Gefüge	Erschmelzung (Reinheit) Verformungen, Wärmebehandlung

Hinweis: Atombau und chemische Bindung sind Themen der Chemie und werden hier der Vollständigkeit wegen als Übersicht gebracht.

Internet: www.Rutherford.de Periodensystem mit ausführlicher Beschreibung der Elemente in Perioden und Gruppen mit Daten.

Im Periodensystem (PSE) sind die natürlich vorkommenden Elemente mit steigenden Ordnungszahlen in waagerechten **Perioden** und senkrechten **Gruppen** angeordnet. Von Element zu Element nimmt die Zahl der Protonen im Kern und die der Elektronen in der Hülle um eins zu. Das hinzukommende Elektron wird in die jeweils nächsthöhere Schale (Energieniveau, Orbital) eingebaut. Die Außenschale kann max. 8 Elektronen aufnehmen. Das ist bei den Edelgasen der Fall (Ausnahme He mit 2). Daraus folgt die Theorie, alle anderen Elemente versuchen diese stabile **Edelgaskonfiguration** in ihren chemischen **Bindungen** herzustellen.

Die Eigenschaften der Elemente (und ihrer Atome) ändern sich von links nach rechts in jeder Periode wiederkehrend und in den Gruppen von oben nach unten.

Hauptgruppen -Elemente		Bild 1.3 Periodisches System der Elemente												Hauptgruppen-Elemente							
	I A	II A	Bezeichnung der Orbitale in welche die jeweils hinzukommenden Elektronen eingebaut werden (→) ↓												III A	IV A	V A	VIA	VII A	0	
1s	1 H																		2 He		
2s	3 Li	4 Be													2p	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3s	11 Na	12 Mg													3p	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4s	19 K	20 Ca	3d	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	4p	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5s	37 Rb	38 Sr	4d	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	5p	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 Je	54 Xe	
6s	55 Cs	56 Ba	5d	57 La ¹⁾	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	6p	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7s	87 Fr	88 Ra	6d	89 Ac ²⁾	1) Lanthaniden (14 seltende Erden Nr. 58...71). Bei ihren Atomen wird das 4f-Orbital aufgefüllt																
2) Actiniden, 5f-Orbital wird aufgefüllt				90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	Transurane, künstlich hergestellte Elemente												

Innerhalb einer senkrechten Hauptgruppe nimmt die Anzahl der Elektronenschalen um eine zu.	Gruppen-Nr. = Anzahl der Außenelektronen
Innerhalb einer waagerechten Periode nimmt die Anzahl der Außenelektronen um jeweils eins zu.	Perioden-Nr. = Anzahl der Schalen

Nach dem Verhalten der Außenelektronen werden die Elemente grob eingeteilt in:

Metalle liegen im linken unteren Bereich des PSE einschließlich der sog. Nebengruppenelemente, zu denen die meisten der technisch wichtigen Metalle zählen. Atome der Hauptgruppen-elemente haben vollständige Unterschalen.

Metallatome haben 1...4 Außenelektronen mit größerem Abstand zum Kern und schwächerer Bindung. Es entstehen positiv geladene Ionen (Kationen) und *freie* Elektronen (elektrische Leitfähigkeit), die von Nichtmetallen gebunden werden können.

Nichtmetalle liegen im oberen rechten Bereich des PSE. Davon sind Stickstoff N und Phosphor P in Metallverbindungen für Werkstoffe von Bedeutung. Die Edelgase werden als Schutzgase und Füllung von Leuchtröhren verwendet.

Nichtmetallatome haben 5 bis 7 Außenelektronen, näher am Atomkern, deshalb stärker gebunden. *Elektronegativ*, da Anziehung anderer Elektronen bis auf max. 8 (Edelgashülle). Dann entstehen negativ geladene Ionen (Anionen). Keine elektrischen Leiter.

Halbmetalle (Metalloide) liegen im markierten Diagonalfeld dazwischen. Davon sind Bor B, Kohlenstoff C und Silicium Si als Partner mit Metallen oder unter sich für die Werkstofftechnik wichtig.

Halbmétallatome sind nicht eindeutig den o.a. Arten von Elementen zuzuordnen. Sie stehen als *Halbleiter* zwischen Metall und Nichtmetall.

1.3.4 Kristallgitter und Bindungsart

Die Regelmäßigkeit freigewachsener Kristalle (Bild) beruht auf der Ordnung der Teilchen im Verband. Dadurch gelingt es, *anziehende* und *abstoßende* elektrostatische Kräfte ins Gleichgewicht zu bringen. Diese geometrische Ordnung nennen wir das *Kristallgitter*. Es wird durch *Elementarzelle* und *Bindungsart* beschrieben.

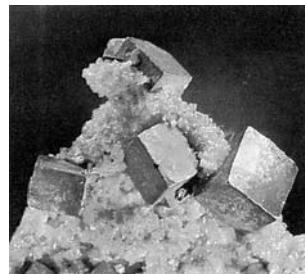
Elementarzelle ist ein herausgeschnittenes Gitterelement (Bild →), das sich im Kristallgitter periodisch nach allen Richtungen fortsetzt, im

- **Idealkristall** (Theorie) fehlerfrei, im
- **Realkristall** mit Störungen (→ 2.2.1).

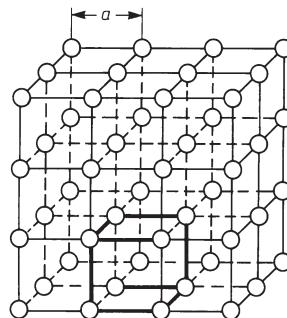
Die Kristallographie kennt sieben Kristallsysteme, von denen nicht alle für die Werkstoffkunde wichtig sind (→ Bild, Kristallgitter mit Elementarzelle und Gitterkonstante).

Bindungsart ist die chemische Bindung zwischen den Gitterbausteinen, d.h. Kräfte und Energien, welche das Gitter zusammenhalten. Ihre Größe und Richtung erklären die Eigenschaftsunterschiede von Metallen, Keramik und Kunststoffen (Tabelle 1.3).

Feststoffe sind meist *kristallin*, ihre Teilchenverbände besitzen eine Ordnung, ein *Kristallgitter*. Der Gegensatz von kristallin ist *amorph*. Es bedeutet „*ohne Gestalt*“, d.h. regellose Anordnung der kleinsten Teilchen.



Bleiglanz-Kristalle (Würfel) auf Dolomit



Kristallgitter (einfach kubisch) mit Elementarzelle und Gitterkonstante a

Tabelle 1.3: Übersicht über die Bindungen in Kristallgittern

Bindungsart Eigenschaft	Metallbindung	Ionenbindung	Elektronenpaarbindung	
	Metallgitter	Ionengitter	Molekülgitter	Atomgitter
Bausteine Teilchenart	positive Metallionen und negative freie Elektronen	positive Metall- und negative Nichtmetallionen	Moleküle der Nichtmetalle	Atome der Elemente C, Si, Ge, g-Sn
Kräfte zwischen den Bausteinen	mittel bis groß	groß	klein	sehr groß
Siede- und Schmelzpunkte	hohe Siedepunkte	hohe Siede- und Schmelzpunkte	niedrige Siede- und Schmelzpunkte	sehr hohe Schmelzpunkte
elektrische Leitfähigkeit	gute Elektronenleiter	Ionenleiter in Schmelzen und Lösungen	z.T. Isolatoren	Nichtleiter
Plastische Verformung – kalt – warm	vom Kristallsystem abhängig, meist gut sehr gut	nicht vorhanden – z.T. unter Druck	nicht vorhanden gut (Thermoplasten)	unverformbar spröde
typische Vertreter	Metalle und Legierungen	Oxide, Salze	Graphit, Eis Kunststoffe	Diamant, Quarz

Sehr viele Stoffe sind Mischformen zwischen den Hauptbindungsarten in Tabelle 1.3.

Eine Mischform zwischen Ionen- und Elektronenpaarbindung ist z.B. das Wasser H_2O , es wird dadurch zum *Dipol* – Molekül (\rightarrow).

Mischformen zwischen Metall und Elektronenpaarbindung (kovalenter B.) liegen z.B. bei den Metalloiden, z.B. Graphit, vor.

Beispiele für den Einfluss der Struktur auf die Eigenschaften sind Graphit und Diamant.

Graphit (Bild 1.4):

C-Atome bilden flächige Netzmoleküle. Jedes C-Atom hat drei Nachbarn mit Atombindung in der Ebene. Das vierte Elektron ist frei, bindet die Schichten und macht den Graphit parallel zu den Schichten leitend für elektrischen Strom.

- kleiner Atomabstand im Molekül: starke Bindung, Graphit ist unschmelzbar,
- größerer Schichtabstand: schwache Bindung, leichte Verschiebung der Schichten, Festschmierstoff.

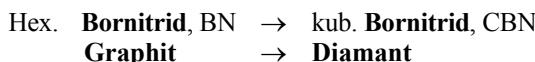
Diamant (Bild 1.5)

C-Atome sind mit kleinstem Abstand vierfach untereinander gebunden (stark gezeichnete Atome). Daraus folgen hohe Härte und Schmelzpunkt $\vartheta_m > 4000\text{ }^\circ\text{C}$.

Die ortsgebundenen (lokalisierten) Elektronen machen ihn zum Nichtleiter für Elektrizität. Seine Wärmeleitung ist besser als die von Cu.

Ein nichtmetallisch-anorganischer Stoff mit technischer Bedeutung ist Bornitrid BN. Er hat ein dem Kohlenstoff entsprechendes Verhalten:

Bei beiden Stoffen kann das hexagonale Gitter durch eine Hochdruck-Temperatur-Behandlung in das kubische Diamantgitter umgewandelt werden (\rightarrow).



Bornitrid (hex.) hat ein gleichartiges Schichten-Gitter und ähnliche mechanische Eigenschaften, jedoch ohne elektrische Leitfähigkeit. Für Bau-teile in Kontakt mit Metallschmelzen geeignet, auch „weißer Graphit“ genannt.

Begriff: Dipole entstehen, wenn sich Atome mit ungleicher Elektronegativität binden. Das negativeren zieht das bindende Elektronenpaar stärker an, sodass diese Molekülseite *negativ* erscheint, die andere *positiv*.

Dipole üben Kräfte aufeinander aus, die als *zwischenmolekulare* Kräfte besonders für die Kunststoffe von großer Bedeutung sind.

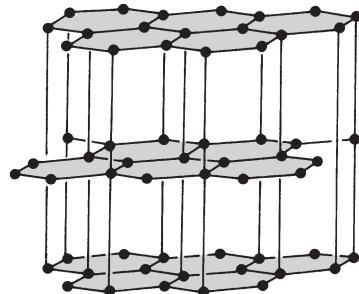


Bild 1.4 Graphit, hex. Molekülgitter

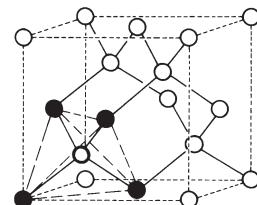


Bild 1.5 Diamant, kubisches Atomgitter

Anwendungen:

Diamant, kubisches Bornitrid CBN und Titan-carbid verhalten sich in den Härten wie 4:2:1. Es sind Schneidenwerkstoffe für die Zerspanung. Etwa 90 % der Industriediamanten stammen aus der Phasenumwandlung von Graphit bei einem Druck $> 60\text{ kbar}$ und ca. $1500\text{ }^\circ\text{C}$ (Synthesediamanten, Syndite).

Kubisches Bornitrid CBN (Handelsnamen Amborite, Borazon) wird auf gleiche Weise wie Diamant durch die Phasenumwandlung des hexagonalen BN hergestellt und als Korn in Schleifscheiben, Wendeschneidplatten zum Zerspanen von gehärtetem Stahl und Hartlegierungen verwendet.

1.3.5 Einflussnahme auf das Kristallgitter

Temperatureinfluss. Wie der Kohlenstoff als Diamant und Graphit, so kommen weitere Stoffe in mehreren Spielarten (Modifikationen) vor, sie sind *polymorph*.

Beim Erwärmen nehmen sie bei der *Umwandlungstemperatur* auch ohne höheren Druck eine andere Gitterstruktur an. Bei Abkühlung erfolgt der Vorgang umgekehrt. Die Umwandlung ist meist mit einer Änderung des Volumens verbunden, das führt zu inneren Spannungen.

Einfluss von fremden Gitterbausteinen. Bei Metallen wird durch Legierungszusätze ein vorhandenes Gitter *verzerrt* oder völlig verändert (→ Legierungen 2.5.1)

Einfluss von Fertigungsverfahren. Kaltumformung sowie Härtung führen auch zu einer begrenzten Gitteränderung. Diese Einflüsse und ihre Auswirkung auf Gefüge und Eigenschaften werden in den entsprechenden Abschnitten behandelt.

1.3.6 Gefüge und Änderungsmöglichkeiten

Gefüge nennen wir das „Haufwerk“ der kleinen Körper, der Phasen, aus denen der Werkstoff zusammengesetzt ist (→ Beispiel), wie z.B. die *Faserstruktur* des Holzes oder Art und Größe der Zuschlagstoffe bei Betonwerkstein.

Wie bei letzterem wird das Gefüge erst nach Vorbereitung der Oberfläche durch Schleifen und einer chemischen Behandlung sichtbar. Dabei erhalten die einzelnen Gefügebestandteile *Helligkeits-* oder *Farbunterschiede* und können so beurteilt werden, meist mithilfe des Mikroskops.

Beispiele für den Einfluss von Gefügeänderungen auf die Eigenschaften:

Gefügeänderung	Eigenschaftsänderung
Mischungsverhältnis der Phasen	Stahl: Härte steigt mit dem C-Gehalt (= Carbidanteil), Beton: Festigkeit steigt mit dem Zementanteil, GFK: Festigkeit steigt mit dem Glasanteil im Kunststoff.
Form und Größe der Kristalle	Gusseisen: mit der Feinheit der Graphitkristalle steigt die Festigkeit, auch bei Übergang von Lamellen- zur Kugelform.

Begriff: polymorph = vielgestaltig. Polymorphie gibt es bei Eisen, Cobalt, Titan, Zinn und Zirkon (Eisen → 3.1)

Auch nichtmetallische Stoffe wie Quarz, SiO₂ oder Zirkonoxid ZrO₂ zeigen Gitterumwandlungen bei höheren Temperaturen. Für keramische Hochtemperaturwerkstoffe sind sie unerwünscht, da sie zu Rissen führen können.

Beispiel: Gitteränderung bei Stahl

Zustand	Kristallgitter	Eigenschaften
unlegiert mit 35 % Mn	kubisch-raumz. kub.-flächenz.	magnetisch unmagnetisch
geglüht abgeschreckt	kubisch-raumz. tetragonal	weich, zäh hart, spröde

Hinweise: Kaltverfestigung 2.3.1
Härtung 5.3.3 und Bild 5.17

Beispiel: Phasen in Werkstoffen

Phasen	Beispiele
metallische Kristalle	Grundmasse aller Metalle und Legierungen
nichtmetallische Kristalle	Graphit in Gusseisen Carbide in Stahl, Hartguss
amorphe Stoffe Schlackenteilchen	Glas, Kunststoffe Sulfid- und Oxidschlacken im Stahl
Gasblasen	Gusswerkstoffe, Schaumstoff
Metallspäne Glasfasern	Bremsbeläge Glasfaserkunststoffe

Faserverbundwerkstoffe bestehen aus einer Metall-, Keramik- oder Kunststoffmatrix, in welche Fasern aus Glas, Kohlenstoff, Keramik oder Kunststoff eingebettet sind.

Tabelle 1.4: Zusammenfassung, Struktur der Werkstoffe

Gefüge (Grobstruktur)	Kristallgitter (Feinstruktur, Struktur der einzelnen Phasen)	(oder amorph)
optisch sichtbar gemacht an: • Bruchflächen • Schliffbildern	Elementarzelle geometrische Anordnung der kleinsten Teilchen	Bindungsart beschreibt Kräfte und Energien zwischen den Teilchen
Sichtbar werden damit: • Größe und Form der Kristalle • Korngrenzen • eine Ausrichtung der Kristalle (Textur, Zeilengefüge) • Anzahl und Form der nicht-metallischen Einschlüsse (Reinheitsgrad) • eine Ausrichtung der Einschlüsse (Faserstruktur)	• kubisch-flächenzentriertes • kubisch-raumzentriertes • hexagonales • tetragonales Kristallgitter Diese Gitter herrschen bei den meisten Metallen vor • Ohne innere Ordnung sind die Gläser, sie sind <i>amorph</i>	• Ionenbindung (z. B. Oxide) Anziehung Kation/Anion • Atombindung (z. B. Diamant) Elektronenpaarbindung • Metallbindung (Metalle) Anziehung Kation/Elektronen • Schwache zwischenmolekulare Bindung (z. B. Kunststoffe) Anziehung durch Dipolkräfte

1.4 Auswahlprinzip für Werkstoffe

1.4.1 Anforderungsprofil

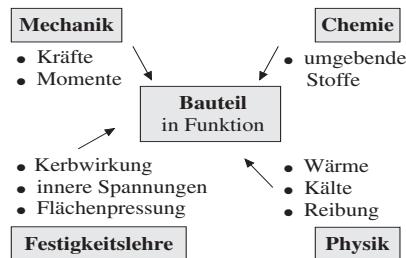
Zum Erkennen und evtl. Berechnen der Beanspruchungen benötigen wir Kenntnisse und Lösungsverfahren aus den anderen Fachgebieten (→).

Jedes Bauteil soll den Anforderungen genügen, denen es im Zusammenwirken mit anderen innerhalb eines Systems (Gerät, Maschine) ausgesetzt ist. Die Anforderungen an das Bauteil führen zur Beanspruchung bestimmter Werkstoffeigenschaften. Bei Überbeanspruchung wird das Bauteil geschädigt.

- Äußere Kräfte erzeugen innere Spannungen,
- umgebende Stoffe schädigen die Oberfläche,
- Reibung führt zu Verschleiß (Stoffverlust),
- bei tiefen oder hohen Temperaturen ist das Bauteil weniger belastbar.

Die Summe aller Einflüsse, die von außen an das Bauteil herantreten, nennen wir das Anforderungsprofil. Es kann in vier Bereiche gegliedert werden (→ Übersicht).

Anforderungsprofil ist die Summe aller Beanspruchungen, die ein Bauteil in Funktion ertragen muss. Es lässt sich in 4 Beanspruchungsbereiche gliedern.

Schema: Anforderungen und Fachgebiete**Übersicht:** Anforderungsprofil

Beanspruchungsbereich	Wirkung auf das Bauteil
Festigkeits-Beanspruchung	Innere Kräfte (Spannungen) führen zu Verformungen, evtl. zum Bruch
Korrosions-Beanspruchung	Reaktionen mit anderen Stoffen führen zu Stoffverlust (Durchbrüche)
Tribologische Beanspruchung	Reibung und Verschleiß ergeben Werkstoff- und Energieverluste
Thermische Beanspruchung	Erweichung in der Wärme, Versprödung in der Kälte, Wärmeausdehnung

Thermische Beanspruchung begünstigt die Diffusion und verstärkt die Wirkung der anderen Beanspruchungsarten:

- Höhere Temperaturen ergeben höhere Korrosionsgeschwindigkeiten.
- Die Kristallgitter sind aufgeweitet, das begünstigt eine langsame bleibende Dehnung, das sog. Kriechen. Die zulässigen Spannungen sinken stark ab und können nur noch eine temperatur- und spannungsabhängige Zeit ausgehalten werden.

Dem **Anforderungsprofil** an das Bauteil stehen die Widerstandseigenschaften des Werkstoffes gegenüber. Die Summe aller Eigenschaften des Werkstoffes nach Abschluss aller Fertigungsgänge ist das **Eigenschaftsprofil** des Werkstoffes im Bauteil.

1.4.2 Eigenschaftsprofil

Werkstoffeigenschaften sind physikalische Größen mit Symbol, Maßzahl und Einheit. Sie werden nach genormten Prüfverfahren quantitativ ermittelt und sind von den Prüfbedingungen abhängig (↓). (Normung → Abschnitt 16).

• Proben einfacher Gestalt mit glatter Oberfläche	• überall gleicher Werkstoffbeschaffenheit
• einfaches Spannungsverlauf	• normalen klimatischen Verhältnissen

Der Werkstoff im Bauteil ist durch die Fertigungsverfahren verändert worden, sodass Unterschiede auftreten können (evtl. nur örtlich):

- Grad der plastischen Verformung,
- Erwärmung und Abkühlung ungleicher Wanddicken,
- Oberflächenstruktur (Rautiefe),
- Spannungsverlauf durch komplizierte Gestalt (Kerben) und Kraftangriff,

je nach Gestalt des Teiles und Art der zuvor abgelaufenen Fertigungsverfahren. Die Bauteileigenschaften sind dadurch örtlich verschieden.

Beim **Bauteil in Funktion** kommen weitere Beanspruchungen hinzu:

- Korrosion durch umgebende Stoffe,
- Kräfte auf die Oberfläche durch berührende Bauteile, sie verursachen,
- Reibung und Verschleiß.

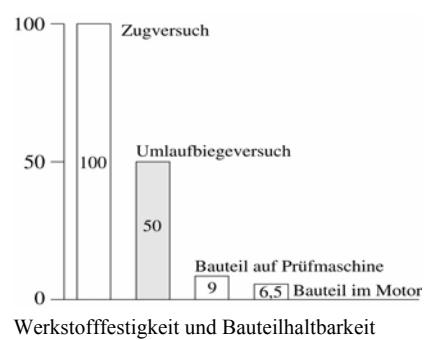
Versuche zeigen, dass die im Zugversuch an einer Probe ermittelte Werkstofffestigkeit bei einem Bauteil in Funktion nur noch in Bruchteilen vorhanden ist (→ Diagramm). Deshalb gilt:

Werkstoffkennwerte aus der Werkstoffprüfung können nicht unmittelbar auf Bauteile übertragen werden.

Die Eigenschaften im Bauteil werden von der Entstehungsgeschichte geprägt, im Einzelnen:

Werkstoff-Erzeugung	Ausgangsstoffe (Reinheit) Erschmelzen, Vergießen nach vielen Verfahren mit unterschiedlicher Qualität
---------------------	---

Formgebung verändert das Gefüge	
Umformen	warm oder kalt
Verbinden	Schweißen, Löten
Trennen	Spanen, Schleifen
Beschichten	thermisch, galvanisch, chemisch
Stoffeigenschaftändern	Härteln, Vergüten, Aushärten



Werkstofffestigkeit und Bauteilhaltbarkeit

Eigenschaftsprofil ist die Summe aller Werkstoffeigenschaften im Bauteil. Es lässt sich in 4 Eigenschaftsbereiche gliedern (↓ Übersicht).

Übersicht: Eigenschaftsprofil (Auswahl)

Bereich	Eigenschaftskennwerte	Bereich	Eigenschaftskennwerte
Mechanische Eigenschaften			Technologische Eigenschaften
Widerstand geg. Zerreißen	Zugfestigkeit R_m in MPa (= N/mm ²)	Verhalten beim – Gießen – Tiefziehen – Schweißen – Härteten	Schwindmaß in % Gießtemperatur Tiefung t in mm Kohlenstoffäquivalent CEV % Härtetiefen, Stirnabschreckkurve
Verhalten bei – elastischer – plastischer Verformung	E-Modul E in GPa Bruchdehnung A in % Brucheinschnürung Z in %		
Thermische Eigenschaften			Chemische Eigenschaften
Verhalten bei – tiefer – hoher Temperatur	Kerbschlagarbeit KV in J Zeitstandfestigkeiten	Beständigkeit gegen Wasser	Korrosionsgeschwindigkeit in mm/a (Jahr)

1.4.3 Auswahlgrundsatz

Wenn ein Bauteil seine Funktion über die vorgesehene Lebensdauer erfüllen soll, müssen die beiden „Profile“ im Gleichgewicht stehen, wobei noch eine Sicherheit (→) einzukalkulieren ist. Daraus ergibt sich als Auswahlgrundsatz:

$$\text{Eigenschaftsprofil} \geq \text{Anforderungsprofil}$$

des Werkstoffes	an das Bauteil
im Bauteil	

Sicherheit ist das Verhältnis der max. auftretenden Beanspruchungen zu den vom Werkstoff ertragbaren. Sie sind z.T. durch Normen festgelegt, andernfalls müssen sie vom Konstrukteur durch eine Abwägung von der Genauigkeit der Lastannahmen (z.B. Stoßbelastung) und dem Schadensrisiko gewählt werden:

- Genaue Kenntnis der Belastungen ⇒ niedrige Sicherheit
- Hohes Schadens-Risiko ⇒ hohe Sicherheit

1.4.4 Maßnahmen zur Verbesserung nicht-ausreichender Eigenschaftsprofile

Im fertigen Bauteil ist nicht nur der Werkstoff örtlich verschieden, auch die Beanspruchungen sind ungleich verteilt. Hier ist die *Oberfläche* am meisten betroffen (→). Eigenschafts- und Anforderungsprofil lassen sich wirtschaftlich ins Gleichgewicht bringen durch folgende Maßnahmen:

- Die Werkstoffoberfläche wird oberflächlich so verändert, dass sie den Anforderungen genügt.

Hierzu gibt es zahlreiche Verfahren der Fertigungshauptgruppen **Stoffeigenschaftändern** und **Beschichten**. Damit können Randschicht oder Oberfläche in diesem Sinne umgestaltet werden (Übersicht in Tabelle 1.5).

Oberflächenbeanspruchung:

Korrosions- und tribologische Beanspruchung wirken fast ausschließlich auf die Oberfläche eines Bauteiles. Auch die Festigkeitsbeanspruchung ist in den meisten Fällen in der Randschicht am größten (bei Biegung oder Torsion).

Beispiel: Stahl ist von Preis, Festigkeit und Formbarkeit her ein universell einsetzbarer Werkstoff, jedoch nicht korrosionsbeständig. Durch Beschichten von Halbzeug oder Bauteilen wird dieser Mangel behoben (→ 14).

Beispiel: Das örtliche Festwalzen von Stellen mit hoher Randspannung (Kerben) erhöht die Dauerfestigkeit des Bauteiles bei dynamischer Belastung. Nicht rotationssymmetrische Teile wie z.B. Pleuel für Kfz-Motoren lassen sich durch Kugelstrahlen behandeln (→ 5.6.6).

Tabelle 1.5: Maßnahmen zur Verbesserung unzureichender Eigenschaftsprofile

Eigenschaft	Verfahren (Abschnitt im Lehrbuch)	
Streckgrenze erhöhen	Mechanismen (Tabelle 2.15); Vergüten (5.3.8); Aushärten (5.4 u. Tabelle 5.8; Al und Legierungen 7.3.5); Kaltverfestigung (2.3.1)	
Dauerfestigkeit erhöhen	Stähle	Allgemein: Verfestigungswalzen und -strahlen der Oberfläche (5.6.6) Einsatzhärten (5.6.3), Randschichthärten (5.6.2), Nitrieren (5.6.4)
		Stähle mit höherem Reinheitsgrad und/oder kleinerem C-Gehalt Umschmelzhärten (5.5.2)
Zähigkeit erhöhen	Stähle	Metalle: Ausbildung von Feinkorn durch hochwertige Erschmelzung. Feinkorn durch Normalglühen (5.2.1) oder Verwendung von Feinkornstählen (4.3.1) mit thermomechanischer Behandlung (5.5.3), Stahl mit kleinerem C-Gehalt und etwas höherlegiert verwenden
Korrosionsbeständigkeit verbessern		Stahl, Temperguss: Korrosionsschutzmaßnahmen (Tabelle 12.11); Al und Al-Legierungen: Anodische Oxidation (7.3.3); Mg und Mg-Legierungen: Chromatieren; Titan: Tiduran-Verfahren (7.5.3)
Verschleißwiderstand erhöhen	abrasiv adhäsig Zerrüttung	Allgemeine Angaben: (13.5), Thermisch Spritzen (11.2.3), Hartverchromen (11.4.5), Auftragschweißen (11.2.4), Borieren (5.6.5) PVD- und CVD-Verfahren (11.2.5), Salzbadnitrieren (5.6.4).
		Stahl: Oberflächenhärten nach verschiedenen Verfahren (5.6 und 11.2.2)
		Allgemein: Legierungen mit höherem Reinheitsgrad verwenden.

- Eine weitere Möglichkeit ist der Übergang zu Werkstoffverbunden (Hybridbauweise).

Das unzureichende Bauteil wird dabei durch Fügeverfahren mit einem Teil aus dem verstärkenden Werkstoff verbunden (→).

Beispiele: Biegebelastete Al-Strangpressprofile für Portalroboter. Der niedrige E-Modul des Al führt zu unzulässigen Durchbiegungen. Durch Aufkleben von CFK-UD-Laminaten auf Ober- und Untergurt entsteht ein Verbund mit höherer Steifigkeit (siehe auch Beispiel in 1.2.3 und 10.1.2 Verbundstrukturen).

1.5 Überlegungen zur Werkstoffwahl

1.5.1 Eine komplexe Optimierungsaufgabe

Die Werkstoffwahl tritt z.B. in folgenden Fällen auf:

- Anpassung von Werkstoffen. Sie wird erforderlich, wenn Maschinen oder Anlagen auf z.B. höhere *Leistungen*, *Tragfähigkeit* oder *Durchsatz* gebracht werden müssen.
- Austausch (Werkstoffsubstitution), zur *Kosten-* oder *Gewichtsverminderung* oder auch *fertigungsbedingt* zieht fast immer auch eine Änderung der Konstruktion und des Fertigungsweges nach sich, wenn z.B. ein Schweißteil als Gussteil gefertigt werden soll (→ 6.1.1).

Anpassungen: Meist kann hier die gleiche Werkstoffart mit höheren Eigenschaften verwendet werden.

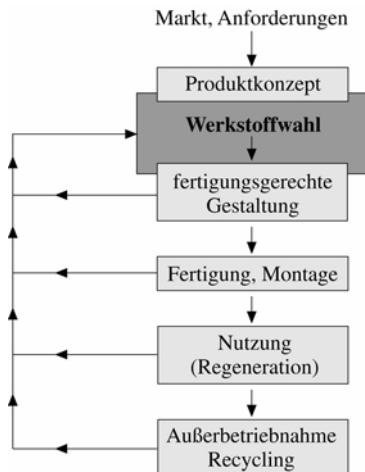
Beispiele: Vergütungsstahl mit höherer Streckgrenze wählen. Bei Feinkornbaustählen steht eine Reihe von Sorten mit Streckgrenzen von 355 bis 960 N/mm² zur Auswahl.

Austausch von Werkstoffen. Bei Ersatz von Stahl durch Al, Mg oder Ti-Legierungen müssen die kleineren E-Moduln beachtet werden (höhere elastische Verformung). Polymere haben eine höhere Wärmedehnung, keramische Stoffe eine kleinere als Metalle; das kann zu Spannungen führen.

• Neukonstruktionen

Neukonstruktionen erfordern eine ganzheitliche Planung, wie sie in Tabelle 1.6 dargestellt ist. Sie zeigt auch den Zeitpunkt der Werkstoffwahl.

Tabelle 1.6: Werkstoffwahl im Produktlebenslauf [3]



Die Pfeile am linken Rand bedeuten, dass evtl. „Schleifen durchfahren“ werden müssen, wenn an einer Stelle geforderte Eigenschaften nicht erfüllt werden.

Neukonstruktionen stellen die höchsten Ansprüche an die Zusammenarbeit der Bereiche, wenn eine *optimale* Lösung in *kurzer* Zeit gefunden werden soll.

Das Produktionskonzept entsteht nach den Anforderungen des Marktes und Vorstellungen des Abnehmers mit Angaben über z.B.

Tragfähigkeiten, Maximalmaße (Lichtraumprofil), Leistung, Geschwindigkeiten, Stückzahlen.

Die **Werkstoffwahl** steht am *Anfang* der Entwicklung, weil der Entwurf (Gestalt)

- **werkstoffgerecht** sein soll, aber auch
- **fertigungs- und montagegerecht**,

der Fertigungsweg nicht ohne konkrete Werkstoffdaten festgelegt werden kann und die

- **Qualitätssicherung** auf den Werkstoff abgestimmt werden muss.

Nach dem Erwerb eines Produktes treten bei seiner **Nutzung** weitere Kosten auf. Sie können für langlebige Produkte wie z.B. Nutzfahrzeuge, Produktionsanlagen usw. die Kaufentscheidung beeinflussen. Dazu gehören auch die Kosten am Ende der Lebensdauer. Eine *ganzheitliche* Betrachtung des Problems bezieht auch diese ein (**Lebenszeitkosten**, life-cycle-cost).

Nutzung	Das Bauteil soll seine Funktion über die geplante Lebensdauer erfüllen. Es darf nicht katastrophal, d.h. durch Sprödbruch versagen. Unterhalts- und Reparaturkosten sollen niedrig sein, z.B. lange Wartungsintervalle und kurze Stillstandszeiten beim Wechsel verschlissener Teile. Wertvolle Verschleißteile sollten zur Wiederaufarbeitung (Regeneration) geeignet sein.
Umweltverträglichkeit	Werkstoff- und Bauteilherstellung sowie Entsorgung möglichst energiesparend, recyclingfähig und wenig Sondermüll erzeugend [4]

Zur Optimierung müssen kombiniert werden:

Bauteil-Vielfalt	
Anforderungen, Gestalt, Größe, Stückzahl	
Werkstoffvielfalt	Verfahrensvielfalt
Metalle, Polymere, Keramik, Verbunde	Urformen, Umformen, Fügen, Trennen, Beschichten
Qualitätssicherung	
Werkstoff-Prüfverfahren	

→ unter minimalen Herstellkosten
zur **optimalen Lösung**

Die Optimierung birgt eine Vielfalt von Fragen, die einen Einzelnen überfordern! Deshalb müssen Sachbearbeiter aus verschiedenen Gebieten in Teamarbeit versuchen, sich einer optimalen Lösung zu nähern. Dazu brauchen alle werkstofftechnisches Wissen, um „mitreden“ zu können.

In der Ausbildung sollte als Motivation für Werkstofftechnik und Fertigungstechnik im Sinne einer **innovativen Werkstoffanwendung** gearbeitet werden. Für bekannte Bauteilarten könnten zunächst *alle* Werkstoffgruppen auf ihre Eignung überprüft werden (→).

Tabelle 1.7 gibt einen Vergleich der Eigenschaften dieser Werkstoffgruppen, so wie sie sich aus den Bindungsarten (Tabelle 1.3) folgern lassen. Sie soll bei einer Vorentscheidung helfen.

Sonderfälle ermöglichen eine schnellere Auswahl. Sie werden zunächst im folgenden Abschnitt beschrieben.

1.5.2 Vereinfachte Direktwahl

Die Werkstoffwahl wird durch eine *herausragende* Anforderung stark vereinfacht, weil sich die Zahl der in Frage kommenden Werkstoffe verkleinert, evtl. auf eine Gruppe beschränkt. Eine solche **Direktwahl** ist möglich in folgenden Fällen:

Ist das Bauteil ...?	Werkstoffe
Werkzeug im weitesten Sinne	Werkzeugstähle nach DIN EN ISO 4957 in Kaltarbeits-, Warmarbeits- und Schnellarbeitsstähle gegliedert (→ 4.7). Großwerkzeuge auch aus Stahlguss mit Einsätzen aus hochlegierten Werkzeugstählen (Werkstoffverbund). Vorrichtungen auch aus verstärkten Kunststoffen
Maschinenelement	Das Fach „Maschinenelemente“ gibt Beispiele für geeignete Werkstoffe.
Extremen Anforderungen in einer Eigenschaft ausgesetzt, z.B.	
Temperaturen sehr hoch, sehr tief	Warm- und hochwarmfeste Stähle und Ni-Basislegierungen für biegebeanspruchte, Keramik für kompakte, auf Druck beanspruchte Teile, Kaltzähle Stähle u. Stahlguss (→ 4.4.2), Ni- u. Ti-Basislegierungen (→ 7.6 u. 7.7).
Wärmeleitung hoch	Hohe Wärmeleitung ist meist mit hoher elektrischer Leitfähigkeit verbunden: Cu und Legierungen, Al und Legierungen. Mit steigendem Anteil an Legierungselementen sinken diese Eigenschaften. Nichtmetallische Wärmeleiter sind SiSiC, Graphit-Verbundwerkstoffe und Diamant.
besondere Wärmedehnung	Tabelle 1.7
Leichtbau	Wichtige Kenngröße ist die Reißlänge. Feinkornbaustähle (→ 4.3), martensitaushärtende Stähle (→ 5.4.4), hochfeste Al-Legierungen, Ti-Legierungen (→ 7.6), Faserverbundwerkstoffe (→ 10.3).
höchste Steifigkeit	Werkstoffe mit hohem E-Modul wie Stahl, CFK, Keramik. Konstruktiv: Wanddicke oder Randfaserabstände vergrößern, Hohlprofile einsetzen
Korrosionsbeständigkeit gegen bestimmte Stoffe	Auswahl nach den DECHHEMA-Tabellen, mit Beständigkeitsangaben in vielen Medien und bei verschiedenen Temperaturen
Verschleiß hoch	Untersuchung des vorliegenden Tribosystems (→ 13.1.3), Ermittlung der Verschleißart (→ 13.4.1) und Wahl eines dafür geeigneten Werkstoffes oder einer Beschichtung (→ 13.4.4)

Hinweis: Detaillierte Informationen → CD-ROM/Stahl- und Stahlguss/Al-Legierungen mit Daten über Erzeugnisformen, Behandlungszustände, Abmessungen und mechanische Eigenschaften.

Das Problem „Werkstoffwahl“ liegt oft bereits am Anfang des Studiums vor, wenn z.B. ein handlungsorientierter Unterricht mit Projekten durchgeführt wird.

Ohne Rücksicht auf bisher verwendete Werkstoffe sollte untersucht werden:

- Muss es unbedingt ein **Metall** sein?
- Würde ein **Kunststoff** genügen?
- Könnte ein **keramischer Werkstoff** geeignet sein?
- Wäre ein **Werkstoffverbund** durch Be- schichten oder ein
- **Verbundwerkstoff** oder eine
- **Verbundkonstruktion** als konstruktiv-fertigungstechnischer Weg die Lösung?

In den meisten Fällen liegen die Beanspruchungen der Bauteile im *mittleren* Bereich, so dass viele Werkstoffe geeignet sind. Die Wahl wird entsprechend schwieriger. Im folgenden Abschnitt wird darauf eingegangen.

1.5.3 Allgemeine, indirekte Wahl

Im allgemeinen Fall, wenn keine besonderen Anforderungen vorliegen, ergibt sich eine *indirekte Wahl* durch Aussondern der Werkstoffgruppen, die wesentliche Anforderungen *nicht* erfüllen können. Diese Überlegungen müssen bereits den groben Fertigungsweg einbeziehen, den der Werkstoff unbeschädigt überstehen muss (hierzu auch Tabelle 1.8).

Tabelle 1.7: Eigenschaftsvergleich Metall – Polymer – Keramik

Eigenschaften	Metalle (Tab. 2.1)	Polymere	Keramik (Tab. 8.6)
E-Modul kN/mm ²	125 (Cu)...210 (Fe)	niedrig ¹⁾ 1 (PP)...4 (EP) 3,5 (PP-AF)...23 (EP-GF)	> Stahl ²⁾ 200 (ZrO)...400 (SiC)
Zugfestigkeit	hoch	niedrig	hoch
Druckfestigkeit	hoch	mittel	sehr hoch
Zähigkeit ¹⁾	mittel bis hoch	mittel bis hoch	niedrig < Gusseisen
Wärmeleitung W/mK	50 (St)...174 (Al)	0,2 (PP) 0,5 (PE-HD) ⁴⁾	1,4 (AlTi)...120 (SiC)
Wärmeausdehnung bis 100 °C 10 ⁻⁶ /K	mittel 12...23,5 X50Ni36: 1,2	hoch 80...160 verstärkt 15...60	niedrig 2,6...8
Dauergebrauchs-temperatur °C	mittel bis hoch NiCr20Ti: < 1100 °C	niedrig 80...130 verstärkt 100...230	hoch > (950) 1300
Korrosions-beständigkeit	schlecht bis gut, je nach Sorte	allgemein gut, einzelne Stoffe können schädigen	allgemein sehr gut
Verschleißwiderstand abrasiv adhäsiv	nur bei carbidreichen Sorten hoch, Lagermetalle gut	einzelne Sorten gut	hoch
Dichte kg/dm ³	1,9.(Mg)..8,5 (Cu)	0,9.(PP)..2,0 (GFK)	zwischen Al und Ti
elektrischer Leiter	z.T. sehr gut	Isolator	meist Isolator ³⁾

¹⁾ stark temperaturabhängig; ²⁾ mit Ausnahme von ZrO und AlTiO; ³⁾ mit Ausnahme von SiC; ⁴⁾ durch Füllstoffe größer bis 0,8

1.5.4 Einfluss des Fertigungsweges auf die Werkstoffwahl

Eine Werkstoffwahl nur auf der Basis der Stoffeigenschaften liefert Vorschläge, die noch unter Fertigungsgesichtspunkten gefiltert werden müssen, weil

- ein so gefundener Werkstoff nicht für *alle* Fertigungsverfahren geeignet ist (Tabelle 1.8),
- nicht in allen *Größen*, *Formen* und *Stückzahlen* gefertigt werden kann,
- die Kosten für den Werkstoff gegenüber den Fertigungskosten meist gering sind und
- viele Werkstoffe erst durch Fertigungsgänge entstehen (z.B. Verbundwerkstoffe, Keramik) oder ihre Gebrauchseigenschaften erlangen (z.B. durch Beschichten).

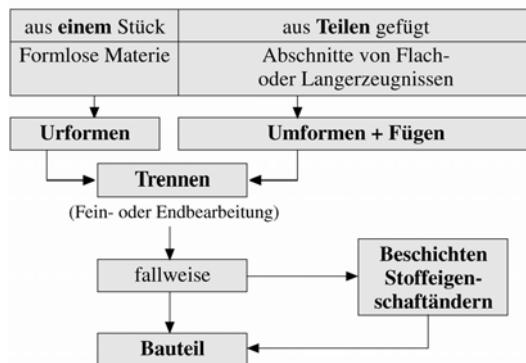
Tabelle 1.8: Eignung der Werkstoffe für die Fertigungsverfahren (siehe auch Abschnitt 1.6)

Eignung zum	Metalle	Polymer	Keramik
Urformen <ul style="list-style-type: none"> • Gießen • PM-Technik (Sintern) 	bis T_{\max} ca. 1700 °C auch PM-Spritzguss alle Metalle	Spritzguss (keine hochwärmebestdg. Sorten) PTFE und andere hochschmelzende	Schlickergießen und Keramik-Spritzguss Alle Keramiken
Umformen <ul style="list-style-type: none"> kalt warm 	Gefüge mit kleinem Anteil harter Phasen. Knetlegierungen fast aller Metalle	thermoplast. Folien, Platten und Profile. Spritzpressen für Duroplaste	nicht anwendbar
Fügen	alle Verfahren mit Ausnahmen	Schweißen (Thermopl.) Kleben, Schnappverbindungen	Aktivlöten, metallisiert Löten, Kleben, Diffusions- und Reibschweißen
Trennen	Spanen, Schneiden Thermisch trennen, Erodieren	(Spanen), Schneiden	Spanen mit Diamantwerkzeugen, Läppen, (Erodieren für SiC)
Beschichten	alle Verfahren mit Ausnahmen (temperaturbedingt)	galvanisch nach Vorbehandlung, Plasmaspritzen	PVD- und CVD-Verfahren
Stoffeigenschaftändern	Glühen für alle Metalle, Härteln, Vergüten und Aushärteln nur für bestimmte Sorten	Erwärmung duroplastischer Teile zum Ausstreichen des Härters	nicht angewandt

Einen großen Einfluss auf die Werkstoffwahl hat die Entscheidung über den grundsätzlichen Fertigungsweg:

1.5.5 Integral- oder Differentialbauweise

Das Bauteil entsteht



Das Schema enthält die Namen der 6 Fertigungshauptgruppen nach DIN 8580. Dahinter stehen viele geläufige Verfahren, aber auch weniger bekannte.

Hinweis: die Bauweise „aus einem Stück“ wird auch **Integralbauweise** genannt, die „aus Teilen gefügte“ **Differentialbauweise**.

Integralbauweise benötigt *weniger* Arbeitsgänge bis zum fertigen Bauteil. Eine Ausnahme ist das „Spanen aus dem Vollen“.

Differentialbauweise muss für sperrige und große Strukturen (evtl. nach Umformung) und auch für Leichtbau aus Blech angewandt werden. Moderne Gießtechnik ermöglicht es, auch hier teilweise die Integralbauweise einzuführen (→ Beispiel 7.1.1).

Sehr häufig werden beide Bauweisen kombiniert, z.B. durch Fügen endkonturnaher Komponenten.

Das geschieht immer dann, wenn es wirtschaftlich oder fertigungstechnisch die bessere Lösung ist oder wenn Gewicht eingespart werden soll (→ Folgeseite).

Hinweis: Eine Aufzählung der einzelnen Fertigungsverfahren ist am Ende des Abschnittes unter 1.6. zu finden.

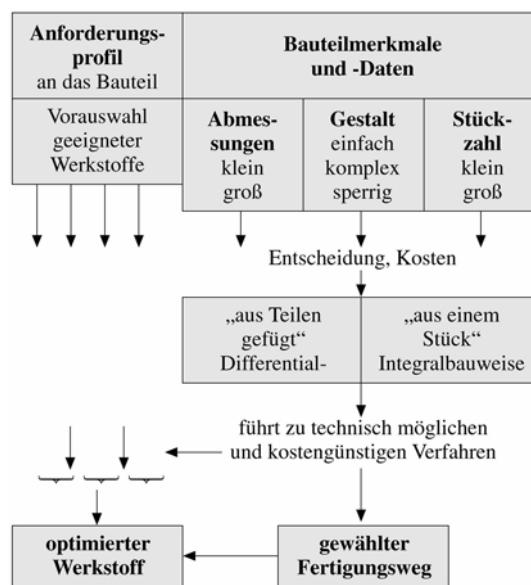
Ziel des Urformens ist das *endkonturnahe* Rohteil mit dem geringsten Aufwand für die Endbearbeitung (z.B. Spanen, Schleifen). Neben dem Urformen führt auch das Massivumformen von Materialabschnitten (Schmieden, Fließpressen) zu endkonturnahen Rohteilen.

Einige Verfahren arbeiten mit hohen Kräften zur Formung des Werkstoffs (z.B. Druckgießen, Pulververarbeitung, Tiefziehen). Masse bzw. Volumen des Teiles sind dann von Werkzeug- und Maschinengröße abhängig (→ Gießen 6.1.1).

Beispiel: „gebaute“ Nockenwelle statt gegossener Ausführung für Pkw-Motoren (Stahl-Innovationspreis 1994).

Die vorgefertigten Nocken, Lagerstellen und Antriebsflansch werden in einem gesenkartigen Werkzeug auf einem Stahlrohr exakt in der Lage fixiert und durch Innenhochdruck-Umformung kraft- und formschlüssig unter einer Axialkraft durch Aufweiten gefügt. Gewichtseinsparung gegenüber der gegossenen Ausführung 50 %.

1.5.6 Einfluss der Bauteilmerkmale auf den Fertigungsweg



Die Entscheidung für einen Fertigungsweg wirkt wie ein Raster für die Vorauswahl, mit dem der optimale Werkstoff gefunden werden kann.

Einfluss der Masse: Das Beispiel eines Getriebegehäuses zeigt, dass je nach der Größe (Masse) des Bauteils ein anderer Fertigungsweg günstig ist, zu dem auch unterschiedliche Werkstoffe gehören.

Einfluss der Stückzahl: Nur bei hohen Stückzahlen sind aufwändige Werkzeuge und Vorrichtungen einsetzbar, welche die Bearbeitungs-

Bauteildaten: Abmessungen (z.B. Masse, Bau-längen usw.) und komplexe Gestalt lassen bestimmte Verfahren ausscheiden, weil sie technisch undurchführbar oder zu teuer sind. Das gilt vor allem für die *Stückzahl*.

Der Grundsatz Anforderungsprofil = Eigenschaftsprofil ist eine notwendige, aber nicht ausreichende Bedingung. Es ergibt sich eine Vorauswahl von Werkstoffen mit anforderungsgerechtem Eigenschaftsprofil.

Der Werkstoff muss nun noch in die Form gebracht, d.h. „gefertigt“ werden. Es gilt, einen Verfahrensweg zu finden, der mit

- wenigen Arbeitsgängen,
- wenig Abfall,
- wenig Energie,
- wenig Zeit und
- sicherer Qualität bei geringsten Kosten zum **Ziel** führt.

Anhand der Bauteildaten lassen sich ungeeignete Fertigungswege ausscheiden und die geeigneten erkennen.

Beispiel: Bauteilmasse und Verwendung beeinflussen Fertigungsweg und Werkstoff

Art des Getriebes	Ausführung, Werkstoff
groß, ortsfest	Gusskonstruktion, GJL
Kranhubwerk, leichtere Bauweise	Schweißkonstruktion, Stahlblech
Kfz-Getriebe, Leichtbau	Al- oder Mg-Druckguss
Kleinmaschinen	Polymerspritzguss, GFK
Fahrzeug-Modellbau	Polymerspritzguss

zeit stark verkürzen. Jedes Verfahren hat seine Anwendungsgrenzen hinsichtlich von Stückzahl und Masse und auch durch die Komplexität des Teiles (Bild 1.6).

Komplexität meint die Gestalt, die von einfachen geometrischen Formen bis zu komplizierten (mit Hohlräumen, Hinterschneidungen und starken Querschnittsunterschieden) reicht, oder von kompakt bis zu sperrig.

Große Gestaltungsfreiheit ist bei den verschiedenen Gießverfahren zu erreichen. Sie ist bei der Massivumformung durch z.B. Schmieden und Fließpressen wegen der geringeren Fließfähigkeit kleiner. Hier dürfen auch bestimmte Wand schrägen oder Wanddicken nicht unterschritten werden.

Einige Verfahren (\rightarrow) arbeiten mit hohen Kräften zur Formung des Werkstoffs. Hier begrenzen die Höchstkräfte der Maschine die Größe des Teiles, z.B. die *projizierte Fläche* in der Teilelungsebene.

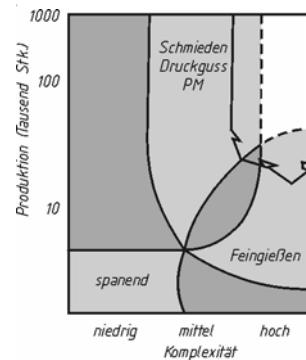


Bild 1.6 Herstellverfahren für kleine bis mittlere Bauteile nach Stückzahl und Komplexität

Hinweis: Übersicht Gießen → 6.1.1.

- Urformen durch z.B. Druckgießen, Spritzpressen oder pulvermetallurgisch
 - Umformen durch z.B. Fließpressen, Tiefziehen oder Schmieden

1.5.7 Vergleich einiger Fertigungsverfahren

In Tabelle 1.9 werden einige Formgebungsverfahren unter den o.a Kriterien und weiteren Fertigungsdaten miteinander verglichen und bewertet (nach *Sigrist, Trapp u.a.*).

Tabelle 1.9: Formgebungsverfahren im Vergleich

	Bedeutung:	Spanende Verfahren	Biegen	Pressen, Stanzen	Freiformschmieden	Gesenkschmieden	Sandformguss	Kokillenguss	Druckguss	Feinguss	Schweißen, Löten	Sintern	Elektrotrödieren
Werkzeugkosten	█ gering/klein	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Fertigungskosten	█ mittel	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Rohteil	█ größer												
Fertigteil	█ groß/gut	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Maßgenauigkeit	█ variabel	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Oberflächengüte	█	█	→	→	→	→	█	█	█	█	█	█	█
Wanddicke	→	→	█	→	█	█	→	█	█	→	→	→	█
Stückzahl	→	→	█	→	█	█	→	█	█	→	→	█	█
Stückgewicht	→	→		→	█	█	→	█	█	→	→	→	█
Abmessungen	→	→	█	→	█	█	→	█	█	→	→	→	█
Komplexität	█	—	—	—	█	█	—	█	█	—	—	█	█
Änderung möglich?	█	█	—	█	—	█	—	█	█	—	—	—	—

Tabelle 1.10:
Vergleich der Genauigkeit
von Fertigungsverfahren
(nach Michaeli u.a.)

Fertigungsverfahren	erreichbare Genauigkeiten ISO-Qualität IT										
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pulvermetallurgie, konv.											
PM-Spritzguss											
Sinterschmieden											
Pulvermetallurgie, konv. mit Kalibrieren											
Feingießen											
Druckgießen											
Gesenkformen, Warmfließpressen											
Halbwarmfließpressen											
Kaltfließpressen											
Drehen											
Schneiden											
Rundschleifen											

Die höheren Qualitäten sind z.T. nur durch Sondermaßnahmen erreichbar.

1.6 Übersicht, Einteilung der Fertigungsverfahren DIN 8580/03

Der Abschnitt gibt einen Überblick über die Vielfalt der Fertigungsverfahren, die in 6 Fertigungshauptgruppen gegliedert sind. Die verwendete Dezimaleinteilung folgt den Normen.

Fertigungshauptgruppen

1 Urformen	2 Umformen	3 Trennen	4 Fügen	5 Beschichten	6 Stoffeigenschaftändern
------------	------------	-----------	---------	---------------	--------------------------

1 Urformen

Hierzu gehören alle Fertigungsverfahren, die der formlosen Materie Zusammenhalt und Gestalt geben. Die Einteilung erfolgt nach dem Zustand der Materie bei der Formgebung.

Zustand des Stoffes ist...	Verfahren (Beispiele und Hinweise auf Lehrbuchstellen)
1.1 flüssig	Gießen (6.1.1) durch Schwerkraft, Druck, Niederdruck. Schleuderguss, Strangguss, Schäumen, Tauchformen, Urformen aus FVK, Ziehen von Kristallen
1.2 plastisch	Pressformen (Thixogießen), Spritzgießen, (Thermoplaste 9.6.3, Spritzpressen, Duroplaste, 9.5.3), Strangpressen (Profile), Ziehformen, Kalandrieren (Kunststoffplatten), Blasformen (Folien), Modellieren
1.3 breiig	1.3.1 Beton, Gips 1.3.2 Porzellan, Keramik (Schlickergießen)
körnig pulvrig	1.4.1 Pressen (Pulvermetallurgie 11.1.3), 1.4.2 Sandformen (Gießerei) 1.4.3 Urformen durch thermisches Spritzen, Sprühkomprimieren (11.1.8)
span- u. faserförmig	1.5.1 Spanplatten, 1.5.2 Faserplatten, Fasergelege für Faserverbunde 1.5.3 Papier und Pappe
gas-/dampfförmig	PDV- und CVD-Verfahren (11.3.5)
1.9 ionisiert	Galvanoformen

Hinweis: Urformverfahren werden auch beim Fügen und Beschichten verwendet.

Schwerpunkt des Urformens ist durch die Vielfalt der Form- und Gießverfahren sowie der Gusswerkstoffe das **Gießen** (Übersicht → 6.1.1).

Keramik: Zusätzlich *Heißgießen* von Keramikpulver mit Wachsen vermengt in Formen, ähnlich dem Keramik-Spritzguss, jedoch mit niedrigeren Temperaturen und Drücken. Werkzeuge können dadurch billiger hergestellt werden.

Rapid-Prototyping: Schnelle Herstellung von Demonstrations- und Erstbauteilen, Kunststoffspritzwerkzeugen (Rapid Tooling) und auch Kleinserienteilen (Rapid Manufacturing).

Kennzeichen ist der *schichtweise* Aufbau eines Bauteils nach verschiedenen Verfahren und Materialien. Voraussetzung ist die Konstruktion des Bauteils über Computer Aided Design (CAD). Die 3D-CAD-Daten ermöglichen es, das Bauteil fiktiv in dünne Schichten zu zerlegen. Danach wird es schichtweise (ca. 0,2 mm) aufgebaut und verfestigt. Nicht verfestigtes Material wird abgesaugt. Die Bauteile entstehen in wenigen Stunden. [6]

Angewandte RP-Technologien	Werkstoffe und Verfahrensweise
Stereolithographie (SL)	Photo-Polymer, flüssig, werden schichtweise aufgetragen, mit einem UV-Laser gescannt und dabei ausgehärtet.
Selektive Laser Sintering (SLS)	Thermoplaste, Formwachs in Pulverform aufgebracht, geglättet und durch CO2-Laser gescannt und gesintert
Fused Deposition Modeling (FDM)	Thermoplaste, Formwachs in Drahtform werden durch eine plotterartige Vorrichtung schmelzflüssig aufgetragen.
Laminated Object Manufacturing (LOM) 3-D-Printing (TDP) (ähnlich Tintenstrahldrucker)	Papier lagenweise verklebt und angedrückt, die Konturen werden durch Laserstrahl beschnitten. Keramiken in Pulverform schichtweise aufgebracht und die Kontur mit flüssigem Kleber durch einen plotterartig bewegten Spritzkopf verfestigt. Danach Sinterung.

Prototypen aus Wachs und Thermoplasten ergeben wegen der niedrigen Festigkeitseigenschaften keine funktionsfähigen Bauteile. Das wird durch die Kombination mit z.B. dem Wachsaußschmelzverfahren erreicht, bei dem die Prototypen als Modell dienen. Mit Laserverfahren werden Formschalen aus kunstharzbundenem Formsand für den Guss von Kurbelwellen gefertigt (EOS, Planegg).

Für die direkte Herstellung von Metall-Prototypen und auch von Werkzeugen aus Metallpulvern sind neben dem Laser-Sintern auch Verfahren des Laser-Auftragschweißens aus Metallpulver oder -draht in Anwendung, z.B. für den Aufbau von Formen für das Kunststoffspritzgießen. Dabei wird das Werkzeug ohne Werkzeugzeichnung direkt mit den Daten des Spritzteils aufgebaut. Die Entwicklung geht zu Rapid Manufacturing, schnelle Herstellung von Kleinserienteilen ohne Formwerkzeuge.

2 Umformen DIN 8582/03

Umformen ist Fertigen durch plastische Änderung der Form eines festen Körpers. Masse und Zusammenhalt bleiben bestehen. Umformverfahren werden auch beim Fügen eingesetzt.

Metalle, insbesondere die *Knetlegierungen*, sind warm und kaltumformbar je nach den Gleitsystemen ihrer Kristalle (Tabelle 2.9).

DIN 8583-1 Druck-Umformen	T2: Walzen Längs- u. Quer-, Blech-, Gewinde-Schrägwalzen	T3: Freiformen Schmieden von Großteilen	T4: Gesenkformen Gesenkschmieden	T5: Eindrücken Prägen (Münzen)
	T6: Durchdrücken Fließ- und Strangpressen			
DIN 8584-1 Zug-Druck-Umformen	T2: Durchziehen Draht- und Stabziehen	T3: Tiefziehen Karosserieteile	T4: Drücken für rotatationssymmetrische Blech- und Hohlkörper	
	T5: Kragziehen	T6: Knickbauchen Ausbauen von Hohlkörpern	T7: Innendruck-Aufweitstauchen Innen-Hochdruckumformen von Rohrteilen	
DIN 8585-1 Zug-Umformen	T2: Längen Streckrichten von Stangen und Strangpressprofilen	T3: Weiten Ausbauen von Hohlkörpern	T4: Tiefen Hohlprägen von Kfz-Nummernschildern, Streckziehen	
DIN 8586 Biege-Umformen	2.4.1 Biegen mit geradliniger Werkzeugbewegung Abkanten im Biegegesenk	2.4.2 Biegen mit rotierender Werkzeugbewegung Abkanten durch Schwenkbiegen		
DIN 8587 Schubumformen	2.5.1 Verschieben		2.5.2 Verdrehen	

Thermoplaste sind im erwärmten Zustand umformbar. Blasen von Folien und Hohlkörpern, Formstanzen und Tiefziehen (bis 1 mm Dicke), Formpressen von GMT (Glasmatten-verstärkte Thermoplaste).

Duroplaste: Die handelsüblichen Pressmassen und vorgetränkten Faserhalzeuge sind warm in einem plastisch verformbaren Zustand. Nach der Formgebung unter Druck und Temperatur sind sie ausgehärtet und nicht mehr umformbar.

Keramik: Keramische Stoffe können nur im Grünzustand (breiig) z.B. aus Strangpressprodukten umgeformt werden, im gesinterten Zustand sind sie nicht umformbar.

3 Trennen DIN 8588 - 8592

Trennen ist Fertigen durch Aufheben des Zusammenhaltes (teilweise oder im Ganzen). Dabei ist die Endform in der Ausgangsform enthalten. Die beiden Gruppen des Spanens bilden den Schwerpunkt. Auch das Zerlegen von zusammengesetzten Körpern (Demontage) gehört dazu.

DIN 8588 3.1 Zerteilen	3.1.1 Scherschneiden Stanztechnik	3.1.2 Messerschneiden	3.1.3 Beißschneiden 3.1.4 Spalten	3.1.5 Reißen 3.1.6 Brechen
DIN 8589-0 9 Teile 3.2 Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden	T1: Drehen T2: Bohren, Senken, Reiben	T3: Fräsen T4: Hobeln, Stoßen	T5: Räumen T6: Sägen T7: Feilen, Raspeln	T8: Bürstspanen T9: Schaben, Meißeln

DIN 8589-0 6 Teile 3.3 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden	T11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug, Rund- und Flächenschleifern	T12: Band schleifen T13: Hubschleifen von Zahnflanken	T14: Honen Zylinderfeinbearbeitung T15: Läppen von Oberflächen	Strahlspanen DIN 8200 T17: Gleitspanen Trommeln
DIN 8590 3.4 Abtragen	3.4.1 Thermisches Abtragen Brennschneiden	3.4.2 Chemisches Abtragen Beizen, Ätzen	3.4.3 Elektrochemisches Abtragen Erodieren	
DIN 8591 3.5 Zerlegen	3.5.1 Auseinandernehmen 3.5.2 Entleeren	3.5.3 Lösen kraftschlüssiger Verbindungen 3.5.7 Ablöten	3.5.4 Zerlegen von durch Urformen gefügten Teilen 3.5.8 Lösen von Klebeverbindungen	3.5.5 Zerlegen von durch Umformen gefügten Teilen 3.5.9 Zerlegen textiler Verbindungen
DIN 8592 3.6 Reinigen	3.6.1 Reinigungsstrahlen Putzstrahlen, Entgratstrahlen, Entzunderungsstrahlen	3.6.2 Mechan. Reinigen 3.6.3 Strömungstechnisches Reinigen	3.6.4 Lösemittel-Reinigen 3.6.5 Chemisches Reinigen	3.6.6 Thermisches Reinigen Sputtern, Laserreinigen

Polymere: Spanen mit HS- oder HM-Werkzeugen (mineralisch gefüllte Duroplaste mit Diamanten). Ausschneiden, Lochen und Trennen flächiger Halbzeuge kann mit Werkzeugen wie bei Metallen durchgeführt werden. Thermoplaste auch mit dem CO₂-Laser-Brennstrahlverfahren, weiche Kunststoffe mit Heizdrahtgeräten

Faserverbundwerkstoffe: Hochdruck-Wasserstrahl-Schneiden (2500 – 4500 bar)

Keramik: Trennende Fertigungsverfahren für keramische Werkstoffe [5]

Fertigungsverfahren	Werkzeug oder Wirkmedium	Anwendungsbeispiele
Spanen		
Trennschleifen	Diamanttrennscheibe	Rohmaterial trennen
Innenloch-sägen	Diamant-Innenloch-trennscheibe	Rohmaterial trennen
Schleifen	Diamantschleifscheibe	Grob- und Feinbearbeitung (z.B. Profil- u. Lagerflächen), Fertigung von Funktionsflächen unter Einhaltung geforderter Toleranzen/Oberflächengüte
Honen	Diamanthonleiste	Verbesserung der Form- und Profilgenauigkeit sowie der Oberflächengüte (z.B. Gleitflächen)
Läppen	SiC-, B ₄ C-, oder Diamantläppgemisch	Verbesserung der Form- und Profilgenauigkeit sowie der Oberflächengüte (z.B. Dichtflächen)
Ultraschall-schwingläppen	Diamant-, Borcarbid-Läppgemisch	Bohrungen und Gravur

Abtragen		
Funken-erodieren	Kupfer-, Graphit- oder Wolframelektrode	geometrisch komplizierte Körper (meist aus SiC-Werkstoffen verschiedener Sorten)
Laser-Trennen	CO ₂ -Laser	Bohren, Trennschleifen

4 Fügen DIN 8593-0/03

Fügeverfahren schaffen Zusammenhalt (deswegen auch Verbinden). Die Einteilung geschieht nach der Technologie des Verbindens: Fügen durch ...

Norm-Blatt	Fügen durch ...	Verfahren (Untergruppen)
Teil 1	4.1 Zusammensetzen	4.1.1 Auflegen, 4.2 Einlegen, 4.1.3 Ineinanderschieben, 4.1.4 Einhängen, 4.1.5 Einrenken, 4.1.6 Federnd Einspreizen
Teil 2	4.2 Füllen	4.2.1 Einfüllen, 4.2.2 Tränkimprägnieren (von Stoffen verschiedener Aggregatzustände und Korngrößen in Hohlkörper und poröse Stoffe)
Teil 3	4.3 An- und Einpressen	Schrauben, Klemmen (Schlauchklemme), durch Pressverbindungen, Schrumpfen (Radreifen), Dehnen (Bolzen in Bohrung), Nageln, Verkeilen (Nabe-Welle), Verspannen (Kegelpresssitz)
Teil 4	4.4 Urformen	4.4.1 Ausgießen (Lagerbuchsen), 4.4.2 Einbetten (Metall in Kunststoff, Draht in Förderbänder), 4.4.3 Vergießen (Seilende in Hülse), 4.4.4 Eingalvanisieren, 4.4.5 Ummanteln (Kabel), 4.4.6 Kitten
Teil 5	4.5 Umformen	4.5.1 Drähte (Flechten, Verdrehen, Verseilen) 4.5.2 Bleche, Rohre, Profile (gemeinsam Fließpressen, Ummanteln, Rohreinwalzen, Aufweiten, Engen, Rundkneten, Einhalsen, Sicken, Bördeln, Falzen, Durchsetzfügen, Clinchen, Verpressen (Seile mit Hülsen)) 4.5.3 Fügen durch Nietverfahren
Teil 6	4.6 Schweißen	4.6.1 Press-Verbindungsschweißen 4.6.2 Schmelz-Verbindungsschweißen
Teil 7	4.7 Löten	4.7.1 Verbindungs-Weichlöten 4.7.2 Verbindungs-Hartlöten 4.7.3 Hochtemperaturlöten
Teil 8	4.8 Kleben	4.8.1 Phys. abbindende Klebstoffe (Nass- Kontakt-, Aktivier- und Haftkleber) 4.8.2 Chem. abbindende Klebstoffe (Reaktionskleber, UP- und EP-Kleber)

Fügen durch Umformen meist für kleinere Wanddicken ausgeführt. Das Schweißen ist auch zum Verbinden großer Wanddicken einsetzbar.

Schmelzschweißverfahren unterscheiden sich durch Wärmequelle (Schmelze, Gas, Lichtbogen, Plasma, Elektronen- und Laserstrahl) und der Art der Abschirmung der Schweißnaht (Elektrodenumhüllung, Schutzgase, Unterpulverschweißung). Zum Aufbau der Schweißnaht wird ein Schweißzusatz benötigt (Schweißstab, Elektrode).

Pressschweißverfahren sind Punkt-, Buckel- und Rollenschweißen für Bleche, Widerstands-, Lichtbogenpress- und Reibschweißen für Profile. Es wird kein Schweißzusatzwerkstoff benötigt.

Fügen von technischer Keramik: Die form- und kraftschlüssigen Fügeverfahren sind wegen der Spannungsspitzen und der damit verbundenen Gefährdung durch Sprödbruch problematisch. Keramik möglichst auf Druck beanspruchen. Es bleiben die stoffschlüssigen Verfahren übrig. Auch hier sind die unterschiedlichen Wärmedehnungen gefährlich.

Löten: Vorheriges Metallisieren (CVD) der Fügeflächen und Löten mit herkömmlichen Loten. Mit weniger Arbeitsgängen kommt das Löten mit Aktivlot aus. Sie enthalten Ti, das mit dem keramischen Werkstoff reagiert (dadurch Haftung mit der metallischen Zwischenschicht).

Schweißen: Diffusionsschweißen und Reibschweißen nach Metallisierung.

5 Beschichten DIN 8580/03

(siehe Abschnitt 11.6)

Beschichten von Kunststoffen: VDI/VDE-Richtlinie 2421 Kunststoffoberflächenbehandlung in der Feinwerktechnik: Blatt 1 mechanische Behandlung, Blatt 2 Metallisieren, Blatt 3 Lackieren, Blatt 4 Bedrucken und Heißprägen.

Metallisieren: galvanisch nach Vorbehandlung mit Säuren, auch durch Aufdampfen im Vakuum. Anwendung für Elektronikteile zur Abschirmung und zur Erhöhung von E-Modul, Oberflächenhärte und Dauergebrauchstemperatur mechanisch belasteter Teile (z.B. Türgriffe).

Lackieren erfordert Vorbehandlung zum Entfernen der Trennmittel mit Lösungsmitteln, z.T. mechanisch, oder Aktivierung von schwer benetzbaren Polymeren (PE, PP, PFTDE, POM) durch Niederdruckplasma. Einbringen von Lackschichten in das Formwerkzeug vor dem Einlegen des Halbzeugs.

6 Stoffeigenschaftändern

siehe Abschnitt 5 (Tabelle 5.1)

In der Neufassung der Norm 8580/03 entfällt die bisherige Grobgliederung der Verfahren nach dem Verhalten der Teilchen in **Umlagern, Einbringen oder Aussondern**.

Literatur:

- VDI-Bericht 410: Werkstoffauswahl für metallische Bauteile
- VDI-Bericht 670: Neue Werkstoffe, Einsatzgebiete heute, Anwendungsmöglichkeiten morgen
- VDI-Bericht 734: Neue Werkstoffe, Verbundstrukturen im Maschinenbau. 1989
- VDI-Bericht 1080: Leichtbaustrukturen und leichte Bauteile. 1994
- VDI-Bericht 1151: Effizienzsteigerung durch innovative Werkstofftechnik. 1995
- Schneider, W.: Werkstoffinnovationen in der Unternehmensstrategie. VDI-B. 1021, S. 1
- [5] Eisfeld, F.: Keramikbauteile in Verbrennungsmotoren. Vieweg Verlag, 1989
- [3] Erlenspiel, K. u. A. Kiewert: Die Werkstoffwahl als Problem der Produktentwicklung (mit 3 Beispielen in VDI-Bericht 797, S. 47...67)
- [6] F. Klocke u. S. Nöken: Rapid Prototyping und Rapid Tooling. VDI-Z spezial V/96, S. 50...54
- Eversheim, W. u. Th. Albrecht: Ökologieorientierte Werkstoffauswahl. VDI-Z, II/96, S. 34
- Herfurth, K.: Einsparung an Material und Energie durch Gussteilfertigung. K + G, 4/1989
- [4] Hubo, R.: Wirtschaftliche Stahlbaukonstruktionen durch Einsatz moderner Stahlprodukte. VDI-B. 1021, S. 125
- Illgner, K.H.: Auswahlkriterien für Werkstoffe und Verarbeitungsverfahren. VDI-Bericht 600.1, S. 283...303
- [1] Rieß, R.: Recycling Technischer Thermoplaste. VDI-Z, II/96, S. 46
- Prange, Schneider „Tailored Blanks“ Werkstoffe für neue Formen der Konstruktion. VDI-B. 1021, S. 45
- Weber, A.: Neue Werkstoffe. VDI-Verlag, 1989

2 Metallische Werkstoffe

2.1 Metallkunde

(→ 1.3.3 Periodensystem)

2.1.1 Vorkommen

Metalle bilden unter den chemischen Elementen die größte Gruppe, es sind etwa 70 unter den 88 natürlich vorkommenden Elementen.

Einige Metalle haben einen beachtlichen Anteil an der Erdmaterie (Wasser, Luft und Erdmantel) Bild 2.1. Die wichtigen Strukturwerkstoffe Eisen, Fe Aluminium, Al und Magnesium, Mg sind dabei vertreten.

Metalle in der Technik: Für die Verwendung als Werkstoffe sind besonders die mechanischen Eigenschaften wichtig. Nur ein kleiner Teil der Metalle genügt den Anforderungen (→).

Metalle unterscheiden sich von anderen Werkstoffgruppen (Polymere, Keramik) durch eine Kombination von Eigenschaften. Typische Metalleigenschaften sind:

- **Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität,**
- **Reflektion** von Licht an oxidfreien Flächen,
- **Festigkeit und Duktilität** (Fähigkeit, plastische Verformungen ohne Bruch zu ertragen),
- **Reaktionsfähigkeit** mit Sauerstoff, Säuren und Salzlösungen (→).

Metalleigenschaften sind eine Folge der besonderen Struktur der **Metallatome** und der **Metallbindung** in Kristallgittern mit einfacher Struktur.

2.1.2 Metallische Bindung

Struktur der Metallatome. Metalle sind im Periodischen System der Elemente (PSE → 1.3.3) im linken Teil angeordnet. Sie folgen jeweils auf ein Edelgas und beginnen eine neue Periode, d.h. sie besitzen eine neue Elektronenschale mit größerem Abstand zum Kern. Die Folgen für Besetzung der Schale und das Verhalten der Elektronen sind:

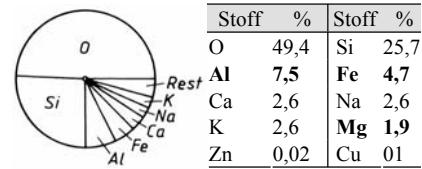


Bild 2.1 Anteil der häufigsten Elemente an der Erdmaterie. Wichtige NE-Metalle liegen um 10-er Potenzen darunter (z.B. Cu) und sind im Diagramm nicht darstellbar. Ihre Gewinnung ist möglich, da sie oft in Erzgängen und -nestern konzentriert sind.

Technische Anforderungen an Metalle

- Ausreichende Festigkeit, Zähigkeit und Eignung für wirtschaftliche Fertigungsgänge
- Ausreichende Korrosionsbeständigkeit bei normalen klimatischen Bedingungen, evtl. höhere Anforderungen durch Seewasser oder Chemikalien

Wirtschaftliche Anforderungen:

- Ausreichendes Vorkommen,
- einfache Aufbereitung der Erze und ihre Reduktion zum Metall,
- mittlere Verarbeitungstemperaturen,
- leichtes Recycling aus den Abfallstoffen.

Hinweis: Nach der Reaktionsfähigkeit wird in edle und unedle Metalle unterteilt (Spannungsreihe der Elemente 12.2.1). Edle Metalle wie z.B. Ag, Au und Platinmetalle sind gegenüber Säuren beständig.

Hinweis: Für die Atomstruktur wird das Atommodell von Bohr und das Periodensystem der Elemente benötigt. Beide gehören zu den chemischen Grundlagen. Das Periodensystem PSE mit weiteren Angaben zu Metallatomen ist unter Bild 1.5 zu finden.

Eine detaillierte Darstellung von beiden steht im Internet unter www.rutherford.de.

- Wenige Elektronen (1...3) in der energiereichsten (Außen)-hülle, die sog. **Valenzelektronen**
- Schwache Bindung an den Kern, die Valenzelektronen werden an Atome mit einer höheren **Elektronegativität EN** (→) abgegeben.
- Niedrige EN-Zahlen

Die EN-Zahlen zweier Elemente und ihre Differenz ΔEN lassen Schlüsse zu über die Art der chemischen Bindung zwischen ihren Atomen.

Tabelle 2.1: EN-Zahl und Bindungsart

EN-Zahl	ΔEN	Bindungsart
< 1,5 Metalle	klein	Metallische Bindung
> 2 Nichtmetalle	Null	Elektronenpaarbindung (kovalente B.)
Metall/ Nichtmetall	groß	Ionenbindung (heteropolare B.)

Metallatome allein erreichen einen Zustand niedrigerer Energie – das **Energieminimum** → wenn sie kleinste, regelmäßige Abstände zueinander einnehmen und ihre Valenzelektronen in die Zwischenräume abgeben, wo sie eine Art Elektronengas bilden. Der Zusammenhalt entsteht aus der Wechselwirkung zwischen Elektronengas und Atomrümpfen:

- Positive Atomrümpfe stoßen sich gegenseitig ab, ebenso die negativ geladenen Elektronen.
- Positive Atomrümpfe und Elektronengas ziehen sich gegenseitig an.

Die Kräfte werden dadurch im Gleichgewicht gehalten, dass die Atomrümpfe eine einfache, regelmäßige Anordnung bilden, das Metallgitter (Bild 2.2). Metallgitter sind Kristallgitter, die sich gegenüber anderen Kristallen (z.B. Oxiden oder Salzen), durch besondere Bindungen der Atome abgrenzen (→ auch Tabelle 1.3).

Bindungskräfte

Im Kristallgitter suchen die Atome einen Abstand einzunehmen bei dem abstoßende und anziehende Kräfte gleich groß werden. Dann ist das Ener-

Elektronegativität EN (nach Linus Pauling). Er berechnete aus den Bindungsenergien chemischer Verbindungen die Vergleichszahlen EN. Sie bewerten die Anziehung, die ein Atom innerhalb einer chemischen Verbindung auf die Elektronen des Partners ausübt.

Im PSE steigt EN in den Perioden von links nach rechts und sinkt in den Gruppen von oben nach unten.

Beispiel: Fluor F hat die höchste EN-Zahl (EN = 4,1). Die Verbindung SF₆, Schwefelhexafluorid, wird als Isoliergas in der Hochspannungstechnik verwendet. Fluor hält die Bindungselektronen so fest, dass das Gas auch im elektrischen Lichtbogen nicht ionisiert (d.h. keine Elektronen abspaltet).

Begriff Energieminimum: Allgemeines Streben der Materie nach einem Zustand niedrigster Energie, vergleichbar mit dem Fließen des Wassers zu Orten niedrigster Höhe.

Die dabei abgegebene Energie taucht dann in Form von Wärme wieder auf (Energieerhaltungssatz), z.B. als

- Kondensationswärme, beim Übergang gasförmig zu flüssig, oder als
- Kristallisierungs wärme beim Übergang flüssig zu fest, oder als
- elektromagnetische Strahlung (Röntgenstrahlung).

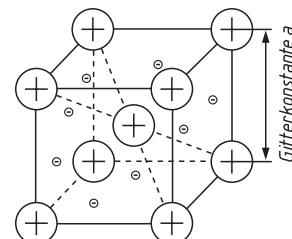


Bild 2.2 Metallgitter aus Atomrümpfen und Elektronen-„Gas“

gieminimum erreicht (Bild 2.3a). Bei Metallen entspricht dieser Abstand l_0 etwa der Summe der Atomradien. Dann wird die Resultierende F_{res} zu null (Bild 2.3a). Jede Änderung von l_0 erfordert eine Energiezufuhr.

Wird der Abstand l_0 durch äußere Kräfte vergrößert, so erreicht die Resultierende F_{res} aus beiden Kräften ein Maximum bei l_{max} und nimmt dann ab. Bei Annäherung der beiden Atome erhöht sich die abstoßende Kraft stärker und steigt steil an. **Folge:** Metalle sind praktisch nicht zusammendrückbar.

Der Energieaufwand zur Trennung der Atome ist die **Bindungsenergie Q** . Ihr Betrag hängt von der Bindungsart ab. Metalle stehen nach den Ionen- und Atombindungen an dritter Stelle (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Bindungsenergien in den Gitterarten

	Gitterart			
	Ionen-	Atom-	Metall-	Molekül-G.
Energie Q kJ/mol	600... 1500	500... 1250	100... 800	< 50
Beispiele	Metall- Oxide	Quarz Diamant	Blei... Wolfram	Eis, festes CO_2

1 mol = $6,02 \cdot 10^{23}$ Teilchen

Die Kräfte zwischen Atomen (Ionen) sind abstandsabhängig, erkennbar an der Steigung der Kurven in Bild 2.3b. Die Steilheit der Kraftkurve entspricht der Stärke der Bindung und lässt Schlüsse auf weitere Eigenschaften zu (Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Bindungskräfte und Eigenschaften

Eigenschaft	steiler Verlauf	flacher Verlauf
Elastizitätsmodul E	groß	klein
Schmelztemperatur T_m ¹⁾	hoch	niedrig
Lin. Längenausdehnung α_l	gering	hoch

¹⁾ Siehe auch Bild 2.4

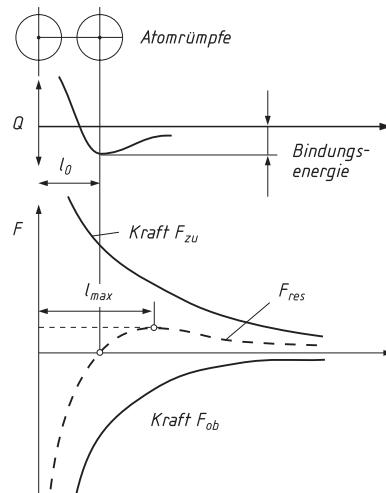


Bild 2.3a Bindungsenergie Q und Kräfte F zwischen den Bausteinen des Kristallgitters

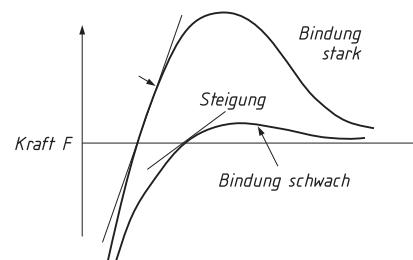


Bild 2.3b Steigung der Resultierenden und Stärke der Bindung

2.1.3 Metalleigenschaften

Verformungsverhalten. Metalle sind, abhängig vom Kristallgittertyp, mehr oder weniger stark plastisch verformbar. Das unterscheidet sie von anderen kristallinen Stoffen und ist eine typische Metalleigenschaft. Sie ist im Abschnitt 2.2 eingehend behandelt.

Schmelztemperaturen liegen in weiten Grenzen je nach Größe der Bindungskräfte. Sie sind Einteilungskriterien für technische Metalle in niedrig-, hoch- und höchstschmelzende.

Zwischen Schmelzpunkt und Wärmeausdehnung besteht ein Zusammenhang (Bild 2.4). Hochschmelzende Metalle (große Bindungskräfte) haben die niedrigsten linearen Ausdehnungskoeffizienten α_1 .

Dichte ρ : Kriterium für Einteilung in Leicht- und Schwermetalle. (Werte in Tabelle 2.6). Die Dichte hängt von der molaren Masse des Metalls und seiner Gitterkonstanten (Volumen der E-Zelle) ab. Berechnung der loschmidt'schen Zahl L (\rightarrow).

$$L = 6,02 \cdot 10^{-23} \text{ Atome/mol}$$

Thermische Ausdehnung, z.B. die lineare Verlängerung eines Stabes beim Erwärmen, wird durch zunehmende Schwingweiten der Atome verursacht. Ihre Größe hängt von den Kräften im Gitter ab. Bild 2.4 zeigt die Beziehung zwischen Schmelztemperatur (Gitterkräfte) und thermischer Ausdehnung. Metalle nehmen darin eine Mittelstellung zwischen Keramik und Polymeren ein.

Leitfähigkeit λ (Tabelle 2.5) für elektrische Ströme und Wärme ist an die Zahl *der* freien Elektronen gebunden, die neben dem Gitterzusammenhalt für den Ladungstransport zur Verfügung stehen. Bester Leiter ist das Silber, bei dem jedes Atom sein Valenzelektron zur Leitung abgibt. Tabelle 2.6a enthält die Angaben für Metalle hoher Leitfähigkeit im Vergleich zu solchen mit niedrigen Leitwerten wie Zn, Fe und Pb.

Die Leitfähigkeit wird gesenkt durch alle Störungen des idealen Gitters, welche die *Beweglichkeit* (freie Weglänge zwischen zwei Zusammenstößen) der Elektronen behindern. Durch Kaltumformung (Zunahme der Versetzungen) sinkt die Leitfähigkeit auf ca. 95 % des geglühten Zustandes.

In Mischkristallen gelöste Fremdatome senken die Leitfähigkeit stark (Tabelle 2.5b, CuZn-Leg.).

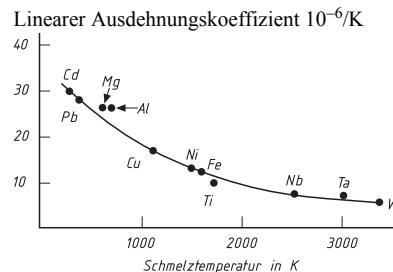


Bild 2.4 Lin. Ausdehnungskoeffizient α_1 und Schmelztemperatur T_m (nach Grüneisen)

Berechnung der theoretischen Dichte:

$$\text{Dichte } \rho = \frac{(\text{Atome/E-Zelle}) \cdot (\text{molare Masse Metall})}{(\text{Volumen E-Zelle}) \cdot L}$$

Tabelle 2.4: Vergleich der Wärmedehnungen

lin. Ausdehnung	Keramik	Metalle	Polymere
$\alpha_1 \text{ in } 10^{-6}/\text{K}$	0,5...10	4,4...30	20...100

Beim Zusammenbau von Bauteilen mit unterschiedlicher Wärmedehnung kommt es zu thermischen Spannungen, deren Betrag von den E-Moduln, dem Temperaturunterschied und der Wärmedehnung abhängt.

Tabellen 2.5: Vergleich von Leitwerten

Elektrisch: κ in $\text{m/mm}^2\Omega$ (Länge eines Drahtes in m mit 1 mm^2 Querschnitt und 1Ω Widerstand).

Thermisch: λ in $\text{W/m}^2\text{K}$.

a) Leitwerte von Metallen, hochrein, bei 20 °C

Metall	Ag	Cu	Au	Al	Zn	Fe
κ	67	64	48	35	18	12
λ	420	386	318	230	112	75

b) Leitwerte von Kupfer, technisch rein, legiert, ausgehärtet, bei 20 °C

Metall	Cu 99,95	Cu Zn5	Cu Zn40	CuSn2,5 ge-gläut	+ Ti + Cr aus-gehärtet
κ	≥ 58	33,3	15,0	4,6	27
λ	≥ 393	243	117	—	—

Hinweis: Wenn die Fremdatome in ausgeschiedene Phasen eingebaut sind, wirken sie weniger stark (Tab. b: CuSn2,5 + Ti + Cr, ausgehärtet).

Temperaturabhängigkeit (Tabelle 2.5c): Bei Erwärmung (Energiezufuhr) erhöht sich die thermische (kinetische) Energie der Atome, die Beweglichkeit der Leitungselektronen wird geringer. Die elektrische Leitfähigkeit reiner Metalle sinkt stärker ($\Delta\kappa = -47,2\%$ bei Cu 99,995), bei Legierungen geringer ($\Delta\lambda = -9,4\%$ bei CuNi9Sn).

Die Wärmeleitfähigkeit reiner Metalle sinkt ebenfalls mit der Temperatur (Cu 99,99), bei Legierungen kann sie dagegen ansteigen (CuNi9Sn).

Tabelle 2.6 Daten technisch wichtiger Metalle (Extremwerte fett gedruckt)

Name Symbol	OZ	KG ¹⁾	Gitter- ¹⁾ konst. a pm	Atom- radius pm	Dichte $\rho^2)$ kg/dm ³	Schmelz- punkt T_m °C	Leitfähigkeit für Strom ⁴⁾ m/ Ω mm ²	Wärme ³⁾ W/mK	Wärme- ausdeh- nung $\alpha^5)$	Elast.- Modul GPa
Aluminium, Al	13	kfz	404	143	2,7	660	37,66	237	23,8	55
Beryllium, Be	4	hdP	229/1,57	114	1,86	1278	23,81	200	11	293
Blei, Pb	82	kfz.	490	175	11,34	327	5,2	35,3	29,2	16
Cadmium, Cd	48	hdP	290/1,83	151	8,64	321	13,3	96,8	30,0	63
Chrom, Cr	24	krz	288	125	7,2	1860	7,7	93,7	8,4	190
Cobalt, Co α - $> 417\text{ }^\circ\text{C}$ β -	27	hdP	250/1,62	125	8,9	1495	16,02	10	18,1	213
Eisen, Fe α - $> 912\text{ }^\circ\text{C}$ γ -	26	krz kfz	287 365	126	7,87	1538	10,29	80,2	12	210 195
Gold, Au	79	kfz	408	144	19,32	1064	42,55	317	14,2	79
Iridium, Ir	77	kfz	384	136	22,65	2446	18,83	147	6,5	530
Kupfer, Cu	29	kfz	361	128	8,95	1085	59,77	401	17,0	125
Magnesium, Mg	12	hdP	320/1,62	160	1,74	649	22,67	156	25,8	45
Mangan, Mn	25	kub	893	124	7,44	1244	0,54	7,8	22,8	201
Molybdän, Mo	42	kfz	315	139	10,28	2633	19,2	138	5,2	336
Nickel, Ni	28	kfz	352	124	8,9	1455	14,6	90,7	13,0	215
Niob, Nb	41	kfz	329	142	8,58	2468	6,9	53,2	7	160
Osmium, Os	76	hdP	273/1,58	135	22,59	3033	12,31	87,6	—	570
Paltin, Pt	78	kfz	392	139	21,45	1768	9,48	71,6	9,0	173
Rhodium, Rh	45	kfz	379	134	12,41	1966	22,17	150	8	280
Silber, Ag	47	kfz	409	144	10,5	961	62,89	429	19,7	81
Tantal, Ta	73	kfz	330	143	16,68	2996	8	57,5	6,5	188
Titan, Ti α - $> 882\text{ }^\circ\text{C}$ β -	22	hdP	295/1,59	144	4,5	1670	7	21,9	8,2	110
		kfz	332							
Vanadium, V	23	kfz	302	132	6,09	1890	5,0	30,7	—	150
Wolfram, W	74	kfz	317	139	19,25	3422	17,69	174	4,5	415
Zink, Zn	30	hdP	266/1,86	134	7,13	419	16,9	116	29,0	94
Zinn, Sn α - $> 13\text{ }^\circ\text{C}$ β -	50	diam								
	tetr	6,49	141	7,29	232	9,09	66	26,9	55	
Zirkon, Zr α - $> 862\text{ }^\circ\text{C}$ β -	40	hdP	323/1,59	160	6,51	1852	2,47	22,7	6,3	90
	kfz	361	87							

Werte beziehen sich auf reine Metalle.

¹⁾ KG, Kristallgitter. kfz.: kubisch-flächenzentriert; krz.: kubisch-raumzentriert; tetr.: tetragonal; hdP.: hexagonal dichteste Packung; bei hexagonalen Metallen ist das Verhältnis der senkrechten Konstante c zu Basis a angegeben (Gitterkonstante Bild 2.7).

²⁾ Dichte ρ bei $20\text{ }^\circ\text{C}$.

³⁾ Wärmeleitfähigkeit λ für Metalle allgemein bei $27\text{ }^\circ\text{C}$.

⁴⁾ Leitfähigkeit κ (kappa) bei $20\text{ }^\circ\text{C}$ entspricht der Länge eines Drahtes von 1 mm^2 Querschnitt und einem Widerstand von $1\text{ }\Omega$. Die SI-Einheit ist S/m (1 Siemens, $\text{Sm} = \Omega^{-1}$).

⁵⁾ Längenausdehnungskoeffizient α_1 $10^{-6}/\text{K}$ bei $0\ldots 100\text{ }^\circ\text{C}$.

e) Leitwertevergleich, Reinkupfer mit Legierung

	Elektrische Leitfähigkeit κ			Wärmeleitfähigkeit λ		
Temp. °C	50	200	$\Delta\kappa\%$	50	200	$\Delta\lambda\%$
Cu 99,995	64,4	34	-47,2	397	384	-1,3
CuNi9Sn	6,4	5,8	-9,4	48	65	+35

Halbmetalle (Metallbindung mit kovalentem Anteil)

Name	Sym- bol	OZ	KG	Gitter- ¹⁾	Radien	Dichte $\rho^2)$	Schmelz- punkt T_m °C	Leitfähigkeit für	Wärme- ausdeh- nung $\alpha^5)$	Elast.- Modul GPa
				konst. a pm	Atom/Ion pm	kg/dm ³	Strom ⁴⁾ m/Ωmm ²	Wärme ³⁾ W/mK		
Antimon	Sb	51	hex	431/2,61	145 89	6,69	632	3	24	10,9
Arsen	As	33	hex	376/2,80	125 69	5,72	subl.	2,8	50	
Bor	B	5	Trig	1012	83 23	2,46	2300		29	
Graphit	C	6	hex	3,51	77 16	3,51	3550	$4,6 \cdot 10^{-3}$	335	7,8
Diamant			diam					—	...2000	
Silicium	Si	14	diam	543	117 26	2,33	1412	$4,4 \cdot 10^{-6}$	150	
Selen	Se	34	hex	436/1,14	116 69	4,82	219		2	
Wismut	Bi	83	hex	455/2,61	155 96	9,8	273	0,93	8	13,4
										34

Internet: www.seilnacht.com/lexikon; www.rutherford.de

2.1.4 Die Kristallstrukturen der Metalle (Idealkristalle)

Allgemeines:

Unter einem Kristall versteht man im Allgemeinen einen frei gewachsenen, mineralischen Körper mit ebenen Flächen. Die äußere Regelmäßigkeit von Kristallen ist eine Auswirkung der inneren Fernordnung, die als *Kristallgitter* bezeichnet wird.

Kristallgitter bestehen aus Bausteinen (Ionen, Atomen oder Molekülen) in regelmäßigen Abständen (Gitterkonstanten), die sich in drei Achsrichtungen periodisch wiederholen.

Bei Metallen sind freigewachsene Kristalle selten. Man findet sie oft gut ausgebildet in den Lunkern großer Gussstücke (Bild 2.5). Sie bilden tannenzweigartig verzweigte Formen und heißen Tannenbaumkristalle oder **Dendriten**.

Im massiven Metall sind Kristalle als **Kristallite** miteinander verwachsen (polykristallin) und sind wegen der Kleinheit meist nur unter dem Mikroskop sichtbar. Vorher muss die Metalloberfläche präpariert werden (→ 14 Werkstoffprüfung). Bild 2.6 zeigt das *Schliffbild* eines Stahlbleches.

Amorphe Metalle (metallische Gläser) sind Legierungen aus Komponenten mit stark unterschiedlichen Atomen in dichtester Packung ohne Ordnung. Sie entstehen in sehr dünnen Quer-

Hinweis: Bleiglanz-Kristalle → Bild in 1.3.4
Mineralien kristallisieren in einer großen Vielfalt von Formen und Farben, z.B. als violette Amethystprismen oder goldene Pyritwürfel.



Bild 2.5 Tannenbaumkristalle (Dendriten) im Lunker eines Gussstückes



Bild 2.6 Schliffbild Stahlblech 200:1

Amorphe Metalle: Durch Einbau von bis 25 % Metalloiden auf Zwischengitterplätzen wird der amorphe Zustand stabilisiert.

schnitten durch Erstarren auf gekühlten Kupferwalzen (Schmelzspinnen) durch schnelle Abkühlung mit 10^6 K/s. und sind thermodynamisch nicht im Gleichgewicht, damit metastabil. Beim Wiedererwärmen bilden sich Kristallite.

Kristallsysteme

Zur Beschreibung der Geometrie dienen die **Gitterkonstanten a, b, c** und **Winkel α, β, γ** der Achsen zueinander. Kristallsysteme werden durch ein herausgeschnittenes Element, die **Elementarzelle EZ** (Bild 2.7), beschrieben. Es ist die kleinste, systematische Anordnung der Bausteine in einem Kristallgitter, die sich in den drei Achsrichtungen ständig wiederholt (\rightarrow Bilder 1.6/1.7).

Beispiele: Fe-P-B, Fe-Ni-Cr-P oder Ni-P als stromlos abgeschiedene Verschleißschichten.

Eigenschaften: hohe Härte (keine Gleitebenen), isotrop, keine Korngrenzen, korrosionsbeständig

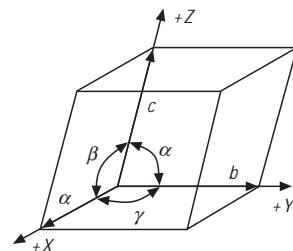


Bild 2.7 Elementarzelle (allgemein) mit Gitterkonstanten a, b, c und Achswinkeln α, β, γ

Tabelle 2.7: Die 7 Kristallsysteme

Kristall-system	Gitter-konstanten	Achswinkel	EZ Körper		Kristall-system	Gitter-konstanten	Achswinkel	EZ Körper
triklin	$a \neq b \neq c$	alle ungleich	Parallel-epiped		hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ ; \gamma \neq 120^\circ$	Sechseck-säule
monoklin	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ ; \beta \neq 90^\circ$	schiefer Quader		tetragonal	$a = b \neq c$	alle 90°	Quader üb. Quadrat
orthorhom.	$a \neq b \neq c$	alle 90°	Quader		kubisch	$a = b = c$	alle 90°	Würfel
trigonal	$a = b \neq c$	alle gleich, nicht 90°	Rhomboïd					

Unterarten: Basis-, flächen- oder raumzentriert, mit Bausteinen mittig im Raum oder in den Flächen. Die meisten Metalle kristallisieren in den o.a. (fett gedruckten) Systemen. Daten für alle Metalle in Tabelle 2.6.

Zur Beurteilung der Kristallgitter sind neben der (den) Gitterkonstanten noch die folgenden Kennzahlen wichtig.

Koordinationszahl KZ: Anzahl der Nachbarn eines Atoms mit gleichem, kleinstem Abstand. In Bild 2.8 sind zwei nebeneinander liegende kfz. E-Zellen abgebildet. Das stark gezeichnete Atom in der Flächenmitte hat zu den 12 Nachbarn in den schraffierten Ebenen den gleichen Abstand.

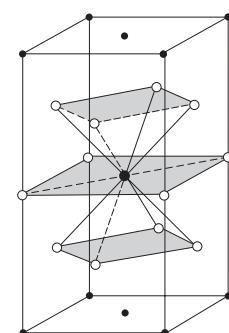


Bild 2.8 Koordinationszahl 12 im kfz-Gitter

Packungsdichte PD ist das Verhältnis vom Volumenanteil der Atome an der E-Zelle zum Volumen der E-Zelle (mit der Annahme, die Atome berühren sich).

Dabei gehört z.B. ein Eckatom des Würfels zu den benachbarten 4 E-Zellen der gleichen Ebene und zu 4 der darüber liegenden Ebene.

Zahlenwerte für die PD der häufigsten Metallgitter sind in Tabelle 2.8 aufgeführt.

Entstehung eines Kristallgitters

Mit einer einfachen Modellvorstellung lässt sich das Entstehen eines Kristallgitters verdeutlichen. Wir schütten gleich große Kugeln in einen Kasten, den wir dabei rütteln (Wärmebewegung). Die Kugeln suchen dann von selbst eine regelmäßige Anordnung (benachbarte Reihen auf Lücke).

Eine dichteste Packung in der **Ebene** liegt dann vor, wenn jede Kugel von 6 anderen umgeben ist (Bild 2.9).

Eine dichteste Packung im **Raum** ergibt sich, wenn die Schichten auf Lücke liegen. Jede Kugel der zweiten Schicht liegt in einer Mulde, die von 3 Kugeln der unteren Schicht gebildet wird. Für die Lage der folgenden dritten Schicht gibt es dann zwei Möglichkeiten, die zu den beiden Systemen mit dichtester Packung führen (→).

Möglichkeit 1: Hexagonales Kristallgitter (hdP) mit **hexagonal dichtester Packung**, (Bild 2.10): Die dritte Schicht liegt senkrecht über der ersten, die Stapelfolge ist 1-2-1-2 usw. Damit ergibt sich als EZ eine **Sechsecksäule**. Die Gitterkonstanten sind Kantenlänge a und Höhe c . Ihr Verhältnis beträgt theoretisch $c/a = 1,633$. Als Koordinationszahl ergibt sich $KZ = 12$.

Einige Halbmetalle, wie z.B. Wismut (Bi) und Antimon (Sb), haben ein Verhältnis c/a über 2,0. Damit sinken Packungsdichte und Metalleigenschaften. Bi und Sb haben hexagonale Schichtgitter (ähnlich Graphit Bild 1.6). Sie erstarren unter Volumenzunahme und mindern das Schwindmaß in Sn- und Pb-Legierungen.

Beispiel: Packungsdichte PD im kfz-Gitter: In einer kfz-E-Zelle ist der Raumanteil der Atome $1/8$ von jedem der 8 Eckatome und $1/2$ von jedem der 6 Zentrumsatome. Das ergibt 4 Atome je E-Zelle. Die Atome berühren sich in der Flächendiagonalen.

$$\text{Diagonale } d = a\sqrt{2} = 4 r_{\text{at}} \Rightarrow a = 4 r_{\text{at}} / \sqrt{2};$$

$$\text{PD} = \frac{4 V_{\text{at}}}{a^3} = \frac{4 \cdot 4/3 \pi r_{\text{at}}^3}{(4r_{\text{at}}/\sqrt{2})^3} = \frac{6,755}{22,628} = 0,74$$

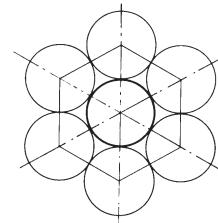


Bild 2.9 Dichteste Kugelpackung in der Ebene

Möglichkeiten der Stapelfolge

	1. Möglichkeit	2. Möglichkeit
Stapelfolge	1,2,1(3) – 1,2,1(3)...	1,2,3,1(4) – 1,2,3,1(4)...
Kristallgitter	hexagonal hdP	Kubisch-flächenzentriert kfz .

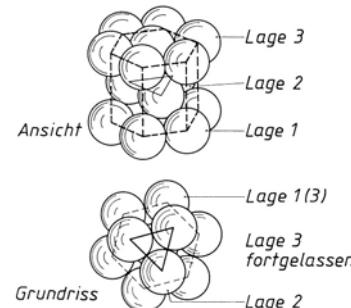


Bild 2.10 Elementarzelle des hexagonal dichten (hdP) Kristallgitters

Möglichkeit 2: Kubisch-flächenzentriertes (kfz)

Kristallgitter (Bild 2.11): Die dritte Schicht liegt nicht senkrecht über der ersten, sondern besetzt die anderen freien Mulden der zweiten Schicht. Die vierte Schicht liegt dann wieder senkrecht über der ersten. Die Stapelfolge ist 1-2-3-1(4) usw. Als Elementarzelle erkennen wir einen Würfel mit 8 Eckatomen, der auf der Spitze steht. In den Flächenzentren ist jeweils ein Atom angeordnet (Bild 2.11), was dem Kristallgitter den Namen gibt.

Es ist die kubisch dichteste Packung mit der Koordinationszahl 12 (Bild 2.8). Die Packungsdichte PD beträgt 0,74.

Kubisch-raumzentriertes (krz) Kristallgitter. Im Würzelzentrum liegt ein Atom, das von den 8 Eckatomen umgeben wird. Die Atome berühren sich in der Raumdiagonalen. Es liegt eine weniger dichte Packung mit KZ = 8 vor (→ Bild 2.12a).

Tetragonale Kristallgitter haben in der Elementarzelle eine quadratische Grundfläche. Die Höhe des darüber errichteten Quaders ist größer (oder kleiner) als die Quadratseite (Bild 2.12b).

Das **kubisch primitive** Gitter (→ 1.3.4) mit einer KZ = 4 hat bei Metallen keine Bedeutung.

Diese idealen Gitterstrukturen werden bei den wirklichen Kristallen nicht erreicht. **Realkristalle** entstehen mit zahlreichen **Baufehlern** (Gitterstörungen). Diese **Kristallfehler** und ihre Auswirkungen sind unter 2.2 näher behandelt.

Polymorphe Metalle haben je nach Temperatur verschiedene Kristallgitter. Die α -Phase existiert bei tiefen Temperaturen. Sie wandelt sich an der Umwandlungstemperatur **A₁ in die β -Phase**, evtl. bei der nächsten Umwandlungstemperatur **A₂ in die γ -Phase** um (Tabellen 2.8 und 2.6).

Tabelle 2.8: Kristallgitter wichtiger Metalle (→ auch Tabelle 2.6)

Gitter	KZ ¹⁾	PD ²⁾	$a = f(r_{\text{at}})^{3)}$	Metalle
kfz	12	0,74	$4 r_{\text{at}} / \sqrt{2}$	Ag, Al, Au, β -Co, Cu, γ -Fe, Ni, Pb, Pt-Metalle
krz	8	0,68	$4 r_{\text{at}} / \sqrt{3}$	Cr, α -Fe, Mo, Nb, Ta, β -Ti, V, W, β -Zr
hdP.	12	0,74	$2 r_{\text{at}}$	Be, Cd, α -Co, Ta, α -Ti, Zn, α -Zr

¹⁾ Koordinationszahl; ²⁾ Packungsdichte; ³⁾ Gitterkonstante a und Atomradius r_{At}

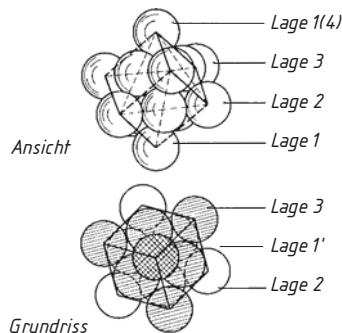


Bild 2.11 Elementarzelle des kfz-Gitters

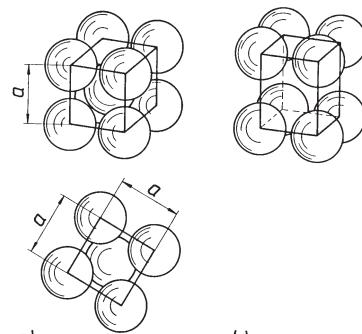


Bild 2.12 a) krz und b) tetragonale E-Zellen

Begriff: polymorph = vielgestaltig

Beispiel: Beim Eisen existieren 4 Phasen von α -Fe bis δ -Fe (→ Bild 3.1). Neben anderen Metallen (Tabelle 2.8) sind auch z.B. Kohlenstoff polymorph. Graphit wandelt sich bei Hochdruck und Hochtemperatur in Diamant um. Ähnlich verhält sich Bornitrid BN (→ 1.3.4).

2.1.5 Entstehung des Gefüges und seine Ausrichtungen (Gefügeuntersuchung → 16.8)

Gefüge ist der Oberbegriff für den Verbund der Kristallite (Kristallkörper) eines vielkristallinen Werkstoffes und wird durch das Schliffbild und andere metallographische Untersuchungen bestimmt. Unter den Gefügebegriff fallen auch weitere Einzelheiten z.B. (→).

Angaben über Begriffe sind im laufenden Abschnitt erläutert:

- Größe und Form der Kristallite (Korngrößen nach ASTM (Tabelle 2.19),
- Korngrenzen und Versetzungen,
- Ausscheidungen, (z.B. durch Wärmebehandlung entstandene, feinstverteilte Phasen),
- Reinheitsgrad, d.h. Anteil von unerwünschten Einschlüssen (Verunreinigungen, Schlaakeneinschlüsse und Gasblasen),
- Eigenspannungen,
- Ausrichtungen der Kristalle (Texturen) oder einzelner Gefügebestandteile.

Primärgefüge entstehen beim *Urformen* (erstmalige Formgebung der formlosen Materie) durch:

- Erstarrung einer Schmelze (Gießen, Bild 2.13),
- Sintern von Pulvern (Pulvermetallurgie, Bild 2.14),
- Kristallisation aus dem Plasmazustand (PVD- und CVD-Verfahren).

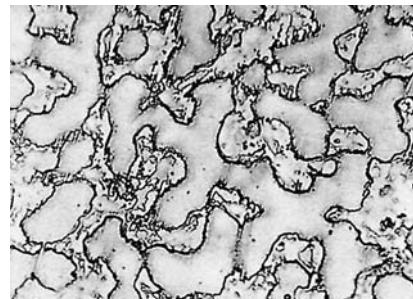


Bild 2.13 Primärgefüge, Gusszustand

Besonderheiten von Gussgefügen sind sog. Tannenbaumkristalle (Dendriten, Bild 2.5), die im Schliffbild erkennbar sind sowie Stängelkristalle (Bild 2.20). Beide Kristallformen verschwinden beim Warmumformen.

Hinweis: Zahlreiche Gefügebilder sind im Internet unter www.metallograf.de zu finden.

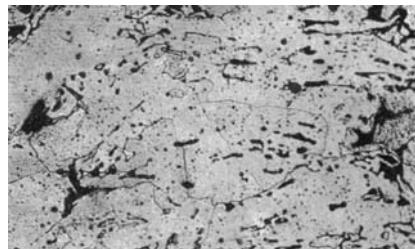


Bild 2.14 Primärgefüge durch Sintern

Sekundärgefüge (Bild 2.15) entstehen aus den Primärgefügen durch den Einfluss der verschiedenen Fertigungsverfahren:

- Umformen der gegossenen Vorprodukte durch Walzen, Strangpressen und Schmieden zu Blech, Band, Profilen und Schmiedeteilen. Dabei erhalten die Kristallite evtl. eine für das Verfahren charakteristische Gestalt (Bilder 2.22 und 2.23).
- Wärmebehandlungen wie Glühen, Vergüten und Aushärteten.



Bild 2.15 Sekundärgefüge, verformt

Erstarrungsvorgang

In einer Schmelze haben die Teilchen eine so hohe Bewegungsenergie, dass sie sich *regellos* bewegen. Es besteht keine *Fernordnung* zueinander. Kristallgitter bestehen nicht mehr oder noch nicht, höchstens in wenigen Atomabständen (Nahordnung) als **Keime** (→).

Zur Abkühlung wird Wärme entzogen, sie verringert die kinetische Energie der Teilchen. Beim Erreichen der Erstarrungstemperatur ist ihre Bewegung so klein geworden, dass die Anziehungskräfte zwischen den Teilchen wirksam werden.

Wachstumbedingungen für Kristalle

- **Kristallkeime**,
- **Unterkühlung** (→) und Abfuhr der entstehenden Kristallisationswärme

Um die Keime lagern sich die träge gewordenen Atome zu einem Kristallgitter an. Der Kristallit wächst. Er wächst solange, bis er an einen benachbarten stößt oder die Schmelze vom Wachstum der Kristallite aufgezehrt ist.

Beeinflussung der Kristallisation:

Für die Korngröße sind **Keimzahl** (Bild 2.16) und **Abkühlgeschwindigkeit** von größter Bedeutung. Keime können von außen zugeführt werden (→). Die Abkühlgeschwindigkeit wird durch Gießquerschnitte, Temperatur und Wärmeleitung der Formen beeinflusst (→ Tabelle).

Unterkühlung tritt an den kälteren Wänden der Form auf, dort beginnt dann das Wachsen der Kristallite. Metallformen kühlen schneller ab als Sandformen, ergeben stärkere Unterkühlung mit Feinkorngefüge und höheren mechanischen Eigenschaften (→ Beispiel).

viele Keime	⇒ Feinkorn
schnelle Abkühlung	
wenige Keime	⇒ Grobkorn
langsame Abkühlung	

Eigenkeime sind noch nicht aufgeschmolzen, winzige Kristallitrete. Sie kommen in allen nicht überhitzten Schmelzen vor und bilden sich in der Nähe der Erstarrungstemperatur von selbst.

Fremdkeime können Schlackenteilchen sein oder Schmelzzusätze, welche die Kristallisation in eine bestimmte Richtung lenken sollen.

Beispiele: Kugelgraphitguss wird mit einer MgNi-Legierung geimpft, um die kugelige Graphitausbildung zu erreichen, AlSi-Legierungen mit Na, um feinkörnige Erstarrung zu erzielen.

Unterkühlung ist die Temperaturdifferenz zwischen der *örtlichen Temperatur* in der Schmelze und ihrem *Erstarrungspunkt*. Sie kann mit einer Trägheit der Teilchen erklärt werden. Mit der Unterkühlung wächst die Wahrscheinlichkeit der Keimbildung.

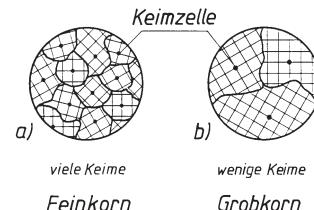


Bild 2.16 Korngröße bei der Erstarrung

Abkühlgeschwindigkeit	Kristallisation
sehr hoch 10^6 K/s	amorphe Strukturen
in Sandformen	normalkörnige Gefüge
in Metallformen	feinkörnige Gefüge
sehr niedrig 10 K/h	Einkristalle → 2.2.1

Beispiel: Legierung EN AC-Al Si7Mg0,3 in Formen aus Sand oder Metall (Kokillen) vergossen (unbehandelt)

Eigenschaft	Einheit	Sand	Kokille
0,2-Grenze $R_{p,0,2}$	MPa	80...140	90...150
Bruchdehnung A	%	2...6	4...9

Kristallisationswärme

Wenn ein Atom aus der ungeordneten Schmelze an ein Kristallgitter anlagert, wird seine Schwingungsenergie sprunghaft kleiner, da es im Gitter nur noch kleinere Schwingbewegungen ausführen kann. Da Energie nicht verloren gehen kann, wird diese Energiedifferenz als **Kristallisationswärme** frei. Sie kann örtlich an einer kleinen Temperaturerhöhung beobachtet werden (Bild 2.17).

Bei sehr langsamer Abkühlung bleibt während der Kristallbildung die Temperatur konstant, obwohl die Wärme weiter durch die kältere Umgebung abgeführt wird. Dadurch ergibt sich bei **reinen Metallen** ein waagerechter Verlauf der Abkühlungskurve bei der Haltepunktstemperatur A_f (Bild 2.17 und 2.18).

Legierungen haben andere Abkühlungskurven (Bild 2.54).

Zusammenfassung:

Für das Wachstum von Kristalliten müssen Keime vorhanden sein. Bei der Kristallisation wird Wärme frei. Diese muss ständig abgeführt werden. Keimzahl und Wachstumsgeschwindigkeit steigen mit der Unterkühlung. Gute Wärmeabfuhr begünstigt die Unterkühlung der Schmelze und die Ausbildung feinkörniger Gefüge.

Isotropie/Anisotropie. In einer E-Zelle sind die Atomabstände verschieden, wie z.B. im kfz.-Gitter in der Flächendiagonalen klein, in Richtung der Würfelkante größer. Für einen Einzelkristall sind deshalb manche Eigenschaften (chemische und physikalische!) von der Richtung abhängig, in der die Beanspruchung oder Messung erfolgt.

Anisotropie:

Eigenschaften sind richtungsabhängig

Isotropie:

Eigenschaften sind nicht richtungsabhängig

In vielkristallinen Metallen liegen die Kristallachsen normalerweise ungeordnet vor, die Unterschiede heben sich auf, sie verhalten sich scheinbar isotrop (quasiisotrop).

Hinweis: Antrieb der Kristallisation ist das Streben nach dem Energieminimum, das durch die Abgabe der Kristallisationswärme erreicht wird. Der kristalline Zustand kann nur durch Zufuhr von Energie (der Schmelzwärme) wieder aufgehoben werden.

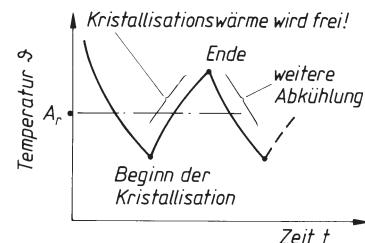


Bild 2.17 Kristallisationswärme

Begriff: Anisotropie ist der Gegensatz von Isotropie (griech.), *isos* = gleich; *tropos* = Richtung

Isotropes Verhalten zeigen amorphe Stoffe:

- Gase, Flüssigkeiten, Glas, Bitumen, Wachs

Anisotropes Verhalten zeigen z.B.

Holz: Festigkeit und Wasseraufnahme ist längs und quer zur Faser verschieden.

Graphit leitet den Strom *in* den Schichten wesentlich besser als *quer* dazu.

Faserverstärkte Werkstoffe besitzen höchste Festigkeiten bei Ausrichtung der Fasern in eine Richtung.

Beachte: Das scheinbar isotrope Verhalten der vielkristallinen Metalle kann durch Ausrichtungen im Gefüge (Texturen, Zeilengefüge) wieder anisotrop werden.

Hysterese. Die Trägheit der Teilchen führt bei schneller Abkühlung zur Unterkühlung, bei schneller Erwärmung zum Überschreiten des Schmelzpunktes, ohne dass Schmelze entsteht.

Schmelz- und Erstarrungspunkt liegen also nur bei unendlich langsamer Abkühlung auf gleicher Temperatur. Das gilt auch für Phasenveränderungen im festen Zustand:

Bild 2.19 zeigt den Einfluss der Abkühlbedingungen auf die Lage eines Haltepunktes A_r bei einem Stahl. Dort findet bei 723 °C eine Gitterumwandlung statt, die bei schneller Abkühlung (Gebläseluft) auf ca. 670 °C, beim Abschrecken in Öl auf ca. 600 °C gesenkt wird. Mit der Lage der Umwandlungs temperatur ändert sich auch der Verlauf der Umwandlung, es entstehen unterschiedliche Gefüge.

Auf dieser Erscheinung beruhen viele Wärmebehandlungsverfahren, wie z.B. das Härt en und Vergüten von Stahl.

Texturen (Ausrichtung von Kristalliten)

Einige Formgebungsverfahren erzeugen Kristallite, die überwiegend in einer Richtung gewachsen oder in eine Vorzugsrichtung gedrängt worden sind. Diese Ausrichtung heißt Textur.

Textur: Gleichrichtung der Kristallachsen. Führt zu anisotropem Verhalten des Werkstoffes.

Bild 2.20 zeigt eine Gusstextur mit langen dünnen Stängelkristallen (kolumnares Gefüge). Sie wachsen senkrecht auf den wärmeabführenden Formwänden. Stängelkristalle verschwinden bei einem nachfolgenden Umformen.

Anwendung: Eine gezielte Stängelkristallisation wird bei Gasturbinenschaufeln aus Ni-Superlegierungen angewandt (→ Beispiel). Die Kristalle verlaufen in Längsrichtung der Schaufeln. Dadurch wird das Korngrenzengleiten bei höheren

Begriff Hysterese: Das Zurückbleiben der Wirkung hinter der Ursache z.B. bei Blattfedern. Ein- und Rückfedern verlaufen wegen der Reibung nach verschiedenen Kennlinien. Auch magnetische Hysterese.

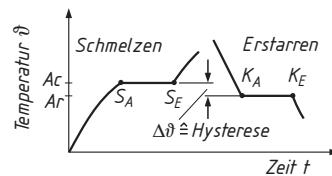


Bild 2.18 Wärme- und Abkühlkurve eines reinen Metalls. Haltepunkte Ac für Erwärmen, Ar für Abkühlen

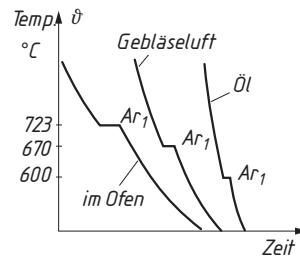


Bild 2.19 Einfluss der Abkühlungsart auf die Lage des Haltepunktes Ar_1 von Stahl 0,6 % C

Texturen können entstehen beim Gießen, Umformen und Rekristallisieren.

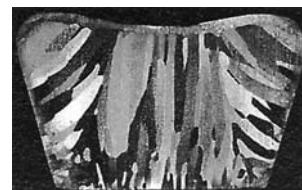


Bild 2.20 Gusstextur in Al-Gussbarren

Hinweis: In Schweißnähten lässt sich eine ähnliche Ausrichtung senkrecht zu den Kanten der verschweißten Bleche erkennen.

Beispiel: Gerichtete Erstarrung von Bauteilen erfolgt nach dem Bridgeman-Verfahren. Sie wachsen unter Vakuum in Kokillen auf wasser gekühlten, absenkbbaren Cu-Platten auf. Im Bereich der Erstarrungszone liegt die Formtempe-

Temperaturen reduziert, die Zeitstandfestigkeit steigt. Eine Weiterentwicklung ist die einkristalline Schaufel.

Die Entstehung einer Walztextur ist in Bild 2.21 schematisch dargestellt. Die Kristallite verformen sich in Richtung des geringsten Widerstands, also senkrecht zum Walzdruck. Dadurch ähnelt ein so verformtes, vielkristallines Metall mit seinen richtungsabhängigen Eigenschaften einem Einkristall.

Ausrichtungen im Gefüge entstehen durch die Schlackenteilchen (Oxide, Sulfide u.a.), die sich trotz aufwändiger Herstellung noch im Metall befinden. Sie werden bei der Warmumformung z.T. gestreckt und durchsetzen als dünne Fasern das Gefüge. Durch diese Schmiedefaser (Bild 2.22), werden längs und quer zur Faser unterschiedliche Eigenschaften beobachtet, ohne dass eine Textur vorliegt. Die Anteile an Schlacken- und Gaseinschlüssen werden durch Vakuumbehandlung stark herabgesetzt. Dadurch gleichen sich die Eigenschaften von Längs- und Querproben an (\rightarrow Zahlenbeispiel). Der Stahl verhält sich nahezu isotrop. Gleichzeitig erhöht sich die Dauerfestigkeit.

Stähle für hochbeanspruchte Werkzeuge (z.B. Druckgießformen, Gesenke) werden ebenfallsvakuumbehandelt.

In Verbindung mit der Schmiedefaser tritt beim Warmumformen auch das Zeilengefüge auf. Dabei kristallisiert eine Phase an die Schlackenteilchen als Keim, während sich die zweite Phase dazwischen anordnet (Bild 2.23).

2.1.6 Verformung am Idealkristall (Modellvorstellung)

Eine wesentliche Eigenschaft der Metalle ist ihre plastische Verformbarkeit, Duktilität genannt.

ratur über der Erstarrungstemperatur, um eine Wandkristallisation zu verhindern. Auch zur Züchtung von Einkristallen (Si, GaAs, Rubine) eingesetzt. Anwendung für Laser und Halbleiter.

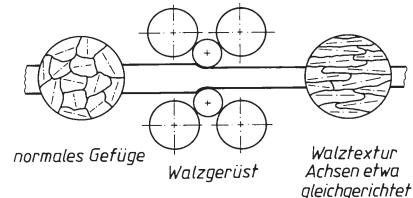


Bild 2.21 Entstehung einer Walztextur

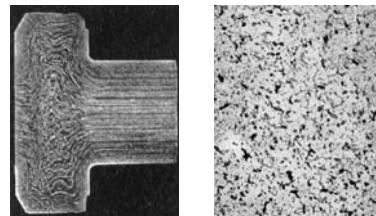


Bild 2.22 Faserverlauf im Kopf einer Schraube, links Längsschliff; rechts Querschliff 100:1

Beispiel: Vergütungsstahl 30CrNiMo8

Erschmelzung		Elektro-Stahl		Vakuum-Stahl	
Richtung	längs	quer	längs	quer	
Bruchdehnung %	15	10	16	15,5	
-einschnürung %	60	32	62	58	
Kerbschlagarbeit J	60	25	75	65	



Bild 2.23 Zeilengefüge von Stahlblech; hell: Ferrit; dunkel: Perlit 200:1

Zur Erklärung der inneren Vorgänge, die sich dabei abspielen, wird hier zunächst als Modell ein idealisierter Kristall, der **Idealkristall** benutzt. Er ist im Gegensatz zum Realkristall ohne Fehler oder Gitterstörungen aufgebaut.

Elastische Verformung. Bei niedrigen Belastungen verformt sich ein Bauteil (z.B. eine Blattfeder) so, dass die Verformung bei Entlastung wieder **zurückgeht**. Konstruktionsteile dürfen nur so, evtl. mit sehr niedrigen elastischen Verformungen, beansprucht werden. Bild 2.24 zeigt diesen Vorgang schematisch an zwei Atomschichten.

Durch die Kraft F wird die obere Lage (Zahlen 1...4) aus den Mulden herausgehoben (Bildteil b). Solange sie noch nicht „über den Berg“ ist, kann sie bei Entlastung wieder in die alte Lage zurückfallen. Erst wenn die Kräfte F groß genug sind, wird die obere Lage „über den Berg“ geschoben. Dann hat eine bleibende (plastische) Verformung stattgefunden (Bild 2.24c).

Plastische Verformung

Modellvorstellung am Idealkristall: Die äußeren Kräfte F auf einen Kristalliten lassen sich nach Bild 2.25, o. in Bezug auf eine Atomschicht in Normalkomponenten F_n und Schubkomponenten F_q zerlegen. Sie erzeugen im Innern Normal- und Schubspannungen.

Bei größeren plastischen Verformungen gleiten Kugelschichten unter der Wirkung der Schubspannungen aneinander vorbei (Bild 2.25 u.). Im unverformten Zustand ist die Oberfläche eben (Ziffern 1...8). Die äußeren Kräfte F verformen den Kristalliten so, dass er länger und dünner wird.

Die verschobenen Atomschichten ergeben an der Oberfläche Stufen mit parallelen Linien (Gleitlinien, Bild 2.26). Die terrassenartig verformte Oberfläche wirkt matt.

Hinweis: Im **Realkristall** sind die Verformungsvorgänge komplizierter, sie werden im Abschnitt 2.2 behandelt.

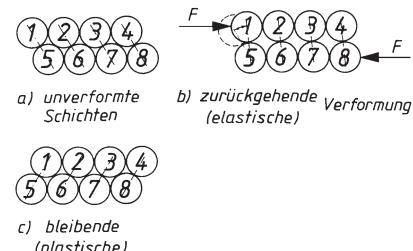


Bild 2.24 Elastische und plastische Verformung von Atomschichten, schematisch

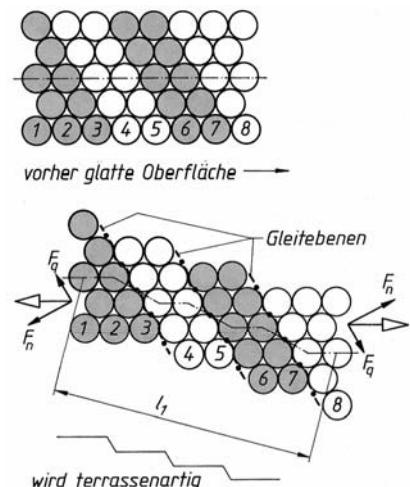


Bild 2.25 Gleiten am Einkristall, schematisch



Bild 2.26 Gleitlinien an der Oberfläche eines verformten Metalls

Dieses Gleiten findet auf **Gleitebenen** statt. Sie liegen zwischen Atomschichten mit dichtester Packung, weil dort der Schichtabstand groß ist und das „Herausheben über den Berg“ eine kleine kritische Schubspannung (\rightarrow) erfordert. Bei Schichten mit größeren Atomabständen sinken die oben liegenden Kugeln tiefer in die untere Schicht ein. Das ergibt größere kritische Schubspannungen.

Die kleinste kritische Schubspannung innerhalb eines Gitters liegt in den sog. Gleitebenen vor, weil dort ist die „Reibung“ niedrig ist.

Gleitebenen sind zunächst die Gitterebenen zwischen den dichtest gepackten Kugelschichten im hdP- und kfz-Gitter (Bild 2.27).

HdP-Gitter: 1 Basisebene und alle parallel dazu liegende Ebenen. Die Seitenflächen sind weniger dicht gepackt.

Kfz-Gitter: 4 Tetraederflächen (1 davon ist eingezeichnet).

Gleitrichtungen ergeben sich aus dem geringssten Energieaufwand unter Erhaltung der Schichtfolge. Bild 2.28 zeigt eine Tetraederebene im kfz-Gitter. Gleitrichtungen sind die Flächendiagonalen (1). Bei Verschiebungen in den Richtungen (2) ergeben sich Stapelfehler (Bild 2.39).

Gleitebenen werden nur dann einer Schubspannung ausgesetzt, wenn sie unter einem Winkel $< 90^\circ$ zur äußeren Kraftrichtung liegen (Bild 2.29). Bei 45° zur Zugrichtung erreichen die Schubspannungen ein Maximum (\rightarrow Hinweis). Dort beginnt die plastische Verformung evtl. auch in weniger dicht gepackten Ebenen.

Gleitebenen und Gleitrichtungen bilden das **Gleitsystem** mit den Gleitmöglichkeiten. Die verschiedenen Kristallsysteme unterscheiden sich darin stark (Tabelle 2.9).

Beispiel: Die kritische Schubspannung τ_0 für den Idealkristall liegt theoretisch bei 0,1 Schubmodul G , z.B. für Fe: $\tau_{th} = 8000 \text{ MPa}$, im Realkristall wegen der Kristallfehler sehr viel niedriger (\downarrow).

Metall/Gitter	Cd, hdP	Cu, kfz	Fe, krz
τ_{th} MPa	200	4200	8000
τ_0 MPa	0,5	0,6	14

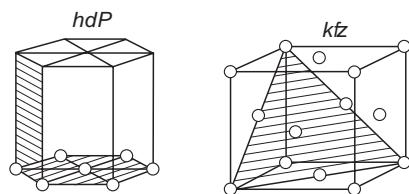


Bild 2.27 Gleitebenen in den beiden dichtest gepackten Metallgittern

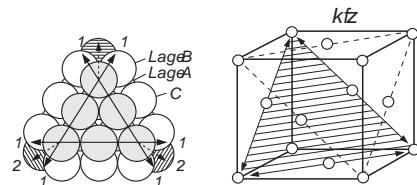


Bild 2.28 Gleitrichtungen im kfz-Gitter

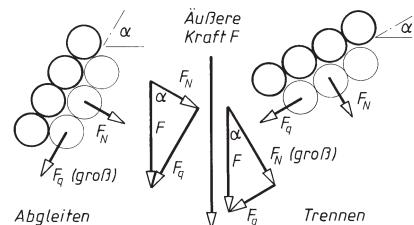


Bild 2.29 Lage der Gleitebenen zur Richtung der äußeren Kraft

Hinweis: Herleitung bei Bild 14.12

Gleitmöglichkeiten sind das Produkt aus der Anzahl der Gleitebenen und Gleitrichtungen in der EZ. Tabelle 2.9 vergleicht die Kristallsysteme unter diesen Gesichtspunkten.

Die **kzf-Metalle** besitzen mit den 4 Tetraederflächen sehr viele Gleitebenen, die sich unter 60° schneiden.

Die **krz-Metalle** haben insgesamt mehr Gleitsysteme, aber mit weniger dicht gepackten Ebenen, in denen eine größere Schubspannung erforderlich ist (Bild 2.30). Ihre Verformbarkeit ist gut bei größerem Energieaufwand.

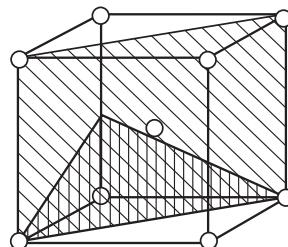


Bild 2.30 Gleitebenen im krz-Gitter

Tabelle 2.9: Vergleich der Kristallgitter und Gleitsysteme

Gitter	kub. -flächenzentriert kzf	kub. -raumzentriert krz	hex. dichteste Pckg. hdP
Hauptgleitebenen	4 Tetraederflächen (und alle dazu parallelen) $\{111\}^1)$	keine	1 Basisebene (und alle dazu parallelen) $\{0001\}$
weitere mögliche Gleitebenen	Würfelaufßenflächen $\{110\}$	6 Flächen mit der Raumdiagonalen $\{110\}$ dazu $12 \{112\} + 24 \{123\}$	Prismenaufßenflächen $\{1010\}$
Gleitrichtungen	3 mal in Richtung der Flächendiagonale $\{110\}^1)$	2 mal in Richtung Raumdiagonale $<111>$	3 Richtungen unter 120°
Gleitsysteme	12 mit kleinen Kräften sehr stark verformbar	12 (+ 12 + 24) mit großen Kräften stark verformbar	3 mit niedrigen Kräften nur gering verformbar

¹⁾ Die in Klammern gesetzten Ziffern sind die Miller'schen Indizes, die eine mathematische Behandlung der Gittergeometrie ermöglichen. Ihre Herleitung ist in der weiterführender Literatur zu finden. $\{111\}$ -Klammern: Gesamtheit der Tetraederflächen, $<110>$ -Klammern: Gesamtheit der Flächendiagonalen

Zwillingsbildung ist eine weitere Möglichkeit der plastischen Verformung. Hier klappen Teile des Kristalliten unter Schubspannungen in eine spiegelbildliche Lage um. Bild 2.31 vergleicht schematisch das Gleiten mit der Zwillingsbildung.

Im Schliffbild sind Zwillinge durch parallele Linien zu erkennen (Bild 2.15). Die Zwillingsbildung ist besonders für hexagonale Metalle (Mg, Ti) mit ihren begrenzten Gleitsystemen eine zusätzliche Verformungsmöglichkeit.

Bei höherfesten Stahlblechen zum Kaltumformen wird die Zwillingsbildung zur Verfestigung benutzt (TWIN-Effekt → 4.5.2).

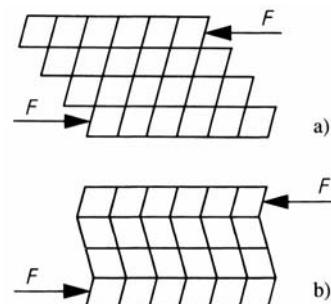


Bild 2.31 a) Gleiten und b) Zwillingsbildung

Kaltverfestigung (am Idealkristall)

Eine steigende Verformung des Metalls erfordert immer größere Kräfte, seine Härte nimmt zu. Anscheinend steigt die „innere Reibung“. Am Ende sind alle Gleitmöglichkeiten erschöpft. Weitere Versuche, das Metall zu verformen, führen zu Rissen und Bruch.

Die Verfestigung durch Umformen wird als Kaltverfestigung (auch Verformungsverfestigung) bezeichnet. Sie tritt auf, wenn Metalle bei niedrigen Temperaturen verformt werden.

Kaltverfestigung ist der Anstieg von Härte und Festigkeit beim Kaltumformen. Dabei sinkt die restliche Kaltumformbarkeit, der Werkstoff wird spröder.

Sie tritt nur bei Metallen mit höheren Schmelzpunkten auf. Blei, Zinn, Zink u.a. verfestigen nicht.

Verformungsgrad ε ist allgemein die prozentuale Änderung des Querschnittes im Verhältnis zum Ausgangsquerschnitt.

Beim Walzen von Blech oder Band ist es die prozentuale Dickenänderung Δs (\rightarrow).

$$\varepsilon = \frac{\text{Querschnittsänderung } \Delta A}{\text{Ausgangsquerschnitt } A_0} \times 100 \%$$

Eigenschaftsänderungen

Bild 2.32 zeigt den Einfluss steigender Verformung auf Rein-Al und eine Legierung AlMn. Die Zugfestigkeit kann durch starke Kaltumformung etwa verdoppelt werden. Die weitere Verformbarkeit (hier als Bruchdehnung A) sinkt jedoch steil ab. Das ist charakteristisch für die Kaltverfestigung.

Der Kurvenverlauf zeigt: Die Legierung besitzt im unverformten Zustand eine höhere Zugfestigkeit (Mischkristallverfestigung) aber kleinere Dehnung als das reine Al. Im Verformungsreich zwischen 20...60 % liegen beide Werte jedoch über denen des Reinmetalles.

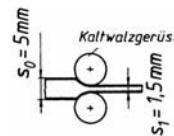
Beispiel: Cu-Rohr lässt sich leicht biegen. Zum weiteren Nachbauen ist bereits ein größerer Kraftaufwand nötig, der Werkstoff ist härter geworden. Jedes Nachbiegen verstärkt diese Erscheinung bis zum Versprüden. Weitere Verformung führt zum Bruch.

Mit der Zunahme der Gitterfehler (und der Spannungen) ändern sich nicht nur die mechanischen, sondern weitere chemisch-physikalische Eigenschaften (\downarrow):

Korrosionsbeständigkeit: Die stark verformten Bereiche sind *unedler* als ihre Umgebung, sie sind unbeständiger und werden korrodiert.

Elektrische Leitfähigkeit beruht auf der Beweglichkeit der Leitungselektronen. Durch Zunahme der Gitterfehler und Spannungen sinkt sie bis auf 95 % gegenüber dem unverformten Zustand.

Verformungsgrad, Beispiel: Blech von 5 mm Dicke wird auf 1,5 mm abgewalzt.



$$\text{Verformungsgrad } \varepsilon = \frac{\Delta s}{s_0} 100\% = \frac{3,5 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} 100\% \\ \underline{\varepsilon = 70\%}$$

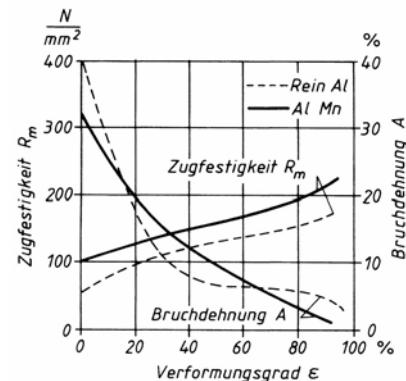


Bild 2.32 Einfluss des Verformungsgrades auf die mechanischen Eigenschaften

Bedeutung der Kaltverfestigung

Die Verfestigung des vorher weichen, dehnbaren Werkstoffes beim Umformen hat für z.B. Tiefziehbleche große Bedeutung (→).

Kaltgeformte Bauteile, z.B. durch Fließpressen hergestellte, sind fester als der Ausgangswerkstoff und haben auch höhere Dauerfestigkeit als spanend hergestellte (z.B. gerollte Gewinde). Die Kaltverfestigung der Randschicht (Kerben) von Bauteilen, z.B. abgesetzten Wellen, erhöht deren Dauerfestigkeit.

Dünnwandige Produkte wie Blech, Band und Profile aus NE-Metallen und Legierungen, deren Festigkeit meist nicht durch Härtung und Vergüten gesteigert werden kann, erhalten durch das Umformverfahren (Kaltziehen, -walzen, usw.) die gewünschte Festigkeit.

Nach Normen sind steigende Festigkeitsstufen lieferbar (alte Bezeichnung viertelhart, halbhart, vollhart (→ Tabellenbeispiele)). Bezeichnungen für Al nach DIN EN 515 durch Buchstaben und Ziffern.

Mit steigender Festigkeit sinkt die Dehnbarkeit stark ab, ein Rückglühen (Kristallerholung) verbessert die Duktilität (→ Beispiel).

Das Beseitigen der Kaltverfestigung durch Rekristallisation ist unter 2.4.2 behandelt.

Karosseriebleche sollen im Werkzeug eine hohe Dehnbarkeit aufweisen, aber als Fertigteile eine hohe Streckgrenze als Widerstand gegen Einbeulen besitzen. Hier sind Werkstoffe mit starker Kaltverfestigung erwünscht (→ 4.5.2).

Beispiele: Bei fließgepressten Schrauben kann durch die Kaltverfestigung evtl. ein Vergüten eingespart werden.

Hinweis: Mechanische Oberflächenhärtung durch Kaltwalzen oder Kugelstrahlen zur Steigerung der Dauerfestigkeit (→ Abschnitt 5.6.6)

Beispiel: Blech Al-Legierung EN-AW-Al Mn1

Zeichen	Zustand	R_m	$R_{p0,2}$	A_{50}
F	Herstellungs-zustand	90... 130	35	21
H12	kaltverfestigt (viertelhart)	115... 155	85	5
H22	kaltverfestigt + rückgeglüht (viertelhart)	115... 155	75	8
H18	kaltverfestigt (vollhart)	185	165	2

Werte für Blech 1,5...3 mm dick; Anhängesymbole → Tabellen A.16 + A.18

Beispiel: Im Zustand H22 wird durch Rückglühen (Kristallerholung) die Bruchdehnung von 5 auf 8 erhöht, die Streckgrenze sinkt von 85 auf 75 gegenüber dem Zustand H12.

2.2 Struktur und Verformung der Realkristalle

2.2.1 Kristallfehler

Bei idealen Kristallen sind alle Gitterpunkte besetzt, die Bausteine haben kleinste Abstände und damit das Energieminimum. Reale Metalle bestehen aus Kristalliten mit Baufehlern, die zu Gitterverzerrungen (Aufweitungen und Verdichtungen) führen und damit einen *höheren* Energiezustand haben.

Alle Gitterfehler erhöhen die Kristallenergie.

Kristallisation: Beim Erstarren von Druckguss erfolgt die Kristallisation innerhalb Sekunden. In dieser Zeit muss eine große Zahl von Atomen seinen Gitterplatz finden.

Ein Kristall von 1 cm^3 Volumen enthält etwa 10^{23} Atome.

Wenn die Kristallbildung an den kälteren Formwänden beginnt, ist es, als ob ein dichter Hagelschauer auf die sich bildenden Kugelschichten niedergeht.

Gitterfehler entstehen bei der Kristallisation (\rightarrow) durch die ständigen Schwingungen der Atome (Wärmebewegung), Energiezufuhr durch Verformungsarbeit oder energiereiche Strahlen. Hilfreich ist die Einteilung nach der *Ausdehnung* der Fehler, ihrer Dimension, in ein-, zwei-, oder dreidimensionale.

a) **Punktförmige Fehler**, Bild 2.33, (auch null-dimensionale), sind unbesetzte Gitterplätze, sog. **Leerstellen**, sowie die **Fremdatome**. Leerstellen enthält jeder Kristall. Ihre Konzentration, die Leerstellendichte, erhöht sich bis zum Schmelzpunkt auf etwa 0,01 %.

Leerstellen ermöglichen die Diffusion.

Fremdatome erhöhen die Festigkeit (Mischkristallverfestigung).

Durch energiereiche Strahlen können Atome von Gitterplätzen auf einen Zwischengitterplatz verschoben werden, wobei eine Leerstelle zurückbleibt.

b) **Linienförmige Fehler** (eindimensionale) sind die **Versetzungen**. Zum Verständnis ihrer Wirkungsweise werden sie zunächst in zwei Grundtypen eingeteilt, die meist gemischt auftreten.

Stufenversetzungen (Bild 2.34 und 2.35) sind tunnelartige Hohlräume, die durch einen Teilungsfehler entstehen. Versetzungslinien liegen senkrecht zur Schubrichtung mit dem Gleitschritt b . Die dargestellte Versetzung ist positiv (\perp). Bei negativen Versetzungen (T) endet die überschüssige Schicht von unten an der Gleitebene.

Bild 2.35 zeigt schematisch das Entstehen einer Stufenversetzung durch Schubkräfte. Sie drücken oberhalb des waagerechten Schnittes (der Gleitebene) die senkrechten Atomschichten zusammen (Kompressionszone), sodass dem unteren Teil eine Schicht zu viel gegenübersteht. Der untere Teil wird gedehnt (Dilatationszone).

Als Folge der Spannungen ziehen sich ungleiche Versetzungen an und können sich bei höheren Temperaturen auslöschen.

Nur bei langsam wachsenden Einkristallen sind fast fehlerfreie Strukturen herstellbar. Sie werden mit einem Einkristallkeim unter Drehung aus einer Schmelze langsam mit Geschwindigkeiten von wenigen mm/h abgezogen (Czochralski- oder Bridgeman-Verfahren).

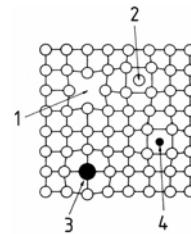


Bild 2.33 Punktfehler im kubisch-einfachen Gitter aus Atomen. 1 Leerstelle; 2 Atom A auf Zwischengitterplatz; 3 Austausch-Atom (größer); 4 Einlagerungsatom (kleiner)

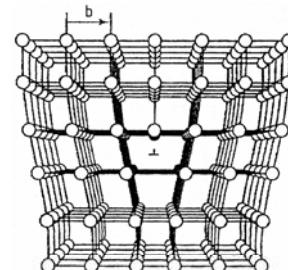


Bild 2.34 Stufenversetzung im kubisch einfachen Gitter

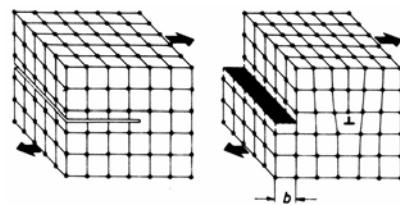


Bild 2.35 Entstehen einer Stufenversetzung durch Schubkräfte (Macherauch)

Schraubenversetzungen (Bild 2.36). Durch Gleiten eines Segmentes *parallel* zur Versetzungslinie entsteht eine rampenartige Fläche um die Versetzungachse (Schraubenachse), die linke Seitenfläche wird durch das Abscheren zum Teil einer Schraubenfläche (Wendeltreppe).

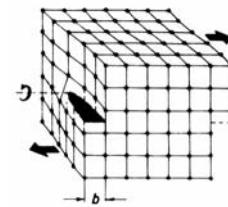


Bild 2.36 Schraubenversetzung (Macherauch)

Meist entstehen kombinierte Versetzungen aus beiden Arten, sodass die Versetzungslinien gekrümmmt sind (Bild 2.37). Sie durchsetzen in hoher Zahl die Kristallite und enden an den Oberflächen, wo sie metallographisch nachgewiesen werden können.

Nachweis von Versetzungen. Beim Ätzen werden die verspannten und damit unedleren Bereiche um die Austrittsstelle angegriffen. Es entstehen Ätzgrübchen.

Bedeutung der Versetzungen:

- Der innere Widerstand gegen Abgleiten sinkt (kleinere kritische Schubspannungen).
- Ihre Beweglichkeit ist die Grundlage für die plastische Verformung.
- Kaltverfestigung beruht auf der Neubildung weiterer Versetzungen.

c) Flächenförmige Fehler (Bild 2.38, zweidimensionale) sind die Korngrenzen, die Bereiche zwischen den Kristallkörnern eines vielkristallinen Metalls mit ungleich gerichteten Kristallachsen. Dort ist die Regelmäßigkeit gestört.

Korngrenzen unterbrechen die Gleitvorgänge, d.h. die Versetzungslinien können sie nicht überwinden und stauen sich. Damit behindern sie das Wandern der nachfolgenden Versetzungen und erhöhen damit den Kraftbedarf zur weiteren Verformung. Das ist eine Ursache der Kaltverfestigung.

Cluster sind dünne flächige Ansammlungen von Legierungsatomen (→ 5.4.2).

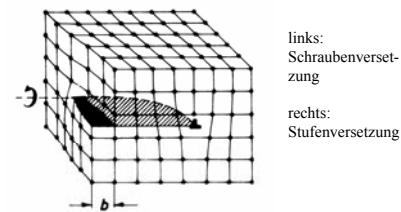


Bild 2.37 Kombinierte Versetzung

Die Länge der Versetzungen je Volumeneinheit wird als **Versetzungsdichte** bezeichnet. Sie nimmt mit der Kaltumformung zu. Die Versetzungsdichte reicht von $10^6 \text{ cm}/\text{cm}^3$ geglättet bis zu $10^{12} \text{ cm}/\text{cm}^3$ nach starker Kaltumformung.

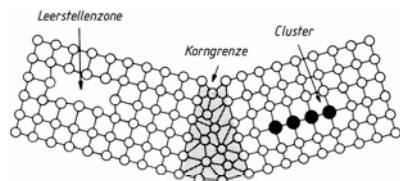


Bild 2.38 Zweidimensionale (Flächen-)Fehler (Macherauch)

Hinweis: Bei Kristalliten mit ungleichen Kristallgittern werden Korngrenzen auch Phasengrenzen genannt (→ Bild 2.40).

Stapelfehler (Bild 2.39) sind Bereiche mit einer anderen Stapelfolge wie die Umgebung (z.B. ABAB-Folgen (hex.), im kfz-Gitter mit ABCABC-Folgen). Sie entstehen z.B. bei der Kristallisation, wenn eine Schicht von außen nach innen wächst. Beim Zusammenwachsen entstehen Teilversetzungen.

Während links die Stapelfolge ABC (kfz) vorliegt, ist sie im rechten Teil ABA (hex.). Stapelfehler unterbrechen die Gleitebenen, behindern damit die Gleitvorgänge.

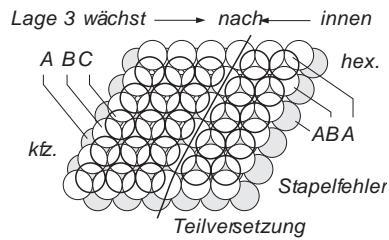


Bild 2.39 Entstehung einer Teilversetzung mit Stapelfehler

d) Dreidimensionale Fehler (Bild 2.40) sind kleinste Körper mit anderer Struktur als die Matrix. Sie bleiben als Verunreinigungen beim Erschmelzen zurück oder werden gezielt durch Behandlungsverfahren zur Eigenschaftsänderung eingebaut (\rightarrow 2.3.4 Teilchenverfestigung).

Wechselwirkungen: Gitterfehler können aufgrund des umgebenden Spannungsfeldes (Zug- und Druckspannungen) miteinander reagieren. Beim Umformen eingebrachte Energie und/oder thermische Aktivierung begünstigen diese Vorgänge. Tabelle 2.10 gibt eine Übersicht (Vertiefung in der weiterführender Literatur).

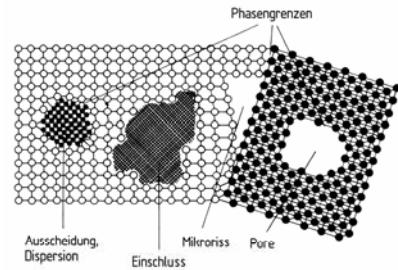


Bild 2.40 Dreidimensionale (Volumen)-fehler (Macherauch)

Tabelle 2.10: Zusammenfassung, Gitterfehler: Entstehung und Wechselwirkungen

Dim.	Bezeichnung	Entstehung	Reaktion mit anderen Fehlern bei Kaltumformung oder Erwärmung (thermischer Aktivierung)
0	Leerstellen	Entropiestreben, Anzahl steigt mit der Temperatur	Leerstellen ziehen Fremdatome an, sie ermöglichen das Klettern einer Stufenversetzung in eine parallele Gleitebene
0	Fremdatome	Verunreinigungen, Legieren	werden von Versetzungen und Leerstellen angezogen
1	Versetzung	fehlerhaftes Kristallwachstum, plastische Verformung erhöht die Versetzungsdichte	ungleichartige Versetzungen in <i>einer</i> Gleitebene können sich auslöschen, gleichartige sich blockieren. Aufspaltung in zwei Teilversetzungen (kleinere Gleitschritte)
2	Korngrenze	Kristallisation aus der Schmelze, Rekristallisation bei $T > 0,4 T_m$	Behindert das Wandern von Versetzungen, es kommt dort zum Stau, d.h. höherer Versetzungsdichte
2	Stapelfehler	fehlerhaftes Kristallwachstum, Ansammlung von Leerstellen	unterbrechen Gleitebenen, sind selbst nicht gleitfähig
3	kohärente Ausscheidungen inkohärente Teilchen	Ausscheidung in übersättigten Mischkristallen (metastabil). (\rightarrow 5.4.2) Pulvermetallurgisch oder innere Oxidation	Versetzungen müssen das Hindernis abscheren oder umgehen und bilden dabei neue Versetzungen

2.2.2 Verformung der Realkristalle und Veränderung der Eigenschaften

Modellvorstellung im Realkristall. Die wirklichen kritischen Schubspannungen sind um Zehnerpotenzen kleiner als der theoretische Wert beim Gleiten ganzer Atomschichten (Tabelle 2.11). Die Ursache sind die Versetzungen.

Die modellhafte Erklärung der Gleitvorgänge in Gleitebenen unter bestimmten Gleitrichtungen kann beibehalten werden. Sie wird durch die Existenz der Versetzungen nur abgewandelt:

Idealkristall: Schrittweises Gleiten ganzer Atomschichten,

Realkristall: Schrittweises Wandern von Atomreihen an den Versetzungslinien.

Bild 2.41a zeigt das Wandern einer Stufenversetzung unter Wirkung einer Schubspannung τ . Dabei wandert die Störung nach rechts und erzeugt unter Auflösung eine Verschiebung um einen Schritt b . Der Vergleich mit dem Ausstreichen einer Teppichfalte ist in Bild 2.4b dargestellt.

Tabelle 2.11: Vergleich zwischen theoretischen (τ_{th}) und wirklichen (τ_0) kritischen Schubspannungen

Metall/Gitter	Cd, hdP	Cu, kfz	Fe, krz
Ideal τ_{th} MPa	200	4200	8000
Real τ_0 MPa	0,5	0,6	14

(nach Guillary, am Einkristall gemessen)

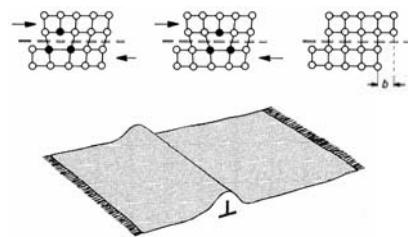


Bild 2.41 a) Wandern einer Stufenversetzung
b) Wandern einer Teppichfalte

2.3 Verfestigungsmechanismen

Die im Realkristall vorkommenden Kristallfehler führen alle zu einer Verfestigung, d.h. zu einer Erhöhung der Spannung, bei der die Versetzungen beginnen zu wandern (kritische Schubspannung). Praktisch bedeutet das eine Erhöhung der Streckgrenze. Wichtig ist, dass Wandern zu erschweren, aber nicht unmöglich zu machen. Damit verbleibt eine gewisse Duktilität, die dem Werkstoff eine der Beanspruchung angepasste Zähigkeit gibt. Das ist für Umformung und für die Dauerfestigkeit (Kerbwirkung) wichtig. Um hohe Festigkeiten zu erzielen, werden meist mehrere der Mechanismen kombiniert (→ Bild 2.44 und Abschnitt 4.3.1). Weitere Möglichkeiten sind unter Verbundwerkstoffe behandelt.

2.3.1 Kaltverfestigung (auch Verformungs- oder Versetzungsverfestigung)

Für die Fertigungstechnik ist der Fließbereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve interessant, der sich von oberhalb der Streckgrenze bis zum Beginn der Einschnürung erstreckt (→ Bilder zum Zugversuch). Dafür existieren besondere Fließkurven, mit denen der steigende Kraft- und Energiebedarf für die Umformung berechnet werden kann. Fließkurven geben die Formänderungsfestigkeit k_f über den Umformgrad φ an (→ Begriffe + Bild 2.42).

(→ Bilder 14.9)

Begriffe zur Kaltverfestigung:

Formänderungsfestigkeit k_f ist die wahre Fließspannung in $N/mm^2 = \text{MPa}$ (auf den Augenblicksquerschnitt bezogen).

Umformgrad φ : $\varphi = \ln(1 + \varepsilon)$ ist die auf die Momentanlänge bezogene logarithmische Formänderung (durch Integration der Diff.-Quotienten $\Delta L/L$).

Fließkurven (Bild 2.42) zeigen den Verlauf der Formänderungsfestigkeit k_f (Fließspannung) mit steigendem Umformgrad φ . Die Steigung der Kurven entspricht der Verfestigungsneigung. Sie hängt vom Gittertyp ab und wird auch durch LE beeinflusst.

Beispiel: Beim austenitischen Stahl XCrNiTi18 8 entsteht während der Gleitvorgänge Martensit und verstärkt die normale Kaltverfestigung.

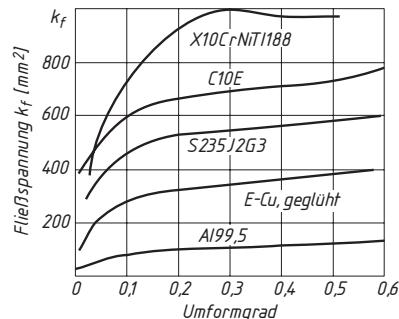


Bild 2.42 Fließkurven einiger Metalle bei RT

Verfestigungsexponent n

Die Fließkurven von Kaltumformstählen und AL-Legierungen können im Bereich von $\varphi = 0,2 \dots 1$ im doppellogarithmischen Netz angenähert durch eine Gerade mit der Steigung n dargestellt werden. Dabei ist n der Verfestigungsexponent.

Mit ε_{gl} als Gleichmaßdehnung aus dem Zugversuch eingesetzt, ergibt sich der **Verfestigungsexponent n** zu

$$n = \ln(1 + \varepsilon_{gl})$$

Zahlenwerte → Tabelle 2.12

2.3.2 Mischkristallverfestigung

Reinmetalle bestehen aus gleichgroßen Atomen, die Gleitebenen ihrer Kristallite sind eben. Punktformige Fehler führen zu Unebenheiten. Fremdatome mit kleinerem Atomradius erzeugen quasi „Mulden“, solche mit größerem „Höcker“. Das Kristallgitter ist verzerrt.

Je nach Größe der Atome wird das Kristallgitter örtlich gedehnt oder zusammengedrückt. Das erhöht die kritische Schubspannung τ_0 für das Gleiten und damit die Festigkeit.

Größe und Dichte der Höcker ergeben sich aus den Durchmessern der Atome und ihrer Anzahl. Die Festigkeitssteigerung wird damit von zwei Einflussgrößen bestimmt:

- Konzentration der Fremdatome (Bild 2.43),
- Differenz der Atom-Durchmesser (Tabelle 2.13).

Tabelle 2.12: Verfestigungsexponent n (→ 4.5.2)

Gitter	Verfestigungsneigung	n
kfz	hoch! Viele sich schneidende Gleitebenen bewirken Verfestigungsstau und Stapelfehler.	≈ 0,5
kfz	mittel! Hauptwerkstoff sind Stahlbleche zum Kaltumformen. Durch LE wie z.B. 0,1 % P wird n erhöht.	0,18 bis 0,3
hex	niedrig! Keine schneidenden Gleitebenen. Nicht angewandt	< 0,1

Reinmetalle haben niedrige Härte und Festigkeit. Alle Verunreinigungen erhöhen sie durch Mischkristallverfestigung (Tabelle ↓).

Werkstoff	Festigkeit MPa		$A_{50} \%$
	R_m	$R_{p0,2}$	
Al 99,8	60	15	35
Al 99	75	25	28

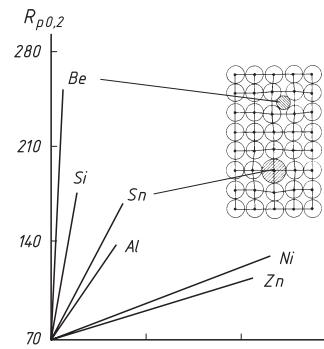


Bild 2.43 Mischkristallverfestigung bei Cu

Beide Einflussgrößen wirken gleichsinnig, je größer, umso stärker ist die Verzerrung des Gitters und die Festigkeitssteigerung. Die Zugfestigkeit steigt mit der Konzentration des LE bis zu einem Maximum. Die Dehnbarkeit wird im Allgemeinen geringer mit Ausnahme einiger Cu-Legierungen (Tabelle 2.13).

Tabelle 2.13: Durchmesserdifferenz der Atome von Cu und LE und Festigkeitssteigerung ΔR_m

	LE %	Atomradius pm	Δ Radius %	Festigkeit R_m MPa	ΔR_m %	Bruchdehnung A_5 %
Cu	–	128	–	220	–	50
CuNi10	Ni 10	124	– 2,7	270	13,6	35
CuZn10	Zn 10	133	+ 4,2	240	9	62
CuAl8	Al 8	143	+ 11,7	370	68	35
CuSn8	Sn 8	151	+ 18,0	430	95	65

Hinweise: Die Verläufe von Festigkeit und Dehnung sind für Cu-Zn in Bild 7.6; für Cu-Sn in Bild 7.7 und für Cu-Ni in Bild 2.59 dargestellt. Die Strukturen von Austausch- und Einlagerungsmischkristallen sind unter Legierungsstrukturen zu finden (Bilder 2.57 und 2.58).

Die Eigenschaftsänderungen hängen auch von der Bindung der Fremdatome und ihrem Standort ab. Metallatome besetzen Gitterplätze, Nichtmetallatome die Lücken (Zwischengitterplätze). Sie sind deshalb nur gering löslich und erhöhen mit kleinen Anteilen die Festigkeit stark, jedoch mit starkem Abfall der Duktilität (Bruchdehnung) → Beispiel Titan.

Beispiel: Sauerstoff im Titan

O-Gehalt %	0,1	0,2	0,25	0,3
Streckgrenze $R_{p0,2}$ in MPa	200	250	360	420
Bruchdehnung A in %	30	22	18	16

Ein ähnliches Verhalten zeigt Kohlenstoff C im kfz-Eisen (Bild 3.15).

2.3.3 Korngrenzenverfestigung (Feinkorn)

Korngrenzen bilden für Gleitvorgänge ein Hindernis, da die Nachbarkristallite eine andere Ausrichtung der Gleitebenen haben. Die Fläche der Korngrenzen lässt sich durch feinkörnige Gefügeausbildung erhöhen. Bei kleinem Korn durchmesser erreichen die Versetzungen schneller die Korngrenzen. Zum Überwinden der Korngrenzen müssen größere Schubspannungen aufgebracht werden ⇒ die Streckgrenze steigt.

Im Gegensatz zu den anderen Verfestigungsmechanismen steigt hier die Duktilität ebenfalls. Bei feinem Korn besteht die Wahrscheinlichkeit, dass mehr Gleitebenen günstig zur Richtung der Zugbeanspruchung liegen (45°), so dass mehr Gleitvorgänge ablaufen können.

(→ Beispiel, Änderung der Bruchdehnung A und Brucheinschnürung Z).

Tabelle 2.14 gibt eine Übersicht der Verfahren zur Erzeugung feinkörniger Gefüge.

Tabelle 2.14: Wege zum Feinkorn

Werkstoff	Maßnahme
Stähle	Feinkornstähle durch thermomechanische Verfahren (→ 5.5), allgemein durch Normalglühen (→ 5.2.1) oder Vergüten (→ 5.3.8)
Knetwerkstoffe	Rekrystallisation nach starker Kaltumformung
Gusswerkstoffe	Schmelzzusätze, die als Fremdkeime wirken

Beispiel: Kornverfeinerung am Stahlguss GC25

Eigenschaft Einheit	R_e MPa	A %	Z %	α_k J/mm^2
Grobkorn	230	13	14	0,29
Feinkorn	280	24	40	0,94
Änderung %	+ 22	+ 84	+ 185	+ 224

2.3.4 Teilchenverfestigung

Als Gleithindernisse für die Versetzungsbewegungen wirken hierbei winzige Teilchen, meist aus härteren, intermetallischen Phasen. Für die Wirksamkeit als Gleithindernis ist eine Teilchengröße von $0,01\ldots0,1 \mu\text{m}$ und ein mittlerer Abstand von $0,1\ldots0,5 \mu\text{m}$ erforderlich. Sie werden auf zwei Wegen in das Kristallgitter eingebracht:

- **Ausscheidung intermetallischer Phasen** in übersättigten Mischkristallen bestimmter Legierungen (Aushärten). Durch die Übersättigung ist das Gefüge metastabil und ändert sich beim Erwärmen (\rightarrow 5.4 Aushärten).
- **Einbringen feinstverteilter Teilchen** (Dispergieren) z.B. Oxide, Carbide, Boride durch mechanisches Legieren (Pulvermetallurgie). Sie sind thermisch stabil (\rightarrow 10.4 Dispersionshärtung, Teilchenverbunde).

Viele kleinste Teilchen mit kleinem Abstand behindern das Gleiten durchgehend im Kristall. Die Hindernisse müssen für ein Wandern geschnitten werden. Das erfordert höhere Schubspannungen.

Weniger große Teilchen haben größere Abstände. Die Versetzungen umgehen sie. Dafür genügen kleinere Schubspannungen.

Beispiel: Eigenschaftsänderungen durch Aushärten von CuBe₂ (Berylliumbronze) für unmagnetische, funkensichere Werkzeuge und elektrischer Leitwerkstoff hoher Festigkeit (\downarrow).

Eigenschaft Einheit	lösungsgeglüht	warmausgelagert 325°C
R_m MPa	420...600	1150...1350
$R_{p0,2}$ MPa	140...210	1000...1250
A_5 %	35	3
HV	—	90...125
		360...390

Hinweis: Abschnitt 4.3.1 und Bild 4.2

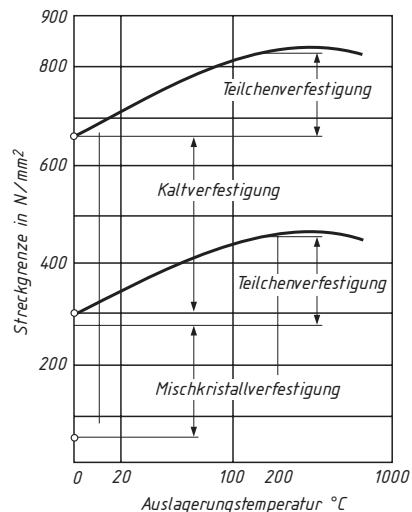
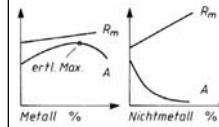
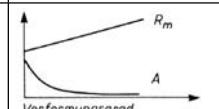
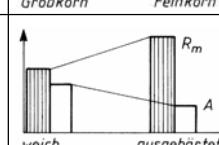


Bild 2.44 Erhöhung der Streckgrenze $R_{p0,2}$ durch Kombination von Verfestigungsmechanismen bei einer NiCrAl-Legierung

Untere Kurve: In ihrem Ausgangszustand *lösungsbehandelt* wirkt nur die Mischkristallverfestigung, die Streckgrenze $R_{p0,2}$ liegt bei 280 MPa, eine ca. 5-fache Erhöhung gegenüber reinem Ni. Durch Warmauslagern bei ca. 300°C wird durch Teilchenverfestigung ein Wert von 460 MPa erreicht, eine Steigerung um nochmals ca. 50 %.

Obere Kurve: Nach dem Lösungsbehandeln wurde um ca. 20 % kaltumgeformt. Die Streckgrenze $R_{p0,2}$ liegt dann bei 650 MPa (doppelt so hoch wie im ersten Fall). Die Warmauslagerung erbringt jetzt die gleiche Erhöhung (parallele Kurven) bis auf 830 MPa.

Tabelle 2.15 Zusammenfassung: Verfestigungsmechanismen durch Ausnutzung der Gitterfehler

Mechanismus, technische Maßnahme	Fehler-Dimension	Strukturänderung, Hindernisse gegen die Versetzungsbewegungen	Festigkeit und Duktilität, schematischer Verlauf
Mischkristallverfestigung Legieren innerhalb der Löslichkeit	0 Punkt-Fehler	Welligkeit der Gleitschichten durch größere oder kleinere LE-Atome. Wirkung steigt mit den 0-Unterschieden und der Konzentration der LE.	
Kaltverfestigung Umformen	1 Linien-Fehler	Kaltumformen erhöht die Versetzungsdichte von 10^8 cm/cm^3 auf 10^{12} cm/cm^3	
Korngrenzenverfestigung Feinkorn herstellen	2 Flächenfehler	Korngrenzen blockieren die Bewegung der Versetzungen. Die Vielzahl der Körner erhöht die Zahl der Gleitmöglichkeiten.	
Teilchenverfestigung • Aushärten • Dispersionshärtung	3 fremde Partikel	Behinderung durch feindisperse, kohärente Ausscheidungen in Mischkristallen, die abgesichert werden müssen. Feindisperse, inkohärente Teilchen, die umgangen werden müssen.	

2.4 Vorgänge im Metallgitter bei höheren Temperaturen

(Thermisch aktivierte Prozesse)

2.4.1 Allgemeines

Nach Erzeugung und Behandlung sind metallische Werkstoffe meist in einem Zustand höherer innerer Energie durch z.B. Gitterfehler, Spannungen oder innere Unterschiede in der Verteilung der Atome (Seigerungen). Sie sind nicht im Gleichgewicht (→). Bei Erwärmung streben sie dem Gleichgewichtszustand zu, je höher die Temperatur, umso schneller.

Das Verhalten einer großen Zahl von Teilchen mit ungeregelter Bewegung und Zufallszusammenstößen lässt sich nur statistisch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erfassen. Mit steigender Temperatur erhöht sich die Zahl der Zusammenstöße und damit Wahrscheinlichkeit von **Platzwechseln**.

Gleichgewicht: Zustand höchster Stabilität, in dem sich ein Stoffsysteem nicht mehr verändert. Stabilität liegt vor im

- **Energie-Minimum**, wenn die freie Energie des Systems ein Minimum erreicht, vergleichbar mit der Ruhelage eines Pendels, oder aber, besonders bei höheren Temperaturen, im
- **Entropie-Maximum**, dem Zustand *kleinst er Ordnung* der Teilchen = Zustand größter thermodynamischer Wahrscheinlichkeit.

Platzwechsel von Atomen im Kristallgitter erfolgen, angeregt durch die Stöße von Nachbaratomen, sprunghaft zu Lücken, Leerstellen oder anderen Störungen.

Die Geschwindigkeit von thermisch aktivierten Prozessen ist die Zahl der Platzwechsel/Zeit.

Das wird in einem **Wahrscheinlichkeitsfaktor B** deutlich, der die Temperatur im *Nenner* des Exponenten enthält. Das erklärt ihren großen Einfluss auf diese Vorgänge. Für Materie am absoluten Nullpunkt wird die Wahrscheinlichkeit B zu Null (keine Platzwechsel). Wenn T gegen Unendlich strebt, wird sie zu Eins (alle Atome wechseln ihre Plätze) → Grenzwertbetrachtung.

Wahrscheinlichkeit von Platzwechseln:

$$v = v_0 B = v_0 \exp(-Q/RT) = v_0 \cdot e^{-Q/RT};$$

v : Platzwechsel/Zeit; v_0 Konstante; Q Aktivierungsenergie; Gaskonstante $R = 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$; T Temperatur.

Grenzwertbetrachtung

Temperatur	Exponent	Faktor B
$T \rightarrow 0$	$\rightarrow \infty$	0
$T \rightarrow \infty$	$\rightarrow 0$	1

Bei manchen Legierungen können Veränderungen durch **Platzwechsel** der Atome bereits bei RT ablaufen (Alterungsvorgänge), bei den meisten erst bei höheren Temperaturen. Die zugeführte Wärmeenergie wirkt beschleunigend, Wärmeenergie wird in Schwingungen der Atome um die Gitterpunkte umgewandelt. Die Folge ist die sog.

Thermische Aktivierung:

Wärmezufuhr ergibt höhere thermische Energie der Atome,
mehr Zusammenstöße der Atome/Zeit,
schnelleren Ablauf der Prozesse (→).

Thermische Aktivierung ist Ursache für zahlreiche innere Vorgänge in Kristallgittern und Gefügen und hat wegen der Verkürzung der Behandlungszeiten Anwendungen in der Werkstofftechnik (→):

Zum Start des Vorganges muss zunächst eine **Energieschwelle** überwunden werden (Bindungen zu den Nachbarn), dann folgt die Materie dem Streben nach dem Gleichgewicht. Die Schwelle wird als **Aktivierungsenergie Q** bezeichnet. Zum Platzwechsel eines Atoms muss die Anziehung der momentanen Nachbarn überwunden und gleichzeitig der Durchlass aufgeweitet werden.

Bild 2.45 zeigt, wie das Atom aus einer „Energiedüse“ (mit Q_0) angehoben werden muss, um den neuen Platz zu erreichen. Dazu ist die Aktivierungsenergie Q erforderlich (Tabelle 2.16). Im Kristallgitter wird die Aktivierungsenergie durch die thermische Energie der Nachbarn (zufällige

Analogien: Im Dampfdruckkochtopf wird die Kochzeit durch 20°C Temperaturerhöhung auf 1/4 verkürzt. Im Dieselmotor wird vorgeglüht, damit die Selbstzündung des Gemisches erfolgt.

Beispiel: Temperaturerhöhung verkürzt die Zeit zum Aufkochen für eine bestimmte Aufkühlungstiefe.

Temperatur in $^\circ\text{C}$	900	1000	1100
Prozesszeit in h	32	10	4

Bedeutung der thermischen Aktivierung:

Kristallerholung und Rekrystallisation 2.4.2;
Kornwachstum 2.4.3;
Diffusion 2.4.5;
Korrosion, 12.6.3;
Warmumformung 2.4.4;
Festigkeit bei höheren Temperaturen 2.4.6

Beachte: Für dichte Gitter (kfz-Fe) wird für das gleiche Atom (C) höhere Aktivierungsenergie benötigt als für weniger dichte (krz-Fe). Der Vergleich (Tabelle 2.16) Ni mit Al im Cu-Gitter zeigt den Einfluss der höheren Schmelztemperatur (stärkere Bindung ⇒ höheres Q).

Tabelle 2.16: Aktivierungsenergien im Vergleich

Atom	Gitter	Q	Atom	Gitter	Q in kJ/mol
C	Fe, kfz krz	138 87,6	Ni Al	Cu, kfz	243 166

Zusammenstöße) aufgebracht. Ihr Betrag wird von Kristallgittertyp und Atomgröße beeinflusst.

Metallatome (etwa gleichgroße in Austausch-Mischkristallen) springen über Leerstellen und brauchen

⇒ **stärkere Anstöße Q_A**

Nichtmetallatome (kleine in Einlagerungs-Mischkristallen) springen durch Lücken

⇒ **schwächere Anstöße Q_Z**

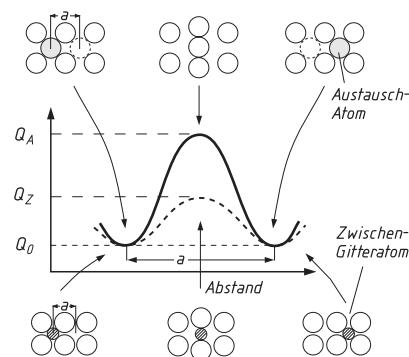


Bild 2.45 Aktivierungsenergie Q . Unten: Einlagerungs-, oben: Austausch-Mischkristalle
(nach Bürgel)

2.4.2 Kristallerholung und Rekristallisation

Die durch Umformen erzeugte hohe Versetzungsichte und Kaltverfestigung werden bei Erwärmung stufenweise abgebaut, ebenso Gitterverzerrungen, die durch Abschrecken entstehen.

Kristallerholung

Bild 2.46 zeigt, dass im schraffierten Temperaturbereich die Zugfestigkeit R_m nur gering abfällt und die Bruchdehnung A_5 etwas steigt, ohne dass sich die Korngroße ändert. Das ist der Bereich der Kristallerholung. Dabei reduzieren sich Gitterfehler, indem sie miteinander reagieren:

Zwischengitteratome wandern in Leerstellen. Entgegengesetzte Versetzungen in einer Gleitebene können sich aufheben. Gleiche Versetzungen suchen energieärmere Positionen, sog. Polygonisierung zu Subkorngrenzen (Bild 2.47).

So werden Spannungen reduziert. Damit führt die Kristallerholung zu folgenden Änderungen im Gefüge und den Eigenschaften:

- Festigkeit und Härte sinken schwach,
- die Duktilität steigt gering an,
- das Verformungsgefüge bleibt erhalten.

Anwendung: Spannungsarmglühen (5.2.3), Altern von kaltgeformten Federn, Leitfähigkeitssteigerung bei kaltgeformtem Cu.

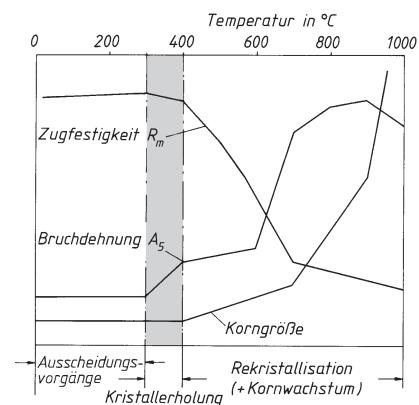


Bild 2.46 Einfluss der Glühtemperatur auf Korngroße und mechanische Eigenschaften von NiCu30Fe, ca. 30 % kaltgeformt und 1 h bei steigenden Temperaturen geglüht

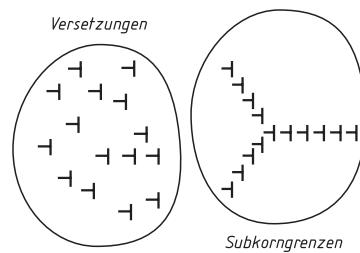


Bild 2.47 Kristallerholung durch Polygonisierung, Subkorngrenzen innerhalb der Körner

Rekristallisation

Mit Überschreiten einer bestimmten Rekristallisationstemperatur ϑ_R (\rightarrow) verändern sich die Eigenschaften stärker (Bild 2.46). Innerhalb der Subkörner gibt es geringer verformte Bereiche, die als Keime wirken, an die sich die energiereichereren Bereiche durch Platzwechsel der Atome angliedern. Dabei wandern die Subkorngrenzen und das ursprüngliche Gefüge wird aufgezehrt. Es entsteht das Rekristallisationsgefüge mit normaler Kornform (Bild 2.48).

Mit wachsender Verformung werden die Kristallite energiereicher, die Neubildung beginnt bei niedrigeren Temperaturen. Bei geringem Verformungsgrad wirken sich Abweichungen von der Temperatur stark auf die Korngröße aus, bei größerem Verformungsgrad dagegen weniger. Tabelle 2.18 gibt eine Gegenüberstellung.

Bild 2.49 Kugelindruck (Brinellmessung) in Stahl mit C-Gehalt von 0,09 % nach Rekristallisationsglühen bei 750 °C/7h.

(200:1)

Unterhalb der Kugelkalotte ist die unterschiedliche Korngröße zu erkennen: Der Kalottenrand ist durch starke Verformung feinkörnig rekristallisiert, tiefere Bereiche, geringer verformt, sind grobkörniger rekristallisiert. Unterhalb ist das zeilige Ausgangsgefüge sichtbar, mangels Verformung nicht rekristallisiert.

Tabelle 2.18: Verformungsgrad und Auswirkungen auf Rekristallisation und Gefüge

Ausgangssbedingungen		\uparrow steigt, \downarrow fällt	
Verformung schwach	wenig Keime, niedrige Energie	Korngröße \uparrow	Rekrist.- Temp. ϑ_R \uparrow
Verformung stark	viele Keime, hohe Energie	Korngröße \downarrow	Rekrist.- Temp. ϑ_R \downarrow
Ausgangs- gefuge	fein	Rekrist.- Temp. ϑ_R \downarrow	Rekrist.- Zeit \downarrow

Die Korngröße lässt sich als Funktion der Temperatur und des Verformungsgrades in einem räumlichen Diagramm darstellen. Es ergibt sich eine gewölbte Diagrammfläche (Bild 2.50).

Als Folge der thermischen Aktivierung fällt mit steigender Glühtemperatur die Dauer der Rekristallisation **exponentiell** ab.

Tabelle 2.17: Rekristallisationstemperaturen ϑ_R

Metall	Pb, Sn	Zn	Mg	Al	Cu
Temp. °C	20	20	150	150	200
Metall	Fe	Stahl	Ni	Mo	W
Temp. °C	450	600	600	900	1200

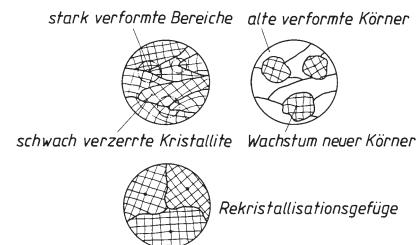


Bild 2.48 Grobkörnige Rekristallisation in schematischer Darstellung

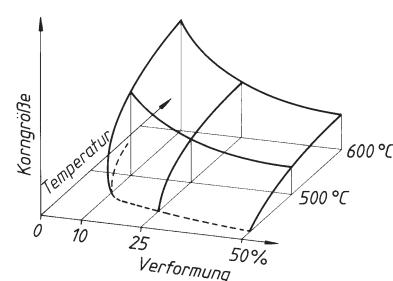
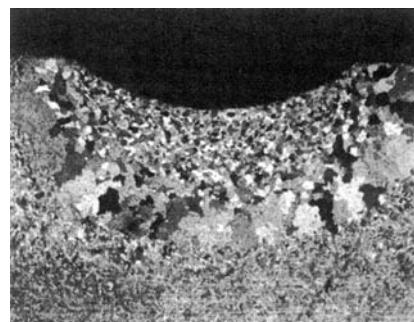


Bild 2.50 Rekristallisationsschaubild

Zusammenfassung: Rekristallisation

Rekristallisation ist die Umkristallisation eines verformten Gefüges.

Sie geht von den am stärksten verformten Kristallbereichen aus und erfordert eine Mindestumformung (krit. Umformgrad).

Die Korngröße wird vom Umformungsgrad und der Ausgangskorngröße beeinflusst.

Die Rekristallisationstemperatur T_R liegt bei etwa $T_R = 0,4 T_m$

Die Lage der Rekristallisationstemperatur ϑ_R wird durch Legierungsatome erhöht (→ Beispiel Blei). Das ist sehr wichtig für Werkstoffe, die ständig höheren Temperaturen ausgesetzt sind (warmfeste und hitzebeständige Werkstoffe).

Mithilfe der Rekristallisationstemperatur können auch die Unterschiede zwischen Kalt- und Warmumformung (→ 2.4.4) erklärt werden.

2.4.3 Kornvergrößerung (-wachstum)

Neben einer grobkörnigen Rekristallisation durch ungünstige Bedingungen können grobkörnige Gefüge auch entstehen, wenn Werkstücke höheren Temperaturen ausgesetzt sind (→ Beispiele).

- **Überhitzen:** kurzzeitig zu hoch,
- **Überzeiten:** zu lange erhitzt.

Dazu gehört auch die Abkühlung von Gussteilen mit größerer Masse in der Form. Stahlguss erstarrt grobkörnig (→ Bild 5.5) und hat geringe Zähigkeit, die durch Normalglühen ansteigt.

Innere Vorgänge: Die Bereiche der Korngrenzen sind gekrümmt, weniger geordnet und energiereicher. Sie besitzen eine Oberflächenspannung, die versucht, die Oberflächen zu verkleinern. Größere Körner haben eine kleinere **Krümmung** (→) und kleinere Spannung.

Geringste Oberflächenspannungen hätte ein Gefüge aus gleichen Sechsecken (im Schliffbild) mit gleichen Winkeln von 120° (sog. Bienenwabenstruktur).

Bei höheren Temperaturen können durch thermische Aktivierung Platzwechsel ablaufen, die diese Spannungen in Richtung „weniger Korngrenzen“ abbauen. Dabei werden die jeweils kleineren

Rekristallisationstemperatur ϑ_R

$$\vartheta_R = 0,4 T_m - 273 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Beispiel: Bei Blei mit ϑ_R bei $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ist eine Verformung bei RT bereits eine Warmumformung mit gleichzeitig einsetzender Rekristallisation. Deshalb versprödet ein Weichbleiklotz nicht, wenn er als Unterlage zum Schlagen benutzt wird. Für legiertes Blei (Hartblei) liegt ϑ_R höher, hier ist eine Versprödung zu bemerken.

Beispiele für Grobkornbildung

Wärmebehandlung: Bei einigen Verfahren werden Werkstücke langzeitig bei hohen Temperaturen behandelt. Hier müssen die Verfahrensbedingungen genau eingehalten werden, um übermäßiges Kornwachstum zu vermeiden.

(→ ZTA-Schaubild für isothermische Austenitisierung 5.3)

Korngröße: Mittlerer Durchmesser der Körner, die im Schliffbild auf einer eingezeichneten Geraden ausgemessen werden können (Tabelle ↓).

Begriffe: Krümmung $1/r$ ist der Kehrwert vom Radius r .

Tabelle 2.19: Korngrößenklassen nach ASTM

Typ	Korngrößenklasse				
Grobkorn	1	2	3	4	5
Körner/mm ² ¹⁾	16	32	64	128	256
Feinkorn	6	7	8	9	10
Körner/mm ²	512	1024	2048	4096	8192

¹⁾ der wahren Schnittfläche

Kristallite von den benachbarten größeren aufgezehrt. Die Platzwechsel brauchen eine Aktivierungsenergie.

Einfluss auf die Kornvergrößerung

Das Kornwachstum wird behindert, wenn bei den hohen Temperaturen noch ungelöste Phasen (andere Kristallite) zwischen den Körnern liegen. Solche Werkstoffe sind nicht überhitzungsempfindlich und sind für längeres Halten bei höheren Temperaturen geeignet (→).

Kornwachstum wird durch intermetallische Phasen der Legierungselemente: Al, Mo, Nb, Ti, V evtl. in Verbindung mit C und N, verhindert.

Bauteile, die hohen Dauertemperaturen ausgesetzt sind, müssen aus Werkstoffen bestehen, die durch legierungstechnische Maßnahmen keinem oder nur geringem Kornwachstum unterliegen.

Beispiele: Einsatz- und Nitrierstähle, warmfeste und hitzebeständige Werkstoffe und Stähle für Schweißkonstruktionen (Feinkornbaustähle)

2.4.4 Warmumformung

Merkmale: Plastische Formänderung bei Temperaturen dicht unterhalb der Solidus-Linie bis oberhalb der Rekristallisationstemperatur ϑ_R . Dadurch erfolgt ständige Rekristallisation und eine Verfestigung unterbleibt. Bei höheren Temperaturen sind die Gleitvorgänge erleichtert (niedrige Verformungskräfte und -arbeit). Zusätzlich treten Gleitvorgänge an den Korngrenzen auf (Korngrenzengleiten). Die für die Verformung notwendige Fließspannung k_f ist wesentlich kleiner.

Bei der Warmumformung lässt sich die Gefügeausbildung (Korngröße) durch die Verformungsendtemperatur (z.T. auch unterhalb ϑ_R) und die folgende Abkühlungsart beeinflussen. Auf diese Weise werden Stahlsorten mit erhöhter Streckgrenze erzeugt (→).

Die Auswirkung der thermischen Aktivierung auf die max. Fließspannung k_f zeigt Bild 2.51 bei den Temperaturen 700 °C (obere Kurvenschar) und bei 1000 °C (untere Kurvenschar).

Vergleich 1: Temperaturen (Bild 2.51)

Graph	Temp. °C	Umformgeschwindigkeit $\Delta\varphi/\Delta t$	Fließspannung k_f MPa
1a	700	20/s	430
2a	1000	20/s	190

Graph	Umformgeschwindigkeit $\Delta\varphi/\Delta t$	Beispiel
a	20/s	Schmiedehämmer
b	10/s	mechanische Pressen
c	1/s	hydraulische Pressen

Warmumformung findet bei Stahlerzeugern und Verarbeitern in zahlreichen Fertigungsstufen zur Erzeugung von Halbzeugen und Schmiederohteilen statt.

Gießformate	Warmumformung durch	Erzeugnis
Brammen, Barren	Walzen	Bleche, Bänder, Profile
Pressbarren	Strangpressen	Profile
Blöcke, Abschnitte	Schmiedepressen, Schmiedehämmer	Schmiederohteile

Hinweis: Thermomechanische Behandlung von Stahl → 5.5.3

Fließspannung k_f

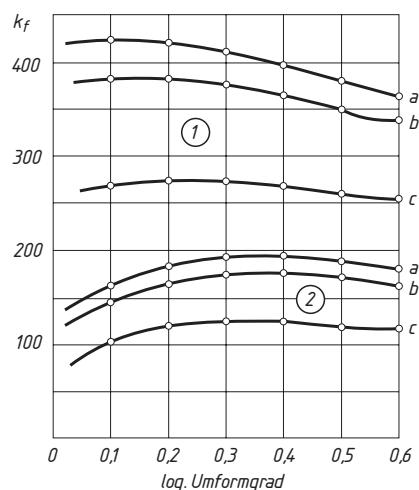


Bild 2.51 Fließkurven von Stahl C45E (Erläuterungen zu k_f und φ bei Bild 2.42)

Vergleich 2 (\rightarrow) zeigt den großen Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit $\Delta\varphi/\Delta\tau$ auf die Fließspannung k_f , weil die Rekristallisation eine gewisse Zeit benötigt, die z.B. bei Schmiedemaschinen und hydraulischen Pressen vorliegt, bei Verformung mit dem Schmiedehammer jedoch nicht. Bei letzterem erhöht sich k_f noch durch eine Umformbeschleunigung.

Superplastizität. Fähigkeit einiger Werkstoffe, unter geringen Spannungen sehr hohe Umformungen bis zu 1000 % ohne Einschnürung auszuhalten. Die Voraussetzungen dafür sind:

Korngröße unter ca. 10 μm ,
Temperatur über 0,5 T_m (Schmelztemp. in K),
niedrige Umformgeschwindigkeiten.

Letzteres ist erforderlich, damit im Werkstoff Platzwechsel der Atome (Diffusion, Kristallerholung, Korngrenzgleiten) stattfinden können und keine Verfestigung auftritt. Es besteht die Gefahr von Hohlräumbildung (Kavitation) durch Ansammlung von Leerstellen. Günstig sind zweiphasige Legierungen mit ähnlich hohen Schmelzpunkten der Komponenten (eutektische oder eutektoidreiche Sorten).

Vergleich 2: Verformungsgeschwindigkeiten

Graph	Temp. °C	Umform- geschwindig- keit $\Delta\varphi/\Delta\tau$	Fließspannung k_f MPa
1a	700	20/s	430
1c	700	1/s	275

Werkstoffe mit superplastischem Verhalten:

Die Erscheinung wird bei einigen Titanlegierungen ausgenutzt: Ti6Al5V lässt bei 850...525°C und 5%/min eine Dehnung von > 700 % zu.

AlZnMg-, AlCuZr- und AlLiZr-Legierungen erreichen bei Temperaturen von 490...540°C und z.T. höheren Dehngeschwindigkeiten Dehnungen bis zu 1200 %.

Umformverfahren sind Blasformen für flächige Teile und Isothermschmieden unter Argon-Atmosphäre für kompaktere Teile. Die geringe Dehngeschwindigkeit ergibt Umformzeiten von 30–90 min für z.B. Triebwerksteile und -verkleidungen.

Entwicklungen für hex. Mg-Legierungen und IP-Werkstoffe wie TiAl und TiAl₃.

2.4.5 Diffusion

Diffusion ist das gegenseitige Durchdringen von Gasen oder Flüssigkeiten infolge der Wärmebewegung ihrer kleinsten Teilchen. Dabei kommt es durch die Zusammenstöße zwischen Molekülen oder Ionen zu einer Vermischung (\rightarrow Beispiel).

Diffusion zum Ausgleich von Konzentrationsunterschieden ist die Grundlage für zahlreiche Verfahren der Wärmebehandlung (Tabelle 2.20).

Begriff: Diffusion, lat. = Ausbreitung, Verschmelzung, Ergiebung

Beispiel: Diffusion im Alltag: Kirsch- und Bananensaft wird geschichtet serviert. Im Laufe der Zeit verwischt sich die Grenze und wird unscharf durch Diffusion der Teilchen über die Grenzfläche von beiden Seiten.

Tabelle 2.20: Verfahren mit Diffusionsvorgängen

Verfahren	Ausgleich bzw. Platzwechsel	Hinweise
Glühverfahren	Verteilung von LE, Ausgleich v. Seigerungen	Tabelle 5.1 und 5.2
Lösungsglühen	Lösen sekundärer Ausscheidungen	5.4.3 und 7.3.5
Ausscheidungen, Auslagern	Abbau von Übersättigung in Mischkristallen	5.4.3 und 7.3.5
Thermochemische Verfahren	Einbringen von C, N, Cr u. a. Elementen	5.6.3 bis 5.6.5
Kristallgitterumwandlungen	Platzwechsel gelöster Atome	3.3.2 Bild 3.7
Sintern, Diffusionsschweißen	Platzwechsel im Korngrenzenbereich	11.1.4

Hinter dieser Wanderung der Teilchen steht das Entropiestreben. Ziel ist ein Zustand mit geringerer Ordnung der Teilchen (→ Ausnahme).

Diffusion ist Bewegung der Atome unter Einfluss eines Konzentrationsgefälles infolge der Wärmebewegung.

Die unregelmäßigen Platzwechsel der Teilchen ergeben einen resultierenden **Teilchenstrom J** , wenn ein **Konzentrationsgefälle $\Delta c/\Delta x$** als (konstant gedachte) Triebkraft vorhanden ist (→).

Wie im ohmschen Gesetz (→) ist bei konstanter Spannung (Triebkraft) der Strom eine Funktion des Leitwertes. Dieser entspricht dem Diffusionskoeffizienten D (→) mit der unanschaulichen Einheit cm^2/s .

Je nach Größe der difundierenden Atome gibt es:

Leerstellendiffusion: Größere oder gleichgroße Austausch-Atome gelangen in eine Leerstelle, die Leerstelle rückt in die Gegenrichtung (Bild 2.45).

- Große Aktivierungsenergie Q ,
- kleinere Diffusionskonstante D .

Zwischengitterdiffusion: Kleine Nichtmetall-Atome gelangen zu den nächsten Zwischengitterplätzen (Bild 2.45), die in großer Zahl vorhanden sind.

- Kleine Aktivierungsenergie Q ,
- große Diffusionskonstante D .

Beispiel: Tabelle 2.21, Elemente H und C im α -Fe.

Nach einem Logarithmieren lassen sich die Einflussgrößen besser beurteilen:

$$\ln J = \ln D_0 - Q/RT$$

Diese Funktion kann im logarithmisch geteilten Netz (Bild 2.52) als fallende Gerade dargestellt werden. D_0 ist der Schnittpunkt auf der Ordinate bei der Temperatur $T \rightarrow \infty$ bzw. $1/T = 0$ (Teilung der Abszisse mit $1/T$).

Ausnahme: Bei tieferen Temperaturen kann auch ein Zustand *höherer* Ordnung angestrebt werden, wenn er *niedrigere* Energie besitzt (z.B. Ansammlung von Fremdatomen in Leerstellen, Clusterbildung (5.4.2)).

Teilchenstrom: $J = \Delta \cdot \Delta c/\Delta x$;

(1. Fick'sches Gesetz)

(Atome/ $\text{cm}^2 \text{ s}$ = cm^2/s Atome/ $\text{cm}^3 \text{ cm}$)

Der Teilchenstrom J entspricht einem elektrischen Strom, der dem ohm'schen Gesetz unterliegt:

Analogie: Strom = Leitwert $\times \Delta$ Spannung

Diffusionskoeffizient D

$$D = D_0 \cdot B = D_0 e^{-Q/RT} \quad (\text{B} \rightarrow 2.4.1.)$$

Der Diffusionskoeffizient D berücksichtigt wie der elektrische Leitwert die **Widerstände**, die dem Teilchenstrom entgegen stehen (Tabelle 2.21). Es sind dies:

- Größe des wandernden Atoms und die Bindungen im Metallgitter (Packungsdichte),
- Diffusionswege über **Leerstellen**, **Zwischengitterplätze** (←). Versetzungen oder Korngrenzen und Oberfläche mit unterschiedlichen Widerständen.

Der Faktor B berücksichtigt den Einfluss von **Aktivierung** und **Temperatur** auf die Wahrscheinlichkeit von Platzwechseln. Wegen der Exponentialfunktion von B umfasst D viele Zehnerpotenzen (Tabelle 2.21)

Tabelle 2.21: Diffusionskonstanten D für einige Diffusionspaarungen (gerundete Werte)

Paarung Atom Gitter	Q	D_0	D	D
			400 °C	800 °C
H α -Fe	12	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	–
C α -Fe	88	$8 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Cr α -Fe	247	1,48	$9,9 \cdot 10^{-20}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$
C γ -Fe	138	$2 \cdot 10^{-1}$	–	$3,7 \cdot 10^{-8}$
Cr γ -Fe	170		–	$3,7 \cdot 10^{-13}$

- Die Aktivierungsenergie Q entspricht der Steigung der Geraden.
- Je steiler die Gerade, umso größer ist der Energieaufwand für einen Platzwechsel.

In Bild 2.52 verlaufen die Linien für die Diffusion von C und H im *dichter* gepackten γ -Eisen (kfz) *steiler* als die im weniger dichten α -Eisen (krz).

Für thermochemische Verfahren (z.B. Aufkohlen, Nitrieren) ist das zweite Diffusionsgesetz wichtig. Es ergibt sich durch Differenzieren des 1. Gesetzes.

Eine Lösung der Differentialgleichung verknüpft hier den mittleren Randabstand x_m , wo die Konzentrationsdifferenz (Kohlungsatmosphäre – Werkstoff) auf die Hälfte gesunken ist, mit der Zeit t .

$$x_m^2 = D \cdot t; \Rightarrow x_m = \sqrt{Dt} \quad (\text{mit } D \text{ konstant})$$

Der Graph ist eine liegende Parabel, Bild 2.53:

Erläuterung der Abhängigkeiten:

Eindringtiefe und Zeit: Bei 925 °C werden erreicht:

1-fache Eindringtiefe	von 0,9 mm in 2 h, die
2-fache	von 1,8 mm in ca. 8 h.

Eine n-fache Eindringtiefe x_2 erfordert die n^2 -fache Zeit t_2 bei $T = \text{konst}$.

Temperatur und Zeit: Für eine konstante Eindringtiefe von 1,5 mm (Waagerechte Linie in Bild 2.53) sind erforderlich:

bei 900 °C ca. 9 h; bei 925 °C ca. 3,5 h

Geringe Temperaturerhöhungen (um 2,78 %) senken die Behandlungszeiten stark (61 %).

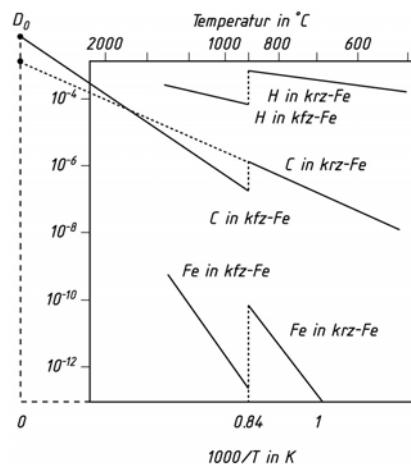


Bild 2.52 Diffusionskoeffizienten = $f(T)$ für einige Paarungen

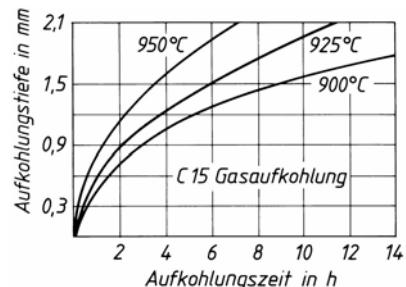


Bild 2.53 Verlauf der Aufkühlungstiefe über der Zeit bei verschiedenen Temperaturen

2.4.6 Werkstoffverhalten bei höheren Temperaturen unter Beanspruchung

Die bei höheren Temperaturen im Innern ablaufenden Vorgänge – die thermische Aktivierung – sind der Grund, dass dann der metallische Werkstoff die sonst zulässigen Spannungen nicht mehr ertragen kann. Sie nehmen mit steigender Temperatur ab. Bei noch höheren Temperaturen verformen sich die Bauteile langsam unter Last und brechen.

Bild 2.54 zeigt den Abfall der Streckgrenze $R_{p0,2}$ beim Kurzzeitversuch.

Oberhalb der Rekristallisationsgrenze sind Bauteile nicht unendlich lange haltbar, sondern nur eine endliche Zeit, sie haben Zeitfestigkeiten, die durch aufwändige Langzeitversuche (Normen →) ermittelt werden.

Zeitfestigkeiten

- Zeitstandfestigkeit** $R_{m/1000/500^\circ} = 100 \text{ MPa}$ bedeutet, dass bei einer Zugbeanspruchung von 100 MPa nach 1000 h bei 500 °C der **Bruch** erfolgt.
- Zeitdehngrenze** $R_{p1/100000/600^\circ} = 22 \text{ MPa}$ bedeutet, dass bei einer Zugbeanspruchung von 22 MPa nach 100 000 h bei 600 °C eine **bleibende Dehnung** von 1 % gemessen wird.

Bauteile mit Dauerbeanspruchung im Bereich über der Rekristallisationstemperatur zeigen das **Kriechen**, eine langsame, plastische Verformung. Dabei liegt die Spannung *unterhalb* der Fließgrenze.

Die inneren Vorgänge sind vereinfacht:

- Aufweitung des Kristallgitters durch die Wärmebewegung, Platzwechsel werden erleichtert,
- Gleithindernisse verschwinden durch Diffusion,
- ausgeschiedene Phasen gehen wieder in Lösung,
- ständige Kristallerholung und Rekristallisation, es erfolgt keine Kaltverfestigung.

Die Auswirkungen des Kriechens sind:

- Spannungsrelaxation (→),
- Kriechdehnung bis zum Bruch.

Vergleich: Werkstoffverhalten bei tiefen und hohen Temperaturen

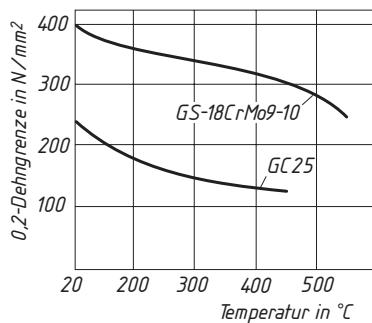


Bild 2.54 0,2-Warmdehngrenze von unlegiertem und niedriglegiertem Stahlguß

Normung:

DIN EN 10291/01	Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung
DIN EN 10319-1/03	Relaxationsversuch unter Zugbeanspruchung

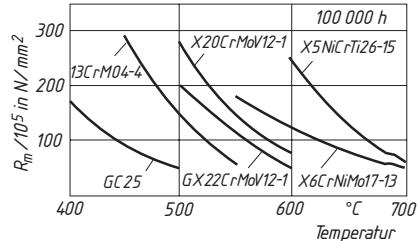


Bild 2.55 Zeitstandsschaubild, schematisch

Spannungsrelaxation (Spannungsermüdung): Nachlassen der Spannung durch das Kriechen z.B. bei vorgespannten Schrauben, oder das Setzen von Dichtungen und Federn.

Merkmale bei $T < T_{\text{Rekrist.}}$	Merkmale bei $T > T_{\text{Rekrist.}}$
Festigkeiten sind zeitunabhängig, weitere Verformung nur bei Spannungen > Fließgrenze	Festigkeiten sind zeitabhängig, Verformung läuft bei allen Spannungen weiter (Kriechen)
Kaltverfestigung, Feinkorn ist festigkeitssteigernd	Ohne Kaltverfestigung, Grobkorn ist kriechfester
Kristallkörper verschieben sich nicht zueinander	Korngrenzgleiten längs der Korngrenzen

Der Kriechvorgang verläuft idealisiert in drei Phasen. Bild 2.56 zeigt den Verlauf der plastischen Dehnung A_p über der Zeit t . Die Steigung der Kurve b entspricht dabei der Kriechgeschwindigkeit.

Erläuterungen zu Bild 2.56, Kurve b: Es lassen sich drei Kurventeile erkennen:

I Primär- oder Übergangsbereich

Nach einer sehr kleinen Anfangsdehnung A_i bei Aufbringen der Belastung nimmt die Steigung der Kurve stetig ab und erreicht ein Minimum. Anfangs bilden sich durch Verformung mehr Versetzungen, als sich bestehende durch die Diffusionsvorgänge auflösen.

II Sekundär- oder stationärer Bereich

Die etwa konstante Steigung (Kriechgeschwindigkeit) in diesem Bereich beruht auf einem Gleichgewicht zwischen dem Auflösen von Versetzungen durch Diffusionsvorgänge und der Neubildung durch die Verformung. Im Bereich von Korngrenzen, die senkrecht zur Zugrichtung stehen, erhöht sich die Zahl der Leerstellen (Aufweitung des Gitters).

Das erzeugt Diffusionsströme (\rightarrow Bild 2.56a) in diese Bereiche.

III Tertiärbereich (Bild 2.56)

Starker Anstieg der Kurve, die Kriechgeschwindigkeit erhöht sich. Die Probe wird evtl. unter Einschnürung stark verlängert und bricht nach der Zeit t_m . Der Bruch wird eingeleitet durch Mikroporenbildung zwischen den gleitenden Körnern. Es entstehen Hohlräume zwischen drei Korngrenzen, die sich vergrößern und als Rissquellen wirken.

Die Kriechkurve verläuft bei **höherer Spannung steiler** und endet nach **kürzerer Zeit**.

Die Diffusionsströme (Bild 2.56a) sind spannungs- und temperaturabhängig und beeinflussen sich gegenseitig. Dieser Materietransport führt zu einer stetigen Verlängerung des zugbeanspruchten Stabes unter Querschnittsabnahme.

Die zulässige Beanspruchung thermisch beanspruchter Bauteile liegt im unteren bis mittleren, linearen Bereich der Kriechkurve.

Beim Zeitstandversuch wird eine Zugprobe langzeitig bei konstanter Temperatur mit konstanter Zugkraft geprüft und die Dehnung gemessen. Das Ergebnis ist das lineare Zeitdehnschaubild (Bild 2.56).

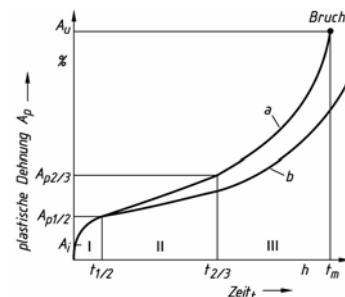


Bild 2.56 Kriechvorgang

Kurve a: Reale Kurve bei konstanter Last. Bei Längenänderung erfolgt auch Querschnittsminderung, dadurch steigen Spannung und Dehnung langsam aber stetig.

Kurve b: Idealisierte Kriechkurve bei konstanter Spannung mit drei Bereichen.

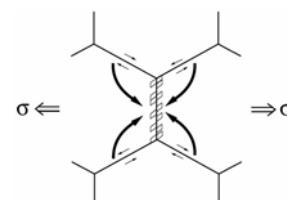


Bild 2.56.a Materietransport durch Diffusionsströme verbunden mit Korngrenzgleiten
← Legende links (nach Bürgel)

Legende:

Dicke Pfeile: Volumendiffusion im Innern des Kristalls, führt zum Diffusionskriechen, durch LE-Atome hochschmelzender Metalle behindert.

Dünne Pfeile: Korngrenzgleiten als Ausgleich. Kann durch kleine Nichtmetallatome auf Zwischengitterplätzen behindert werden.

Erhöhung des Kriechwiderstandes

Bauteile, die bei hohen Temperaturen langzeitig beansprucht werden, dürfen nur geringe Kriechgeschwindigkeiten aufweisen, damit die bleibende Dehnung nicht zu Funktionstörungen führt. Die zusätzliche Schädigung durch Korrosion ist dort behandelt (Abschnitt 12.).

Werkstoffe für solche Einsätze sind durch Legierungszusätze, Wärmebehandlung oder spezielle Gießverfahren entwickelt worden (→).

ODS-Legierungen sind durch Oxide teilchenverstärkte, pulvermetallisch hergestellte Legierungen (→ 10.6).

Beispiel: Eine konstant gedachte Kriechgeschwindigkeit ($d\varepsilon/dt$) von $2,8 \cdot 10^{-10}/\text{s}$ führt nach 10000 h zu einer Dehnung von 1 %.

Eine Turbinenschaufel von 200 mm Länge würde dann 2 mm länger geworden sein.

Bei biegebeanspruchten Teile wäre die Deformation stärker.

Werkstoffe sind warmfeste Stähle, hitzebeständige Stähle und hochwarmfeste Legierungen (4.4.5), Ventilwerkstoffe.

ODS: (Oxid-Dispersion-Strengthened alloys)

Zur Steigerung der Warmfestigkeit auch bei Mg- und Ti-Legierungen angewandt.

Übersicht: Maßnahmen zur Erhöhung der Kriechfestigkeit der Metalle:

Maßnahme	Wirkung
Stähle mit LE wie Mo und V (Vergütungsstähle) verwenden. Sie benötigen zur Bildung ihrer Carbide höhere Anlasstemperaturen.	LE behindern die Diffusionsvorgänge beim Anlassen, höhere Anlasstemperaturen ermöglichen auch höhere Einsatztemperaturen.
Metalle mit Kristallgittern dichtester Packung verwenden. Von ferritischen Stählen auf austenitische Stähle oder Ni- bzw. Co Legierungen übergehen.	In dichtest gepackten Gittern (austenitischer Stahl; kfz/Co-Legierungen, hdP) ist die Diffusion erschwert, die Warmfestigkeiten sind höher als z.B. in krz-Gittern (ferritische Stähle).
Grobkörniges Gefüge ausbilden, Stängelkristallisation, im Grenzfall einkristalline Erstarrung herbeiführen (→ Textur).	Ein kleinerer Anteil an Korngrenzen mindert das Korngrenzengleiten und fällt bei Einkristallen ganz weg. Anwendung bei hoch durch Fliehkräfte beanspruchten Turbinenschaufeln. Nutzung des Korngrenzengleitens bei der Superplastizität (2.4.4).
Korngrenzen durch ausgeschiedene Carbide oder Nitride „verzahnen“. Ahnlich wirken die LE B, Ce, Re, W, Zr.	Das Korngrenzengleiten wird behindert, bei optimaler Größe der Ausscheidungen wird die Rissgefahr kleiner.
LE einbauen, die thermisch stabile, intermetallische Phasen (IP) bilden. Eine weitere Möglichkeit sind nichtmetallische Phasen (Oxide), die pulvermetallurgisch eingebracht werden (ODS-Legierungen).	Teilchenhärtung, wichtig ist eine feindisperse Verteilung der Phasen. Beide sind durch ihre Bindungsart thermisch stabil. Anwendung z. B. bei: γ' -Phase Ni_3Al in Ni-Superlegierungen, Al-Oxide in Al-Legierungen (DISPAL®).

2.5 Legierungen (Zweistofflegierungen)

2.5.1 Begriffe

In der Technik werden meist nicht die reinen Metalle verwendet, sondern Legierungen. Durch Zusatz anderer Elemente können die Eigenschaften eines Metalles (meist die Festigkeit) gezielt verändert und bestimmte Eigenschaftsprofile verwirklicht werden (→ Beispiele).

Legierungen sind Stoffgemenge mit metallischen Eigenschaften. Hier ist eine Begrenzung auf solche aus zwei Komponenten nötig, um den Einfluss von Legierungselementen (**LE**) auf ein **Basismetall** darzustellen.

Die meisten technisch wichtigen Legierungen sind solche aus drei und mehr Komponenten, wobei viele als Verunreinigungen gelten, die auch mit großem Aufwand nicht völlig entfernt werden können (→ Reinheitsgrad, Tabelle 3.4).

Legierungen werden durch gemeinsames Einschmelzen hergestellt. Wenn das wegen hoher Schmelzpunkte nicht möglich ist, kann das pulvermetallurgische Verfahren angewandt werden. Es entstehen die sog. Pseudolegierungen (→).

Für den Einsatz von Legierungen sind neben den Metallpreisen weitere technische Kriterien wichtig (→).

Technisch verwendbare Legierungen ergeben sich dadurch nur bei bestimmten Legierungssystemen und Mischungsbereichen.

Die Grundbestandteile einer Legierung heißen **Komponenten** (A und B). Sie reagieren evtl. miteinander und bilden Kristalle, die **Phasen** (α , β , γ usw.). Alle Legierungen aus A und B bilden das **Legierungssystem**.

Älteste bekannte Legierung ist die Zinnbronze (Bronzezeit). Cu-Erze enthielten zufällig auch Zinn. Sn erniedrigt die Schmelztemperatur und erhöht die Festigkeit und Härte, wichtig für Waffen und Werkzeuge.

Beispiel: Festigkeit von Al

Werkstoff	R_m	in MPa	A %
Al 99,9	40		30
AlMn1Mg1	155	weichgeglüht	14
AlMg4Cu1	420	(ausgehärtet)	8

Beispiel: Wärmedehnung α

Werkstoff	Analyse	$\alpha \cdot 10^6/K$
Eisen	Fe, rein	12,0
INVAR	FeNi36	1,5

Unlegierter Stahl enthält neben Fe und C auch kleine Anteile von Mn, Si, P und S.

Zweistofflegierungen: Cu-Ni, Pb-Sn (Lötzinn)

Dreistofflegierungen: Cu-Sn-Zn (Rotguss)

Mehrstofflegierungen: NiCr MoV-Stahl

Beispiele für Pseudolegierungen: Cu-Graphit für Stromabnehmer wegen Unlöslichkeit des C in der Cu-Schmelze.

Sinterhartmetalle WC/TC-Co und Kontaktwerkstoff W-Cu wegen zu hoher Schmelztemperaturen (→ Pulvermetallurgie 11.1.6).

Kriterien für die Verwendbarkeit:

Von den vielen Legierungssystemen sind nur jene Sorten brauchbar, bei denen Gefüge entstehen, welche

- gute Festigkeit, angepasster Zähigkeit mit
- wirtschaftlicher Formbarkeit und
- ausreichender Beständigkeit (thermisch und chemisch) verbinden.

Als Komponenten können auftreten:

Metall/Metall	häufigster Typ: Cu-Sn (Bronze), Cu-Zn (Messing), Sn-Pb (Lote)
Metall/Nichtmetall	Gusseisen mit Graphit

Die Komponenten einer Legierung können miteinander reagieren (→). Dadurch entstehen Gefüge, die aus den folgenden Phasen (allein oder gemischt) bestehen können:

Legierungstrukturen

Metallgitter können als Realkristalle immer Fremdatome einbauen. Reine Kristalle aus einer einzigen Atomart sind evtl. als gezüchtete Einkristalle denkbar. Kristallstrukturen sind:

- fast **reine Kristalle** einer Komponente,
- **Mischkristalle (MK)**, feste Lösungen, als Austausch-MK oder Einlagerungs-MK,
- **Intermetallische Phasen**.

Austausch-Mischkristalle (AMK, Bild 2.57) LE-Atome können Basisatome im Gitter ersetzen, im **Austausch** an seine Stelle treten (deshalb auch Substitutions-MK). Sie sind *regellos* verteilt. MK bilden *eine* Phase und werden deshalb feste Lösungen genannt. Die vollkommene Löslichkeit, d.h. MK in allen Mischungsverhältnissen, ist nur möglich, wenn sich die Komponenten sehr ähnlich sind (→ Tabelle 2.22).

Bedingungen für Mischkristalle mit unbegrenzter Mischbarkeit:

- Gleiche Kristallgitter,
- Atomradien differieren weniger als 15 %,
- gleiche Wertigkeiten,
- annähernd gleiche Elektronegativität EN.

Überstrukturen sind *geordnete* AMK (Gitter im Gitter). Sie entstehen, wenn die Anziehung *ungleicher* Atome größer ist, als die *gleichartiger* und nur bei *bestimmten* Verhältnissen. Ihre Bildung erfordert Zeit (langsame Abkühlung), bei Erwärmung gehen sie langsam in den ungeordneten Zustand über (Entropiestreben).

Überstrukturen besitzen andere, z.T. *extreme* Eigenschaftswerte gegenüber den normalen Mischkristallphasen des Systems (z.B. elektrische Leitfähigkeit, Härte).

Physikalische Reaktion ist hier das *In-Lösung-Gehen*, die Mischbarkeit der Komponenten.

Chemische Reaktionen zwischen Metall und Nichtmetall (C, N, O) ergeben nichtmetallische Phasen, z.B. Carbide, Nitride und Oxide.

Begriff: Reinheit ist relativ und von der Genauigkeit der Analyse und den Anforderungen abhängig. Hochrein bedeutet ≥ 99,99 %. Dann sind 0,001 % Fremdatome enthalten, d.h. auf 100000 Atome 1 fremdes (bei gleichen Atommassen).

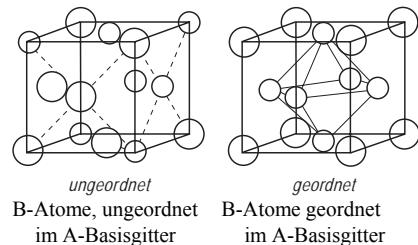


Bild 2.57 Austausch-Mischkristalle, links ungeordnet, rechts geordnet (Überstruktur)

Tabelle 2.22: Legierungssysteme mit vollkommener Mischbarkeit im festen Zustand Cu + LE

Metall/Eigenschaft	Cu	LE		
		Ni	Pt	Au
Atom-Radius in pm	128	124	138	144
Kristallgitter	kfz	kfz	kfz	kfz
Außenelektronen	1	2	1	1
EN-Zahl	1,8	1,8	1,4	1,4

Beispiel Überstruktur: Im System Cu-Au gibt es die 2 Typen:

Beim Atomverhältnis 3:1 bildet sich Cu_3Au : Cu-Oktaeder im Au-Würfel (Bild 2.57). Dieser Typ ist in vielen Legierungssystemen anzutreffen (z.B. Ni-Al, Ni-Fe, Ni-Cr).

Beim Verhältnis 1:1 entsteht der Typ CuAu, (Cu in Grund- und Deckflächen, Au in senkrechten Flächenzentren eines Quaders).

Größere Abweichungen der Atome führen zu einer begrenzten Löslichkeit der LE-Atome, die zudem temperaturabhängig ist (Tabelle 2.23).

Im Allgemeinen steigt die Löslichkeit mit der Temperatur (ähnlich Zucker in Wasser). Beim Abschrecken dieser MK bleibt der hohe Gehalt bei RT bestehen, es entstehen übersättigte Mischkristalle, die metastabil, d.h. nicht im Gleichgewicht sind. Sie versuchen, durch Ausscheidung des Überschusses den stabilen Zustand zu erreichen (→).

Legierungen mit einem LE-Gehalt über der Löslichkeit bilden dann neben den Mischkristallen eine (oder mehr) weitere Phasen aus, die meist zu den intermetallischen Phasen (IP) gehören.

Begrenzte Löslichkeit gilt besonders für die Nichtmetallatome, die kleiner als die Atome des Basisgitters sind, also H, C und N. Sie bilden Einlagerungs-MK (↓). Ihre *Löslichkeit* ist gering, bleibt meist unter 1 % und fällt mit der Temperatur (kleinere Schwingungen ⇒ kleinere Lücken, → Beispiel).

Einlagerungsmischkristalle (EMK, Bild 2.58) werden auch interstitielle MK genannt. Die LE-Atome sind auf Zwischengitterplätzen eingelagert, den Lücken zwischen den „Kugeln“ des Basisgitters. Bei ausreichend großen Lücken sind kleine LE-Atome, meist Nichtmetalle löslich.

Bedingungen für die Bildung von EMK sind:

- Basisgitter aus Übergangsmetallen,
- Radienverhältnis $r_{\text{LE}}/r_{\text{Bas}} < 0,41$ (B, C, N, O).

Intermetallische Phasen (IP) bilden sich, wenn die Mischkristallregeln nicht erfüllt sind und über die Löslichkeitsgrenze hinaus legiert wird. Der Begriff IP wird auch als Oberbegriff für folgende Strukturen verwendet:

Name	Partner	Beispiele
Intermetallische Phase	Metall/Metall	CuZn, Al ₂ Cu
Intermediäre Phase	Metall/Nichtmetall	Fe ₃ C
Einlagerungsstrukturen, (geordnete Einlagerungs-Mk)	Metall/Nichtmetall mit Radienverhältnis $r_{\text{NM}}/r_{\text{M}}$ von $0,43 \dots < 0,59$	Carbide, Nitride z.B. Mo ₂ C, TaC, TiC, TiN, WC

Tabelle 2.23: Legierungssysteme mit teilweiser Mischbarkeit im festen Zustand Cu + LE

Metall/Eigenschaft	Cu	LE		
		Al	Sn	Zn
max. Löslichkeit %	—	9,4	15,8	37
Atom-Radius in nm	124	143	141	133
Kristallgitter	kfz	kfz	tetr	hdP
EN-Zahl	1,8	1,5	1,7	1,7
Außenelektronen	1	3	4	2

Hinweis: Übersättigte Mischkristalle sind Ursache von Kristallausscheidungen im festen Zustand (Anwendung beim Aushärten → 5.4).

Beispiel: Eisen kann bei RT nur sehr wenig C-Atome lösen. In den Stählen liegt der Kohlenstoff dann als intermediäre Phase Eisencarbid, Fe₃C (Zementit) vor. Sie ist hart und spröde und hat im Stahl C60 mit 0,6 % C einen Anteil von 9 % am Gefüge (→ Bild 3.13 unten).

Beispiel: Kohlenstofflöslichkeit im Fe

Phase	Temperatur °C	max. C-Gehalt
α- Fe krz	20	0,02 %
γ- Fe kfz	723	0,80 %
γ- Fe kfz	1147	2,06 %

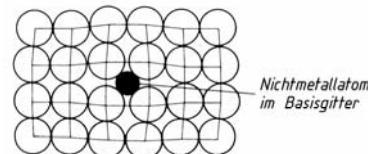


Bild 2.58 Einlagerungsmischkristall

Sie haben andere, oft kompliziertere und weniger dicht gepackte Kristallgitter als die Komponenten. Die Schichten aus Atomen mit unterschiedlichen Radien erfordern hohe Kräfte beim Gleiten. Die metallische Bindung hat Anteile an Ionen- oder Atombindung, der Metallcharakter sinkt und damit auch die Duktilität, die Härte steigt.

Die gemischte Bindung führt zu hoher Steifigkeit (E-Modul) bei hohen Temperaturen, ebenso zum Widerstand gegen Kriechen und Oxidation. Dadurch kommen einige IP trotz der geringen Verformbarkeit als Strukturwerkstoff infrage (→).

Intermetallische Phasen sind meist hart und spröde, ihr Anteil am Gefüge der bekannten Legierungen ist niedrig und dient zur Steigerung der Härte und Festigkeit.

Bezeichnung der IP entspricht den chemischen Formeln, ohne dass ein exaktes stöchiometrisches Verhältnis vorliegen muss. Bei den meisten IP haben die Atomverhältnisse eine Schwankungsbreite.

Beispiel Intermetallische Phasen der Legierung Cu (kfz) mit Zn (hdP), (→ Bild 9.6).

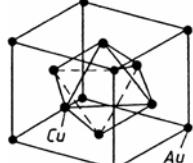
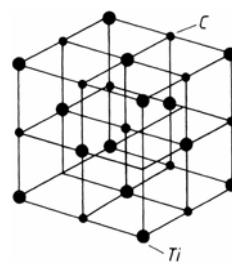
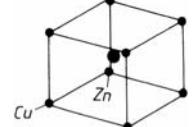
E-Zelle	krz	kub. 58 Atome	hdP
Phase	β-Phase	γ-Phase	ε-Phase
IP-Formel	CuZn	Cu ₅ Zn ₈	CuZn ₃

Beispiel: Leichtbaustoff Titanaluminid, die γ-Phase Ti-Al mit einer Dichte von $3,84\text{g}/\text{cm}^3$ tetragonale E-Zelle mit $a = 399$; $c = 407\text{ pm}$.

Eigenschaften stranggepresst: hohe Wärmeleitfähigkeit $22\text{ W/m}^2\text{K}$ bei RT, $R_{p0,2/RT} = 800\text{ MPa}$; $R_{m,800\text{ }^\circ\text{C}} > 500\text{ MPa}$; spezifische Steifigkeit $E/\rho = 46\text{ GPa cm}^3/\text{g}$ (zum Vergleich: Stahl hat 26), Werkstoff für Gasturbinen.

Tabelle 2.24 gibt eine Zusammenfassung über die in den Legierungen vorkommenden Kristallstrukturen.

Tabelle 2.24: Übersicht, Möglichkeiten für den Einbau von Legierungselementen in ein Wirtsgitter

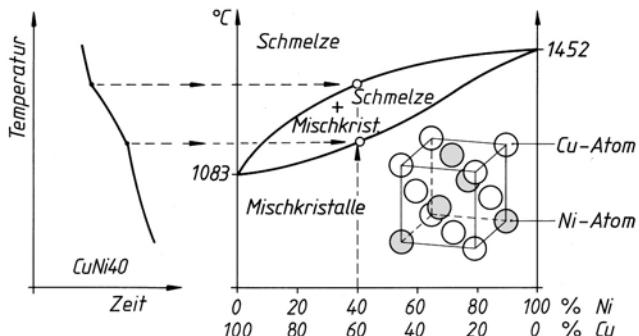
LE-Atome im Wirtsgitter	Legierungselement ist Metall	Nichtmetall
sind ungeordnet	Austausch-Mischkristalle Bild 2.57	Einlagerungs-Mischkristalle Bild 2.58
sind geordnet (Gitter im Gitter)	Überstrukturen  Oktaeder im Würfel, Au ₃ Cu	Einlagerungsstrukturen 
bilden neues, anderes Gitter	Intermetallische Phase  CuZn, b-Messing	Titancarbid TiC, Titanitrid TiN

2.5.2 Zustandsdiagramme, Allgemeines

Diese Schaubilder, auch Phasendiagramme genannt, sind eine Art Landkarte für Stoffsysteme. Aus ihnen lassen sich für alle Legierungen eines Systems die Art und Zusammensetzung der Phasen und ihr Anteil am Ganzen ermitteln.

Bild 2.59 Zustandsdiagramm des Systems Cu-Ni mit Abkühlkurve einer Legierung und E-Zelle eines Austauschmischkristalls.

Aus der Abkühlkurve der Legierung CuNi40 (Bildteil links) werden die Haltepunktstemperaturen nach rechts in das Diagramm übertragen und mit der Senkrechten bei der Konzentration CuNi40 zum Schnitt gebracht. So entstehen punktweise die Linienzüge. Sie begrenzen die Zustandsfelder.



Aufstellung eines Zustandsdiagrammes erfolgt aus den Abkühlkurven (nach Bild 2.59) vieler Legierungen eines Systems oder durch rechnerische Bestimmung der Haltepunkte.

Zustandsdiagramme bestehen aus einer waagerechten Konzentrationsachse mit den beiden reinen Komponenten links und rechts außen, ihr Anteil jeweils nach rechts und links fallend. Auf den beiden senkrechten Achsen ist die Temperatur aufgetragen.

Zustand eines Stoffsystems beschreibt die Phasen, aus denen das Stoffsystem bei einer Temperatur T besteht, sowohl nach ihrer Konzentration (Zusammensetzung) als auch nach ihrem Anteil am Gefüge.

Verhalten einer Legierung im Diagramm.

Jede Legierung wird mit dem Wertepaar Konzentration/Temperatur durch einen **Punkt** im Diagramm dargestellt. Mit sinkender Temperatur wandert dieser Punkt auf einer Senkrechten abwärts, schneidet Linien und durchläuft Zustandsfelder.

Alle Punkte in **einem** Zustandsfeld stellen Legierungen mit gleicher Struktur dar, obwohl sie sich voneinander durch die Phasenanteile und deren Konzentration unterscheiden.

2.5.3 Zustandsdiagramm mit vollkommener Mischbarkeit der Komponenten (Bild 2.59)

Es ist das Einfachste der Phasendiagramme mit nur drei Phasenfeldern (Grundtyp I)

Linien und Felder	Erklärung
Liquidus-Linie: (liquidus, lat. = flüssig)	Oberer Linienzug. Darüber sind alle Legierungen flüssig (1-phasig). Beim Schneiden der Linie beginnt die Kristallisation.
Solidus-Linie: (solidus, lat. = fest)	Unterster Linienzug. Beim Schneiden der Linie ist die Kristallisation beendet. Unterhalb bestehen alle Legierungen aus Mischkristallen.
Oberes Feld (oben offen)	Alle Legierungen sind schmelzflüssig, einphasig.
Linsenförmiges Feld	Erstarrungsbereich, alle Legierungen sind 2-phasig und bestehen aus Schmelze (abnehmend) + Mischkristallen (zunehmend).
Unteres Feld	Alle Legierungen sind kristallisiert, einphasige Mischkristalle, homogene Gefüge.

Mit dem Erreichen der Liquiduslinie beginnt die Kristallisation. Mit sinkender Temperatur wachsen die Kristalle auf Kosten der Schmelze. An der Solidus-Linie ist die Kristallisation beendet: Es entstehen einphasige M_k -Gefüge.

Zustandsdiagramme gelten für eine sehr (unendlich) langsame Abkühlung, damit sich das **Phasengleichgewicht** einstellen kann. Die Phasen, z.B. Schmelze und Kristalle, haben unterschiedliche Energieinhalte. Für jede Temperatur stellt sich ein Verhältnis der Phasen ein, bei dem das Ganze ein Energieminimum besitzt.

Lesen des Zustandsdiagrammes (Bild 2.60). Da die Wärmeenergie an die Masse der Phasen gebunden ist, kann das mechanische Gleichnis der Waage verwendet werden, um die Phasenanteile in Prozent vom Ganzen zu berechnen. Es gilt also das Hebelgesetz in der Form einer Verhältnisgleichung.

Jede Phase ist dem abgewandten Hebelarm proportional.

Bild 2.60 zeigt den Abkühlverlauf der Legierung CuNi40. Im linsenförmigen Erstarrungsbereich ist sie zweiphasig. Sie wird zunächst dicht unterhalb der Liquiduslinie beim Punkt A betrachtet. Die Kristallisation hat gerade begonnen. Der geringe Anteil der Kristalle M_k_1 entspricht dem kurzen Hebelarm, der lange Arm dem Anteil der Schmelze.

Mit sinkender Temperatur wachsen immer mehr Kristalle bei abnehmender Schmelze. Bei Punkt B sind die Hebelverhältnisse umgekehrt wie bei A.

Mit Bild 2.61 und den herausgezogenen Hebelarmen lassen sich die Massenanteile von Schmelze und M_k berechnen (\downarrow):

Berechnung des M_k -Anteils für Punkt B:

$$M_k_2 : S_2 = 29 : 3 \text{ (korrespond. Addition)}$$

$$M_k_2 : (M_k_2 + S_2) = 29 : (29 + 3);$$

$$M_k_2 + S_2 = 100 \% \text{ eingesetzt!}$$

$$M_k_2 : 100 \% = 29 : 32$$

$$M_k_2 = \frac{29}{32} 100 \% = \underline{\underline{90,93\%}}; S_2 = \underline{\underline{9,37\%}}$$

Begriff: Phasengleichgewicht ist hier der Zustand der größten thermodynamischen Stabilität. Sie ist erreicht, wenn das System ein Minimum der freien Enthalpie (d.h. nutzbaren Energie) besitzt.

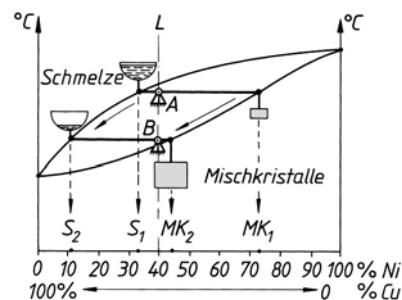


Bild 2.60 Abkühlung der Legierung CuNi40 mit Hebelbeziehung

Die Tabelle 2.25 zeigt für Punkt A diese Abschätzung und zugleich die Konzentration der Phasen (den Ni-Gehalt), die man auf der Konzentrationsachse durch das Lot ablesen kann.

Tabelle 2.25 Abschätzung der Phasen (A und B)

Pkt.	Hebelarm	Phasen	% Ni
A	links klein rechts groß	wenig M_k viel Schmelze	$M_k_1 : 73$ $S_1 : 33$
B	links groß rechts klein	viele M_k wenig Schmelze	$M_k_2 : 43$ $S_2 : 11$

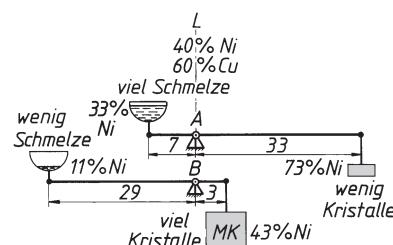


Bild 2.61 Hebelbeziehung aus Bild 2.60

Die ersten MK, bei Punkt A entstehend, sind Ni-reich, bei Punkt B sind sie Ni-ärmer. Wenn die Legierung vollständig kristallisiert ist, haben die Mischkristalle 40 % Ni gelöst. Die entstehenden Mischkristalle müssen also während des Wachssens ständig ihre Zusammensetzung ändern. Das verlangt langsame Abkühlung, damit die Diffusion stattfinden kann.

Bei technischen Abkühlungen entstehen sog. *Schichtkristalle*, die für die betrachtete Legierung im Kern reicher an Ni ist als in den Randzonen. Diese Erscheinung wird als *Kristallseigerung* bezeichnet (Bild 2.62 o). Durch anschließende Warmumformung und Rekristallisation entsteht ein Ausgleich innerhalb der Kristalle, sodass das Gefüge danach aus gleichartigen homogenen Mischkristallen besteht (Bild 2.62 u).

Systeme mit vollkommener Mischbarkeit im festen Zustand sind neben Cu-Ni:

Ag-Au, Ag-Pd, Co-Mn, α -Fe-Cr, α -Fe-V, γ -Fe-Co, γ -Fe-Pt, γ -Fe-Pd, Cu-Au, Cu-Ni, Cu-Pd, Cu-Pt, Ni-Co, Ni-Fe, Ni-Pd, Ni-Pt, Mo-W, Pt-Ir.

2.5.4 Allgemeine Eigenschaften der Mischkristall-Legierungen (Tabelle 2.26)

Wichtigste Wirkung der LE ist die Mischkristallverfestigung (\rightarrow Abschnitt 2.3.2). Bild 2.63 zeigt, dass sie sowohl durch Ni-Atome im Cu-Gitter als auch durch Cu-Atome im Ni-Gitter erreicht wird. Das gilt auch für die Härte, wobei die Maxima nicht an der gleichen Stelle liegen.

Neben der Festigkeit werden andere Eigenschaften beeinflusst, hier z.B. der elektrische Widerstand und seine Temperaturabhängigkeit.

Tabelle 2.26: Technologische Eigenschaften der homogenen Mischkristalllegierungen

Kaltumformen	Alle Kristallite nehmen daran teil. Bei einfachen Kristallgittern (kfz, krz) ist Kaltumformen stark bis sehr stark möglich. Cu-Legierungen haben durch die LE eine verbesserte Dehnbarkeit.
Zerspanen	Da keine spröde, spanbrechende Phase vorliegt, tritt Fließspan und Schmieren des Werkstoffes auf. Kaltverfestigter Werkstoff ist besser zerspanbar. Viele Systeme haben Automatenlegierungen mit 1...3 % Pb und günstigerer Spanbildung.
Gießen	Der längere Erstarrungsbereich und die Kristallseigerung führen zu höheren Schwindmaßen und inneren Spannungen. Die Gießbarkeit ist im Allgemeinen weniger gut und kann evtl. durch dritte LE verbessert werden (z.B. CuSnZn = Rotguss).

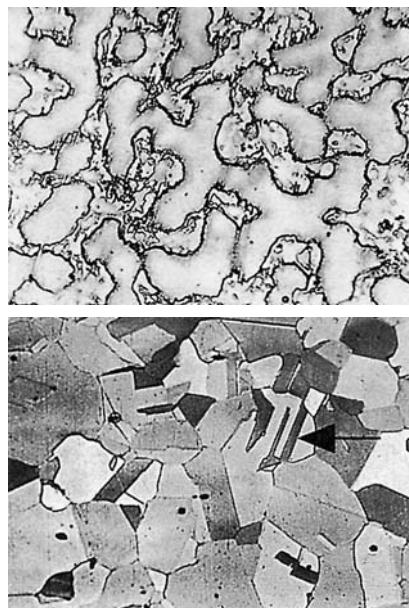


Bild 2.62 Mischkristallgefüge NiCu30Fe.
Oben: Gussgefüge mit Kristallseigerung. Korngrenzen sind anders geätzt als die Kornmitte.
Unten: Gefüge nach Warmumformung und Rekristallisation, homogene Mischkristalle mit Zwillingssbildung (Pfeil \leftrightarrow) 200:1

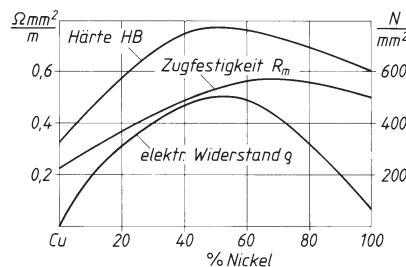


Bild 2.63 Eigenschaften der Legierungen des Systems Cu-Ni. CuNi44 ist eine korrosionsbeständige Widerstandslegierung (Konstantan)

2.5.5 Eutektische Legierungssysteme (Grundtyp II)

Bekannte Legierungen dieses Typs sind die Blei- oder Zinnlote, mit **niedrigen Schmelztemperaturen** zum Verbinden von Blei- und Zinkblech durch Löten.

Diese Systeme ergeben sich bei Unterschieden in allen Eigenschaften der Komponenten (→ Tab.).

Bild 2.64 zeigt das Zustandsdiagramm Pb-Sn. Die Liquidus-Linie ist v-förmig. Sie beginnt an den Schmelzpunkten der Komponenten und fällt von beiden Seiten bis zum eutektischen Punkt ab. Er liegt bei 183 °C und ist Schmelz- und Erstarrungspunkt der sog.

Eutektischen Legierung mit 61,9 % Sn. Bis zu dieser Temperatur behindern sich die unterschiedlich kristallisierenden Atome

– **Pb** kristallisiert **kfz**, **Sn** aber **tetragonal** – bei der Keimbildung, bis sie am eutektischen Punkt, beide gleichzeitig, aber jede für sich, kristallisieren. Sie erstarrt wesentlich tiefer als die reinen Komponenten Pb oder Sn, ist deshalb stark unterkühlt und hat meist ein feinkörniges Gefüge (→ Bildteil 2.65c) mit dem Namen **Eutektikum**. Es ist immer ein Kristallgemisch, hier aus den beiden Phasen $\alpha + \beta$.

Phasen im System Pb-Sn:

α -Phase: Pb-Mischkristalle mit max. 19 % Sn, ihr Gehalt sinkt mit der Temperatur auf 4 %,

β -Phase: Sn-Mischkristalle mit max. 2,5 % Pb, ihr Gehalt sinkt mit der Temperatur auf etwa Null.

Die beiden Phasen wachsen oft lamellen- oder stäbchenartig. Der Lamellenabstand kann durch höhere Abkühlgeschwindigkeit verkleinert werden. Das führt zu höherer Festigkeit. Bei RT liegen die beiden Phasen α (Pb-Mk. mit 4 % Sn) und β (Sn-Mk. mit sehr geringem Pb-Gehalt) vor.

Die Felder der Phase α und Phase β (Bild 2.64) sind durch die Äste der Solidus-Linie und die jeweilige **Löslichkeitslinie** (Solvus) begrenzt. Zwischen ihnen liegt die **Mischungslücke**. Legierungen, die in diesem mittlerem Feld liegen, sind heterogen und bestehen aus einem Gemisch der beiden Phasen α und β :

Begriff: eutektisch, zum **Eutektikum** gehörend (griech.) = das Feingebaute. Eutektikum ist das feinkörnige, besonders strukturierte Gefüge.

	r_{Ion}	Gitter	Gitterkonst. pm	EN
Pb	132	kfz	490	1,6
Sn	93	tetr	649	1,7

Grundtyp II wäre der Gegensatz zum Grundtyp I, die **vollkommene Unlöslichkeit** der Komponenten. Diese existiert in Wirklichkeit nicht, da jedes Metallgitter – besonders bei höheren Temperaturen – Fremdatome eingliedern kann. Darum scheiden sich aus der Schmelze immer Mischkristalle aus. Im Schaubild wird es durch schmale Zustandsfelder rechts und links deutlich, in denen nur eine Phase = Mischkristalle vorliegen.

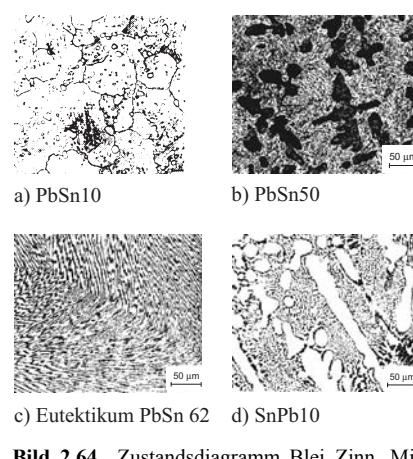
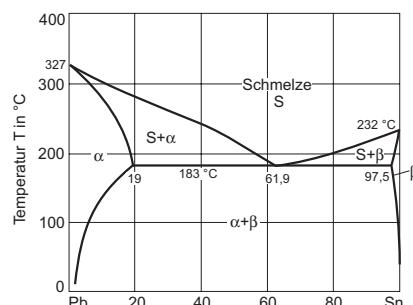


Bild 2.64 Zustandsdiagramm Blei Zinn. Mit charakteristischen Gefügen des Legierungssystems

Übersicht: Legierungstypen im Zustandsschaubild Pb-Sn (Bild 2.64)

Legierungsbereich	Gefüge	Beschreibung
α -Bereich Pb-Mischkristall- Legierungen mit Pb + 4- < 19 % Sn	Bildteil 2.65a	Sind unterhalb der Solidus-Linie homogen , beim Erreichen der Löslichkeitslinie beginnt die Ausscheidung von sekundären Kristallen ¹⁾ . Die aus der Schmelze kristallisierten Pb-Mk. sind zunächst ungesättigt, beim Erreichen der Löslichkeitslinie gesättigt und scheiden bei weiterer Abkühlung den Überschuss an Sn an die Korngrenzen aus. Bei RT ist das Gefüge heterogen und besteht aus Pb-Mk (4 % Sn) + Sn-K.
$\alpha+\beta$ -Bereich Untereutektische Legierungen Pb + 19-61,9 % Sn	Bildteil 2.65b	Liegen links vom eutektischen Punkt . Ihr Gefüge besteht aus den in der Schmelze ausgeschiedenen Pb-Mischkristallen (dunkel), die im Laufe der Abkühlung ihren Sn-Gehalt von 19 % auf 4 % verringern. Sie sind eingebettet in das Eutektikum. Die in der Schmelze wachsenden Kristalle (sog. Primärkristalle) werden meist größer ausgebildet und heben sich im Schliffbild vom feinkörnigen Eutektikum ab.
$\alpha+\beta$ -Bereich Übereutektische Legierungen Pb + 61,9-97,5 % Sn	Bildteil 2.65d	Liegen rechts vom eutektischen Punkt . Ihr Gefüge besteht aus den in der Schmelze ausgeschiedenen Sn-Mischkristallen, die im Laufe der Abkühlung ihren Pb-Gehalt von 2,5 % durch sekundäre Ausscheidungen auf fast Null % verringern.
β -Bereich Sn-Mischkristall-L. Sn ≤ 2,5 % Pb	ohne Bild	Sind unterhalb der Solidus-Linie homogen , beim Erreichen der Löslichkeitslinie beginnt die Ausscheidung von Sekundärkristallen ¹⁾ , hier ist es der Überschuss an Pb. Bei RT ist das Gefüge dadurch heterogen und besteht aus Sn-K. + Pb-Mk. (4 % Sn).

1) Sekundäre Ausscheidungen führen zu Eigenschaftsänderungen (unerwünschte, Altern) oder werden beim Aus härten zum Eigenschaftsändern benutzt.

2.5.6 Allgemeine Eigenschaften der eutektischen Legierungen

Eutektische Legierungen fallen durch niedrige Schmelztemperaturen auf. Tabelle 2.27 vergleicht sie mit denen der Komponenten.

Tabelle 2.27: Technisch wichtige eutektische oder naheutektische Legierungen

Legierung	Komponente A A %	Komponente A T_m °C	Komponente B B %	Komponente B T_m °C	Eut. Leg. T_m °C
Gusseisen	Fe 96	1538	C 3...4		1200
Weichlot	Sn 60	232	Pb 40	327	183
Silberlot	Cu 55	1083	Ag 45	961	620
Zn-Druck-guss	Zn 96	419	Al 4	660	380
Al-Druck-guss	Al 88	660	Si 12	1414	577
Hartblei	Pb 87	327	Sb 13	630	274

Eutektische Legierungen haben ein heterogenes Gefüge aus den zwei Phasen. In der Realität sind es Mischkristalle mit geringen Anteilen der jeweils anderen Komponente. Eine dieser Phase wird härter und spröder sein. Das wirkt sich auf die Eigenschaften aus (Tabelle 2.28).

Die Absenkung der Schmelzpunkte durch fremde Zusätze wird häufig angewandt:

- Al-Schmelzfluss-Elektrolyse (\rightarrow 7.3.1),
- beim Löten werden **Flussmittel** zum Lösen der Metalloxide zugesetzt.
- **Hochofenzuschläge** aus SiO₂, CaCO₃ oder Al₂O₃ sind zur Gangart berechnet (gattiert), um dünnflüssige Schläcken zu bilden.

Allgemeines Verhalten der Legierungen vom eutektischen Typ:

- Alle flüssigen Legierungen streben bei der Abkühlung zur eutektischen Konzentration.
- Es wird die Komponente ausgeschieden, die gegenüber der eutektischen Konzentration im Überschuss vorhanden ist.
- Wenn die Solidus-Linie erreicht ist, hat die Restschmelze die eutektische Konzentration und erstarrt zum Eutektikum.

Durch Hinzufügen weiterer unterschiedlicher LE entstehen niedrigschmelzende Mehrstoffeutektika, z.B. die Wood'sche Legierung aus Bi, Cd, Pb und Sn mit dem Schmelzpunkt bei 70 °C.

%-LE	50 Bi	10 Cd	27 Pb	13 Sn
Gitter	hex.	hex.	kfz.	tetr.
Konstante pm	431	290	490	649
Schmelzp. °C	273	321	327	232

Tabelle 2.28: Technologische Eigenschaften der eutektischen Legierungen

Kaltumformung	Nur die weichere Kristallart nimmt an der Kaltumformung teil, die andere weniger oder nicht. Daraus folgt eine geringere Kaltformbarkeit gegenüber homogenen Legierungen.
Spanbarkeit	Der Span wird durch eine vorhandene sprödere Phase gebrochen, sodass sich kein Fließspan ausbildet. Daraus folgt eine leichte Spanbarkeit.
Gießbarkeit	Niedrige Schmelztemperatur (kein Erstarrungsbereich), geringes Schwindmaß und gutes Formfüllungsvermögen (keine Primärkristalle an Formwänden)
Mechanische Eigenschaften	Das Gefüge ist eine Mischung aus zwei Phasen mit Mischkristallverfestigung. Festigkeit und Dehnung ergeben sich als Mittelwerte aus dem Verhältnis der reinen Komponenten.

Übung: Beschreibung des Abkühlverlaufs unter Anwendung der Hebelbeziehung

Zum leichteren Einstieg wird der linke Teil des Diagrammes vereinfacht und eine Unmischbarkeit der beiden Komponenten angenommen. Bild 2.65 zeigt dieses fiktive System A-B mit der Legierung L aus 80 % A und 20 % B, ähnlich dem System Bi-Cd.

Die Abkühlung beginnt im Gebiet der Schmelze. Der darstellende Punkt L wandert bei Abkühlung senkrecht abwärts, schneidet die Liquidus-Linie und gelangt in das Zweiphasenfeld zum Punkt 1 (oberer Hebel).

Die eingezzeichnete Temperaturwaagerechte stößt links an die Phasengrenze Punkt K und rechts an das Phasenfeld Schmelze. Punkt S. Die Waagergerechte (Konode) symbolisiert den Waagebalken, an dem die Kristalle und Schmelze als gedachte Masse bei dieser Temperatur im Gleichgewicht sind (↓ Auswertung Punkt 1).

Mit fallender Temperatur wachsen immer mehr A-Kristalle. Dadurch verringert sich der Anteil der Schmelze, gleichzeitig wird sie A-ärmer.

Zur Klärung wird dicht über der Solidus-Linie bei Punkt 2 (mittlerer Hebel) eine zweite Konode gelegt und ausgewertet (↓ Auswertung Punkt 2).

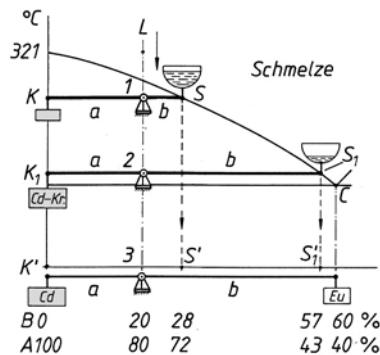


Bild 2.65 Darstellung der Hebelbeziehung am linken Ausschnitt eines eutektischen Systems

Komponente A = Cadmium, Cd; Komponente B = Wismut, Bi

Auswertung der Hebelbeziehungen (Bild 2.65)

Punkt 1:	Punkt 2:
Abschätzen der Massenverhältnis der Phasen:	
langer Hebel a \Rightarrow kleine Masse Kristalle	langer Hebel b \Rightarrow kleine Masse Restschmelze
kurzer Hebel b \Rightarrow große Masse Schmelze	kurzer Hebel a \Rightarrow große Masse Kristalle
Ablesen der momentanen Konzentrationen der Phasen:	
Von den Punkten K und S ein Lot auf die waagerechte Achse zu K' und S' fallen und ablesen: Punkt K': Kristalle bestehen aus 100 % A, Punkt S': Schmelze aus 72 % A und 28 % B.	Von den Punkten K ₁ und S ₁ ein Lot auf die waagerechte Achse zu K ₁ ' und S ₁ ' fallen und ablesen: Punkt K ₁ ': Kristalle bestehen aus 100 % A, Punkt S ₁ ': Schmelze aus 43 % A und 57 % B.

Beim Erreichen der Solidus-Linie besteht ein bestimmtes Verhältnis zwischen den Kristallen und der Restschmelze, welche dann die eutektische Konzentration hat. Hier läuft die eutektische Reaktion ab: Die homogene Schmelze zerfällt in ein Kristallgemisch aus A- und B-Kristallen.

Die Berechnung der Anteile von Kristallen und Eutektikum erfolgt mit einer Verhältnisgleichung, die durch Behandlung beider Seiten nach der korrspondierenden Addition umgeformt wird (\rightarrow).

Allgemein gilt für den Massenanteil einer Phase:

$$\text{Phase \%} = \frac{\text{abgewandter Hebel}}{\text{Gesamthebel}} 100 \%$$

2.5.7 Ausscheidungen aus übersättigten Mischkristallen

Im vorangehenden Abschnitt traten zum ersten Mal Mischkristalle auf, deren Löslichkeit mit der Temperatur abnahm. Zum Vergleich ein Beispiel aus dem Alltag (\rightarrow).

Zur Klärung der Vorgänge dient eine bekannte Al-Legierung (Duraluminium). Bild 2.66 zeigt dazu einen Ausschnitt aus dem Zustandsdiagramm Al-Cu. Die Linie BC zeigt, dass die Löslichkeit von 5,7 % bei 548 °C auf ≈ 0 bei RT zurückgeht.

Abkühlverlauf der Legierung AlCu2: Nach Erstarrung besteht sie aus einem homogenen Al-Mk-Gefüge und ist am Punkt 1 **ungesättigt**, da die Mk mehr lösen könnten (die Linie BC gibt bei dieser Temperatur ca. 4 % an) und am Punkt 2 gerade **gesättigt**.

Am Punkt 3 wäre sie **übersättigt** (die Linie BC gibt bei dieser Temperatur ca. 1 % an). Bei langsamer Abkühlung wandern deshalb Cu-Atome an die Korngrenzen und bilden dort sekundäre Ausscheidungen (Segregat).

Mit der Temperatur sinkt die Löslichkeit schließlich gegen Null, sodass ständig weitere Cu-Atome ausdiffundieren müssen, bis bei Punkt 4 das Gefüge aus Al-Mk mit sehr wenigen Cu-Atomen besteht, die an den Korngrenzen Sekundärkristalle besitzen. Das vorher homogene Gefüge wird dadurch heterogen.

Berechnung der Massenanteile bei RT:

$$K : Eu = b : a \text{ (korrespondierende Addition)}$$

$$K : (K + Eu) = b : (a + b); K + Eu = 100 \%$$

$$K : 100 \% = b : (a + b);$$

$$K = \frac{b}{a+b} 100 \% = \frac{40}{20+40} 100 \% = 66.6 \%$$

$$Eu = 33.3 \%$$

Beachte: Eutektikum ist keine Phase, sondern ein Gefügebestandteil. Es entsteht aus der Phase „eutektische Restschmelze“. Die **Phasenzusammensetzung** für AB20 ist natürlich 80 % A-Kristalle und 20 % B-Kristalle. Der Waagebalken verläuft zwischen den beiden T-Achsen.

Hinweis: Phasenanteile können auch graphisch abgelesen werden (\rightarrow Bild 3.12 unten).

Hinweis: 7.3.7 Aushärtungen der Al-Legierungen

Vergleich: Warmer Kaffee kann mehr Zucker lösen als kalter. Nach Abkühlung liegt im kalten Kaffee ein Bodensatz von dann nicht mehr löslichem Zucker vor, eine zweite Phase.

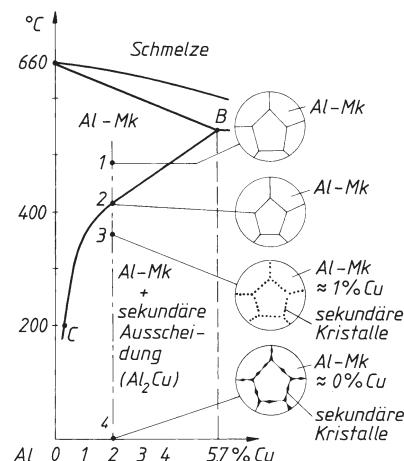


Bild 2.66 Zustandsdiagramm Al-Cu, linke Seite mit schematischen Gefügen bei langsamer Abkühlung. Die sekundären Ausscheidungen bestehen aus der intermetallischen Phase Al₂Cu.

Schnelle Abkühlung aus dem Mk-Gebiet verhindert die Ausscheidungen und erzeugt übersättigte Mischkristalle. Sie sind nicht im Gleichgewicht und nicht stabil (metastabil). Die zwangsgelösten Cu-Atome können z.T. bei RT diffundieren und bewirken im Laufe der Zeit Gefüge- und damit auch Eigenschaftsänderungen (→).

Bedeutung der Ausscheidungen:

- Mit der Temperatur sinkende Löslichkeit tritt bei den meisten Metallen auf.
- Dadurch können bei normaler Abkühlung nach Gießen, Schweißen oder Warmumformen übersättigte Mischkristalle entstehen.

Die festigkeitssteigernde Wirkung von sekundären Ausscheidungen wird beim **Aushärteten** angewandt (→ Teilchenhärtung 2.3.4 und 5.4).

Werkstoffe und Ausscheidungen:

Alterung: Abnahme der Zähigkeit (Übergangstemperatur) durch unerwünschte Ausscheidungen über längere Zeit bei RT (→ 5.4.4).

Künstliche Alterung: Wenn vom Werkstoff Konstanz der Eigenschaften verlangt wird (z.B. Federn für Messgeräte), nimmt man durch Erwärmen evtl. Ausscheidungen vorweg. Dann ist das Gefüge stabil bevor Eichungen erfolgen. Die Temperaturen sind legierungsabhängig.

Aushärteten ist die gesteuerte Ausscheidung bestimmter Phasen in geeigneten aushärtbaren Legierungen zur Festigkeitssteigerung.

Beispiel: Aushärtung der Legierung AlZnMg1

Zustand	R_m MPa	A in %	Härte HB
weich	150	14	60
ausgehärtet	350	10	105

2.5.8 Zustandsdiagramm mit intermetallischen Phasen

Die Legierung Cu-Zn ist mit ca. 40 Legierungen genormt, darunter auch Mehrstofflegierungen (Sondermessinge) und Gusslegierungen mit weiteren Zusätzen. Die hohe Zahl spiegelt ihre vielseitige Verwendbarkeit wieder (→).

Das Zustandsdiagramm (Bild 2.67) zeigt ebenfalls eine hohe Zahl von Phasenfeldern und Linien, eine Folge der intermetallischen Phasen (IP), die in diesem System auftreten. Das technisch interessante Diagramm schließt bei 50 % Zn, da Legierungen nur bis ca. 45 % nutzbar sind. Darüber ist der Einfluss der harten und spröden IP so stark, dass sie keine verwendbaren Legierungen ergeben (Tabelle 2.29).

Cu-Zn Zweistofflegierungen (binäre) lassen sich vom Gefüge her in drei Gruppen einteilen:

α-Legierungen haben homogene Gefüge aus flächenzentrierten Cu-Mischkristallen mit bis zu 37,5 % Zn. Ihre Festigkeit steigt durch Mischkristallverfestigung, ebenso die Dehnbarkeit bis zu einem Maximum bei 30 % (Bildteil unten). Die 9 Sorten von CuZn5 bis CuZn37 sind gut bis sehr gut kaltformbar und als Band, Blech und Rohr genormt. Kaltverfestigung erhöht ihre Zugfestigkeit bis auf 340...610 MPa, ebenso die Wechselfestigkeit gegenüber dem geglühten Zustand.

Anwendungen: CuZn-Legierungen werden z.B. für feinmechanische Geräte, Armaturen für Gas und Wasser bis hin zu Schiffsschrauben verwendet.

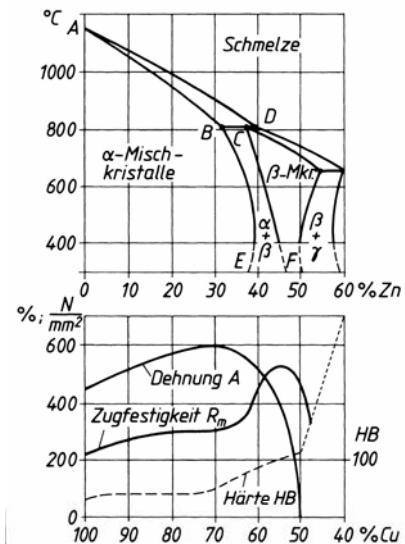


Bild 2.67 Zustandsdiagramm Cu-Zn und Auswirkung des steigenden Zn-Gehaltes auf die mechanischen Eigenschaften (geglüht)

α -Legierungen über ca. 35 % Zn können bei schnellerer Abkühlung aus dem Zweiphasen-gebiet unterhalb BC, auch nach Kaltumformung und Glühen, geringe Anteile von β enthalten.

$\alpha + \beta$ -Legierungen liegen zwischen 37,5 und 46 % Zn-Gehalt und haben heterogene Gefüge. Zu den α -Mischkristallen kommt die erste der intermetallischen Phasen, die β -Phase CuZn. Ihre E-Zelle ist ein Würfel mit 8 Cu-Atomen und einem Zn-Atom im Zentrum (Bild in Tabelle 2.24).

Sobald die härtere IP-Phase im Gefüge auftritt, steigt die Zugfestigkeit an (die Streckgrenze verläuft ähnlich, aber tiefer), um ab 44 % Zn wegen fallender Dehnbarkeit stark abzufallen. Die Härte (Messung durch Druck) steigt steil an. Die Dehnung fällt über 30 % Zn bis auf null bei reinem β -Gefüge ab (Bild 2.67 unten).

2.5.9 Übung: Auswertung eines Zustandsdiagrammes, Abkühlverlauf einer Cu-Zn-Legierung (64,5 % Cu)

Die Legierung kühlt aus der Schmelze ab. Beim Erreichen der Solidus-Linie tritt eine zweite Phase auf, die α -Phase (kfz. Cu-Mischkristalle), die nach und nach die Konzentration des Punktes B annimmt (67 % Cu). Die Schmelze strebt der Konzentration des Punktes D zu.

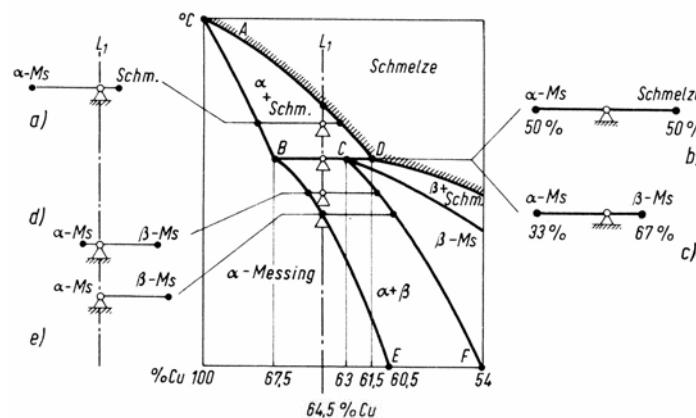


Bild 2.68 Zustandsdiagramm Cu-Zn mit Abkühlverlauf der Legierung (64,5 % Cu) und Phasenverhältnissen

Tabelle 2.29: Phasen im System Cu-Zn

Phase	α	β	γ
Zn- %	> 0 ... 37,5	43,8 ... 48,2	ca. 58
IP ¹⁾		CuZn	Cu ₅ Zn ₈
Formel		krz (Tab. 2.9)	kub 52 Atome
E-Zelle	kfz		
Umformbarkeit	kalt gut bis sehr gut	kalt nur gering, warm gut	nicht umformbar

¹⁾ Formeln geben keine stöchiometrische Zusammensetzung an, sondern einen Mittelwert der Konzentration dieser Phasen.

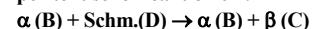
β -Legierungen mit ca. 46...< 50 % Zn haben ein homogenes Gefüge aus der β -Phase.

Mit steigenden Zn-Gehalten treten nach β - und γ -Phase noch weitere extrem spröde Phasen auf. Sie sind technisch unbrauchbar.

Bildteil a: Unterhalb der Liquidus-Linie überwiegt noch der Anteil der Schmelze.

Bildteil b: Dicht über der Solidus-Linie sind bei dieser Legierung gleiche Anteile von Schmelze und α -Mk. vorhanden (gleiche Hebelarme).

Bildteil c: An der Linie BC tritt die peritektische Reaktion ein:



Dabei reagieren α -Mk. mit der Schmelze zu β -Mk. Dadurch wird die Schmelze aufgezehrt und der Anteil der α -Mk. reduziert (Hebelverhältnis). Dicht unterhalb der Linie CD liegt dann ein Gefüge mit 1/3 α -Mk. vor (mit 67,5 % Cu) und 2/3 β -Kristallen (mit 63 % Cu). Die Hebelarme verhalten sich wie 2:1.

Bildteil d: Mit weiterer Abkühlung ändern sich die Konzentrationen beider Phasen: α -Mk. längs der Linie BE, β -Kristalle längs der Linie CF. Gleichzeitig wächst der Anteil der α -Mk., jener der β -Kristalle sinkt (**Bildteil d**). Beim Erreichen der Linie BE (**Bildteil e**) ist der Anteil der β -Kristalle auf null gesunken: homogenes Gefüge aus α -Mk.

Zusammenfassung:

Regeln für die Auswertung von Zustandsdiagrammen

Die Vorgänge lassen sich im Diagramm auf einer senkrechten Linie verfolgen. Sie liegt bei der Konzentration der untersuchten Legierung. Der darstellende Punkt wandert abwärts (Abkühlen) oder aufwärts (Abheben). Mit der Hebelbeziehung können bei jeder Temperatur die Phasen ermittelt werden (→).

- Wenn dabei im Diagramm eine Grenzlinie durchlaufen wird, ändert sich die Art der Phasen oder ihre Zahl der Phasen um eins. Abweichungen sind nur an Punkten möglich.
- Der Anteil einer Phase am Gefüge ist dem abgewandten Hebelarm proportional (Hebelgesetz). Die Phasen liegen im Schnittpunkt zwischen Hebel und Phasengrenzen.

2.5.10 Vergleich von homogenen und heterogenen Legierungen

In dieser Zusammenfassung werden die beiden Grundgefüge gegenübergestellt und daraus auf Eigenschaften und Verwendung geschlossen. Die Zuordnungen sind grob, in Sonderfällen können auch Abweichungen auftreten.

	Homogene Legierungen	Heterogene Legierungen
Zustandsdiagramm (prinzipiell)	Legierungen Grundtyp I oder im Randbereich bei den meisten anderen Typen	In den Mischungslücken bei teilweiser Mischarkeit der Komponenten
Beispiele	Cu-Legierungen mit geringem Gehalt an LE, austenitische Stähle	Eutektische Gusslegierungen, Einsatz-, Vergütungs- und Werkzeugstähle, austärkbare Al-Legierungen
Gefüge	homogen, eine Phase Mischkristalle	heterogen, zwei Phasen bilden ein Kristallgemisch
Fertigung durch Gießen	ungünstig bei breitem Erstarrungsbereich, Schwindung, Seigerung	günstig, da niedriger Schmelzpunkt, kleines Schwindmaß
Kneten	günstig, alle Kristallite nehmen daran teil, homogen verformbar	Rissgefahr, wenn beide Phasen sehr unterschiedliche Verformungswiderstände haben,
Spanen	Fließspan, rauere Oberfläche	günstig, weichere oder sprödere Phase kann spanbrechend wirken, glatte Oberfläche
vorwiegender Verwendung	Knetlegierungen	Gusslegierungen
Fertigungsgänge	Gussblock → Umformen → Halbzeug → Umformen/Verbinden → Fertigteile	Rohgussteil → Spanen → Fertigteile
Verlauf der Eigenschaften über der Konzentration	<p>Bei bestimmten Konzentrationen sind extreme Eigenschaften möglich.</p>	<p>Eigenschaften liegen zwischen denen der reinen Komponenten (Ausnahme Schmelztemperaturen).</p>

2.5.11 Übersicht über Phasenumwandlungen im festen Zustand

Neben den unter 2.4.7 behandelten Ausscheidungen aus Mischkristallen beim Überschreiten der Löslichkeitslinie und langsamer Abkühlung oder innerhalb der übersättigten Mischkristalle beim schnellen Abkühlen, gibt es weitere Umwandlungen im festen Zustand. Sie sind nicht auf die Stähle beschränkt, für die sie eine besondere Bedeutung haben und dort eingehend behandelt werden.

Name	Vorgänge	Anwendungen, Beispiele, Hinweise auf Lehrbuch-Abschnitte
Ausscheidungen in übersättigten Mischkristallen	Überschuss bildet intermetallische Phasen in feindisperser Form	Aushärtungen zahlreicher Legierungen (5.4; Tabelle 5.8; Al: 7.3.7; Cu: 7.4.4)
Eutektoidische Umwandlung (Ähnlichkeit mit Bildung des Eutektikums)	homogene Mischkristalle reagieren am eutektoiden Punkt und zerfallen dann wegen Gitterumwandlung zu einem Kristallgemisch	Austenitzerfall zu Perlit (Bild 3.7) oder Bainit (Bild 5.34)
Martensitische Umwandlungen	Diffusionslose Gitterumwandlung, verläuft sehr schnell. Gelöste Atome bleiben in Zwangslösung und verzerrten die Gitter.	Härten von Stahl (5.33). Tritt auch auf beim Abkühlen von Co und Ti: Co wandelt um von kfz in hdP. Ti wandelt um von krz zu hdP. Formgedächtnislegierungen 11.5.3

Literaturhinweise

- Fachzeitschrift:** Zeitschrift für Metallkunde (Aufsätze überwiegend engl.). Hanser-Verlag
- Askeland, D.R.: Materialwissenschaften. Spektrum-Verlag, 1996
- Bargel/Schulze: Werkstoffkunde. VDI-Verlag, 2004
- Bergmann, W.: Werkstofftechnik 1. Hanser-Verlag, 2003
- Bürgel, R.: Handbuch der Hochtemperatur-Werkstofftechnik. Vieweg Verlag, 2006
- Gräfen, H. (Hrsg.): Lexikon Werkstofftechnik. VDI-Verlag, 1991
- Hornbogen, E. u. Warlimont, H.: Metallkunde. Springer, 2001
- Macherauch, E.: Praktikum in Werkstoffkunde. Vieweg Verlag, 1989
- Merkel/Thomas: Taschenbuch der Werkstoffe. Hanser-Verlag, 2003
- Schatt, W. (Hrsg.): Einführung in die Werkstoffwissenschaft. Wiley-VCH, 2002
- Wellinger/Krägeloh: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. rororo-Technik-Lexikon Rowohlt, 1971

3 Die Legierung Eisen-Kohlenstoff

Das Eisen ist mit einem Anteil von etwa 4,7 % an der Erdrinde nach dem Aluminium das am häufigsten vorkommende Metall.

Die Legierungen auf der Basis „Eisen“ sind sehr zahlreich und haben einen breiten Anwendungsbereich. Es sind ca. 2500 verschiedene Stähle lieferbar.

Die Ursache dafür liegt in den großen Möglichkeiten, ihre Eigenschaften zu ändern:

- durch Wärmebehandlung,
 - durch Legierungselemente
- } Kombination aus beiden

Sie ist in einigen Besonderheiten des Eisen gegenüber anderen Metallen begründet (a, b).

Zunehmend wichtig wird das *Recycling* von Werkstoffen, für das Stahl und Eisen hervorragend geeignet sind.

Beispiel: Massenanteile verschiedener Metalle an der Erdrinde in %:

Al	Fe	Mg	Ti	Cr	Zn	Ni	Cu
7,5	4,7	1,9	0,58	0,33	0,02	0,018	0,01

Beispiel: Legierungen des Eisens

Walz- und Schmiede-Stähle Konstruktions-teile
Gusslegierungen Werkzeuge

Beispiel: Veränderbarkeit der Eigenschaften

Weichglühen ↔ Härtung
Grauguss (weich) ↔ Hartguss

- Polymorphie des Eisens (polymorph = vielfältig, siehe unten),
- Verhalten zum Legierungselement „C“.

3.1 Abkühlkurve und Kristallarten des Reineisens

Das Eisen gehört zu den wenigen *polymorphen* Metallen. Es tritt somit in verschiedenen Kristallarten auf (Bild 3.1):

Reineisen erstarrt bei 1536 °C zu Kristallen mit *kubisch-raumzentriertem* Gitter, dem δ-Eisen. Darin ist jedes Fe-Atom von 8 Nachbarn umgeben (Koordinationszahl 8).

Bei 1401 °C entstehen ruckartig durch eine Gitterumwandlung *kubisch-flächenzentrierte* Gitter, das γ-Eisen. Darin ist ein Fe-Atom räumlich von 12 anderen umgeben (Koordinationszahl 12), es ist also *dichter gepackt*.

Nach weiterer Abkühlung findet bei 911 °C eine *letzte* Gitterumwandlung statt, es entsteht Eisen mit *kubisch-raumzentriertem* Gitter, das α-Eisen. Dieses bleibt bei weiterer Abkühlung bis auf Raumtemperatur bestehen.

Bei 769 °C liegt noch ein Knickpunkt, hier wird α-Eisen wieder magnetisch, im kfz-Zustand ist es unmagnetisch. Das unmagnetische α-Eisen wird auch als β-Eisen bezeichnet.

Beispiel: Weitere polymorphe Metalle sind: Cobalt Co, Mangan Mn, Titan Ti, Zinn Sn, Zirkon Zr (Tabelle 2.6).

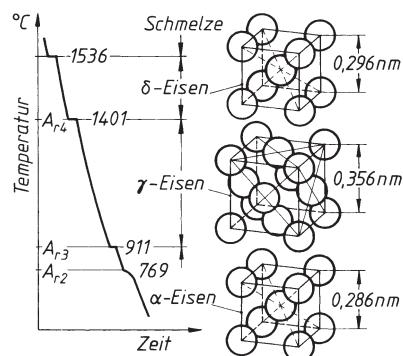


Bild 3.1 Abkühlkurve des Reineisens und seine Kristallarten.

Bei einer Erwärmung verlaufen die Vorgänge im entgegengesetzten Sinn. Die angegebenen Haltepunktstemperaturen gelten nur für sehr langsame Temperaturänderungen, schnellere Änderungen verschieben sie (Hysterese, Bild 2.18).

Die Umwandlung am Haltepunkt A_3 bei $911\text{ }^{\circ}\text{C}$, die $\gamma\text{-}\alpha$ -Umwandlung, ist besonders wichtig. Wir dürfen sie uns nicht als eine Auflösung des geordneten Zustandes vorstellen!

Die Skizze soll zeigen, dass sich im kfz-Gitter (zwei E-Zellen mit dünnen Kreisen) bereits ein etwas verzerrtes krz-Gitter (dicke Kreise) befindet, die Gitterumwandlung erfordert nur *kleinste* Bewegungen der Atome.

Dadurch werden die Anziehungskräfte im Gitter nicht aufgehoben, und die Materie behält ihren Zusammenhang: Form und Festigkeit der Bauteile bleiben erhalten!

Die Umwandlung von einer dichtesten Packung in eine weniger dichte ist mit einer sprunghaften *Volumenänderung* verbunden, die mit Messgeräten ermittelt werden kann.

Dazu wird ein Stab des Metalls gleichmäßig über seiner Länge erhitzt und seine Längenausdehnung über der Temperatur aufgezeichnet. Die entstehende Kurve wird *Dilatometerkurve* (lat. Dilatation = Dehnung) genannt.

Stoffe ohne kristalline Veränderungen zeigen dabei eine *stetige* Kurve, bei Gefügeänderungen wird der stetige Verlauf unterbrochen.

Diese Dilatometermessung wird für Metalle und Legierungen mit hohen Schmelztemperaturen zur thermischen Analyse verwandt.

Von den Kristallarten des Eisens sind zwei von besonderer Bedeutung:

Bei *Raumtemperatur* und niedrigen Temperaturen werden Eigenschaften und Verhalten des Metalls bestimmt durch das

α -Eisen, Ferrit

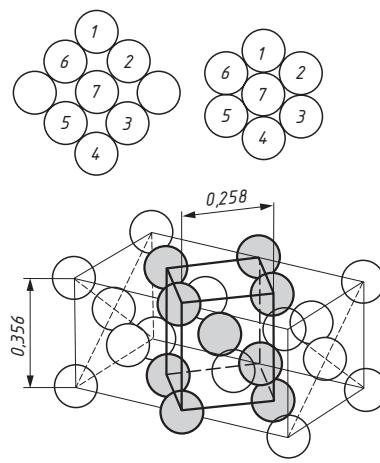
mit kubisch-raumzentriertem (krz) Kristallgitter.

Hinweis:

Das Verschieben der Haltepunkte bei schneller Abkühlung zu tiefen Temperaturen und die Folgen für die Gefügebildung sind Voraussetzung für Härten und Vergüten der Stähle.

Analogie:

Übergang einer Kugelpackung in der Ebene in eine solche mit dichterer Packung.



2 γ -Fe-Zellen mit Vorstufe einer α -Zelle

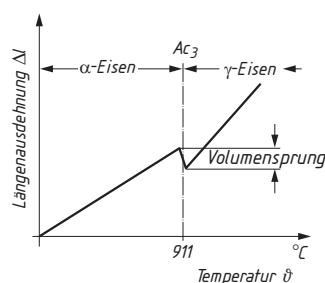
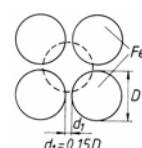


Bild 3.2 Dilatometerkurve, Längenänderung eines Eisenstabes bei Erwärmung

Die unterschiedliche Struktur ergibt bedeutsame Eigenschaftsunterschiede:

Ferrit: (lat. ferrum, Eisen)



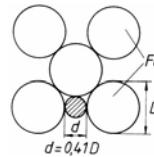
weniger dichte Packung,
gute Verformbarkeit,
sehr kleine C-Löslichkeit,
kleinere Wärmedehnung

Bei höheren Temperaturen (oberhalb A_3), z.B. beim Warmumformen durch Schmieden, liegt vor:

γ -Eisen, Austenit

mit kubisch-flächenzentriertem (kfz) Raumgitter

Austenit: (Roberts-Austen, engl. Forscher)



dichteste Packung,
beste Verformbarkeit,
unmagnetisch,
löst max. 2 % C-Atome.
größere Wärmedehnung

Trotz dichterer Packung können im Austenit *mehr* C-Atome eingelagert (EMK) werden als im Ferrit. Die Bilder zeigen:

Das kfz-Gitter des Austenits hat größere *Zwischengitterplätze* als das krz-Gitter des Ferrits.

Die sprunghafte Volumenänderung, die mit der Gitterumwandlung einhergeht, hat für Teile, die ständig im Wechsel erhitzt und abgekühlt werden, eine schwerwiegende Folge:

Eine gebildete Oxidschicht (Zunder), die ja ein anderes Kristallgitter besitzt, wird durch die entstehenden Schubspannungen gelockert und platzt ab. Deshalb sind unlegierte Stähle nicht hitzebeständig, d.h. sie verzundern allmählich, wenn sie ständig die γ - α -Umwandlung in beiden Richtungen durchlaufen.

Auswirkungen:

Eine Legierung aus Fe-C hat unterhalb A_3 wegen der Unlöslichkeit ein *heterogenes* Gefüge mit begrenzter Verformbarkeit. Oberhalb A_3 , im austenitischen Zustand, besteht Löslichkeit, das Gefüge ist *homogen* (sehr wichtig für die Schmiedbarkeit).

Hinweis:

Hitzebeständige Stähle müssen deshalb *umwandlungsfrei* sein. Das ist nur durch Zusatz von Legierungselementen möglich.

- Cr, Si, Mo in höheren Gehalten ergeben ferritische Stähle. Sie erstarren kubisch-raumzentriert und behalten dieses Gitter bis auf Raumtemperatur bei (3.5.2).
- Ni, Mn, Co in höheren Gehalten ergeben austenitische Stähle. Sie sind bei der Abkühlung auf RT noch kubisch-flächenzentriert, d.h. noch nicht umgewandelt (3.5.1).

3.2 Erstarrungsformen

Kohlenstoff ist das wichtigste Legierungselement, weil es bereits in kleinen Anteilen

- die Härtbarkeit der Stähle bewirkt,
- die Festigkeit stark erhöht.

Die Erhöhung der Festigkeit setzt allerdings die *Verformbarkeit* herab (\rightarrow 3.4.1).

Kohlenstoff erniedrigt den Schmelzpunkt des reinen Eisens bei 4,3 % C von 1536 °C auf 1147 °C, (sehr wichtig für die Eisen-Guss-Legierungen).

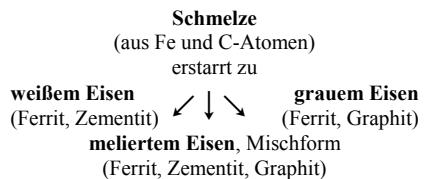
Eine C-haltige Eisenschmelze kann je nach dem C-Gehalt bei der Erstarrung unterschiedliche Gefüge bilden. Es gibt zunächst *zwei gegensätzliche* Erstarrungsformen und Mischgefuge aus beiden.

Kohlenstoff ist ein „billiges“ Legierungselement, es gelangt durch Koks und CO-Gas in das Eisen und Stahl z.B. bei der

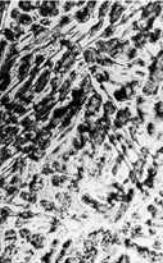
- Erschmelzung im Hochofen mit Koks,
- Erzeugung von Eisenschwamm,
- Stahl aus Kohle-Lichtbogenöfen

und ist im Roheisen mit ca. 4 % enthalten.

Übersicht: Erstarrungsformen



Die nachstehende Übersicht ist von den Kriterien in der mittleren Spalte jeweils nach links und rechts zu lesen!

		Schmelze	
hat wenig C-Atome		Kriterium	hat mehr C-Atome
unmöglich	← →	Keimbildung für Graphit begünstigt durch	möglich
schnelle Abkühlung + Mn-Gehalte ergeben: Zementit-Kristalle (dunkel) (Eisencarbid, Fe_3C) und Ferrit, α-Eisen (hell)			langsame Abkühlung + Si-Gehalte ergeben: Graphit-Kristalle (dunkel) (elementarer Kohlenstoff) und Ferrit, α-Eisen (hell)
		Gefügeausbildung 100 : 1	
Gefüge kann durch Glühen verändert werden nach $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3 \text{ Fe} + \text{C}$ (Zementit) (Graphit)	← →	Beständigkeit	Gefüge ist beständig: keine Veränderung
Metastabile Erstarrung Metastabiles System (Fe - Fe_3C), Bild 3.13.o Stähle, Hartguss und Temperrohrguss	↔	Folge: 2 Zustands-schaubilder	Stabile Erstarrung Stabiles System (Fe - C), Bild 3.13.u Gusseisen mit kleinen Festigkeiten, wie z.B. GJL-150
	↔	Verwendung z.B. als	

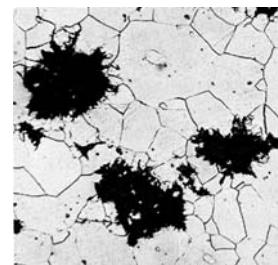
Mischformen:

Durch Überlagerung beider Erscheinungen entstehen Gefüge, die aus Ferrit und Graphit bestehen, ein Teil des C-Gehaltes ist als Zementit im Ferrit verteilt (Perlit).

Dadurch entstehen Gusswerkstoffe höherer Härte und Festigkeit, *perlitisches Gusseisen* wie z.B.: GJL-300, GJS-600-3, GJMB-550-4 (Abschnitt 6 Gusswerkstoffe).

Der *metastabile* Zementit zerfällt bei höheren Temperaturen.

Das wird benutzt, um *Temperguss* zu erzeugen. Dabei entsteht durch eine Glühbehandlung (Tempern) aus metastabil erstarrtem Eisen ein ferritisches (bis perlitisches) Grundgefüge mit flockigem Graphit (Temperkohle).



Gefüge von Temperguss
hell: Ferrit
dunkel: Flockengraphit

3.3 Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD)

Das Bild zeigt zunächst den oberen Teil des EKD mit Liquidus- und Solidus-Linie. Man erkennt, dass es sich hier um eine Überlagerung der zwei Legierungsgrundtypen Mischkristallsystem + Eutektisches System handelt:

- Es liegt ein *eutektischer* Typ vor mit einem eutektischen Punkt bei 4,3 % C.

Der Schmelzpunkt des reinen Eisens wird am Eutektikum durch gelösten Kohlenstoff auf 1147 °C gesenkt. In diesem Bereich liegen die meisten „Gusslegierungen“.

- Das linsenförmige Erstarrungsfeld lässt den *Mischkristalltyp* erkennen.

Bis zu einem C-Gehalt von max. 2 % C entstehen homogene γ -Mischkristalle. Das ist der Bereich der schmiedbaren „Stähle“.

Das Schaubild endet auf der rechten Seite mit einem C-Gehalt von 6,67 % C, entsprechend einem 100 %-igen Anteil der Phase *Zementit*, Fe_3C (Stöchiometrische Rechnung →):

Im Bild sind die Legierungen in drei Gruppen eingeteilt. Innerhalb dieser Gruppen verhalten sich die Legierungen bei der Abkühlung gleichartig, deshalb genügt es, aus jeder eine beliebige Legierung zu beschreiben.

3.3.1 Erstarrungsvorgänge

Stähle

Alle Legierungen von 0...2 % C verhalten sich wie Grundtyp I (Mischkristalltyp): In der Schmelze scheiden sich unterhalb der Liquidus-Linie Mischkristalle aus. Sie sind zunächst C-arm, werden aber zunehmend C-reicher.

Diese Veränderung lässt sich im Diagramm (Bild 3.4) am Weg des Punktes K auf der Solidus-Linie darstellen. Die zugehörigen Konzentrationen liest man auf der unteren Achse ab (Punkte K' u. K_1'). An der Solidus-Linie ist der Anteil der Schmelze auf null gesunken.

Das Gefüge besteht dann aus γ -Mischkristallen, einem homogenem Gefüge, **Austenit**.

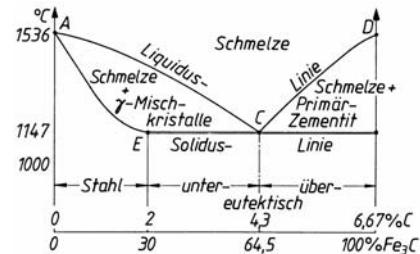


Bild 3.3 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, Erstarrungsbereich des metastabilen Systems (vereinfacht). Die exakten Vorgänge am Pkt. A werden hier nicht behandelt. Vollständiges EKD → Bild 3.13

Berechnung: C-Gehalt von Zementit, Fe_3C

$$\text{C} = \frac{\text{A}(\text{C})}{\text{M}(\text{Fe}_3\text{C})} \cdot 100 = \frac{12}{3 \cdot 56 + 12} \cdot 100$$

$\text{A}(\text{C})$ = relative Atommasse von C = 12,

$\text{M}(\text{Fe}_3\text{C})$ = relative Molekularmasse von Fe_3C mit $\text{A}(\text{Fe}) = 56$

- Stähle
- untereutektische Gusslegierungen
- übereutektische Gusslegierungen

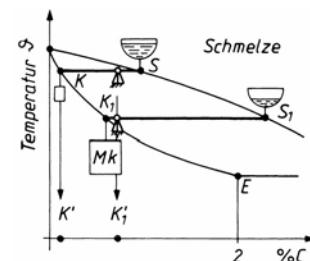


Bild 3.4 Konzentrationsänderung bei der Erstarrung eines Stahls

γ -Mischkristalle können frei in der Schmelze wachsen und bilden langgestreckte Formen mit Seitenästen, als Tannenbaumkristalle oder *Dendriten* bezeichnet (Bild 2.5).

Durch Warmumformung entsteht ein Korngefüge.

γ -Mischkristalle sind *Einlagerungs-Mischkristalle*, kleine C-Atome sitzen auf Zwischengitterplätzen (Hilfsvorstellung: Sie besetzen das Innere der kfz-Elementarzellen).

Hinweis: Wenn man die relativen Atommassen berücksichtigt ($Fe = 56; C = 12$), so ist bei max. 2 % C im Mischkristall etwa jede dritte Elementarzelle mit einem C-Atom belegt.

Untereutektische Legierungen

Der Erstarrungsverlauf gleicht anfangs dem der Stähle: Die γ -Mischkristalle werden vom Punkt K dargestellt. Mit sinkender Temperatur streben sie zum Punkt E, die Mischkristallkonzentration steigt dabei auf max. 2 % C, Punkte K' und K_1 der unteren Achse (Bild 3.5).

Die Schmelze wird durch die Punkte S dargestellt. Mit sinkender Temperatur streben sie dem Punkt C zu. Dabei verschiebt sich ihre Konzentration auf 4,3 % C, d.h. auf die eutektische Zusammensetzung, wenn die Solidus-Linie erreicht wird ($1147^{\circ}C$).

Dann erstarrt die Restschmelze zum Eutektikum. Am Hebelverhältnis können die Massenprozente von γ -Mischkristallen und Eutektikum bei einer bestimmten Temperatur errechnet oder abgeschätzt werden.

Übereutektische Legierungen

Diese Legierungen verhalten sich wie die des Grundtyps II (Kristallgemischtyp). Es scheidet sich in der Schmelze die Komponente aus, die gegenüber der eutektischen Zusammensetzung im *Überschuss* vorhanden ist. Hier sind es Fe_3C -Kristalle (Primär-Zementit). Primärkristalle können unbehindert in der Schmelze wachsen und sind darum größer.

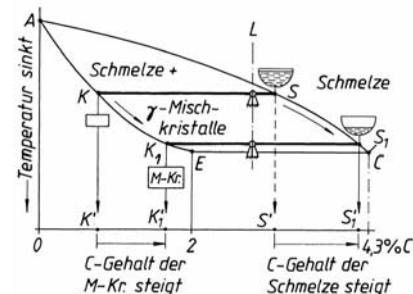
Mit sinkender Temperatur verarmt die Schmelze an Kohlenstoff und nähert sich der eutektischen Zusammensetzung. Diese ist an der Soliduslinie erreicht, es entsteht das Eutektikum.

3.3.2 Die Umwandlungen im festen Zustand

Bei weiterer Abkühlung verändern sich die Gefüge *aller* Legierungen, weil:

- die *Löslichkeit* des γ -Eisen für den Kohlenstoff mit der Temperatur *abnimmt*.
- γ -Eisen sich bei A_1 in α -Eisen umwandelt, das praktisch keine C-Atome lösen kann.

Obere Temperatur: Viel Schmelze, wenig Kristalle, Erstarrung hat eben begonnen



Untere Temperatur: Wenig Schmelze, viel Kristalle, Erstarrung fast beendet

Bild 3.5 Erstarrung einer untereutektischen Legierung, Darstellung der Hebelbeziehung

Eutektikum (erstarnte Schmelze 4,3 % C): Wie bei den Legierungen des Grundtyps II ist auch hier das Eutektikum ein feinkörniges Gemenge aus zwei Kristallarten, weil im festen Zustand nur eine sehr geringe Löslichkeit für C-Atome vorliegt.

Darum besteht das Eutektikum unmittelbar nach der Erstarrung aus γ -Mischkristallen und Zementit in feiner Verteilung. Es hat die metallographische Bezeichnung Ledeburit nach Prof. Ledebur, 1837...1906, Freiberg).

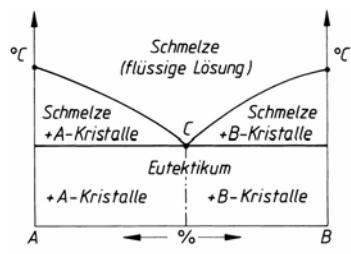
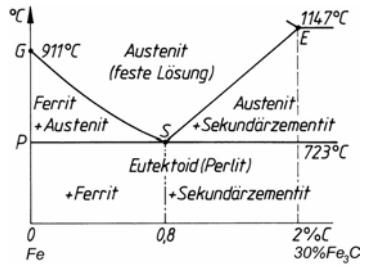
Analogie:

Das begrenzte Lösungsvermögen der γ -Mischkristalle für C-Atome kann man mit dem Verhalten von Wasser und Zucker vergleichen:

Heißes Wasser kann eine bestimmte Masse von Zucker lösen. Die Lösung ist dann *gesättigt*. Kaltes Wasser kann weniger Zucker lösen. Deshalb wird sich bei der Abkühlung der heißen, gesättigten Zuckerlösung auf Raumtemperatur fester Zucker als Bodensatz ausscheiden.

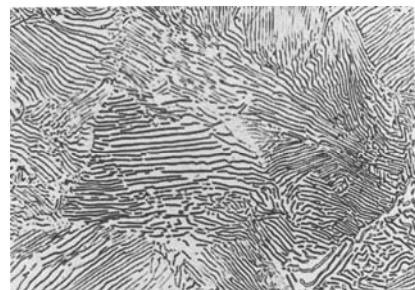
Diese Gefügeänderungen sind besonders für die Stähle wichtig und werden an einem Ausschnitt des EKD, der Stahlecke, behandelt (Bild rechts). Die eben zu γ -Mischkristallen erstarrten Stähle verhalten sich bei weiterer Abkühlung wie die Legierungen eines eutektischen Systems (Grundtyp II Bild links). Mit Hilfe dieser Analogie lassen sich die Umwandlungen des Stahles im festen Zustand aus Bekanntem folgern:

Vergleich: Grundtyp II mit Stahlecke

Grundtyp II	Löslichkeit der Komponenten	System Fe-Fe ₃ C
Löslichkeit in der Schmelze, Unlöslichkeit im festen Zustand	Schaubild	Löslichkeit im Mischkristall, Unlöslichkeit nach Umwandlung
	Liquidus-Linie \triangleq Linie GSE Solidus-Linie \triangleq Linie PSK Verhalten bei der Abkühlung	
Aus der Schmelze (flüssige Lösung) scheiden sich solange Kristalle aus,		Aus den Mischkristallen (feste Lösung) scheiden sich solange Kristalle aus,
links A-Kristalle, von C: rechts B-Kristalle, bis die Restschmelze die eutektische Konzentration angenommen hat.		links α -Eisen (Ferrit), von S: rechts Fe ₃ C (Zementit), bis die restlichen Mischkristalle die Konzentration des Punktes S (0,8 % C) angenommen haben.
Einphasige Schmelze wird zum zweiphasigen Kristallgemisch, dem	Verhalten am Pkt C bzw S	Einphasige Mischkristalle zerfallen zu einem zweiphasigen Kristallgemisch, dem
Eutektikum		Eutektoid (Perlit)

Wegen der Ähnlichkeit der Vorgänge wird die an der Linie PSK erfolgende γ - α -Umwandlung als *eutektoider* Zerfall des Austenits bezeichnet. Das entstehende Kristallgemisch ist dann das *Eutektoid* mit dem metallographischen Namen Perlit.

Perlit ist ein Gefügebereich aus den beiden Phasen *Zementit* (in Lamellen, dunkel) und *Ferrit* (hell), der das Grundgefüge bildet (\rightarrow Bild und Abschnitt Austenitzerfall).



Perlitischer Stahl, 0,8 % C;

500:1

Nachfolgend sind nochmals die Ausscheidungs- und Umwandlungsvorgänge von je einem Stahl links und rechts vom Punkt S (0,8 % C) mit Hilfe der Hebelbeziehung erläutert.

Stähle mit C-Gehalten unter 0,8 % C

(unterperlitische Stähle), Bild 3.6.

Im Bild ist ein Stahl mit 0,2 % C an vier verschiedenen Temperaturpunkten untersucht und sein Gefüge schematisch skizziert.

Oberhalb GS ist er homogen austenitisch, die γ -Mischkristalle enthalten 0,2 % C und sind *unge- sättigt*, da sie bei dieser Temperatur noch mehr C-Atome lösen könnten.

Beim Schneiden der Linie GS beginnt die γ - α -Umwandlung, die beim reinen Eisen am Punkt G (911 °C) erfolgt und durch C-Gehalte erniedrigt wird.

Dabei entsteht im Austenit als zweite Phase Ferrit, kubisch-raumzentriertes α -Eisen. Die eingezeichneten Hebelwaagen zeigen mit sinkender Temperatur die Zunahme des Ferrits und Abnahme des Austenits. Gleichzeitig erhöht sich der C-Gehalt des Austenits in Richtung auf Punkt S, (Weg des Punktes A nach A_1 bzw. auf der unteren Achse von A' nach A'_1).

Diese Anreicherung des C-Gehaltes geschieht durch Diffusion der C-Atome aus den γ -Mischkristallbereichen, die zu Ferrit werden. Ferrit hat keine ausreichenden Zwischengitterplätze für C-Atome (\rightarrow 3.1). Eine „Wanderung“ der C-Atome durch das Raumgitter (bei höheren Temperaturen schwingt es infolge der Wärme- bewegung) ist wegen der Kleinheit der C-Atome gegenüber den Fe-Atomen möglich, benötigt jedoch Zeit.

Bei schneller Abkühlung wird die Diffusion behindert, es entstehen andere Gefüge.

Zusammenfassung: Immer, wenn ein unterperlitischer Stahl bei langsamer Abkühlung die Temperatur 723 °C (Linie PSK) erreicht, besteht er aus dem voreutektoid ausgeschiedenen Ferrit und noch nicht umgewandelten γ -Mischkristallen, mit 0,8 % gelöstem C.

Einteilung

der Stähle nach ihrer Lage zum Punkt „S“:
links von S: unterperlitisch, (- eutektoid)
rechts von S: überperlitisch, (- eutektoid)

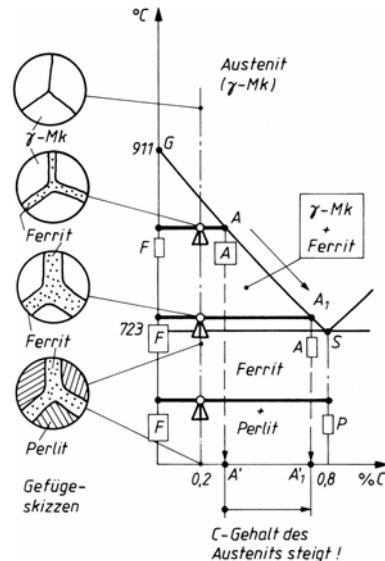


Bild 3.6 Abkühlung eines unterperlitischen Stahles mit 0,2 % C

Hinweis:

C-Atome können im dicht gepackten γ -Eisen nur langsam diffundieren, im lockerer gepackten α -Eisen ist die Diffusionsgeschwindigkeit etwa 100-mal so groß.

Vergütungs- und Härtungsgefüge entstehen durch eine teilweise oder vollständige Behinderung der Kohlenstoffdiffusion beim Abschrecken, dabei verschieben sich die Umwandlungstemperaturen nach unten, Bild 2.19.

Analogie: Verhalten einer Legierung des Grundtyps II, Kristallgemisch:

Beim Erreichen der Solidus-Linie wurden so lange Primärkristalle ausgeschieden, bis die Restschmelze die eutektische Konzentration angenommen hat.

Austenitzerfall = Perlitzbildung

Beim Durchlaufen der Linie PSK erfahren alle Stähle diese letzte Umwandlung. Sie kann in zwei Teiltorgängen gesehen werden:

- Der kfz γ -MK wandelt sich in das krz α -Eisen. Dieser Vorgang verläuft mit geringem Energieaufwand schlagartig.
- Die eingelagerten C-Atome (0,8 %) werden aus dem entstehenden α -Gitter herausgedrängt, sie müssen *diffundieren*, um nach längerem Weg zusammen mit Fe-Atomen die intermetallische Phase Fe_3C , Zementit, zu bilden.

Zur Veranschaulichung dieses Vorganges ist in Bild 3.7 modellhaft ein Austenitkorn abgebildet. Der mittlere Bereich hat die Umwandlungstemperatur $723^{\circ}C$, oberhalb liegt sie höher. Deshalb ist erst das halbe untere Korn umgewandelt.

Ferrit und Zementit wachsen in Lamellenform nach oben in den Austenit hinein. Dabei müssen die im Austenit gelösten C-Atome vor der Front der wachsenden Ferritlamellen seitlich ausweichen und sich an die Zementitlamellen angliedern (kleine Pfeile).

Das Wachstum der Ferrit- und Zementitlamellen ist mit der Diffusion der C-Atome aus dem Austenit gekoppelt. Diffusion (= Platzwechsel von Atomen) braucht aber Zeit.

Beim Abschrecken steht sie nicht zur Verfügung. So können die C-Atome nur kleine Wege zurücklegen, es bilden sich *dünnere*, dafür *zahlreichere* Lamellen, d.h. ein feinkörnigeres Gefüge.

Bei weiterer Abkühlung auf Raumtemperatur finden keine Umwandlungen mehr statt.

Das Gefüge der unterperlitzischen Stähle besteht dann aus dem (voreutektoid) ausgeschiedenen Ferrit (helle Flecken im Schliffbild) und den Perlitzbereichen (dunkle Flecken), deren Lamellenstruktur erst bei stärkerer Vergrößerung zu erkennen ist (Bilder 3.9 und 3.8).

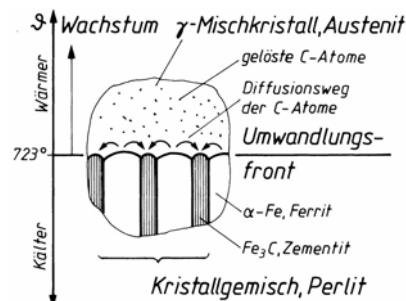


Bild 3.7 Bildung des lamellaren Perlits, Modellvorstellung

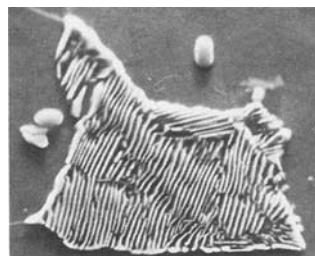


Bild 3.8 Perlit,

6400:1

Der metallographische Name „Perlit“ röhrt vom perlmuttartigen Glanz unter dem Mikroskop her.

Hinweis:

Diese Erscheinung ist die Grundlage aller Vergütungsverfahren. Die feinere Verteilung der harten, spröden Phase Zementit im zähen Grundgefüge ergibt höhere Festigkeit und Zähigkeit des Werkstoffes.

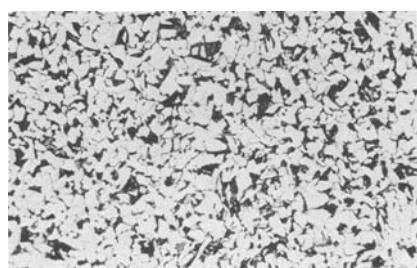


Bild 3.9 Unterperlitzischer Stahl, 0,2 % C, 100:1

Stähle mit C-Gehalten über 0,8 % C (überperlitische Stähle)

Im Bild 3.10 ist ein Stahl mit 1,4 % C bei der Abkühlung an vier Temperaturpunkten untersucht, die Gefüge schematisch skizziert.

Bei der Temperatur der Linie ES sind die Mischkristalle *gesättigt*.

Linie ES gibt für jede Temperatur die größte Löslichkeit der C-Atome im γ -Eisen an. Bei 1147 °C können 2 % C gelöst werden, bei 723 °C nur noch 0,8 % C. Deshalb kann die Linie ES als *Löslichkeits- oder Sättigungsline* bezeichnet werden.

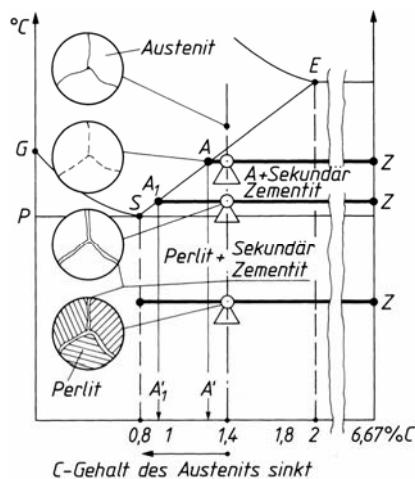
Unterhalb der Linie ES kann das Gitter nicht mehr soviele C-Atome einlagern (siehe Lot von Punkt A auf die untere Achse).

Deswegen müssen C-Atome aus den γ -Mischkristallen diffundieren, sie wandern an die Korngrenzen und bilden dort Zementitkristalle: *Sekundärzementit*.

Diese Zementitausscheidung erfolgt bei sinkender Temperatur so lange, bis der restliche Austenit seinen C-Gehalt auf den des Punktes S (0,8 % C) erniedrigt hat (Weg des Punktes A nach A₁ und Lote auf die untere Achse A' und A₁').

An der Linie PSK besteht der Stahl zunächst aus γ -Mischkristallen mit 0,8 % C und einem Netz von Sekundärzementit, dann erfolgt wie bei unterperlitischen Stählen der Zerfall des Austenits zu Perlit.

Das Gefüge der überperlitischen Stähle besteht bei Raumtemperatur aus Perlit mit dem Netz aus Sekundärzementit (Bild 3.11).



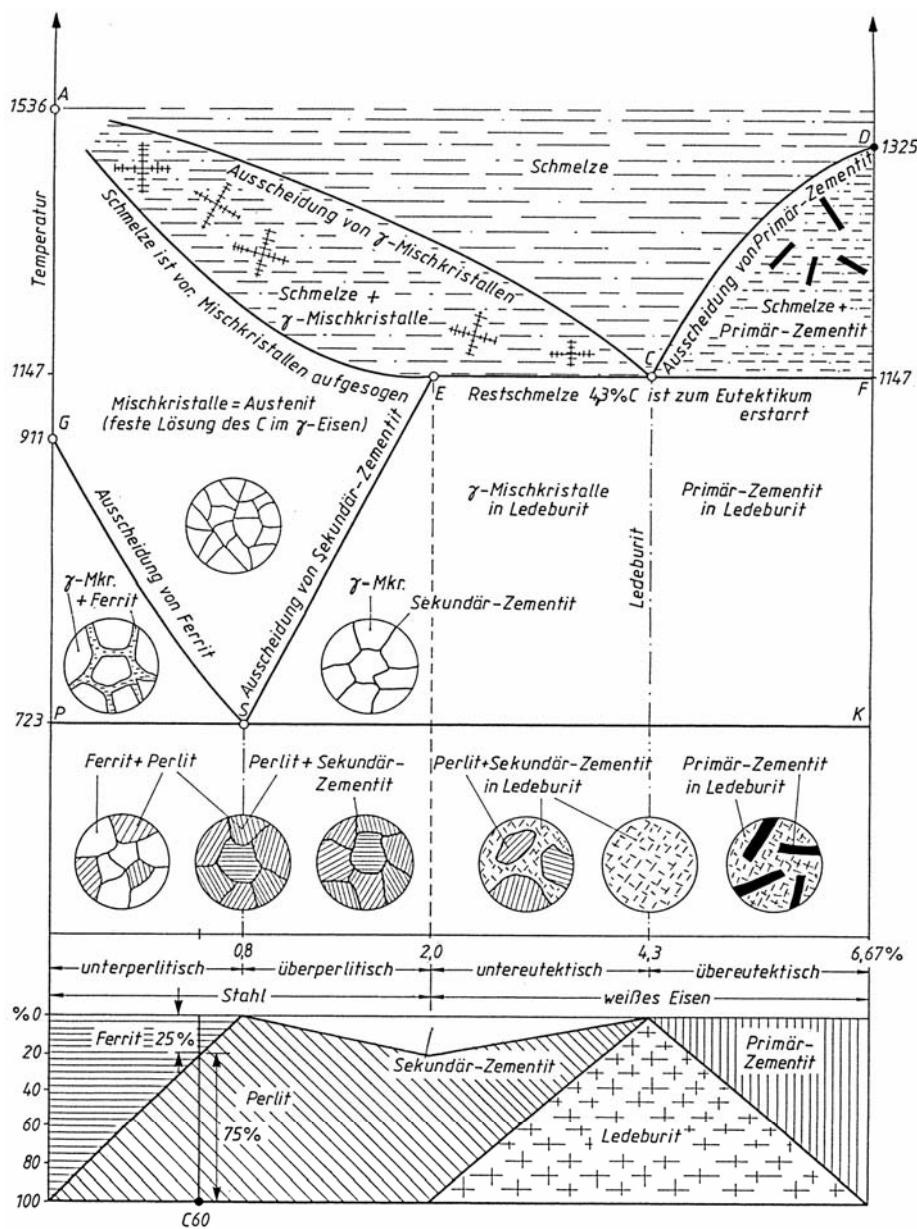


Bild 3.12 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (vereinfachte Darstellung)

Ablesebeispiel für Wirkung von 0,6 % C auf das Gefüge (unteres Diagramm): Senkrechte Hilfslinie bei 0,6 % C schneidet die Felder „Ferrit“ und „Perlitz“. Die Strecke im Ferritfeld beträgt 25 %, die im Perlitz 75 %. Das sind die Gefügebestandteile eines Stahles C60 (0,6 % C-Gehalt).

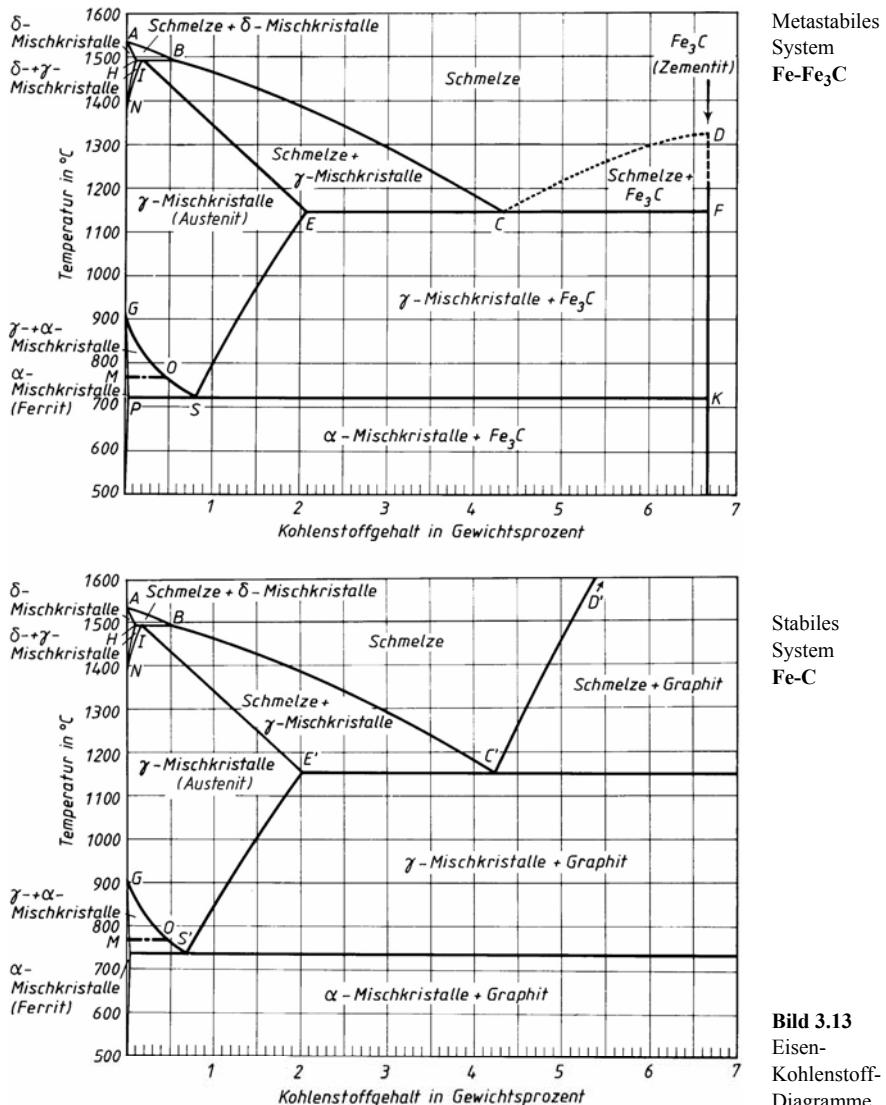
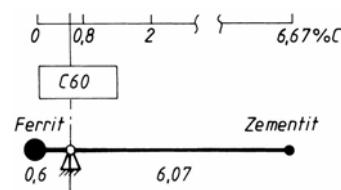


Bild 3.13
Eisen-Kohlenstoff-Diagramme

Wollen wir dagegen die *Phasen* (Ferrit und Zementit) bestimmen, müssen wir die Hebelbeziehung anwenden: Das Bild (→) zeigt:

9 % Zementit und 91 % Ferrit,

d.h. 0,6 % C-Atome bauen 9 % Zementit Fe_3C auf, die aber 75 % des Gefüges (im Perlit) als harte, spröde Lamellen durchsetzen!



Mit fortschreitender Abkühlung erfolgen die bereits behandelten Umwandlungen:

- Zementitausscheidung aus den γ -Mischkristallen, der Zementitanteil erhöht sich.
- Bei PSK zerfallen die γ -Mischkristalle zu Perlit.

Bei RT bestehen diese Legierungen aus dem Eutektikum Ledeburit mit eingebetteten Perlitbereichen (Bild 3.14, dunkle Flecken: Perlit; gesprankelte Fläche: Ledeburit).

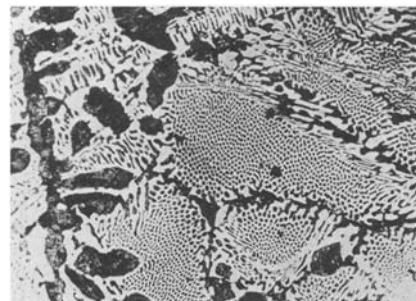


Bild 3.14 Untereutektisches Eisen, 2,8 % C,
200:1

Das Eutektikum Ledeburit

Unmittelbar nach der Erstarrung liegt ein feinkörniges Gemenge aus γ -Mischkristallen und Zementit vor. Die γ -Mischkristalle unterliegen der Zementitausscheidung und zerfallen bei 723 °C zu Perlit.

Bei RT besteht Ledeburit aus einem feinkörnigem Gemenge von Perlit und Zementit (Bild 3.15).



Bild 3.15 Eutektisches Eisen, 4,3 % C,
Ledeburit 200:1

3.4 Einfluss des Kohlenstoffs auf die Legierungseigenschaften

3.4.1 Mechanische Eigenschaften

Die Eigenschaften eines Werkstoffes, der ein Haufwerk verschiedener Kristallarten – Phasen – darstellt, werden von diesen geprägt und sind abschätzbar. Das Mischungsverhältnis der Phasen kann mit der Hebelbeziehung bestimmt werden. Die Gefügebestandteile lassen sich aus dem EK-Diagramm unterhalb Bild 3.12 ablesen.

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die im Stahl auftretenden Kristallarten, ihre Struktur und die Eigenschaften (Bild 3.17).

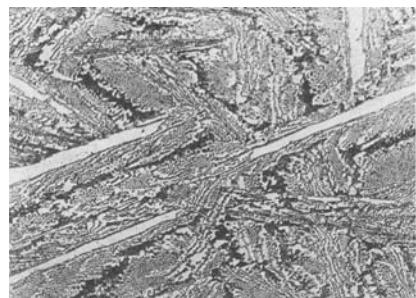


Bild 3.16 Übereutektisches Eisen, 5 % C,
200:1

Tabelle 3.1: Kristallarten in Fe-C-Legierungen

Eigenschaften	Ferrit	Austenit	Zementit	Graphit
Stoff/Gitter	α -Fe, krz	γ -Fe, kfz	Fe_3C , rhomboedrisch	C, hex. Molekülgitter
Härte	weich 60 HV	–	hart, 800 HV	sehr weich
Verformbarkeit	hoch	sehr hoch	keine, spröde	keine, spröde
sonstige	magnetisch	unmagnetisch	magnetisch	Festschmierenstoff

Stähle: Im Gefüge kommt zum reinen Ferrit mit steigendem C-Gehalt zunehmend Zementit hinzu, zunächst im Perlit. Bei 0,8 % C ist Stahl rein perlitisch. Härte HB und Festigkeit R_m nehmen zu (Bild 3.17), Verformungskennwerte wie Bruchdehnung A und Brucheinschnürung Z dagegen ab.

Mit steigendem C-Gehalt tritt Sekundärzementit auf den Korngrenzen auf (im Gefüge als Netz zu erkennen), dessen Anteil bei 2,0 % C ca. 20 % beträgt. Er entsteht zwischen den Kristallen und schwächt den Zusammenhalt. Damit sinkt die Zugfestigkeit wieder ab (Kurve R_m in Bild 3.17). Die Härte steigt dagegen weiter an.

Unter- bis übereutektische Legierungen gehören zu den Gusswerkstoffen (\rightarrow 6.2 u. Tabelle 6.1).

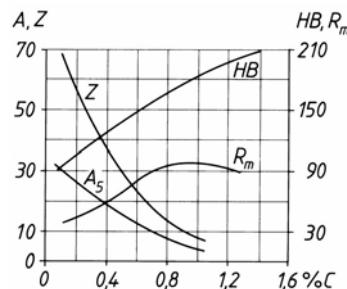


Bild 3.17 Einfluss des C-Gehaltes auf die mechanischen Eigenschaften von Stahl, Zugfestigkeitswerte R_m mit 10 multiplizieren, Einheit ist MPa = N/mm². Bruchdehnung A und Brucheinschnürung Z in %

3.4.2 Technologische Eigenschaften

Für die Formgebung zu Bauteilen müssen zahlreiche Fertigungsverfahren durchlaufen werden. Das erfordert bestimmte technologische Eigenschaften (\rightarrow Werkstoffprüfung).

Tabelle 3.2: Einfluss des Kohlenstoffs auf die technologischen Eigenschaften

Eignung zum	Einfluss des Kohlenstoffs
Gießen	Erniedrigt die Schmelztemperaturen erst bei größeren C-Gehalten (> 3 %), günstig durch niedriges Schwindmaß (1,0...1,5 %), Stahlguss (< 1,2 %) ist wegen der Ausscheidung von γ -Mischkristallen in der Schmelze nicht dünnwindig vergießbar, hohes Schwindmaß (1,5...2 %).
Warmumformen	Umformtemperaturen liegen im Austenitgebiet unterhalb der Solidus-Linie. Das Gefüge ist homogen austenitisch, Stähle mit höheren C-Gehalten werden bei sinkenden Temperaturen zweiphasig durch Ausscheidung von Sekundärzementit, Gefahr von Rissen. C-arme Stähle sind bei höheren Temperaturen leichter verformbar (kleinere Kräfte).
Kaltumformen	Ferrit lässt stärkere Umformungen zu. Der spröde Zementit verhindert Bruchdehnung und -einschnürung. Die Grenze liegt bei etwa 0,8 % C. Kraft- und Arbeitsbedarf steigen mit dem C-Gehalt. Eine kugelige Form der Zementitkristalle erhöht die Kaltformbarkeit.
Spanen	Schnittkraft und Schneideverschleiß steigen mit dem Zementitanteil, bei kugeliger Zementitausbildung werden sie vermindert. Kohlenstoff C als Graphit (Gusseisensorten) erleichtert das Spanen durch seine Schmierwirkung.
Schweißen	Schweißeignung hängt von der Fähigkeit ab, die beim Schweißen entstehenden Spannungen durch kleine plastische Verformungen abbauen zu können. Deshalb sind Stähle mit höherem C-Gehalt und kleiner Bruchdehnung rissgefährdet.
Härten, Vergüten	Eine merkliche Härtesteigerung nach dem Abschrecken ist ab 0,3 % C festzustellen, sie steigt bis 0,8 % C und bleibt dann konstant (Bild 5.19).

3.5 Einfluss von Legierungselementen auf das EKD

3.5.1 Elemente, die das Austenitgebiet erweitern

Beim Reineisen ist der Haltepunkt A_{r3} (911°C) die niedrigste Temperatur, bei der langsam abgekühlter Austenit noch existieren kann. Gelöste C-Atome erweitern diesen Bereich, indem A_{r3} nach unten verschoben wird (Linien PSK im EKD). LE mit ähnlicher Wirkung werden als Austenitbildner bezeichnet. Es sind:

Mangan Mn, Nickel Ni, Cobalt Co, Stickstoff N

Bei höheren Gehalten erweitern sie den Existenzbereich der γ -Mischkristalle bis auf RT (Bild 3.18), dadurch entstehen **austenitische Stähle**, sie haben bei RT ein homogenes Gefüge aus γ -Mischkristallen und dadurch ein besonderes Eigenschaftsprofil:

- niedrige Streckgrenze, stark umformbar,
- zäh, auch bei tiefen Temperaturen,
- unmagnetisch durch das Kfz-Gitter,
- umwandlungsfrei, kein Härteln und Vergüten möglich.

Die Austenitbildner können sich gegenseitig ersetzen, dadurch sind kostengünstige Kombinationen möglich.

3.5.2 Elemente, die das Austenitgebiet verkleinern

Elemente einer anderen Gruppe verkleinern das Gebiet der γ -Mischkristalle oder schnüren es ab.

Chrom Cr, Silicium Si, Molybdän Mo, Vanadium V, Titan Ti, Aluminium A

Im System Fe-Cr (Bild 3.19) erstarren Legierungen bis 12 % Cr wie andere Stähle, durchlaufen das γ -Gebiet und unterliegen dem Austenitzerfall = Perlitzbildung. Sorten mit über 13 % Cr erstarren zu α -Eisen und kühlen ohne Umwandlung bis auf RT ab. So entstehen die ferritischen Stähle. Sie unterscheiden sich von den austenitischen Stählen in wichtigen Eigenschaften (→ Tabelle 4.16).

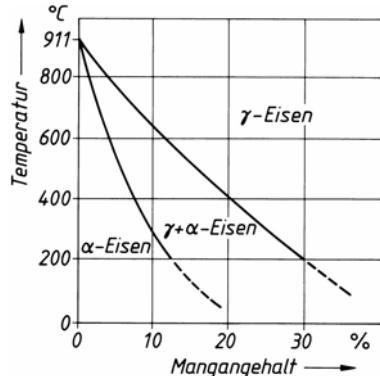


Bild 3.18 Zustandsschaubild Fe-Mn, linke Seite

Bei kleineren Anteilen, z.B. Stahl mit 10 % Mn, muss aus Temperaturen im γ -Gebiet abgeschreckt werden. Dann entsteht unternahmelter Austenit, der durch Kaltumformung örtlich zu Martensit umwandelt (Prinzip der Mangan-Hartstähle, z.B. X120Mn12).

Stickstoff N diffundiert beim Carbonitrieren in das Gefüge, erweitert das Austenitgebiet auf ca. 600°C und erniedrigt so die Abschrecktemperatur.

Hinweis: Austenitische Stähle (Tabelle 4.15)

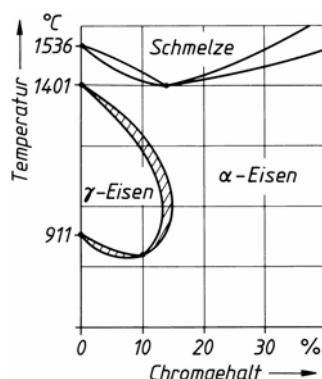


Bild 3.19 Zustandsschaubild Fe-Cr, linke Seite

3.5.3 Wirkung mehrerer Elemente

Stähle enthalten immer Kohlenstoff C, es kommt dadurch zu einer Dreistofflegierung. In den erzeugten Stählen sind stets noch weitere Elemente enthalten, die auf das Gefüge Einfluss nehmen. Die Beurteilung ist vielschichtig, weil sich ihre Wirkungen nicht einfach addieren. Sie können sich gegenseitig verstärken, abschwächen oder gemeinsam neue Wirkungen hervorrufen.

Das kann am Beispiel der Cr-Stähle gezeigt werden. Durch die Höhe des C-Gehaltes wird die Wirkung der Cr-Atome verändert.

- Cr > 13 % schnürt das Austenitgebiet ab.
- Cr ist Carbidbildner, d.h. bindet C-Atome, die dann für die erste Wirkung nicht zur Verfügung stehen.

Bild 3.20 zeigt die möglichen Gefüge der Cr-Stähle.

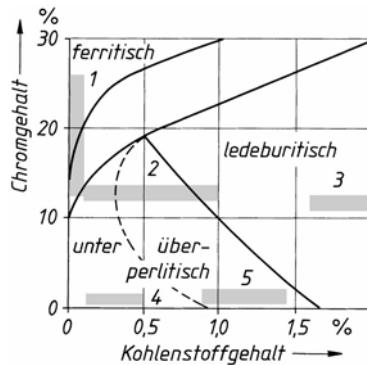


Bild 3.20 Gefüge der Chromstähle

Legende zu Bild 3.20

Feld	Beschreibung	Stahlsorten
1 C niedrig Cr hoch	Umwandlungsfreie, homogen ferritische Stähle, carbidfreies Gefüge (C niedrig)	Beispiel: XCr17 Nr. 1.4016 Korrosionsbeständiger Stahl für Küchengeräte, Beschläge und Verkleidungen im Ladenbau
	Sie haben keine sprunghafte Volumenänderungen bei Erwärmungs- und Abkühlzyklen. Die Oxidschicht lockert sich nicht. Die festhaftende Cr-Oxidschicht wird durch Si und Al verstärkt	Beispiel: X10CrAl24 Nr. 1.4762 hitzebeständiger Stahl bis zu 1200 °C. Für Ofenbauteile, die heißen Gasen ausgesetzt sind
2 C mittel Cr hoch	Härt- und vergütbare Werkzeugstähle, korrosionsbeständig durch > 13 % Cr (bei geschliffener Oberfläche)	Beispiel: X46Cr13 Nr. 1.4034 korrosionsbeständiger, härbarer Stahl für Messer aller Art, Kunstharzpressformen, Wälzlager
3 C hoch Cr hoch	Ledeburitische Werkzeugstähle, schmiedbar, härbar. Durch Cr-Carbide verschleißfest und schneidhäftig. Weitere verbesserte Sorten mit W- und V-Anteilen	Beispiel: X210Cr12 Nr. 1.2080 verzugsarmer Werkzeugstahl für Schnittwerkzeuge schwieriger Form. Ledeburit ist schmiedbar, da er statt Fe ₃ C die Cr-Carbide mit höherem Schmelzpunkt enthält
4 C niedrig Cr niedrig	Einsatz- und Vergütungsstähle, niedriglegiert, Cr bewirkt die Durchhärtung bei größeren Querschnitten	Beispiel: 41Cr4 Nr. 1.7035 Vergütungsstahl zum Öl- und Salzbadhärten, für Dicken bis 40 mm und R _{p0,2} = 1300 MPa
5 C höher Cr niedrig	Werkzeugstähle, niedriglegiert mit überperlitischem (übereutektoidem) Gefüge. Verschleißfest bei ausreichender Zähigkeit, Ölhärtbar	Beispiel: 100Cr6 Nr. 1.3505 Wälzgerüststahl für Kugeln, Rollen und Ringe von 17...30 mm Wanddicke. Kaltarbeitsstahl für mittlere Beanspruchung z.B. Reibahlen, Lehren

3.6 Stahlerzeugung

3.6.1 Allgemeines

Stähle sind die **Knetlegierungen** des Legierungssystems Fe-C. Kennzeichnende Eigenschaft ist die Schmiedbarkeit. Sie wird durch die spröde Phase Zementit Fe_3C stark herabgesetzt.

Die (theoretische) 2 %-Grenze trennt im EKD die **schmiedbaren** (→) Stähle von den Gusslegierungen, deren eutektisches Grundgefüge nicht warmumgeformt werden kann (hoher Anteil an Fe_3C).

Die Eisenbegleiter gelangen durch Erze, Zuschläge, Brennstoff und feuerfeste Auskleidungen der Gefäße und Öfen in die Roheisenschmelze, ohne dass sie bewusst zulegiert werden. Es sind dies die Elemente:

- **schädliche** (qualitätsmindernd): Phosphor P, Schwefel S, Sauerstoff O, Stickstoff N, Wasserstoff H,
- **nützliche** (in kleinen Anteilen): Mangan Mn, und Silicium Si.

Schmiedbarkeit ist die Fähigkeit, starke Warmumformungen ohne Risse zuzulassen. Das erfordert ein Gefüge, das bei 1100...800 °C homogen austenitisch ist.

Der C-Gehalt ist deshalb auf 1,7 % begrenzt. Daneben darf das Gefüge keine zusammenhängenden Schlacken aus Sulfiden, Phosphiden und Oxiden enthalten.

Hinweis: Angaben zu Einteilung und Normen der Stähle siehe unter 4.0

3.6.2 Die Wirkung der Eisenbegleiter auf Gefüge und Eigenschaften der Stähle

Einfluss der Nichtmetalle

Diese Elemente bilden bei den hohen Temperaturen mit dem Fe chemische Verbindungen: **Phosphide, Sulfide, Oxide**, die nach Abkühlung als Schlackenteilchen vorliegen. Sie sind z.T. spröde, andere strecken sich bei der Warmumformung und ergeben zeilige Gefüge (Schmiedefaser führt zu Eigenschaftsunterschieden längs und quer zur Faser, anisotropes Verhalten). Verformbarkeit und Schweißeignung nehmen ab. Die nachstehenden Tabellen beschreiben Herkunft, Gefügeeinfluss und Eigenschaftsänderungen:

Bei höheren Gehalten P und S können Phosphide und Sulfide mit Fe und dem als FeO vorliegenden Sauerstoff niedrigschmelzende Dreifach-Eutektika auf den Korngrenzen bilden, die bei der Warmumformung zu Rissen führen. Deshalb müssen P- und S-Gehalte so niedrig wie möglich eingestellt werden (Tabelle 3.4).

Tabelle 3.3: Übersicht, Einfluss von Phosphor und Schwefel

	Phosphor P	Schwefel S
Herkunft	P-haltige Erze und Zuschläge im Hochofen, Energiequelle für Blasverfahren	Sulfidische Erze, auch im Koks enthalten
Standort im Gefüge	Im Ferrit löslich (max. 2,8 % bei 1050 °C) bildet mit Fe Phosphide. Im Gusseisen entsteht aus Fe, C und Fe_3P das niedrigschmelzende Dreifach-Eutektikum Steadit mit $T_m = 950$ °C.	Im Ferrit unlöslich, bildet mit Fe und Mn Sulfide (Schlackenteilchen). Das Eutektikum aus Fe, FeO, und FeS hat $T_m = 935$ °C. Abhilfe durch Mn-Gehalte, es entsteht MnS statt FeS.

Tabelle 3.3: Fortsetzung

	Phosphor P	Schwefel S
Auswirkung auf das Verhalten	Diffundiert langsam (Atom-Ø groß) ergibt Seigerungen, erniedrigt die Schmelztemperatur des Ledeburits, das Formfüllungsvermögen steigt.	Warmumformung unter 1200 °C, oberhalb Heißbruch durch Eutektika, Rotbruch unter 1000 °C.
auf die Eigenschaften	Fe-P-Einlagerungs-Mischkristalle sind kalt-spröde. Der Steilabfall (Übergangs-Temperatur) der Kerbschlagarbeit (Bild 14.26) wird nach rechts verschoben.	Feinverteilte Sulfidschlacken (meist MnS) ergeben Kurzspan mit hoher Oberflächenqualität.
Anwendungen	Stähle für Warmpressmuttern enthalten bis zu 0,3 % P, Kunstguss bis 1 %.	Automatengestähle unlegiert und niedrig legiert mit 0,035...0,25 % S und 0,1 % P

Wegen der ungünstigen Wirkungen der beiden Elemente (gilt auch für O) werden Stahlsorten nach ihrem Gehalt an P und S eingeteilt.

S-, P- und O-Gehalte bestimmen den Reinheitsgrad, d.h. die Stahlqualität.

Tabelle 3.4: Stahlqualität und P- und S-Gehalte

Qualität		Stahlsorten, Beispiele	P in %	S in %
Qualitätsstähle	unlegiert	C10...C60 S235JO, (Walzdraht C70D)	0,045 (0,035)	0,045 (0,035)
	legiert	Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, Stähle zum Kaltumformen, 0 S460MC	0,03...0,025 0,025	0,030...0,015 0,015
Edelstähle	unlegiert	C10E...C60E, (Walzdraht C70D2)	0,035 (0,02)	0,035 (0,25)
	legiert	Werkzeugstähle, hochfeste Baustähle	0,035...0,020	0,035...0,015

Einfluss von Gasgehalten

Gase sind in der Schmelze löslich und bleiben z.T. bei der Erstarrung als Gasblasen im Gefüge zurück, wo sie die Zähigkeit stark vermindern. Deshalb wird bei der Erschmelzung die Gasaufnahme klein gehalten und durch eine Sekundärbehandlung mit Vakuum (3.6.4) weiter reduziert. Tabelle 3.5 enthält Einzelheiten über die Wirkung.

Tabelle 3.5: Einfluss der Gase Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff

Gas	Herkunft und Standort	Auswirkungen auf Verhalten und Eigenschaften
Sauerstoff O	O ₂ -Blasverfahren erzeugen FeO, das sich in der Schmelze löst und als FeO-Schlacke im Gefüge vorliegt.	Führt in Kombination mit FeS (Tabelle 3.3) zu Rotbruch beim Warmumformen, d.h. Stahl ist nicht schmiedbar bei FeO ≥ 0,2 %.
Stickstoff N	Aufnahme beim Kontakt der Schmelze mit Luft und Reststickstoff von technisch reinem O ₂	Löslichkeit von N im Ferrit ist gering, sie sinkt bei RT fast auf null. Ausscheidungen von Fe-Nitrid nach schneller Abkühlung führen zur Abnahme der Kaltzähigkeit (→ 5.4.4 Alterung).

Tabelle 3.5: Fortsetzung

Gas	Herkunft und Standort	Auswirkungen auf Verhalten und Eigenschaften
Wasserstoff H	Rostiger, feuchter Schrott und Brenngase. Hohe Löslichkeit im Ferrit und als H ₂ -Gas in Poren. H-Atome diffundieren bei RT so schnell wie C bei 1000 °C.	Abnahme der Löslichkeit bei der Erstarrung und Abkühlung führt zur Molekülbildung in Fehlstellen unter hohem Druck. Dadurch sog. Flockenrisse und innere Spaltbrüche besonders bei der Verformung großer Querschnitte aus Ni- und Mn-Stählen. Abhilfe durch Glühen mit Ausdiffundieren des Wasserstoffs.
	Kaltverformter Stahl nimmt bei chemischer Behandlung mit Säuren (Beizen, Galvanik) H-Atome auf.	Beizsprödigkeit ist eine geringe Kaltformbarkeit durch H-Atome auf Zwischengitterplätzen im Ferrit (Mischkristallverfestigung) und kann durch Glühen bei 200 °C beseitigt werden. ¹⁾

¹⁾ Die Härte von galvanisch abgeschiedenen Hartchromschichten hat die gleichen Ursachen.

Einfluss von Mangan Mn und Silicium Si

Alle Stähle enthalten von der Erschmelzung her die Elemente Mangan Mn und Silicium Si. Für die Gruppe der unlegierten Stähle sind es wichtige Legierungselemente.

Tabelle 3.6: Übersicht: Einfluss von Mangan und Silicium

	Mangan Mn	Silicium Si
Herkunft	In Erzen enthalten und durch Desoxidation nach z.B.: FeO + Mn → MnO + Fe FeS + Mn → MnS + Fe	In Erzen enthalten, Gangart Quarz, SiO ₂ Durch Desoxidation nach z.B.: 2 FeO + Si → SiO ₂ + 2 Fe; SiO ₂ bildet mit anderen Oxiden spröde, hochschmelzende Silikate.
Standort	Schlackenteilchen nach o.a. Reaktionen	
Gefügewirkung	Rest Mn im Ferrit und Zementit ergeben Walz- und Schmiedefaserstrukturen mit anisotropem Verhalten	Rest Si im Ferrit gelöst
Eigenschaften erwünscht	Mn bildet Mischcarbide (Fe, Mn) ₃ C, bremst den Zementitzerfall bei Temp. über 700 °C, steigert Festigkeit ohne Zähigkeitabfall und die Härtbarkeit.	Fördert den Zementitzerfall (zu Graphit). Steigert Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Härtbarkeit, mindert Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste.
unerwünscht	Begünstigt das Kornwachstum bei höheren Temperaturen.	Begünstigt das Kornwachstum, mindert Bruchdehnung, Tiefzieheigenschaften, Warmformbarkeit und Schweißeignung (zähflüssige Silikathaut).
Anwendung	Hochbaustahl S355J2G3 (St 52-3) erhält hohe Festigkeit bei niedrigem C-Gehalt durch 0,9...1,4 % Mn.	Magnetbleche für Trafos und E-Maschinen enthalten bis zu 4 % Si, säurefester Guss 16 % Si.

3.6.3 Rohstahlerzeugung

Bild 3.21 gibt einen Überblick über den Weg vom Erz zum Stahl. Auf die verfahrenstechnischen Einzelheiten kann im Rahmen des Buches nicht eingegangen werden. Eine gute Darstellung ist in Lit. [1] zu finden. Die wichtigsten Vorgänge sind:

Reduktion der Fe-Erze im Hochofen durch das CO des verbrennenden Kokses mit Zusatz von Kohle, Öl und Kunststoffabfällen. Hauptverfahren zur Roheisenerzeugung, Leistung 10000 t/24 h.

Direktreduktion von aufbereiteten Erzen in Schachtofen mit einem meist außerhalb erzeugten Reduktionsgas aus CO und H₂ bei niedrigen Temperaturen zu Eisenschwamm mit Fe-Gehalten von < 95 %. Verwendung auch für Sintereisenpulver, Leistung 100 t/24 h.

Roheisen enthält ca. 4 % C und größere Gehalte an den Eisenbegleitern (Mn, P, S, und Si). Sie müssen reduziert werden, um **Schmiedbarkeit** zu erreichen, das ist die Fähigkeit, starke Warmumformungen rissfrei zu ertragen.

Oxidation (hist. Frischen) ist das Verschlacken bzw. Vergasen (z.B. C zu CO) der Eisenbegleiter mit Hilfe von Sauerstoff (früher mit Luft) oder chemisch gebunden. Die Verfahren unterscheiden sich durch die Sauerstoffzufuhr:

- Sauerstoffgas bei den Blassstahlverfahren,
- Fe-Oxide beim Elektrostahlverfahren.

Sauerstoff-Aufblasverfahren (Bild 3.22): Einsatz ist flüssiges Roheisen mit Schrottzusatz zur Kühlung. Der Gasstrom kann von oben über eine Lanze, durch Düsen im Boden und auch kombiniert zugeführt werden. Die Leistung beträgt 600 t/h. Die Verfahren haben einen Anteil von ca. 80 % an der Stahlerzeugung in der BRD.

Zum Absenken des P-Gehaltes wird mit dem O₂-Strom noch Feinkalk auf die Schmelze geblasen, LDAC-Verfahren (Stahlerzeuger Linz-Donawitz, ARBED, CRNM).

Bild 3.22 Sauerstoffblasverfahren mit LDAC-Konverter
1 Sauerstoffflanze, 2 Abstichloch, 3 Tragring, 4 Futter,
5 Boden, 6 Schutzzring, 7 Abgashube, 8 Schlackenpfanne,
9 Gießpfanne, 10 Stahlentnahmewagen

(nach DEMAG)

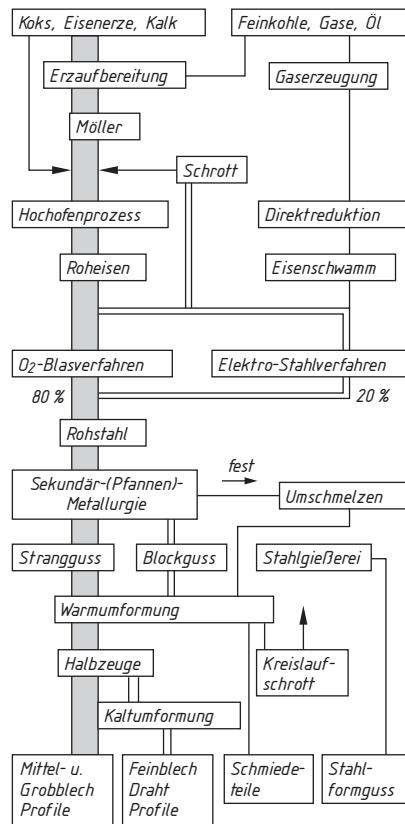
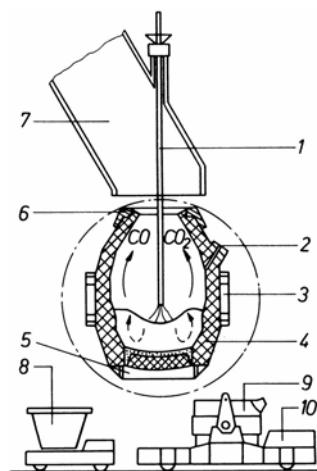


Bild 3.21 Der Weg vom Erz zum Stahl



Elektrostahlverfahren (Bild 3.23): Einsatzmaterial ist fester Schrott und Eisenschwamm. Die Öfen werden in den Stahlgießereien und Ministahlwerken eingesetzt. Letztere haben begrenztes Lieferprogramm und damit niedrigere Investitionskosten. Die Leistung der Öfen beträgt etwa 130 t/h.

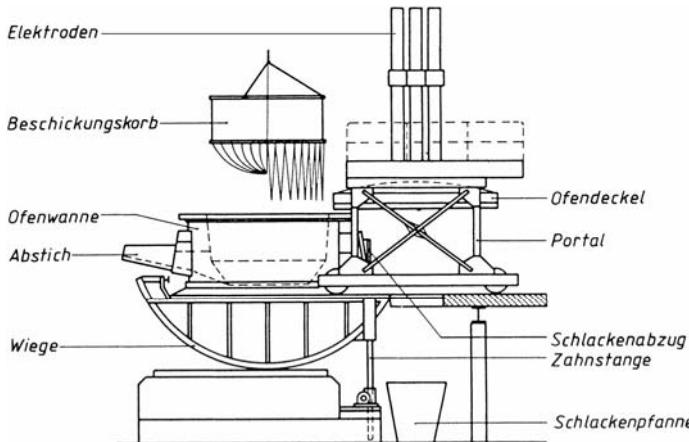


Bild 3.23 Elektrostahlverfahren, Lichtbogenofen mit ausgefahrenem Deckel beim Beschicken. Beschickungskorb linke Hälfte gefüllt, rechte Hälfte im leeren Zustand gezeichnet

(DEMAG)

3.6.4 Sekundärmetallurgie

Rohstahl enthält nach dem schlackenfreien Abstich in die Gießpfanne noch gelöstes FeO, das nach der Erstarrung im Gefüge als Oxidschlacke vorliegt. Seine Entfernung wird **Desoxidation** genannt, d.h. Reduktion des gelösten FeO durch Zugabe von Stoffen mit höherer Affinität zum O. Solche **Desoxidationsmittel** sind Al, Ca, Mg, Si und Ti, auch in Kombination.

Dabei laufen Redox-Reaktionen ab, es entstehen nichtmetallische Teilchen, die nicht vollständig in der zähen Schmelze aufsteigen können. Ihre Entfernung und weitere Arbeiten wie das Einstellen der Analyse, Legieren, sowie Absenken des Gasgehaltes werden in der Gießpfanne oder besonderen Gefäßen durchgeführt, auch Pfannenmetallurgie genannt. Dazu sind zahlreiche Verfahren entstanden (Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7: Sekundärmetallurgie

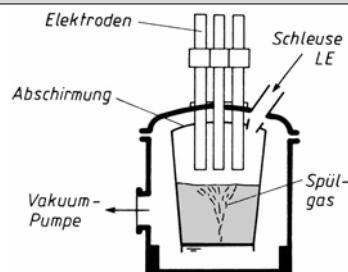
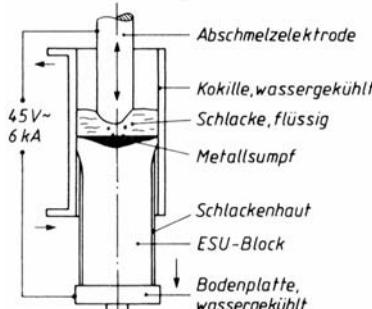
Rohstahlmerkmale	Verfahren	Beispiele für Reaktion/Anlagen
Gasgehalte zu hoch (N ₂ und H ₂)	Entgasen durch Vakuum	
Nichtmetallischen Teilchen in der Schmelze aus der Desoxidation oder Entphosphorung	Spülen mit Argon durch poröse Bodensteine fördert das Aufsteigen und homogenisiert Temperatur und Analyse	
Zu niedrige Temperatur	Elektrisch Heizen durch Elektroden (Bild 3.24) oder chemisch durch Verbrennung von Al unter Schutzgas	
Ungenaue Gehalte an Legierungselementen	Legieren durch Zugabe über eine Schleuse	Bild 3.24 Heizbarer Pfannenstand VAD-Verfahren

Tabelle 3.7: Fortsetzung

Rohstahlmerkmale	Verfahren	Beispiele für Reaktion/Anlagen
FeO-, FeS-, P ₂ O ₅ -Gehalte zu hoch	Desoxidation, Entphosphorung durch Einblasen oder Einspulen reaktiver Metalle	$3 \text{ FeO} + 2 \text{ Al} \Rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$; $2 \text{ P}_2\text{O}_5 + 6 \text{ CaO} \Rightarrow 2\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$
C-Gehalte zu hoch	Tiefentkohlung durch Frischen im Vakuum	VOD-Verfahren für C-arme Cr-Ni-Stähle
Gasgehalte zu hoch (N ₂ und H ₂)	Umschmelzen (ESU, Elektro-Schlacke-Umschmelzen Bild 3.25) oder im Vakuum-Lichtbogenofen ergibt: <ul style="list-style-type: none"> • Gasgehalte auf 50 % abgesenkt, • Abschirmung vor O₂ und N₂ aus der Luft, • Abdampfen von Spurenelementen wie Sn und Pb, • Wiederaufleben der Kohlenstoffdesoxidation: FeO-Gehalte sinken weiter 	 <p>Bild 3.25 ESU-Umschmelzanlage</p>

Umschmelzverfahren sind wegen der Kosten auf Stahlsorten für hochbeanspruchte Schmiedeteile begrenzt, wenn Längs- und Quereigenschaften möglichst gleich sein sollen (isotropes Verhalten).

Beispiele: Kaltwalzen höchster Oberflächengüte, Wälzlager für höchste Sicherheit, Vergütungsstäbe für den Flugzeugbau, warmfeste Schmiedeteile für Kraftwerksbau, Druckgießformen, HS-Stähle

3.6.5 Vergießen und Erstarren des Stahles

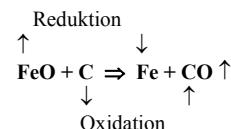
Vergießen: Der größte Teil (ca. 90 %) des in der BRD erschmolzenen Stahles wird im Strangguss vergossen. Der Rest ist Blockguss für große Schmiedeteile und Stahlguss.

Erstarren: In der Schmelze ist durch das Blasen mit Sauerstoff FeO entstanden, das mit dem noch vorhandenen C-Atomen reagiert, die sog. Kohlenstoffdesoxidation (→).

Die in der Schmelze gelösten Stoffe FeO und C liegen mit Fe und CO im sog. Chemischen Gleichgewicht (→) vor. Jede Änderung der Zustandsgrößen führt zu einer Reaktion, die ein neues Gleichgewicht anstrebt.

Die Entwicklung geht zu endmaßgenauen Gießformaten, um Walzwerke und Energie einzusparen: Vorbandgießen (15...20 mm) und Gießwalzen (1...2 mm Dicke).

Kohlenstoffdesoxidation:



Chemisches Gleichgewicht: Wenn Druck und Temperatur konstant gehalten werden, streben die Stoffe ein bestimmtes Verhältnis an.

Jede Änderung der Verhältnisse (→) verursacht Reaktionen, die ein neues Gleichgewicht herstellen.

Ein gegenüber dem Gleichgewicht höherer C-Gehalt der Schmelze tritt auch bei der Erstarrung C-armen Stähle (Baustähle) auf (→). Sie enthalten mehr FeO als C-reichere Stähle mit weniger FeO.

Das aufsteigende CO-Gas bewirkt ein Kochen in der Form, der Stahl ist **unberuhigt** (→) vergossen. Das Kochen fördert das Aufsteigen von nicht-metallischen Teilchen.

Die CO-Entwicklung während der Erstarrung muss verhindert werden bei:

- C-reichen Stählen, die nicht stark umgeformt werden können (Rissgefahr durch Fe_3C),
- Stahlformguss, (Blasen wären innere Fehler), Strangguss.

Hier muss ohne aufsteigende CO-Blasen, also beruhigt (→) vergossen werden.

Seigerung ist die Entmischung einer Schmelze durch die Kristallisation. Seigerungszonen sind i.A. Werkstoffbereiche minderer Qualität.

Blockseigerung tritt bei Stahlblöcken und dickwandigen Gussteilen auf. Im Randbereich (Formwand) bilden sich fast reine Fe-Kristalle, die Verunreinigungen reichern sich in der Restschmelze an und bilden die Seigerungszone im Kern.

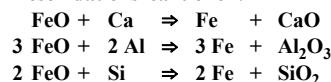
Beispiele: CO-Gas wird beim Vakuumguss abgezogen. Das Gleichgewicht ist gestört, es wird weiteres CO gebildet, dadurch sinkt der FeO Gehalt (Desoxidation).

Beispiel: Die ersten γ -Mischkristalle, die an den kalten Formwänden entstehen, entziehen der Schmelze C, das Gleichgewicht ist gestört, es kommt zur vorstehenden Reaktion.

Unberuhigt vergossen: CO-Blasen entweichen nicht vollständig, sondern bleiben als Blasenkranz unter einer Schicht C-armen Stahles eingeschlossen, verschwinden aber bei einer starken Warmumformung.

Beruhigt vergossen: Durch Zugabe von Desoxidationsmitteln entstehen feste Reaktionsprodukte, keine Gasentwicklung, der Stahl erstarrt ohne Badbewegung (↓).

Desoxidationsreaktionen:



Beispiele für Seigerungen:

Schwerkraftseigerung bei C-reichen Guss-eisensorten. Auskristallisierter, leichter Graphit schwimmt auf der Schmelze.

Antimonkristalle (Sb) steigen in der Pb-reichen Schmelze von PbSbSn-Lagermetallen auf.

Blockseigerung: Beim Warmumformen wird die Seigerungszone mit ausgewalzt und lässt sich im Profil nachweisen (Bild 14.32a).

Literaturhinweise

- Zeitschrift: Stahl und Eisen, Stahleisen-Verlag
 Horstmann, G.: Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff und die Grundlagen der Wärmebehandlung der Stähle. Verlag Stahleisen 1985
 Hougardy, H.: Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle. Verlag Stahleisen 2003
 Taube, K.: Stahlerzeugung kompakt. Vieweg Verlag 1998
 Internet: www.stahl-online.de/forschung-und-technik (viele Links)

4 Stahlsorten – Normen und Verwendungsgruppen

4.1 Der Werkstoff Stahl

4.1.1 Begriffe und Einteilung

Der im Strang- oder Blockguss erzeugte Stahl wird nach dem Vergießen warm- und evtl. kaltumgeformt und als Stahlerzeugnis (→) durch Trennen, Umformen und Fügen weiterverarbeitet.

Stahlguss ist in Formen vergossener Stahl mit ähnlichen Analysen, der nur sehr selten noch weiter warmumgeformt wird (→ Abschnitt 4.8).

Einteilung der Stähle DIN EN 10020/00

Stahlsorten werden nach unterschiedlichen Gesichtspunkten (→) zu Gruppen zusammengefasst. Ihnen ist jeweils eine bestimmte Eigenschaft oder Eignung gemeinsam, mit denen auch die jeweiligen Normblätter benannt sind.

Eine Gliederung erfolgt nach dem Gehalt an LE in 3 Klassen:

Unlegierte Stähle: Die Sorten erreichen keinen der Grenzwerte nach Tabelle 4.1.

Nichtrostende Stähle: Die Sorten haben > 1,2 % C-Gehalt und > 10,5 % Cr.

Andere legierte Stähle: Alle Sorten, die nicht zu den beiden genannten gehören.

Übergeordnet ist die Unterscheidung nach dem Reinheitsgrad in Qualitätsstähle und Edelstähle.

Unlegierte Qualitätsstähle: Stahlsorten, die nicht den Kriterien für Edelstähle entsprechen.

Unlegierte Edelstähle: Stahlsorten mit einem höheren Reinheitsgrad durch aufwändige Metallurgie. Sie erfüllen eine oder mehrere der folgenden Anforderungen:

- Besonders niedrige Gehalte an nichtmetallischen Einschlüssen,
- gleichmäßiges Ansprechen auf Wärmebehandlungen, mit bestimmter Einhärtungstiefe beim Oberflächenhärteten,

Stahlerzeugnisse: (DIN EN 10079/01)

- Flacherzeugnisse: Bleche und Bänder,
- Langerzeugnisse: z.B. Rohre, Doppel-T-Träger und andere Profile, nebst Sonderprofilen wie z.B. Spundwandbohlen

Einteilungskriterien sind die Eignung für z.B.:

- bestimmte **Anforderungen**: warmfeste, kaltzähe und korrosionsbeständige Stähle;
- bestimmte **Fertigungsverfahren**: z.B. Nieten-, Einsatz-, Vergütungs-, Automatenstähle, oberflächenhärtbarer Stahlguss;
- bestimmte **Bauteile**: z.B. Feder-, Nieten-Schrauben-, Ventil-, Wälzlager- und Werkzeugstähle.

Tabelle 4.1: Grenzwerte zwischen unlegierten und legierten Stählen (Schmelzenanalyse)

LE...	%	LE...	%	LE...	%
Al	0,30	Cr	0,30	Co	0,30
Cu	0,40	Mn	1,65	Mo	0,08
Ni	0,30	Nb	0,06	Pb	0,40
Se	0,10	Si	0,60	Te	0,10
Ti	0,05	V	0,10	Bor	0,0008
W	0,30	Zr	0,05	Sonst.	0,10

Beispiele für unlegierte Edelstahlsorten sind: Stähle mit vorgeschriebenen max. P- und S-Gehalt < 0,02 %, (Federdraht, Elektroden, Reifenkorddraht).

Ausscheidungshärtende Stähle mit ferritischer-perlitischem Mikrogefüge ($\geq 0,25\% \text{ C}$), Spannbetonstähle, Kernreaktorstähle und Stähle mit festgelegter elektrischer Leitfähigkeit von $> 9 \text{ S/mm}^2$.

- festgelegter Mindestwert der Kerbschlagarbeit (vergütet), $KV > 27 \text{ J}$ bei -50°C , Charpy-V-Proben (längs), bzw. $> 16 \text{ J}$ (quer).

Nichtrostende Stähle werden noch unterteilt:

Kriterium	Stahlart
Ni-Gehalt	Stähle mit $< 2,5\%$ Stähle mit $> 2,5\%$
Haupteigenschaften	korrosionsbeständige Stähle hitzebeständige Stähle warmfeste Stähle

Tabelle 4.2: Grenze der chemischen Zusammensetzung zwischen Qualitätsstählen und Edelstählen bei schweißgeeigneten legierten Feinkornbaustählen

Element	Masseanteil in %	Element	Masseanteil in %
Cr	0,50	Cu	0,50
Mn	1,80	Mo	0,10
Nb	0,08	Ni	0,50
Ti, V, Zirkon (Zr)		je 0,12	

Legierte Qualitätsstähle: Stahlsorten mit Anforderungen an z.B. Zähigkeit, Korngröße oder Umformbarkeit. Sie sind im Allgemeinen nicht für ein Vergüten oder Oberflächenhärtung vorgesehen.

- Stähle mit Dicken $\leq 16 \text{ mm}$, einer Streckgrenze $< 380 \text{ MPa}$ und
- festgelegtem Mindestwert der Kerbschlagarbeit $KV > 27 \text{ J}$ bei -50°C (Charpy-V-Kerbprobe, längs entnommen) oder $> 6 \text{ J}$ (quer),
- Gehalte an LE sind niedriger als in Tabelle 4.2

Legierte Edelstähle sind außer den nichtrostenden Stählen alle Stahlsorten, die nicht zu den Qualitätsstählen gehören.

Beispiele für legierte Qualitätsstähle sind: Schweißgeeignete Feinkornstähle für Konstruktionen im Stahl-, Druckbehälter- und Rohrleitungsbau,

legierte Stähle für Schienen, Spundbohlen und Grubenausbau,

legierte Stähle mit festgelegtem Cu-Gehalt,

legierte Stähle für Flacherzeugnisse kalt- und warmgewalzt für die Kaltumformung, die mit B, Nb, Ti, V und/oder Zr legiert sind und Dualphasenstähle.

Beispiele für legierte Edelstähle sind: Einsatz- und Vergütungsstähle, Werkzeugstähle, Wälzlagerringstähle, Schnellarbeitstähle und Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften.

4.1.2 Einfluss der Legierungselemente auf das Gefüge

Legierungselemente unterscheiden sich stark in ihrer Wirkung, weil sie im Gefüge an verschiedenen Standorten eingebaut sind (Tabelle 4.3) und der C-Gehalt diese Wirkung noch verändert. Hinzu kommt die Wirkung weiterer LE. Sie addieren sich nicht einfach, sondern ergeben evtl. gemeinsam neue Eigenschaftsänderungen (Beispiel Cr-Ni-Stähle).

Tabelle 4.3: Übersicht, Standort und Wirkung der LE im Stahl

Standort, LE-Atome bilden	Auswirkung / Bedeutung
Austausch-Mischkristalle bis zur Löslichkeitsgrenze	Mischkristallverfestigung ($\rightarrow 2.3.2$) Die Umwandlungspunkte und -linien des EKD werden verschoben, es entstehen neue Zustandsschaubilder ($\rightarrow 3.5$)
NE im Mischkristall ändern Löslichkeit der C-Atome und behindern die C-Diffusion bei der wichtigen γ - α -Umwandlung. Das Härteln wird vereinfacht. Zum Durchhärteln und Durchvergüten kann langsamer abgekühlt werden (wichtig für Teile mit großen Querschnitten).	Phasen sind härter als Zementit und erhöhen den Verschleißwiderstand, wichtig für Werkzeugstähle, erhöhen in feindisperser Form die Festigkeit, auch bei höheren Temperaturen (Anlassbeständigkeit).

Mischkristallbildner

Alle LE sind in kleinen Gehalten im Ferrit und Austenit löslich, manche vollkommen (Tabelle 4.4). Ein Ausnahme ist Blei, es ist unlöslich.

Gelöste Elemente erhöhen die Festigkeit des Ferrits (Mischkristallverfestigung → 2.3.2).

Gleichzeitig wirken sich die LE auf das γ - α -Umwandlungsverhalten aus. Die LE-Atome ändern die Löslichkeit der C-Atome und behindern die Diffusion aus dem Austenit bei der Umwandlung. Die Folgen sind (→):

- Oberhalb der Linie PS wird weniger Ferrit ausgeschieden,
- beim Austenitzerfall wird der Abstand der Zementitlamellen kleiner, dadurch bildet sich der Perlit feinstreifiger aus (wie bei schneller Abkühlung des Austenits).

Es entstehen Stähle mit perlitischem (untereutektoidem) Gefüge, obwohl ihr C-Gehalt unter 0,8 % liegt (→ Beispiel). Für die Wirkung auf das EKD bedeutet das:

Gelöste LE verschieben die Punkte S und E des EKD nach links.

Carbidbildner

Metalle mit einer höheren Affinität zum Kohlenstoff können Fe-Atome im Zementit teilweise ersetzen und Mischcarbide bilden, daneben auch eigene (→). Diese Metalle bilden einen Block im PSE als Nebengruppenelemente.

Periode	Nebengruppe					
	IVB		VB		IVB	
	Titan	Ti	Vanadium	V	Chrom	Cr
4						
5	Zirkon	Zr	Niob	Nb	Molybdän	Mo
6	Hafnium	Hf	Tantal	Ta	Wolfram	W

Ihre Carbide zählen zu den intermetallischen Phasen mit gemischten Bindungsarten, härter als Zementit (Tabelle 4.5). Die Löslichkeit im Austenit ist verschieden, ebenso ihr Einfluss auf Härte-

Tabelle 4.4: Löslichkeit (%) einiger LE im Eisen

Element	im Ferrit bei 9 in °C	im Austenit bei 9 in °C
Ferrit bildende Legierungselemente		
Chrom	100	800
Molybdän	37,5	1450
Vanadium	100	1400
Austenit bildende Legierungselemente		
Mangan	3,5	700
Cobalt	76,0	600
Nickel	8	300
	100	1130
	100	1000
	100	910

Auswirkungen: Ferrit ist die weichere Phase im Stahl. Hier beginnt die erste plastische Verformung, die Streckgrenze ist erreicht. Viele dünne Zementitlamellen im Ferrit stützen das Ferritgefüge besser als wenige dicke. Das bedeutet größere Kräfte oder

die Dehngrenze $R_{p0,2}$ wird erhöht.

Beispiel: Stahl mit 10 % Cr hat bereits bei 0,3 % C ein rein perlitisches Gefüge, es gibt keinen voreutektoid (zwischen GS und PS) ausgeschiedenen Ferrit. LE wie Mo, V, und W erreichen dies mit noch kleineren Anteilen.

Beispiele für Carbide

Mischcarbide	(Fe, Mn) ₃ C, (Fe, Cr) ₃ C
Doppelcarbide	Fe ₃ W ₃ C, Fe ₄ Mo ₂ C
Sondercarbide	Cr ₂₃ C ₆ , Cr ₇ C ₃

Sondercarbide ist ein Sammelname für solche Carbide, die nicht die Zementitstruktur besitzen. Ihre Härte steigt mit dem C-Anteil, also MC härter als M₂C (Tabelle 4.5).

Tabelle 4.5: Mikrohärte einiger Carbide

Carbid	Härte	Carbid	Härte
TiC	3200	VC	2800
NbC	2800	Wc	2400
Cr ₃ C ₂	2150	Mo ₂ C	1500

verhalten (v_{crit}) und die Gefügestabilität bei höheren Temperaturen. Sie erhöhen Anlassbeständigkeit und verhindern als Korngrenzenauscheidung das Kornwachstum.

Der Anteil der LE, die in Carbiden gebunden sind, geht dem Grundgefüge verloren. Damit auch dort genügend LE-Atome wirken können, ergibt sich für Carbidbildner die Forderung:

Hoher C-Gehalt im Stahl erfordert hohen Anteil an Carbidbildnern (→ Beispiel).

Nitridbildner

C und N haben als Nachbarn im PSE kleine, ähnliche Atomradien, ihre Carbide und Nitride z.T. gleiche Kristallgitter. Darin sind C- und N-Atome austauschbar. Es können sich auch Carbonitride bilden. Dazu gehören die Elemente:

Aluminium Al, Bor B, Chrom Cr, Niob Nb, Titan Ti, Vanadium V, Zirkon Zr

Nitride liegen als feindisperse Ausscheidungen innerhalb der Kristalle vor und bewirken:

- Streckgrenzerhöhung bei C-armen, mikrolegierten Bau- und austenitischen Stählen (→),
- Behinderung des Kornwachstums beim Glühen,
- Steigerung der 0,2 %-Dehngrenze bei warmfesten Stählen (vergütet) ohne Zähigkeitsabfall und geringere Kriechrate bei Temperaturen über 400 °C.

Anwendung: Alle Werkzeugstähle und verschleißfester Guss enthalten diese Carbide möglichst feinkörnig im gehärteten Grundgefüge. Aus Gründen der Schmiedbarkeit ist der Carbidgehalt auf ca. 15 % begrenzt.

Höchste Carbidanteile besitzen die Sinterhartstoffe mit ca. 95 % (WC + TiC + TaC) in einem Co-Grundgefüge.

Beispiel: Kaltarbeitsstahl **X210Cr12**. Mit 2,1 % C und 12 % Cr hat er ca. 15 % Carbidanteil. Bei Härtetemperatur ist genügend Cr im Austenit gelöst, sodass er die Eigenschaft *lufthärtend* besitzt.

Beispiele: TIC und TIN haben die gleiche kubisch-flächenzentrierte Einlagerungsstruktur, (→ Tabelle 2.24).

Hinweis: Nitride sind die Träger der Härte beim Nitrieren von Nitrierstählen. Al-legierte Sorten erreichen die höchste Härte mit 950 HV1.

Nitride und Carbonitride werden durch CVD- oder PVD-Verfahren in Dünnschichten ($\approx 10 \mu\text{m}$) als Verschleißschutz auf Werkzeuge aufgebracht.

Beispiele:

S550MC, kaltumformbarer Stahl mit hoher Streckgrenze nach DIN EN 10149.

P460NH, warmfester Stahl für Druckbehälter DIN EN 10028-2 mit $\leq 0,2\%$ N; an Al oder V $\leq 0,2\%$ gebunden.

4.2 Stähle für allgemeine Verwendung

4.2.1 Anforderungsprofil

Die Masse des erzeugten Stahles besteht aus Grund- und Qualitätsstählen, die aufgrund ihrer gewährleisteten Streckgrenze als Konstruktionswerkstoff eingesetzt werden. *Temperaturen* und *Korrosionsangriff* müssen dem normalen Klima entsprechen. Für die Verarbeitung sind folgende Eigenschaften wichtig:

- Eignung zum **Kaltumformen** (→), z.B. durch Abkanten, Walzprofilieren oder Kaltziehen.

Normung: Technologischer Biegeversuch nach DIN EN ISO7438/05 (→ 14.7).

Sorten mit *besonderer* Kaltumformbarkeit werden im Kurzzeichen durch ein nachgestelltes C gekennzeichnet. Genormte Stahlsorten mit besonderer Kaltumformbarkeit (→ 4.5.2).

Die Erzeugnisse müssen das Abkanten mit bestimmten Biegehalbmesser rissfrei gewährleisten. Er ist von der Erzeugnisdicke abhängig (\rightarrow Beispiel) und steigt mit der Streckgrenze (C-Gehalt mindert Dehnung) an.

• Eignung zum Schmelzschweißen

Diese Eigenschaft hängt zunächst vom C-Gehalt ab (\rightarrow Tabelle 3.2). Sind weitere LE enthalten, so kann es bei der Abkühlung zur **Aufhärtung** kommen. Das findet in den Bereichen statt, welche die Härtetemperatur überschritten hatten und durch Luft und die Wärmeleitung in die kälteren Bereiche abgeschreckt werden.

Der Anteil der LE wird auf einen gleichartig wirkenden (äquivalenten) Kohlenstoffanteil **CE** umgerechnet (\rightarrow). Nach dem CE-Wert werden die Stähle in drei Gruppen eingeteilt (\rightarrow Tabelle 4.6).

Bedingt schweißgeeignet bedeutet, dass unter gewissen Bedingungen, wie Vorwärmern der Teile oder einer nachträglichen Wärmebehandlung, die Stähle für das Schweißen geeignet werden.

Schwer schweißbare Stähle lassen sich mithilfe austenitischer Elektroden (z.B. aus Cr-Ni-Mn-Stahl) schweißen. Eine Schweißnaht aus diesen nicht härtbaren Stählen mit niedriger Streckgrenze kann beim Schrumpfen durch geringe plastische Verformung die Spannungen abbauen, sodass sie keine gefährliche Höhe erreichen.

4.2.2 Baustähle nach DIN EN 10025 (Tabelle 4.8)

Die Stähle sind nach ihrer gewährleisteten Mindest-Streckgrenze R_{eH} benannt. Sie wird bei den Sorten S185 bis E360 durch den Einfluss der Eisenbegleiter und des C-Gehaltes auf das Gefüge eingestellt:

- Erhöhung des Perlanteils im ferritisch-perlitischen Gefüge durch Mn-Gehalte,
- Mischkristallverfestigung durch kleine Gehalte der im α -Eisen gelösten Eisenbegleiter,
- Kornverfeinerung durch eine Pfannenbehandlung der Schmelze (\rightarrow 3.5.4 Sekundärmetallurgie) und normalisierendes Walzen.

Beispiel: Biegehalbmesser in mm

Sorte	C %	Erzeugnisdicke s in mm		
		$\leq 1,5$	$> 5 \dots \leq 6$	$> 10 \dots \leq 12$
t: quer, l: längs ¹⁾		1	t 1	t 1
S235J0C	0,19	1,6	8 10	20 25
S275J0C	0,21	2,0	10 12	25 32
S355J0C	0,23	2,5	10 12	25 32

¹⁾ Lage der Biegeachse zur Walzrichtung

Aufhärtung ist die teilweise Martensitbildung in den Randbereichen der Schweißnaht. Der dadurch spröde gewordene Werkstoff reißt durch behindertes Schrumpfen während der Abkühlung.

Kohlenstoffäquivalent CE ist ein scheinbarer C-Gehalt, errechnet nach:

$$\text{CE} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15 \quad \text{in Masse-\%}$$

Tabelle 4.6: Schweißeignung und CE-Wert

... schweißgeeignet	CE in %
gut ...	< 0,45
bedingt ...	< 0,6
schwer ...	> 0,6

Die Elemente Cr und Si verbrennen beim Schweißen zu hochschmelzenden Oxiden, die das Zusammenfließen der Schweißnahrränder behindern. Mn, das ebenfalls oxidiert, erniedrigt durch sein Oxid den Schmelzpunkt der anderen. Dadurch gleicht Mn die ungünstige Wirkung von Si und Cr aus.

Steigende Festigkeit kombiniert mit Schweißeignung wird durch niedrige C-Gehalte von 0,21...0,14 % und 1,5...1,7 % Mn eingestellt.

Jede Festigkeitsstufe enthält mehrere Sorten mit steigender Sicherheit gegen Sprödbruch. Das wird durch kleinere P-, S- und N-Gehalte und Desoxidation (Feinkorn) erreicht.

Die wesentlichen Unterschiede der Stahlsorten einer Festigkeitsstufe liegen in der steigenden **Sprödbruchsicherheit**. Sie wird mit dem Kerbschlagbiegeversuch ermittelt.

Mit sinkender Temperatur erhöhen sich die Anforderungen an den Werkstoff, unter ungünstigen Bedingungen noch verformbar zu bleiben.

Damit ist die **Sprödbruchsicherheit** eines Stahles umso höher, je tiefer die Prüftemperaturen für die gewährleistete Kerbschlagarbeit KV liegen. Die angehängten Kurzzeichen geben die Prüfbedingungen des Kerbschlagbiegeversuches an (Tabelle 4.7).

Tabelle 4.7: Kurzzeichen für Sprödbruchsicherheit, Werte gültig für Spitzkerb-Längsproben und Dickenbereich.

Zei-chen	KV J	Zeichen	T °C	Dicke in mm
J	27	R	+20	$> 12 \leq 250$
		0	0	
		2	-20	$> 12 \leq 400$
K	40	2		≤ 150

Tabelle 4.8: Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen, DIN EN 10025-2/05, mechanische Eigenschaften, gewährleistete Mindestwerte

Stahl-sorte	Werk-stoff-Nr.	R_{eH} bzw. $R_{p0.2}$ Nenndicken (mm)	R_m MPa	A_{80} Nenndicken (mm)	A %	Bemerkungen
		≤ 16 ≤ 100 ≤ 200	≤ 100	$\leq 1...<3$ $\leq 3...<40$		

Stahlsorten mit Angaben der Kerbschlagarbeit KV (\rightarrow Tabelle zu 4.3 Stahlbau)

S235JR	1.0038							Niet- und Schweißkonstruktionen im Stahlbau, Flansche, Armaturen
S235J0	1.0114	235	215	175	360 ...510	I: 17...21 t: 15...19	I: 26 t: 24	schmelzschweißgeeignet
S235J2	1.0117							
S275JR	1.0044							Für höhere Beanspruchung im Stahl- und Fahrzeugbau, Kräne und Maschi-
S275J0	1.0143	275	235	215	410 ...560	I: 14...18 t: 12...20	I: 22 t: 20	nengestelle
S275J2	1.0145							schmelzschweißgeeignet
S355JR	1.0045							
S355J0	1.0153	355	315	285	490 ...630	L: 14...18 t: 12...16	I: 22 t: 20	wie bei S275
S355J2	1.0577							
S355K2	1.0596							schmelzschweißgeeignet
S450J0	1.0590	450	380	---	550 ...720			Nur für Langerzeugnisse

Stahlsorten ohne Werte für die Kerbschlagarbeit KV

S185	1.0035	185	175	155	290 ...510	t: 10...14	I: 18 t: 16	Bauschlosserei
E295	1.0050	295	255	235	470 ...610	I: 12...16	I: 20 t: 18	
E335	1.0060	335	295	265	570 ...710	I: 8...12	I: 16 t: 14	Achsen, Wellen, Zahnräder, Kurbeln, Buchsen, Passfedern, Keile; Stifte,
E360	1.0070	360	325	295	670 ...830	I: 5...7	I: 11 t: 10	alle Sorten sind pressschweißgeeignet

¹⁾ Bruchdehnungswerte an Längsproben (l) und Querproben (t) gemessen;

4.3 Baustähle höherer Festigkeit

Um der Konkurrenz von Leichtmetallen und faserverstärkten Kunststoffen – vor allem im Fahrzeugbau – zu begegnen, hat die Stahlindustrie Baustähle höherer Festigkeit entwickelt, mit denen Material- und Herstellungskosten gesenkt werden können. Voraussetzung waren Verfahren der Sekundärmetallurgie zur Absenkung des C-Gehaltes sowie der P- und S-Gehalte im Stahl.

Beispiel: Bei Verwendung hochfester Stähle können im Stahl- und Brückenbau, für Schwerlast- und Kranfahrzeuge erhebliche Einsparungen erzielt werden durch (Bild 4.1):

- Kleinere Blechdicken (kleinere Masse) bei etwas höheren Werkstoffkosten/t Stahl.
- Wegfall des Vorwärmens zum Schweißen,
- Nahtvolumen kleiner, kürzere Schweißzeiten.

Hinweis: Beim Ersatz konventioneller Stahlsorten durch höherfeste Stähle sind kleinere Querschnitte möglich. Damit sich die Durchbiegung nicht vergrößert (gleiche E-Moduln) müssen dann die Flächenmomente vergrößert werden.

4.3.1 Die Erhöhung der Festigkeit

Um die Anforderungen an diese höherfesten Stähle zu erfüllen, sind zusätzliche metallurgische Maßnahmen erforderlich (→ Übersicht).

Der Zementitanteil begrenzt die Kaltformbarkeit und senkt die Zähigkeit. C-arme Stähle haben diese Schwächen nicht, sind gut schweißgeeignet und haben dafür niedrige Streckgrenzen.

So muss die Steigerung ihrer Festigkeit durch solche Maßnahmen erfolgen, die weder Schweißeignung, Kaltformbarkeit noch Kaltzähigkeit senken. Das geschieht durch eine Kombination von Verfestigungsmechanismen (Bild 4.2).

Voraussetzung sind geringe Gehalte bestimmter LE (mikrolegiert) in Verbindung mit thermomechanischer Behandlung. Sie erzielt ein besonders feinkörniges Gefüge, das auf andere Weise nicht erzeugt werden kann (Anhängezeichen M). Dadurch wird in Verbindung mit kleinen P- u. S-Gehalten die Übergangstemperatur T_U zu tiefen Temperaturen verschoben. (Kaltzähigkeit).

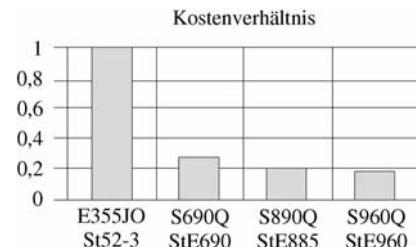


Bild 4.1 Einfluss der Stahlsorte auf die Gestehungskosten bei Mobilkrallen

Übersicht

Anforderung	Maßnahme
Schweißeignung, Kaltformbarkeit, kaltzäh bei -40 °C	niedrige C- und LE-Gehalte perlitzarm oder perlitfrei, Feinkorn, P- u. S-Gehalte weiter abgesenkt,
Hohe Streckgrenze	Kombination festigkeitssteigernder Maßnahmen (2.3)

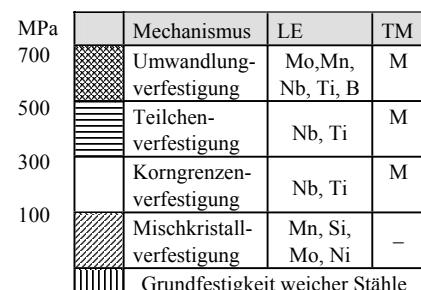


Bild 4.2 Erhöhung der Streckgrenze $R_{p0.2}$ bei mikrolegierten Feinkornstählen (nach L. Meyer)

Begriff: Mikrolegierte Stähle enthalten nur geringe Anteile einer Kombination der LE Nb, Ti und V. Ihre Wirkung beruht auf der Aushärtung, in Verbindung mit der Thermomechanischen Behandlung TM (→ 5.3.3).

Die CE-Werte dieser Stähle liegen niedriger als bei konventionellen Stählen gleicher Festigkeit.

Das Beispiel (→) vergleicht 3 Sorten mit gleicher Streckgrenze von 355 MPa. Der normalisierte Stahl (N) hat bei gleichem C-Gehalt ein kleineres CE als der S355J2, während der TM-Stahl (M) diese Festigkeit mit kleinerem C-Gehalt und damit kleinerem CE besitzt.

Beispiel: CEV-Werte einiger Baustähle

Sorte	veraltete Bez.	C %	CEV ¹⁾
S355J2G3	St 52-3	0,2	0,45
S355N	StE 355 N	0,2	0,43
S355M	StE 355 TM	0,4	0,39

¹⁾ für Blechdicken ≤ 40 mm

4.3.2 Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, nicht vergütet.

Tabelle 4.9: Normenübersicht

DIN EN 10025/05 Warmgewalzte Erzeugnisse aus schweißgeeigneten Feinkornbaustählen (Tabelle 4.10) (bisher DIN EN 10113 Z)	DIN EN 10028/03 Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen (Tabelle 4.10) Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, T 3: normalisierend gewalzt (N), T 4: thermomechanisch gewalzt Stähle (M).
DIN EN 10222-4/01 Schmiedestücke aus Stahl für Druckbehälter, schweißgeeignete Feinkornbaustähle hoher Dehngrenze.	

Kaltzähe Sorten werden durch angehängte Zeichen **L** oder **L1**, auch **L2** unterschieden. Bei sonst ähnlichen Analysenwerten haben sie noch weiter abgesenkte P- und S-Gehalte und damit steigende Kaltzähigkeit (Kerbschlagarbeit *KV* für tiefere Temperaturen in Tabelle 4.10).

Tabelle 4.10: Vergleich der schweißgeeigneten Feinkornbaustähle DIN EN 10028-3/5 und DIN EN 10125-3/4

DIN EN 1010025		DIN EN 10028				A ²⁾ in %	Kerbschlagarbeit <i>KV</i> ³⁾					
T-3	T-5	T-3		T-5			An Längsproben gemessen	Sorte	°C	0°	-20 °	-40
Kurzname ¹⁾		R _m ¹⁾ MPa	Kurz- name ¹⁾	R _m ¹⁾ MPa	Kurz- name ¹⁾	R _m ¹⁾ MPa						
S275N NL	S275M ML	370 ...510	P275N NL1 NL2	390 ...510	-----	----	24	N/M NL/ML	47	40	--	--
S355N NL	S355M ML	470 ...630	P355N NL1 NL2	490 ...630	P355M ML1 ML2	450 ...610	22	Für P-Stähle gelten höhere <i>KV</i> -Werte ↓				
S420N NL	S420M ML	520 ...680	-----	-----	P420M ML1 ML2	500 ...660	19	Sorte	°C	0°	-20 °	-40
S460N NL	S460M ML	550 ...720	P460N NL1 NL2	570 ...720	P460M ML1 ML2	530 ...720	17	N NL1 NL2	40 50 60	30 35 40	-- 27 30	-- 27 30
								M ML1 ML2	40 60 80	27 40 60	-- 27 40	-- 27 40

¹⁾ Der Kurzname enthält die obere Streckgrenze in MPa für Nenndicken ≤ 16 mm.

²⁾ A-Werte gelten für S- und P-Sorten gleichermaßen.

³⁾ KV-Werte sind den Anhängesymbolen zugeordnet und gelten jeweils für alle Festigkeitsstufen.

4.3.3 Vergütete schweißgeeignete Feinkornbaustähle, DIN EN 10025-6/05 Blech und Breitflachstahl, (DIN EN 10137-2 Z). Ähnliche Sorten auch in DIN EN 10028-6.

Höhere Streckgrenzenwerte von 500...960 MPa werden durch Abschrecken der Ni-legierten Stähle (2 %) in Wasser und Anlassen erreicht. Durch niedrigste C-Gehalte ($\leq 0,2$) hat der bei ca. 650 °C angelassene Martensit andere Eigenschaften als der in Werkzeugstählen. Die Kaltzähigkeit steigt bei den Sorten mit den Anhängesymbolen Q < QL < QL1 durch höheren Reinheitsgrad (P+S-Gehalte, Tabelle 4.11), die Bruchdehnungen fallen mit steigender Streckgrenze ab.

Tabelle 4.11: Feinkornbaustähle, vergütet, Unterschiede der Sorten Q, QL, QL1¹⁾

Sorte	S460Q	S500Q	S550Q	S620Q	S690Q	S890Q	S960Q
R_m in MPa	550-720	590-770	640-820	700-890	770-940	940-1100	980-1150
A in %	17	17	16	15	14	11	10

Kerbschlagarbeit Alle Q-Sorten: KV bei 0 °C = 40 J

R_m und A wie oben		Kerbschlagarbeit KV (Längsproben) in J bei T		
Variante	P %	S %	-20 °C	-40 °C
S ... QL	$\leq 0,025$	$\leq 0,015$	30	30
S ... QL1	$\leq 0,020$	$\leq 0,010$	50	40
				30

¹⁾ Mechanische Werte für Erzeugnissdicken von $\geq 3 \dots \leq 50$ mm ; Nicht genormt ist : S1100QL (1.8942) mit $R_m = 1200 \dots 1500$ MPa bei 8 % Bruchdehnung, S-Gehalt 0,005 % (XABO® 1100).

4.4 Stähle mit besonderen Eigenschaften

4.4.1 Wetterfeste Baustähle DIN EN 10025-5/05 [Merkblatt 434/04 über Stahl-info.de/]

Diese Stähle bilden durch Einwirkung der Umgebung fest haftende Schutzschichten. Das wird erreicht durch kleine Gehalte von Cu, Cr und Ni. Dadurch haben sie eine niedrige Korrosionsgeschwindigkeit. Die Wetterbeständigkeit gilt für Industrieklima, jedoch nicht für *Meeresnähe und chloridhaltige Luft*. Mechanische und Verarbeitungs-Eigenschaften gleichen denen der Stähle nach DIN EN 10025-2.

Verwendung: im Stahlbau, für Fahrzeuge und Anlagen im Freien, Spundwände.

4.4.2 Kaltzähe Stähle

Anwendungsbereich: Wenn die kaltzähen Sorten der Feinkornbaustähle (bis -50 °C) den Anforderungen nicht mehr genügen, z.B. bei Rohrleitungen, Armaturen und Apparaten, die mit verflüssigten Gasen in Kontakt sind oder in Gebieten mit Dauerfrost eingesetzt werden.

Tabelle 4.12: Profile der kaltzähen Stähle

Anforderungsprofil:	Eigenschaftsprofil:
Hohe Sicherheit gegen Sprödbruch, wenn Leitungen oder Behälter bei den tiefen Temperaturen verformt werden (z.B. durch Unfall oder Erdsetzungen). Schweißeignung und Korrosionsbeständigkeit bei Rohren und Behältern.	Schweißeignung und Zähigkeit werden durch metallurgische Maßnahmen erreicht. <ul style="list-style-type: none"> • Niedrige C-Gehalte, hoher Reinheitsgrad, • Feinkörnigkeit durch TM-Behandlung, • Legieren mit Ni und Vergüten.

Tabelle 4.13: Kaltzähe Stähle DIN EN 10028-4/03

Sorte	Zustd.	Werk-St. Nr.:	KV min ¹⁾ bei ... °C.		R_m , min/ R_{eH} , min
11MnNi5-3	+N	1.6212	40	-60	420/275
13MnNi6-3	+N	1.6217	40	-60	490/345
16NiMn6	+N	1.6228	40	-80	490/345
12Ni14	+N	1.5637	40	-100	490/345
X12Ni5	+N	1.5680	40	-120	530/380
X8Ni9	+N	1.5662	50	-196	640/480
	+QT	---	70	-196	680/575
X7Ni9	+QT	1.5663	100	-196	680/575

¹⁾ KV in J an Spitzkerbproben, längs

Durch die Maßnahmen nach Tabelle 4.12 wird der Steilabfall der Kerbschlagarbeit zu tieferen Temperaturen verschoben (→), die Stähle werden kaltzäh.

Eine Stahlauswahl kann nach der Arbeitstemperatur der Betriebsmittel (Tabelle 4.14) in Verbindung mit Tabelle 4.13, Spalte 3 Kerbschlagarbeit/Temperatur erfolgen.

4.4.3 Austenitische Stähle

Wie in Abschnitt 3.5.1 erläutert, erweitern die Elemente Ni, Mn und N neben dem Kohlenstoff den Existenzbereich der γ -Mischkristalle bei bestimmten Gehalten bis auf RT. Es entstehen umwandlungsfreie, **homogene** Stähle.

Bild 4.3 zeigt die Gefüge der Cr-Ni-Stähle in Abhängigkeit vom Cr- und Ni-Gehalt bei 0,2 % C.

- Homogener Austenit wird erst bei hohen Ni-Gehalten erreicht (> 24 %),
- durch Cr-Zusatz kann der Ni-Gehalt reduziert werden,

sodass mit 18 % Cr bereits 8 % Ni genügen, ein austenitisches Gefüge durch Abschrecken auf RT zu erhalten, für den zähen Austenit ohne Gefahr von Rissen.

Der metastabile Austenit kann sich bei Kaltumformung umwandeln und zusammen mit gelösten C-Atomen Martensit bilden. Das ist die Ursache für die starke Verfestigungsneigung austenitischer Stähle (→ Beispiel).

Tabelle 4.14: Siedetemperaturen einiger technischer Gase in °C¹⁾

Propan	-42	Methan	-164	N ₂	-196
CO ₂	-79	O ₂	-183	H ₂	-253
Ethan	-89	Argon	-186	He	-269

¹⁾ gerundete Werte

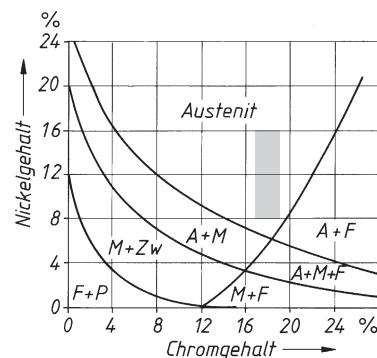
Weitere Normen:

DIN EN 10213-3/96 Stahlgussarten für tiefe Temperaturen

DIN EN 10222-3/99 Schmiedestücke aus Stahl, Nickelstähle

DIN EN 1563/05 Temperguss, kaltzäh

Ausnahme: Austenitische Stähle haben keinen Steilabfall in der KV,T-Kurve (Bild 14.26)

**Bild 4.3** Gefüge von C-armen Cr-Ni-Stählen nach dem Abschrecken aus 1000 °C

Austenitische Stähle basieren auf der 1912 von Krupp als **Rostfreier Stahl** patentierten Sorte mit 18 % Cr und 8 % Ni bei niedrigem C-Gehalt.

Beispiel: Beim Bohren von austenitschem Stahl mit unscharfen Bohrern kommt es zur Erhöhung der Vorschubkraft mit geringer plastischer Verformung (niedrige Steckgrenze) und Martensitbildung. Der Bohrer schneidet noch weniger, reibt, erhitzt sich, wird höher angelassen und erwacht.

Abhilfe durch Erhöhung des Ni-Gehaltes zur Stabilisierung des Austenits. Stahlsorten für Tiefziehzwecke haben deshalb 10...12 % Ni.

Die Korrosionsbeständigkeit wird durch Erhöhung von Cr und Ni und Zusatz weiterer LE für alle chemisch angreifenden Stoffe angepasst.

Durch ihr kfz-Gefüge besitzen austenitische Stähle eine Kombination von Eigenschaften, sodass sie bei besonderen Anforderungen eingesetzt werden können (Tabelle 4.15).

Tabelle 4.15: Eigenschaftsprofil der austenitischen Stähle

Merkmale	Ursachen, Eigenschaften	Stahlgruppe
Homogenes Gefüge aus kfz-Mischkristallen	Das kfz-Gitter hat maximale Gleitmöglichkeiten, beste Kaltumformbarkeit, hohe Werte für Bruchdehnung und Bruchbeanspruchung, ebenso für die Kerbschlagarbeit bis -200°C . Korrosionsbeständigkeit die mit dem Gehalt an weiteren Legierungselementen steigt.	Kaltzähe Stähle Korrosionsbeständige Stähle
Streckgrenze niedrig, bei hoher Zugfestigkeit, dadurch	Niedrige kritische Schubspannung im kfz-Gitter, für höher beanspruchte Bauteile sind deshalb N-legierte und aushärtbare Sorten mit höherer Streckgrenze entwickelt worden.	Schweißelektroden
Großer Dehnungsbereich im σ , ε -Diagramm	Stickstoff N wird beim Umschmelzen unter Druck zugesetzt und wirkt auf Zwischengitterplätzen verfestigend, durch Übersättigung kommt es später zur Ausscheidungshärtung.	Aushärtbare austenitische Stähle
Umwandlungsfrei	Keine Möglichkeit zum Härteten, Vergüten und Normalisieren. Rekrystallisationsglühen ist möglich. Keine Volumenänderung wie sie bei umwandelnden Stählen erfolgt. Dadurch kein Abscheren von Oberflächenschutzschichten.	Warmfeste, hitzebeständige Stähle
Unmagetisierbar	Eigenschaft des kfz-Gitters. Wegen des metastabilen Austenits haben diese Stähle höhere Anteile an LE.	Nicht magnetisierbare Stähle

4.4.4 Ferritische Stähle

Wie im Abschnitt 3.5.2 erläutert, engen die Elemente **Cr**, **Si**, **Al** und einige weitere das Austenitgebiet ein oder schnüren es ab. So entstehen bei höheren Gehalten dieser Legierungselemente die umwandlungsfreien, homogenen ferritischen Stähle (Bild 3.19).

Voraussetzung sind $> 12\%$ Cr und ein **niedriger C-Gehalt**. Cr wird als Carbidbildner von C-Atomen gebunden und so dem Mischkristall entzogen. Damit würde weniger Cr für die Veränderung des Kristallgitters zur Verfügung stehen und die Korrosionsbeständigkeit wäre nicht mehr gegeben.

DIN EN 10088/ 05 5 Teile Korrosionsbeständige Stähle; **DIN EN 10283 / 98** Korrosionsbeständiger Stahlguss.

Hinweis: Korrosionsbeständige austenitische Stähle im Abschnitt Korrosion (Tabelle 12.9).

Anwendungsbereich der ferritischen Cr-Stähle.

- Wegen des homogenen Gefüges als **korrosionsbeständige Werkstoffe**,
- wegen der Umwandlungsfreiheit als **hitzebeständige Werkstoffe**.

Hitzebeständigkeit: Weil die γ - α -Umwandlung (und α - γ) mit einer sprungartigen Volumenänderung fehlt, wird eine entstandene Oxidschicht nicht gelockert. Sie ist auch bei ständigen Wärme- und Abkühlzyklen festhaftend und wird durch die Elemente Si und Al verstärkt (\rightarrow hitzebeständige Stähle 4.4.5).

Hinweis: korrosionsbeständige, ferritische Stähle sind auch im Abschnitt Korrosion (Tabelle 12.9) behandelt.

Schweißeignung: Beim Erwärmen entstehen Cr-Carbide (Cr_{23}C_6) als weitere Phase und der Ferrit verarmt an Cr. Damit verliert er seine Korrosionsbeständigkeit (→ interkristalline Korrosion 12.3). Stärkere Carbidbildner wie Ti stabilisieren das homogene Gefüge.

Cr-ärmere Stähle unterliegen der Umwandlung und sind dann härtbar (→ Bild 3.20).

Schweißgeeignete beständige Cr-Stähle: Durch die Verfahren der Sekundärmetallurgie können Stähle mit sehr niedrigem C-Gehalt erzeugt werden. Sie sind auch nach dem Schweißen korrosionsbeständig, da ohne C-Atome keine Carbidauscheidungen erfolgen können.

Tabelle 4.16: Vergleich austenitischer und ferritischer Stähle

Kriterium	Austenitische Stähle	Ferritische Stähle
Hochlegiert mit, stabilisiert durch	Ni, Mn (Cr), Zusätze von Mo, V, Ti, Nb, Ta, einzeln oder kombiniert	Cr , Zusätze von Al, Si, Mo; V Ti
Gefüge	Homogene Gefüge entstehen durch Abschrecken aus Temperaturen 1000 °C, kubisch-flächenzentriert	800 °C, kubisch-raumzentriert (bei höheren Gehalten an LE auch nach langsamer Abkühlung)
Zähigkeit	hoch , kein Steilabfall, kaltzäh	niedriger , Steilabfall, kaltspröde
Kaltformbarkeit	hoch, dabei stark kaltverfestigend, wird besser mit steigenden Ni-Gehalten	Geringer, wenig verfestigend, Halbwarmumformung günstig
Schweißeignung	sehr gut Nur bei sehr niedrigen C-Gehalten oder durch Zusatz von starken Carbidbildnern (Ti, Nb), die das Gefüge gegen Chromverarmung stabilisieren, sonst Gefahr von interkristalliner Korrosion.	geringer
Korrosionsbeständigkeit	durch Zusatz weiterer LE breite Anwendung mit zahlreichen Sorten	gegen Wasser, Dampf, nicht anfällig gegen Spannungsrißkorrosion (SpRK)
Warmfestigkeit	650 °C...(750 °C, ausgehärtet). Hochwarmfeste Stähle	300...600 °C im Glühzustand. Warmfester, ferritischer Stahlguss.
Hitzebeständigkeit	800...1150 °C, Si-Zusatz, wenig beständig gegen S-haltige Gase und Aufkohlung	750...1150 °C, Al- und Si-Zusatz bewirken Beständigkeit gegen oxidierende und S-haltige Gase

4.4.5 Stähle für Einsatz bei hohen Temperaturen

Die Stähle dürfen bei der Gebrauchstemperatur keine Gefügeveränderungen erleiden, die zu Erweichung führen. Durch die thermische Aktivierung verlieren die Mechanismen der Festigkeitssteigerung z.T. ihre Wirkung, sodass Versetzungen, die bei RT blockiert sind, nun langsam wandern, z.T. in andere Ebenen klettern können. Durch Diffusion wirken Korngrenzen nicht mehr als Hindernisse, es kommt zum Korngrenzengleiten. Feindispers ausgeschiedene Teilchen können in Lösung gehen und wirken nicht mehr verfestigend.

Die Folge ist das **Kriechen**, eine sehr langsame, bleibende Formänderung unter Spannung. Nach einer längeren Kriechphase mit konstanter Kriechgeschwindigkeit (temperatur- und spannungsabhängig) stellt sich eine Zunahme der Kriechgeschwindigkeit ein, die bis zum Bruch führt (Vorgänge in Abschnitt 2.4.6). Wegen dieser Krievorgänge haben Metalle keine Dauerstandfestigkeit, also eine Spannung, die sie zeitlich unbegrenzt ertragen könnten.

Für höhere Temperaturen gelten deshalb die sog. **Zeitfestigkeiten**:

Zeitstandfestigkeit $R_{m/t/T}$

Zeitdehgrenze $R_{p/\varepsilon/t/T}$

Warmfeste Stähle für den Dauereinsatz z. B. in Dampferzeugungsanlagen als Kesselrohre, Sammler usw. müssen das folgende Eigenschaftsprofil aufweisen (→ Tabelle 4.17).

Unlegierte Stähle sind vergütet bis ca. 400 °C einsetzbar, Legierte Stahlsorten enthalten Cr, Mo, und V, zur Mischkristallverfestigung, zur Anhebung der Anlasstemperatur und zur Bildung thermisch stabiler, feinstverteilter Carbide als Kriechhindernisse. Die Stähle werden vergütet (bainitisiert) und sind bis ca. 540 °C geeignet (Tabelle 4.18).

Hochwarmfeste Stähle sind ferritisch-martensitisch durch 12 % Cr und bis ca. 600 °C einsetzbar. Darüber werden austenitische CrNi-Stähle bis 700 °C verwendet, noch höher müssen Ni- und Co-Basislegierungen eingesetzt werden.

Entwicklungen: Höhere Arbeitstemperaturen, d.h. höherer Wirkungsgrad, werden ermöglicht durch (→):

- Lebensdauer (Standzeit) herkömmlicher Stoffe wird erhöht (z.B. durch Wärmedämm-schichten),
- Entwicklung von neuen Werkstoffen mit höherer thermischer Beständigkeit.

Zeitstandfestigkeit ist die Spannung σ , die nach einer Zeit t bei der Temperatur T zum Bruch führt.

Zeitdehgrenze ist die Spannung σ , die nach einer Zeit t bei der Temperatur T eine bestimmte Dehnung ε (in %) hervorruft.

Tabelle 4.17: Eigenschaftsprofil warmfester Stähle

Eigenschaft	Maßnahme
Kaltformbarkeit	0,1...0,15 % C
Schweißeignung	max. 0,25 % Si
Vergütbarkeit	...2,2 % Cr
Anlassbeständigkeit	...1 % Mo; ...0,3 % V
Zähigkeit (Spröd-bruchsicherheit)	durch niedrigen C-Gehalt und Vergütung

Normung:

DIN EN 10 028-2/03 Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen – unlegierte und legierte, warmfeste Stähle;
DIN EN 10 213-2/96 Stahlguss für Druckbehälter, warmfeste Stähle.

Beispiele für Maßnahmen und Werkstoffe:

Dämmsschichten auf Gasturbinenschaufeln aus stabilisiertem ZrO₂ durch Plasmaspritzen aufgebracht (Wärmedehnung wie bei Metallen).

IP-Werkstoffe, Intermetallische Phasen haben keine Gleitsysteme im Kristallgitter, kein Kriechen, z.B: TiAl, Ti₃Al, NiAl, TiSi₂,

ODS-Legierungen (→ 10.4).

Tabelle 4.18: Auswahl warmfester Stähle

Sorte	Kurzzeitversuch ¹⁾ $R_{p0,2}$ in MPa bei 9 in °C				Langzeiteigenschaften über 100 000 h bei 9 in °C						Gefüge			
	50	300	400	500	500	R_{p1}	R_m	550	R_{p1}	R_m	600	R_{p1}	R_m	
P265GH	247	166	145	--										ferrit.-perlit.
P460NH	416	281	244	--										ferrit.-perlit
13CrMo4-5	285	209	180	159	98	137	36	49						vergütet
10CrMo9-10	279	228	205	179	103	135	49	68	22	34				vergütet
X20CrMoV12-1	490	390	360	290	190	235	98	128	43	59	17	23		vergütet
X8CrNiNb16-13	205	137	128	118		157		154		108	49	64		austenitisch
GX22CrMo12-1	540	430	390	340	172	207	91	118	34	49	--	--		oberer Bainit

¹⁾ Erzeugnisdicke $t < 60$ mm

Hitzebeständige Stähle

Hitzebeständigkeit bedeutet Widerstand gegen **Zunderung** (\rightarrow) durch heiße Gase verbunden mit Gefügestabilität bei der Betriebstemperatur. Die LE Cr, Al und Si reagieren mit den heißen Gasen und bilden eine dichte Schutzschicht. Der Grundwerkstoff muss umwandlungsfrei sein.

Die Stähle sind deshalb hochlegiert und

- **ferratisch** durch 7...27 % Cr oder
- **austenitisch** durch 18...36 % Cr+8...20 % Ni und weiteren Elementen für die Bildung der Schutzschichten zur Erhöhung von Zunderbeständigkeit und Warmfestigkeit.

Werkstoffwahl erfolgt nach der Art des Gases (Tabelle 4.19) und der Dauergebrauchstemperatur. Austenitische Sorten haben höhere Zeitfestigkeiten, die aber insgesamt niedrig sind. Die Zeitstandfestigkeit $R_m/10000$ liegt für 900...1000 °C etwa zwischen 20 und 3 MPa, je nach Sorte.

Tabelle 4.19: Beständigkeit der Sorten.

Beständigkeit gegen Gase	Ferritisch 7...25 % Cr	Austenitisch 9...21 % Ni
S-haltig, oxidierend	sehr groß	mittel...gering
S-haltig, reduzierend	mittel (groß)	gering
N-reich, O-arm	gering	groß
aufkohlend	gering	gering

Begriff: Zunderung (Verzunderung) ist der Materialverlust durch Reaktion des Stahles mit heißen Gasen über 600 °C.

Eisen und seine Oxide haben unterschiedliche Wärmeausdehnung. Dadurch wird bei Stählen mit γ - α -Umwandlung die gebildete Oxidschicht beim Wechsel von Erwärmern und Abkühlen gelockert (Volumensprung, Bild 3.2), sodass ständig eine weitere, tiefer gehende Oxidation stattfindet.

Hitzebeständige Stähle und Ni-Legierungen DIN EN 10095/99:

- **Ferritische** Sorten vom Typ CrAlSi (7-25 % Cr), X2CrAlTi18-2 und XCnN28 für Temperaturen von 800...1000 °C (in Luft!),
- **Austenitische** Sorten Typ CrNi/CrNiTi, NiCrSi/NiCrAlTi für 850...1170 °C,
- **Ni-Basis-Legierungen:** NiCr15Fe, NiCr16Ti NiCr23Fe geeignet für 1150-1200 °C.

Hitzebeständiger Stahlguss DIN EN 10283/98 mit ähnlichen Analysen (Al-frei), aber höheren C-Gehalten; SEW 595 Stahlguss für Erdöl und Erdgasanlagen;

Verwendung: Bauteile für Industriöfen und Geräte zum Handhaben und Fördern des Glühgutes (Gestelle, Ofenrollen), Teile für Dampfkesselbau, chemische Apparate und Anlagen zur Erdölverarbeitung.

Ventilwerkstoffe DIN EN 10090/98 (mit 10 Sorten). **Heizleiterlegierungen** DIN 17470/84

4.5 Stähle für bestimmte Fertigungsverfahren

4.5.1 Automatenstähle

Stähle mit Eignung für das Spanen bei hohen Schnittgeschwindigkeiten unter geringem Werkzeugverschleiß bei guter Spanbildung, Spanabfuhr und Oberflächengüte.

Diese Eigenschaften werden durch S-Gehalte von 0,15 ... 0,4 % und evtl. zusätzlich 0,15...0,35 % Pb erreicht. Die feinverteilten Sulfide wirken spanbrechend. Die Sorten haben Festigkeiten R_m zwischen 380...570 MPa und Bruchdehnungen A von 25 bis 8 %.

Tabelle 4.20: Automatenstähle DIN EN 10087/99

Normale Sorten	Einsatzstähle	Vergütungsstähle
11SMn30	10S20	35S20, 35SPb20
11SMnPb3	10SPb20	38SMn26,
0	15SMn1	38SMn26
11SMn37	3	44SMn28,
11SMnPb3		44SMnPb28
7		46SMn20,
		46SMnPb20

Verwendung: Massendrehteile für Feinmaschinen, den Geräte- und Apparatebau, auch für dünnwandige und verwickelte Formen.

4.5.2 Stähle zum Kaltumformen

Flacherzeugnisse sind Bleche und Bänder (coils), die kalt oder warm gewalzt werden. Die Sorten sind für steigende Beanspruchungen an die Kaltumformbarkeit vorgesehen, vom einfachen Abkanten bis hin zum Tiefziehen.

Langerzeugnisse werden für die Herstellung von Bauteilen durch Kaltstauchen und Fließpressen eingesetzt.

Bleche und Bänder werden weich und höherfest, ohne und mit Beschichtungen aus Metallen oder organischen Stoffen angeboten.

Anforderungsprofil: Eignung für die zahlreichen Verfahren des Umformens (\rightarrow 1.6) bei kleinen Kräften (Energie- und Werkzeugaufwand) im Blech, im fertigen Bauteil dagegen höherer Widerstand gegen Beulen und Crash durch die Verformungsverfestigung, gekennzeichnet durch den Verfestigungsexponenten $n \rightarrow$).

Stähle guter Kaltformbarkeit lassen sich am σ , ε -Diagramm des Zugversuches erkennen:

- Niedrige Streckgrenze R_e , bzw. $R_{p0,2}$,
- stetig steigende Kennlinie mit großer Gleichmaßdehnung ε_{gl} bis zum Maximum,
- insgesamt hohe Bruchdehnung A .

Für die Kaltformbarkeit und Schweißeignung sind niedrige Gehalte an C und nichtmetallischen Teilchen erforderlich. Die weichen Stähle haben niedrige, fallende Gehalte an C, P, S und Mn mit steigender Bruchdehnung und dabei sinkender Streckgrenze (Tabelle 4.21).

Flacherzeugnisse sind:

Feinstblech/Weißblech,	Dicke unter 0,5 mm,
Kaltband,	Dicke 0,4...5. mm,
Warmband,	Dicke 1,25...15 mm.

Langerzeugnisse sind Walzdraht, Stäbe und Draht aus Kaltstauch- und Fließpressstählen zur Fertigung von Schrauben, Nieten, Bolzen usw.

Höherfeste Stähle sind für den Karosseriebau entwickelt worden, um das Gewicht der Rohkarosse um 24 % senken zu können. ULSAB-Projekt (Ultra Light Steel Auto Body), u.a. Projekte der europäischen Stahlhersteller.

Verfestigungsexponent n: Die Kaltverfestigung wird durch den Verfestigungsexponenten

$$n = \ln(1 + \varepsilon_{gl}) \quad \text{bewertet.}$$

Er hängt von der Gleichmaßdehnung ε_{gl} ab.

Wenn die Fließkurve im doppelt log. Netz dargestellt wird (Gerade), so entspricht deren Steigung dem Verfestigungsexponenten.

n -Werte liegen bei Tiefziehstählen zwischen 0,18 und 0,3; je höher, desto stärker ist die Kaltverfestigung und umso geringer die Dickenminderung (Einschnürung), die zu Rissen führen kann, wichtig für Umformen unter allseitigem Zug, z.B. beim Streckziehen oder bei Böden von gezogenen Näpfen.

Tabelle 4.21: Kaltgewalztes Blech und Band aus weichen Stählen zum Kaltumformen DIN EN 10130/99

Kurzname nach DIN EN 10130 (1623-1Z)	Werk- Stoff.-Nr.	Festigkeit		A_{80mm}	C %	Verwendung	n_{90}	r_{90}
		$R_{p0,2}$	R_m					
DC01	St12	1.0330	280	270...410	28	0,12	Abkanten, Sicken	--
DC03	RRSt13	1.0347	240	270...370	34	0,10	Einfaches Tiefziehen	1,3
DC04	St14	1.0338	210	270...350	38	0,08	Für höchste Um- formansprüche	1,6
DC05	St15	1.0312	180	270...330	40	0,06		0,18
DC06	IF18 ²⁾	1.0873	180	270...350	38	0,02	Sondertiefziehgüte	1,9
								0,20
								1,8
								0,22

¹⁾ Für die Streckgrenze kann ein Mindestwert von 140 verwendet werden, bei DCO6 nur 120 MPa.

²⁾ IF: interstitiell free, Sondergüte, keine Fremdatome auf Zwischengitterplätzen, Zusatz von 0,01...0,04 % Ti.
Oberflächenausführungen: A normale, B beste Oberfläche; G glatt; M matt; R rau; geölt oder ungeölt.

Durch das Walzen und Glühen entstehen Ausrichtungen der Kristalle (Texturen) in der Walzrichtung. Beim Umformen wird das Blech in der Ebene nach allen Richtungen beansprucht. Erwünscht ist geringe Anisotropie. Das unterschiedliche Fließen in Breiten- und Dickenrichtung (anisotropes Verhalten) lässt sich am Verhältnis der Formänderungen von Breite zu Dicke der Probe nach dem Versuch beurteilen und wird als senkrechte Anisotropie r bezeichnet.

Senkrechte Anisotropie r (\rightarrow):

Gleichzeitig sind die r -Werte von der Winkellage der Zugprobe zur Walzrichtung abhängig. Deshalb gibt es mehrere Anisotropie-Werte r (\rightarrow).

r -Wert kennzeichnet die Neigung zu Dickenänderungen unter Zug/Druck beim Tiefziehen,
 Δr die Neigung zur Zipfelbildung.

Die Kfz.-Industrie ist wichtigster Abnehmer von Feinblechen. Der Trend zum Leichtbau und die Konkurrenz von Al- und Mg-Legierungen sowie verstärkten Polymeren führen zu Neuentwicklungen bei Blechen zum Kaltumformen (\rightarrow und folgende Tabelle).

Tabelle 4.22: Entwicklungen für höherfeste Stähle zum Kaltumformen

Stahlsorte	Beschreibung
Y-Stähle Interstitiell free	Ferritische Stähle ohne C-Atome auf Zwischengitterplätzen-(max. 0,01 % C). Dadurch hohe Kaltformbarkeit.
LA-Stähle Mikrolegierte St.	C-arm, mit Nb/Ti legiert, Festigkeit durch Aushärtung
B-Stähle Bake-hardening Effekt	Sorten, die beim Einbrennen des Lacks aushärten. Anlieferungszustand ist <i>lösungsbehandelt</i> , mit einer noch niedrigen Streckgrenze. Das Einbrennen stellt den Auslagerungsvorgang dar. Die Streckgrenze erhöht sich um ca. 35 MPa.
DP-Stähle¹⁾ Dualphasen-St.	C-arme Stähle aus Ferrit mit ca. 20 % Martensitinseln im Gefüge durch schnelles Abkühlen aus dem γ - α -Zweiphasenfeld (im EKD).
CP-Stähle¹⁾ Complexphasen-St.	Mehrphasige Gefüge aus Ferrit, Martensit und Bainit. Sie erreichen Streckgrenzen von 680...720 MPa
TRIP-Stähle¹⁾ Restaustenitstähle (Transformation induced Plasticity)	Enthalten metastabiles Austenit im ferrit-bainitischem Gefüge, der bei entsprechender Analyse durch schnelle Abkühlung nach dem Endwalzen bei Temperaturen von 800...900 °C und Haspeln bei ca. 300 °C entsteht. Bei Kaltumformung entsteht zusätzliche Verfestigung durch Austenitumwandlung in Martensit.
TWIP-Stähle (Twinning induced Plasticity)	Hochlegierte, austenitische Mn-Stähle mit Verformungsverfestigung durch Zwillingsbildung. Zugfestigkeiten von 600 bis 1000 MPa bei Bruchdehnungen von 90...40 %.

¹⁾ Zusätzlich bake-hardening Effekt möglich

Senkrechte Anisotropie r :

r -Werte liegen zwischen 0,8 und 2,8. Aus 3 Werten (0° , 45° und 90° zur Walzrichtung) wird ein Mittelwert $r_m = 1/4(r_0 + r_{90} + 2r_{45})$ errechnet.

Ebene Anisotropie Δr = $1/2(r_0 + r_{90} - r_{45})$, sie liegt zwischen 0 und 1, kann auch negativ sein und äußert sich in der *Zipfelbildung*.

- Höherfeste Bleche bei noch brauchbarer Dehnung mit geringer Anisotropie
- und hohe Festigkeit im Bauteil durch *zusätzliche* Verfestigungsmechanismen:
- geschweißte Platinen und Rohre als Vorprodukte (Bild 4.4).

Weiterentwicklungen der Stahlwerke nutzen alle Möglichkeiten der Festigkeitssteigerung und mechanischen Umformung aus, um die Streckgrenzen auf ca. 1000 MPa anzuheben.

Innovationspreis 2003 für Porsche-Cayenne:
Die Rohkarosse besteht zu 64 % aus höherfesten Stählen, davon 35 % Mehrphasenstähle. Die A- und B-Säulen bestehen aus TRIP-Stählen mit bis zu 700 MPa Streckgrenze.

Neue Blechwerkstoffe enthalten bis zu 25 % Mn + 2 % Al und sind nach Abschrecken austenitisch. Die Dichte von Fe-Al nimmt für 1 % Al um 1 % ab. Proben mit $R_m = 500$ MPa, $A = 28$ % bei einer Dichte von $\rho = 7,1$ g/cm³.

Tabelle 4.23: Höherfeste Stähle zum Kaltumformen, DIN EN 10292/04

Stahlsorten, typische Legierungs-Elemente		Sorten, Kurznamen ¹⁾	$R_{D0,2}$ in MPa quer	R_m in MPa quer	A_{80} quer	A_{80} längs
Y-Sorten:	C _{max} , 0,01 %, 0,1 % Si; 0,06...0,1 % P; 0,7...1,6 % Mn, 0,12 % Ti	HX180YD HX180BD	180–240	340...400	34	
		HX220YD HX220BD	220–280	340...410	32	---
B-Sorten:	0,04...0,11 % C; 0,5 % Si; 0,7 % Mn; 0,06...0,12 % P	HX260YD HX260BD	260–320	380...400	30/28	---
		HX300BD	300–360	400...480	26	
LA-Sorten, mikrolegiert,	0,11 % C, 0,5 % Si, 0,6...1,4 % Mn + 0,15 % Ti und 0,09 % Nb	HX260LAD HX300LAD HX340LAD HX380LAD HX420LAD	350–430 300–380 340–420 380–480 420–520	350–430 380–480 410–510 440–560 470–590	26 23 21 19 17	27 24 22 20 18

¹⁾ H: höherfest, X = Walzzustand, Y: (interstitial free); B: bake-hardening; D: für Schmelztauchüberzüge. Alle Sorten können wahlweise mit Überzügen geliefert werden: +Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS (Tabelle Anhang A.13).

Zur Gewichtsverminderung tragen weiterhin bei:

Geschweißte Platinen (tailored blanks, Bild 4.4) sind Blechzuschnitte aus Blechen verschiedener Dicke und Festigkeit, Beschichtung und Walzrichtung. Sie sind laser- oder quetschnaht geschweißt. Damit werden beim Verarbeiter Versteifungen und Fertigungsstufen eingespart.

Durch sie werden

- die geeignete Blechgüte in der
- notwendigen Wanddicke an der
- richtigen Stelle im Bauteil plaziert.

Geschweißte Rohre (Welded Tubes und Tailored Tubes) haben ähnliche Funktion. Es sind dünnwandige Rohre oder Hohlprofile, die durch die Innenhochdruck-Umformung (Hydroforming) in einem Werkzeug durch Wasserdruck ihre Außenkonturen erhalten. Sie werden z.T. mit tailored blanks zusammen zu Karosserie- teilen verarbeitet.

Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen, DIN EN 10149-1...3 (→). Die hohen Streckgrenzwerte bei noch hoher Bruchdehnung werden durch TM-Behandlung erreicht, die Schweißeignung und Kaltformbarkeit durch niedrige C-Gehalte.

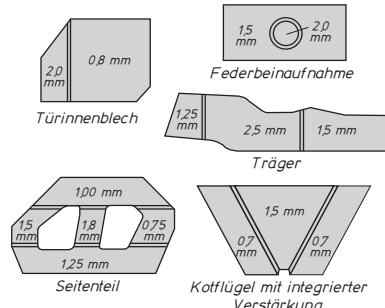


Bild 4.4 Maßgeschneiderte Platinen, Tailored Blanks und Tailored Tubes

DIN EN 10149/95:

Teil 2: enthält 4 Sorten normalisierend gewalzt von **S275N** in Stufen 315 / 355 bis **S420N**.

Teil 3: enthält 9 Sorten thermomechanisch behandelt von **S315MC**, in Stufen 355 / 420 / 460 / 500 / 550 / 600 / 650 bis **S700MC**.

Anwendung: Zum Abkanten oder Walzprofilieren in Dicken bis 15 mm, für Pressteile im Waggon-, Schwerlast- und Kranfahrzeugbau.

Oberflächenveredelte Bleche und Bänder sind nach zahlreichen Normen mit Zn, Al- und Legierungen elektrolytisch (7...20 µm Auflage) oder schmelztauchveredelt (5...42 µm oder 70...600 g/m² Auflage) genormt (Tabelle 4.24).

Tabelle 4.24: Übersicht, Normen für oberflächenveredelte Bleche und Bänder zum Kaltumformen

Normen	Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band und Blech aus:	Beispiele
DIN EN 10326/04	Baustählen	5 Sorten S22GD+Z, S550GD+AZ
DIN EN 10327/04	weichen Stählen	6 Sorten DX51D+ZA DX57D+AS
DIN EN 10292/03	mikrolegierten Stählen mit höherer Streckgrenze	Tabelle 4.23
DIN EN 10209/96	Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Emaillieren	DC01EK /04/06
DIN EN 10152/03	Elektrolytisch verzinkte Flacherzeugnisse aus Stahl 5 Sorten	DC01+ZE.. ..DO6 + ZE
DIN EN 10169/04	Kontinuierl. organisch beschichtetete Flacherzeugnisse aus Stahl	+OC

Kaltstauch- und Kaltfließpressstähle

Die Werkstoffausnutzung ist bei den Fließpress- und Kaltstauchverfahren höher als bei den spanenden Verfahren (Bild 1.3) ebenso die Oberflächengüte. Phosphatieren der Rohlinge ergibt eine wenige µm dicke, reibungsmindernde Gleitschicht. Es werden Befestigungsmittel wie Schrauben aller Art, Nieten, Schweißbolzen, -stifte und -hülsen, hergestellt, aber auch z.B. Differenzialkegelräder, Synchron-, Brems- und Schaltelemente. Für die unterschiedlichen Beanspruchungen gibt es die Stähle nach Tabelle 4.26.

Tabelle 4.26: Kaltstauch- und Kaltfließpressstähle DIN EN 10263/02

Teil	Werkstoffgruppe	Anzahl	Sorten			
- 2	Unlegierte Stähle	8	C2C, C4C C8C, C10C, C15C C17C, C20C, 8MnSi7, nicht für eine Wärmebehandlung vorgesehen			
- 3	Einsatzstähle	25	4 unlegierte, 3 B-legierte, 7 S-legierte Automatensorten			
- 4	Vergütungsstähle	35	4 unlegierte, 16 Bor-legierte, 15 Cr-, CrMo- CrNiMo-legierte Sorten			
- 5	Nichtrostende Stähle	19	2 ferritische, 1 martensitische, 1 austentisch-ferritische, 15 austenitische Sorten nach DIN EN 1008			

Nachgestellte Symbole für Lieferzustände +U = unbehandelt (wie warmgewalzt)

+PE	wälzgeschält	+C	kaltgezogen	+LC	kalt nachgezogen	Symbole können mit + Zeichen kombiniert werden: Z.B. + AT+C
+AT	lösungsgeglüht	+AC	geglüht auf kugelige Carbide			

4.5.3 Weitere Stahlsorten für bestimmte Fertigungsverfahren (auch 4.8 Stahlguss)

Stahlsorten	Normen DIN	Eigenschaften, Hinweise
Einsatzstähle	EN 10084 / 98	5.6.3 Einsatzhären, Tabelle 5.10
Nitrierstähle	EN 10085 / 01	5.6.4 Nitrieren, Tabelle 5.12
Vergütungsstähle	EN 10083 / 96	5.3.8 Vergüten, Tabelle 5.6
Stähle für große Schmiedeteile	SEW 555/01	

4.6 Stähle für bestimmte Bauteile

4.6.1 Wälzlagerstähle

Anforderungsprofil: Das ständige Überrollen bewirkt eine hohe Zug-Druck-Wechselbelastung und dadurch Wälzverschleiß mit Oberflächenzerstörung (13.4.1). In Sonderfällen tritt auch Korrosion und /oder thermische Beanspruchung auf.

Eigenschaftsprofil: Hohe Härte und Streckgrenze werden durch Härtung erreicht. Die Stähle haben ca. 1 % C und steigende Cr-Gehalte zum Durchhärteten der Rollen, Kugeln, Ringe und Scheiben.

Hohe Dauerfestigkeit wird durch hohe Reinheitsgrade (Edelstähle) erreicht, da winzigste Schlackenteilchen in der Oberfläche als Risskeime wirken.

Durch halbwarmes Umformen von stranggegossenen Vorformen aus 100Cr6 zu Hohlzyllindern mit gleichzeitigem Abtrennen der Käfigrohlinge wird beim Abkühlen ein feinkörniger Zementit ausgebildet. Dadurch kann das bisher notwendige GKZ-Glühen eingespart werden (→).

4.6.2 Federstähle

Anforderungsprofil: Werkstoffe für Federn und federnde Bauelemente müssen hohe zulässige Spannungen im elastischen Bereich aufweisen, um die bewegten Massen klein zu halten, dazu hohe Dauerschwingfestigkeit, in besonderen Fällen auch Korrosionsbeständigkeit oder Warmfestigkeit

Eigenschaftsprofil. Erhöhte Streckgrenze durch Vergüten mit niedrigen Anlasstemperaturen. Glatte Oberflächen mit evtl. Kaltverfestigung zur Erhöhung der Dauerfestigkeit. Verbesserter Korrosionsschutz durch Beschichten. (Z = Zn, ZA = ZnAl-Überzüge, ph = phosphatiert).

Federn haben i.A. kleinere Querschnitte. Deshalb genügen zum Durchvergüten unlegierte oder niedriglegierte Stähle. Die nachträgliche Kaltverformung ergibt hohe Festigkeitswerte, die mit zunehmender Erzeugnisdicke absinken (Tabelle 4.27, DIN EN 10270).

Normung: DIN EN ISO 10269-17/00. Für eine Wärmebehandlung vorgesehene Stähle, **Wälzlagerringstähle**.

Für Normalbeanspruchung, mit Härtung von 58...64 HRC:

- **C100Cr6, C100CrMn6, C100CrMo7**

Bei Korrosionsangriff:

- **X46Cr13, X90CrMoV18**

Bei höheren Temperaturen bis ca. 300 °C:

- **X30CrMoN15-1**

Unmagnetisch ist **X5CrNi18-8** plasmaaufgekohlt und ausscheidungsgehärtet auf 540 HV. Stabil von -196 °C bis +700 °C (INA).

CRONIDUR 30 ähnlich X30CrMoN15-1 + 0,4 % N mit homogener, sehr feinkörnigen Carbideverteilung (10 µm) sehr hohe Lebensdauer bei Mangelschmierung und Korrosionsangriff.

TRENPRO-Verfahren (→ 5.5.3).

Hinweis: Hybrillager mit Kugeln aus Si-Nitrid für hohe Drehzahlen (Dichte 3,2 kg/dm³) eingesetzt (Vollkeramiklager → 8.4.2).

Tabelle 4.26: Normenübersicht Federstähle

Drähte	patentiert + kaltgezogen	DIN EN 10270-1 5 Sorten
	ölschlüssvergütet	DIN EN 10270-2 9 Sorten
Draht + Flachstahl	warmgewalzt + vergütet	DIN EN 10089 19 Sorten
Bänder	kaltgewalzt	DIN EN 10132-4

Nichtrostende Stähle

Bänder	kaltgewalzt	DIN EN 10151 16 Sorten
Draht	kaltgezogen	DIN EN 10270-3 3 Sorten

Ein neues Verfahren benutzt thermomechanisch vorbearbeitetes Halbzeug zum Wickeln hochfester Federn (→ 1.2 Beispiel 2).

Eine Erhöhung der Dauerfestigkeit kann durch mechanische Verformung der Randschicht mittels Kugelstrahlen erreicht werden (→ 5.6.6).

Tabelle 4.27: Übersicht über die Federstähle

DIN EN 10089/03 Federstähle warmgewalzt + vergütet		in Dicken 3...20 mm
19 Sorten Rund- und Flachstäbe, gerippter Federstahl und Walzdraht. Die Härte steigt mit dem C-Gehalt von 61 auf 66 HRC, die Durchhärtung mit dem LE-Gehalt von 7mm Ø (38Si7) bis auf 54 mm Ø (52CrMoV4)		
38Si7 Federringe, Federplatten für Schraubensicherungen (wasservergütet)	Lieferformen sind:	
54SiCr6 Blatt- und Kegelfedern für Schienenfahrzeuge bis 7 mm Dicke	+H unterer Bereich des Streubandes,	
60SiCr7 Fahrzeugblattfedern, Schrauben- und Tellerfedern	+HH oberer Bereich der Stirnabschreckkurven	
55Cr3 hochbeanspruchte Blatt-, Schrauben-, Teller-, Drehstabfedern, Stabilisatoren		
51CrV4, 52CrMoV4 desgl. höchstbeansprucht und für größere Abmessungen		

DIN EN 10151/03 Federband aus nichtrostenden Stählen		s ≤ 3 mm , max. 600 mm breit
16 Sorten kaltverfestigt geliefert von +C700 bis +C1900 (Anhängezeichen für $R_{m,min}$ in MPa) z.T. für Wärmebehandlung geeignet. Die Korrosionsbeständigkeit steigt mit dem Gehalt an Ni und Mo.		
Gefüge	Beispiele	Stoff-Nr.
ferritisches	X6Cr17	1.4016
martensitisches	X20Cr13	1.4021
ausscheidungshärtend	X7CrNiAl17-7 ¹⁾	1.4568
austenisches	X10CrNi18-8	1.4310

¹⁾ Für Temperaturen bis 300 °C, NiMo16Cr16Ti (Hastelloy C4) bis 450 °C, Nimonic 90 bis 600 °C.

DIN EN 10270/01 Stahldraht für Federn				Teil 1 patentiert und kaltgezogen (Kurzzeichen fett)		Teil 2 ölschlussergütet (Kurzzeichen normal gedruckt)	
Sorten nach	Federbeanspruchung				Dauerfestigkeit		Draht-Ø für die Sorten in mm SL, SM, SH, DM, DH 0,5...20
	Festigkeit	statisch	mittler	hoch	---	---	
T1 (fett)	niedrig	SL / FDC	--- / TDC	--- / VDC			FDC, FDCrV, FDSiCr 0,5...17
	mittel	SM / FDCrV	DM / TDCrV	DH / VDCrV			TDC, TDCrV, TDSiCr, 0,5...10
	hoch	SH / FDSiCr	--- / DSiCr	--- / VDSiCr			VDC, VDCrV, VDSiCr

	R_m ¹⁾ in MPa für Draht-Ø in mm				R_m ¹⁾ in MPa für Draht-Ø in mm				R_m ¹⁾ in MPa für Draht-Ø in mm			
	Sorte	1	4	15	Sorte	0,5	4	15	Sorte	0,5	3	5
SL		1320			FDC	1900	1550	1270	TDC, VDC	1850	1600	1540
SM	----	1530	1110		FCrV	2000	1620	1410	TDCrV, VDCrV	1910	1670	1570
SH	2230	1740	1270		FDSiCr	2100	1870	1570	TDSiCr, VDSiCr	2080	1910	1810
DM		1530	1110		¹⁾ untere Werte der Zugfestigkeit. R_m ; E-Modul $E = 206\,000$ MPa, Gleitmodul $G = 81\,500$ MPa.							
DH		1740	1270									

Die Sorten mit mittlerer und höherer Dauerfestigkeit haben gegenüber den statisch belastbaren Sorten einen höheren Reinheitsgrad und definierte Oberflächenbeschaffenheit (Oberflächenfehler und Randentkohlung).

Tabelle 4.27: Übersicht über die Federstähle, Fortsetzung

DIN EN 10270-3/01 Stahldraht für Federn, kaltgezogen							$d = 0,2 \dots 10 \text{ mm} \varnothing$	
Sorte	Stoff-Nr.	Zugfestigkeit R_m in MPa für Draht-Ø in mm				T_{\max}	E-Modul	G-Modul
		$\leq 0,2$	$0,4 \dots 0,5$	$4,25 \dots 5$	$8,5 \dots 10$	$^{\circ}\text{C}$	MPa	
X10CrNi18-8	1.4310	2200	2050	1450	1250	30...+270	180 000	70 000
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	1725	1650	1200	1050	300	175 000	68 000
X7CrNiAl17-7	1.4568	1975	1900	1350	1250	350	190 000	73 000

DIN EN 10132-4/03 Kaltband aus Stahl, T4: Federstähle		Dickenbereich 0,2...10 mm
8 unlegierte: C55S, C60S, C67S, C75, C85S, C90S, C100S, C125S		
7 niedriglegierte: 48Si7, 55Si7, 51CrV4, 80CrV2, 75Ni8, 125Cr2, 102Cr6		

Zugfestigkeit je nach Dicke bis 3 mm und C-Gehalt, vergütet:	unlegierte Sorten: 1100...2100 MPa niedrig legierte: 1200...2100 MPa
--	---

4.7 Werkzeugstähle

4.7.1 Allgemeines

Werkzeugstähle sind härtbare Edelstähle, die in den verschiedenartigsten Werkzeugen im direkten Kontakt mit dem Werkstoff zur Fertigung von Halbzeugen und Bauteilen dienen. Unlegierte Stähle genügen den immer weiter gestiegenen

Anforderungen nicht mehr, deshalb sind legierte und hochlegierte Stähle in der Überzahl. Eine Einteilung geschieht nach dem Anwendungsbe- reich:

Übersicht: Einteilung der Werkzeugstähle

Bereich	Einsatzgebiet	Beispiele: Werkzeuge für / zum...
Kalt-Arbeitsstähle	Umformen, Prägen und Trennen von Halbzeugen, Pressen von pulverigen Ausgangsstoffen in kaltem Zustand	Tiefziehen, Fließpressen, Kaltschlagen, Schneiden und Stanzen, Pressen von Sinterteilen, Handwerkzeuge
Warm-Arbeitsstähle	Urformen von flüssigen, Umformen von erhitzten Metallen und Glas	Druckgießformen, Strangpressen, Glasformen, Schmiedegesenke
Kunststoff-Formen-stähle	Urfomen von körnigen/pulvriegen Formmassen aus duro- oder thermoplastischen Polymeren mit Füllstoffen	Formen für Press- u. Spritzgussteile, Bauteile von Kunststoffmaschinen zum Spritzgießen oder Extrudieren
Schnell-arbeitsstähle	Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden ¹⁾	Bohrer, Fräser, Gewindebohrer, Metallsägen, Reibahlen

¹⁾ Für hohe Schnittgeschwindigkeiten durch Sinterhartstoffe und Keramik ersetzt

Normung: DIN EN ISO 4957/01; (DIN 17350 Z), VDI-Richtlinien 3388/97)

Beanspruchungen: Der Kontakt mit harten und verschleißenden oder flüssigen Werkstoffen unter hohen Kräften verlangt vom Werkzeug neben weiteren speziellen Eigenschaften allgemein:

- **harte Oberflächen** (Verschleißwiderstand)
- **Druckfestigkeit** im Kern (Erhaltung der Form).

Beide Werkstoffeigenschaften werden durch **Härten** (→) erreicht. Kohlenstoff und LE beeinflussen wichtige Eigenschaften (↓ Übersicht).

Einhärtung ist die Tiefe der martensitisch umgewandelten Zone vom Rand aus und wird mit dem Stirnabschreckversuch geprüft (Bild 5.22). Die LE vergrößern sie bis hin zur Durchhärtung.

- Legierte Stähle härten tiefer ein.
- Legierte Stähle können langsamer abgeschreckt werden (Öl, Salzbäder, Luft/Gase)

Der Einfluss der LE auf das Härteverhalten zeigt Bild 4.5 anhand der ZTU-Schaubilder.

- Die Felder von Perlit- und Bainitstufe sind getrennt durch einen
- umwandlungsträgen Bereich, in dem Austenit längere Zeit beständig ist, günstig für den Temperaturausgleich bei der Warmbadhärtung von großen Teilen.
- Der Bainitbereich ist weiter nach rechts verschoben. Die gewählte Abkühlkurve kann dicht vor den Umwandlungsfeldern verlaufen. Es kommt zu vollständiger Martensitbildung.

Das Bild 4.5 enthält 3 ledeburitische Stähle (↓ Tabelle). Bei Stahl Nr. 3 sind Perlit- und Bainitstufe stärker nach rechts verschoben, als bei den beiden anderen Sorten.

Nr.	Sorte	LE-Anteile
1	X210Cr12	ohne W, V und Mo
2	X210CrW12	mit 0,7% W
3	X155CrVMo12-1	mit 1% V + 0,9% Mo

Bild 4.6 zeigt die Auswirkungen der LE auf die Härteverläufe über den Querschnitt eines Rundstahles von 100 mm Ø. Stahl 3 hat die höchste Randhärte bei vollkommener Durchhärtung. Es zeigt, dass Mo und V stärker wirken als das Element W. 1 % Mo ersetzt 2 % W.

Hinweis: Das Härteln des Stahles ist im Abschnitt Wärmebehandlung 5.3 ausführlich behandelt. Es besteht aus drei Arbeitsgängen:

Austenitisieren: Erwärmen und Halten auf Temperaturen, bis das Gefüge in Austenit umgewandelt ist, in dem die LE- und C-Atome homogen verteilt sind (Bilder 5.2 und 5.3).

Abkühlen (Abschrecken) mit einer kritischen Geschwindigkeit v_{crit} , bei der die Perlitzbildung übersprungen wird und die Umwandlung ohne Diffusion der C-Atome stattfindet. Es entsteht ein verzerrtes Gitter, der Martensit. Seine Härte ist C-abhängig und beträgt bei 0,8 % C ca. 64 HRC (Bild 5.19).

Anlassen: Erwärmen auf Temperaturen bis ca. 300 °C (600 °C), dabei steigt die Zähigkeit an, während die Härte sinkt. Durch die Anlasstemperatur kann die Zähigkeit der Beanspruchung des Werkzeuges angepasst werden (Bild 5.29).

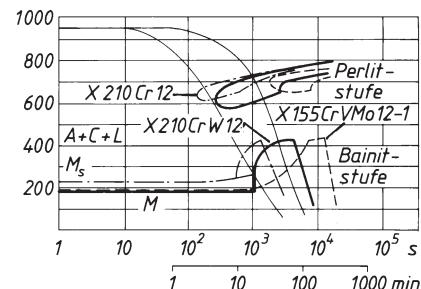


Bild 4.5 ZTU-Schaubilder hochlegierter Stähle

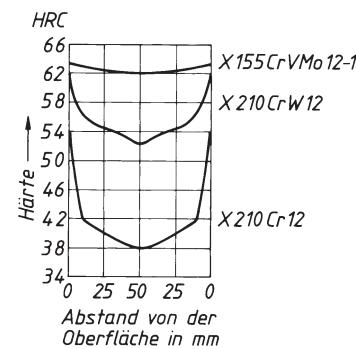


Bild 4.6 Härtbarkeitsschaubild ledeburitischer Stähle. Rundstahl von 100 mm Ø nach Vakuumhärtung mit Stickstoffabkühlung

Leistungssteigerung bei Werkzeugstählen

Standzeit und -menge der Werkzeugstähle können verbessert werden.

- Größerer Reinheitsgrad durch ESU- oder Vakuumerschmelzung verbessert Oberflächengüte und Dauerfestigkeit (weniger nichtmetallische Teilchen).
- Oberflächenbehandlung oder Beschichten erhöht Widerstand gegen Verschleiß.
- PM-Herstellung der carbidreichen Stähle lässt höhere Carbidenteile zu und ergibt gleichmäßig feinkörnige Verteilung. PM-Stähle härten dadurch verzugsärmer.

Hinweis: Zum vollständigen Auflösen der Legierungsbestandteile müssen vor allem höher legierte Stähle vor dem Abschrecken auf Temperaturen über 1000 °C erwärmt werden. Zum Mindern oder Vermeiden von Härteverzug sind Stahlauswahl und Härtetechnik zu beachten.

Verschleißwiderstand wird durch diamantartige Schichten erhöht, die nach dem PVD-Verfahren aufgebracht werden (→ 11.2.5 und Tabelle 11.16).

Übersicht: Einfluss des Kohlenstoffs und der Legierungselemente (LE) auf das Härteln

Einfluss des Kohlenstoffs	↑ C-Gehalt steigt, Härte steigt, Zähigkeit sinkt	↓ C-Gehalt sinkt, Zähigkeit steigt, Härte sinkt und muss durch LE (wie Cr, Mo, V und W) ausgeglichen werden	
Einfluss der Legierungselemente	LE-Gehalt niedrig	LE-Gehalt mittel	LE-Gehalt hoch
	Wasserhärtung, Verzug hoch	Ölhärtung, Verzug geringer	Warmbad-/Lufthärtung, Verzug klein
Werkzeug, Querschnitt und Komplexität	niedrig	mittel	hoch

4.7.2 Kaltarbeitstähle

Stähle dieser Gruppe sind für Werkzeuge (→) bestimmt, deren Oberfläche im Einsatz nicht über 200 °C steigt. Sie benötigen keine besondere Anlassbeständigkeit. Tabelle 4.28 zeigt das Anforderungsprofil.

Beispiele für Kalarbeitswerkzeuge.

Schnittwerkzeuge, Scherenmesser, Räumnadeln, Schneideisen, Sägen, Feilen, Meißel, Prägewerkzeuge, Kalschlag- und Fließpresswerkzeuge, Mess- und Prüfzeuge.

Tabelle 4.28: Anforderungsprofil der Kalarbeitsstähle und erforderliche Gefügeausbildung

Anforderung, Widerstand gegen	Eigenschaft	LE, Wärmebehandlung
Plastische Verformung	Hochliegende Fließgrenze	Martensitische Gefüge, Durchhärtung/Durchvergütung 0,3...0,6 % C + 1...5 % Cr
Verschleiß	Härte	Widerstand gegen Abrasion durch hohen Carbidenteilen (LE Mo, V, Cr, W),
	Tribologische Eigenschaften	gegen Adhäsion: Laserhärten, nichtmetallische Beschichtungen, Nitrocarburieren, PVD-Beschichtung mit TiN, Ti(CN)
Schlag, Stoß, Kantenausbrechen	Zähigkeit	C-Gehalt niedrig, Ausgleich durch höhere LE-Gehalte, Ni steigert Härtbarkeit und Zähigkeit, Reinheitsgrad durch Vakuumerschmelzung erhöhen, Feinkorngefüge durch besondere Wärmebehandlung
Härteverzug	Verzugsarmut	Warmbad- oder lufthärtende Sorten einsetzen, PM-Stähle

Der C-Gehalt bestimmt Härte und gegenläufig die Zähigkeit über den **Carbidanteil**. Sie erhöhen den Verschleißwiderstand. Damit lassen sich drei Gruppen von Stählen erkennen (→).

Stähle mit höheren Carbidgehalten als 28 % (z.B. X280W12) sind durch die Schmelzmetallurgie (+ Schmieden) nicht herstellbar. Hier knüpfen die PM-Stähle an, die bis zu 75 % enthalten können.

Die Carbide einiger LE (Carbidbildner 4.1.2) sind wesentlich härter als Fe₃C, Zementit (Tabelle 4.5). Diese LE wie Cr, W, und V sind für leistungsfähige Werkzeugstähle unverzichtbar.

Zähharte, untereutektoidische Stähle ohne Carbide, < 62 HRC. Anwendung zum Schneiden und Umformen von dicken Blechen und Werkzeuge mit starker Kerbwirkung.

Harte, übereutektoidische Stähle mit ca. 10 % Carbidanteil und der vollen Martensithärte von > 64 HRC. Anwendung für Schneidplatten und Stempel mittlerer Blechdicken und Leistung.

Verschleißfeste, ledeburitische Stähle mit bis zu 28 % Carbidanteilen und 60...65 HRC. Für Schneidplatten, Ziehringe und -stempel bei hohen Standmengen und Blechen bis zu 4 mm.

Tabelle 4.29: Kaltarbeitsstähle, Auswahl aus 6 + 17 Sorten der DIN EN ISO 4957/01

Kurzname	Stoff.-Nr.	Eigenschaften, Anwendung
C45U	1.1730	Unlegiert, für Handwerkzeuge, Meißel, Aufbauteile von Werkzeugen
102Cr6	1.2067	Bördelrollen, Stempel, Lehren, Wälzlager
60WCrV8	1.2550	Schnitte u. Stempel für dickere Bleche, Holzbearbeitungswerkzeuge
X155CrVMo12-1	1.2379	Gewindewalzrollen und -backen, Schneid- und Stanzwerkzeuge für Blech < 6 mm, Feinschneidwerkzeuge bis 12 mm, Tiefziehwerkzeuge
X210CrW12	1.2436	Durchhärtender, maßbeständiger, verschleißfester Stahl für Schnittplatten und -stempel, Tiefzieh- und Fließpresswerkzeuge
X220CrVMo13-4	1.2380	PM-Kalarbeitsstahl, (K 190 PM Böhler), verzugsarm, hochverschleißfest

Werkzeugstahlguss: Für Großwerkzeuge (z.B. zum Pressen von Karosserieteilen) eingesetzt: z.B. G45CrNiMo4-2 (1.2769) oder GX100CrMoV5-1 (1.2363), mit Randschichthärteten von 56...62 HRC; G41CrMn6 (1.7104) Schnittwerkzeuge für Karosserieteile.

4.7.3 Warmarbeitsstähle

Diese Stähle werden für Werkzeuge zum Urformen und Warmumformen der Werkstoffe eingesetzt. Tabelle 4.30 nennt Anforderungen und Gefüge. Im Allgemeinen sind Kaltumformbarkeit und Schweißeignung nicht erforderlich (→).

Die Anforderungen an Kalarbeitsstähle (Tabelle 4.28) erhöhen sich bei den Warmarbeitsstählen (Tabelle 4.30). Durch den Kontakt mit flüssigen oder auf Formgebungstemperatur erwärmt Metallen besteht die Gefahr der Gefügeveränderung durch weiteres Anlassen. Die Anlasstemperatur sollte deshalb etwa 80...100 K höher als die Betriebstemperatur des Werkzeuges sein. Danach ist die Sorte auszuwählen.

Beispiele für Warmarbeitswerkzeuge:

Gesenke für Schmiedehämmer und -maschinen, Warmscheren, Druckgießformen, Strangpresswerkzeuge, Glasformen.

Ausnahmen: Kalteinsenken flacher Gravuren, Auftragschweißung zur Reparatur von Gesenken.

Ständige Temperaturwechsel warm/kalt erzeugen ein Netz von Ermüdungsrissen (Brandrisse). Höhere Zähigkeit ist für stoßbeanspruchte Teile wichtig (Hammergeesenke).

Für höhere Gebrauchstemperaturen sind sekundärhärtende Sorten (Mo- und V-legiert) zu wählen (Sekundärhärtung → Bild 4.7).

Tabelle 4.30: Zusätzliche Anforderungen an Warmarbeitsstähle und erforderliche Gefügeausbildung

Anforderung	Eigenschaft	LE, Wärmebehandlung
Hohe Temperaturen verändern das Gefüge und senken die Härte	Anlass-Beständigkeit, Warmhärte	Aushärtungseffekt durch 0,3...0,9 % V, V-Carbide scheiden erst bei hohen Anlasstemperaturen aus. W und /oder Mo zulegieren, ihre Carbide sind härter als Cr-Carbide
Ständige Temperaturwechsel	Thermoschock-beständigkeit	Σ LE niedrig halten, um Wärmeleitfähigkeit (Rissanfälligkeit) zu verbessern, 1 % Mo ersetzt 2 % W, V wirkt noch stärker
Stoß- und Schlagbeanspruchung	Warmzähigkeit	C-Gehalt niedrig, Ni zulegieren, Feinkorn und Reinheitsgrad verbessern

Tabelle 4.31: Warmarbeitsstähle, Auswahl aus DIN EN ISO 4957/01

Kurzname	Stoff-Nr.	Eigenschaften, Anwendung
55NiCrMoV7 G56NiCrMoV7	1.2714	Warmzäh, durchhärtend, weniger anlassbeständig. Gesenkstahl für große Hammergeesenke (Vollform)
X38CrMoV5-1 GX38CrMoV5-1	1.2343	Hohe Warmfestigkeit und -zähigkeit, wenig empfindlich gegen Temperaturwechsel, warmverschleißfest. Gesenke, Schnecken und Zylinder für Kunststoff-Spritzgussmaschinen und Extruder
X40 CrMoV5-1 GX40CrMoV5-1	1.2344	Wie vor, für größere Querschnitte, sekundärhäftend, Druckgieß- und Strangpresswerkzeuge, nitrierte Auswerfer, Warmscherenmesser
32CrMoV12-28 GX32CrMoV3-3	1.2365	Hoch anlassbeständig (sekundärhäftend), wenig rissempfindlich bei Wasserkühlung, weniger durchhärtend, für kleinere Querschnitte, Druckgießformen

4.7.4 Kunststoff-Formenstähle

Bei der Verarbeitung duro- oder thermoplastischer Formmassen liegen die Temperaturen unter denen der Metalle. Wichtig ist eine dauerhaft glatte Oberfläche zum leichten Entformen von Spritzgußteilen (Polierfähigkeit). Das erfordert bei Massen, die korrodierende Stoffe abgeben, auch **Korrosionsbeständigkeit**. Harte und abrasive Zusätze verlangen erhöhten Verschleißwiderstand. Höhere Standmengen werden durch PVD-Schichten aus TiN, CrN, TiCN und AlTiN in Dicken von 2...8 μm erreicht.

Korrosionsbeanspruchung entsteht z.B. durch die Hilfsstoffe (Weichmacher, Flammenschutzmittel, antistatisch wirkende Zusätze) oder Stoffe, die bei der Polykondensation frei werden.

Verschleißbeanspruchung entsteht durch Zusätze wie Gesteinsmehl, Kreide, Schwerspat, Silikate, Kaolin, Glasfasern).

Hinweis: Verfahren und Schichtstoffe in 11.2.5; Tabelle 11.16

Tabelle 4.32: Kunststoff-Formenstähle, Auswahl

Kurzname	Stoff-Nr.	Eigenschaften, Anwendung
21MnCr5	1.2162	zum Einsatzhärten, polierfähig, kalteinsenkarbar. Für hochglanzpolierte flache Kunststoffformen, Führungssäulen
40CrMnNiMo8-6-4	1.2738	Gut spanbar, polierbar, narbungsgeeignet, für Großformen mit tiefer Gravur durch 1 % Ni durchvergütend
X38CrMo16	1.2316	Gute Polierbarkeit, korrosionsbeständig, für aggressive Polymere

Neben Stählen werden auch elektrolytisch abgeschiedene Formschalen aus Hart-Ni verwendet, die zur Abstützung hintergossen werden. Für einfache Teile und Temperaturen < 100 °C sind auch Zn-Legierungen geeignet.

4.7.5 Schnellarbeitsstähle (HS-Stähle)

Hochleistungs-Schnittstähle (früher HSS-Stähle) sind Werkstoffe für hohe Spanungsleistungen, z.B. für Fräser und Fräserzähne, Wendel- und Gewindebohrer, Schneideisen. Die Hauptbeanspruchung entsteht durch hohe Schneidentemperaturen.

HS-Stähle sind hoch mit W, Cr, Mo, V und Co legierte Stähle (→ Beispiel). Die LE liegen im Gusszustand als grobkörnige Primärkarbide vor und werden durch Schmieden mit evtl. Weichglühen feinkörniger. Sie sind härter als Martensit und thermisch stabiler. So ergibt sich die hohe Warmhärte und Anlassbeständigkeit der HS-Stähle. Sie wird nur erreicht, wenn besondere Bedingungen für das Härteln eingehalten werden.

Der hohe Legierungsanteil führt zu verminderter Wärmeleitung und Diffusionsgeschwindigkeit. Die Wärmebehandlung benötigt deshalb längere Zeiten und höhere Temperaturen (Tabelle 4.33.).

Tabelle 4.33: Wärmebehandlung der HS-Stähle

Härteln	Schrittweise Erwärmung in Luftumwälzern + Salzbädern, Wirbelschichtbetten oder Vakuumöfen auf 1180...1320 °C je nach Sorte. Optimale Härtung erfordert die vollständige Auflösung der Sonderkarbide, durch richtige Temperatur und Haltezeit (Bild 4.7).
Abschrecken	In Öl, Warmbad von 550 °C, Gebläseluft, oder Vakuumhärtung mit N ₂ unter Druck. Das Gefüge besteht aus Martensit, Restaustenit und Sonderkarbiden.
Anlassen → Bild 4.7	Zwei- bis dreimaliges Anlassen bei 540...580 °C je nach Sorte. Die Martensithärte fällt zunächst leicht ab, steigt dann durch feinste Carbidauscheidungen wieder an und kann höher liegen als die Abschreckhärte (als Sekundärhärte (→) oder auch Sprunghärte bezeichnet).

Die ersten Schnellarbeitsstähle wurden 1900 von den Amerikanern *Taylor* und *White* erfunden und für Dreh- und Hobelmeißel eingesetzt. Sie enthielten bis zu 20 % Wolfram. Später sind zahlreiche Wolfram ärmere Sorten entstanden.

Die frühere Bedeutung der HS-Stähle für Drehmeißel ist auf moderne Schneidwerkstoffe wie Hartmetall und Keramik übergegangen.

Zur Carbidbildung sind 0,8...1,4 % C, zur Durchhärtung ca. 4 % Cr erforderlich. Die an deren LE sind je nach Sorte unterschiedlich.

Beispiel: Sorte S 10-4-2-10, Analyse

C	Cr	Mo	V	W	Co
1,2	4,1	3,5	3,3	9,5	10

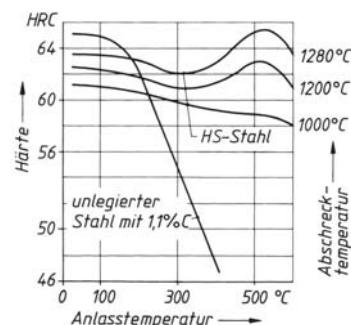


Bild 4.7 Einflüsse der Abschreck- und Anlasstemperaturen auf Härte der HS-Stähle im Vergleich mit unlegiertem Stahl

Sekundärhärte der HS-Stähle (Bild 4.7). Ursache sind die Sonderkarbide der gelösten LE. Sie scheiden erst bei diesen hohen Anlassstemperaturen in submikroskopischer Form aus und wirken als Gleitblockierung im Grundgefüge. Für das „In Lösung gehen“ der LE sind die richtigen, **hohen** Abschrecktemperaturen erforderlich. Ein Unterschreiten führt zu kleineren Härtewerten, oder Wegfall des Sekundärhärte-Effektes.

Hinweis: Die höhere Anlassbeständigkeit durch Sekundärausscheidungen von Sonderkarbiden liegt auch bei einigen hochlegierten Warmarbeitsstählen vor (Tabelle 4.31).

Tabelle 4.34: Schnellarbeitsstähle

LE-Gruppe	Sorte ¹⁾	Stoff-Nr.	Verwendungsbeispiele
W hoch	HS18-1-2-5	1.3255	Schrupparbeiten für harte Werkstoffe und große Spanungsleistungen, Hartguss, nichtmetallische Werkstoffe
W mittel	HS10-4-3-10	1.3207	Schlichtarbeiten mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und hoher Oberflächengüte
W+Mo	HS6-5-2-5	1.3243	Fräser, Bohrer und Gewindeschneidwerkzeuge höchster Beanspruchung
Mo höher	HS6-5-3	1.3344	Hochleistungswerkzeuge zum Schneiden dicker Bleche > 6 mm, Stempel für Feinschneidwerkzeuge, auch als PM-Stahl

¹⁾ Zahlen geben den Prozentsatz der LE in der Folge W, Mo, V und Co an, bei ca. 4 % Cr und 0,8...1,4 C

Leistungsteigerung bei HS-Stählen

Pulvermetallische Herstellung von Schnellarbeitsstählen und anderen hochcarbidhaltigen Werkzeugstählen ergibt eine homogener und feinkörnigere Carbidverteilung, als es schmelzmetallurgisch möglich ist (große Primärkarbide beim Erstarren). Dadurch steigen Biegefesteitigkeit (Zähigkeit gegen Kantenausbrechen) und damit die Standzeiten. Zahlreiche Sorten sind als PM-Stähle im Handel.

Nachbehandlungen zur Erhöhung der Standzeiten sind Badnitrieren und PVD/CVD-Beschichtungen mit TiN, TiC oder Ti(CN), evtl. mehrlagig (Multilayer).

4.8 Stahlguss

4.8.1 Allgemeines

Stahlguss ist in Formen vergossener Stahl mit ähnlichen Analysen wie Walz- und Schmiedestähle, jedoch nicht in der Vielzahl der Sorten.

Erschmelzung. In Stahlgießereien werden Lichtbogen- und Induktionsöfen (kleine Abstichmassen) verwendet. Da Gussteile nicht plastisch weiterverformt werden, wird zur Vermeidung von Gasblasen *desoxidiert, beruhigt* vergossen, oder vakuumgetestet (\rightarrow 4.2.2 Sekundärmetallurgie).

Erstarrung. Stahlguss hat beim Erstarren eine Volumenschrumpfung von 6...8 %, deshalb müssen zum Abguss lunkerfreier Gussstücke viele Speiser zum Nachsaugen gesetzt werden. Die langsame Abkühlung führt zu Grobkorn (Widmannstätten'sches Gefüge, Bild 5.5). Die Zähigkeit ist gering und muss durch Normalisieren und Spannungsarmglühen angehoben werden. Je nach C-Gehalt (und LE) sind alle anderen Wärmebehandlungen möglich.

Gießeigenschaften. Von allen Gusswerkstoffen besitzt Stahlguss die erwünschten Gießeigenschaften (\rightarrow Abschnitt 6.1) am geringsten.

- Hohe Gießtemperatur 1500...1700 °C.
- Das Schwindmaß beträgt insgesamt 2 %.
- Schlechtes Formfüllungsvermögen, da auf der kälteren Formwand dendritische Mischkristalle senkrecht wachsen und bei dünnen Querschnitten den Durchfluss sperren.

Anwendung: Stahlguss wird dann verwendet, wenn das Eigenschaftsprofil der anderen Fe-Gusswerkstoffe nicht ausreicht. Das ist bei folgenden Beanspruchungen der Fall:

- wenn höhere Zähigkeit verlangt wird,
- bei Tieftemperatur-Einsatz,
- bei Betriebstemperaturen über 300 °C,
- bei besonderen Korrosions- und Verschleißbeanspruchungen.

4.8.2 Stahlguss für allgemeine Verwendung

DIN EN 10293 ersetzt die zurückgezogenen Normblätter DIN 1681, DIN 17182 schweißgeeigneter Stahlguss und DIN 17205 Vergütungsstahlguss und enthält 5 unlegierte, 19 niedrig legierte und 6 hochlegierte Sorten.

Tabelle 4.35: Stahlguss, Auswahl aus DIN EN 10293/05

Stahlsorte		Stoff-Nr.	Dicke mm	$R_{m,\min}$ MPa	$R_{p0,2}$ MPa	A %	KV in J ¹⁾		Anwendungsbeispiele
Kurzname	Zustand						RT / °C	27 / -40	
GE200	+N	1.0420	≤ 300	380...530	200	25	27	--	Kompressorengehäuse
GE240	+N	1.0446	≤ 300	450...600	230	22	27	--	Konvertertragring
GE300	+N	1.0558	≤ 100	520...670	300	18	31	--	Großzahnräder
G17Mn5 ²⁾	+QT	1.1131	≤ 50	450...600	240	24	70	27 / -40	Tunnelabdeckung für U-Bahn
G20Mn5 ²⁾	+N	1.1120	≤ 30	480...620	300	20	60	27 / -40	Fachwerknoten (2,3 t)
G30CrMoV6-4	+QT	1.7725	≤ 100	850...1000	700	14	45	27 / -40	Achsschenkel (400 kg)
G9Ni14	+QT	1.5638	≤ 35	500...650	360	20	---	27 / -90	Kaltzäh, Kälteanlagen

¹⁾ ISO-V-Probe bei RT ²⁾ Stahlguss mit guter Schweißeignung (früher DIN 17182); SEW 520/96 Hochfester Stahlguss mit guter Schweißeignung mit 10 Sorten

Schweißeignung ist wichtig für die Reparaturschweißung zum Beheben von Oberflächenfehlern bei großen Gussstücken und für konstruktives Schweißen, wenn Werkstücke ausgießtechnischen Gründen geteilt gegossen und durch Schweißen zusammengefügt werden.

4.8.3 Weitere Stahlgusswerkstoffe, Übersicht

DIN EN 10283/98 Korrosionsbeständiger Stahlguss

Gefüge	Beispiele	$R_{p0,2}$ MPa	Gefüge	Beispiele	$R_{p0,2}$ MPa
6 martensitische	GX20Cr14, GXCrNiMO16-5-2	450-750	7 voll-austenitische	GX2NiCrMo28-20-2 GX6CrNi26-7, GX2CrNiMoN26-7-4	165-200
8 austenitische	GX5CrNi19-11, GX2CrNiMoN17-13-4	185-210	6 austenitisch- ferritische Stähle		420-480

DIN EN 10213/96 Stahlguss für Druckbehälter, 4 Teile

Teil 2 enthält im Anhang die Zeitdehngrenzen R_{p1} für 10^4 und 10^5 h und die Zeitstandfestigkeit R_m für 10^5 und $2 \cdot 10^5$ h bei steigenden Temperaturen.

Teile Nr.	Titel	Anzahl und Art der Sorten
-1	Allgemeines,	-----
-2	Stahlsorten für Verwendung bei Raum- und höheren Temperaturen,	3 unlegierte, 5 niedrig, 5 hoch legierte Sorten
-3	desgl. bei tiefen Temperaturen,	6 niedrig- und 1 hoch legierte Sorten
-4	austenitisch und- austenitisch-ferritische Sorten.	2 CrNi-, 1 CrNiNb-, 3 CrNiMo-, 2 CrNiMoN-, 1 CrNiMoCu-, 1 CrNiMoNb-legierte Sorten

DIN EN 10295/01 Hitzebeständiger Stahlguss

Anzahl	Gefüge	Beispiele	$\vartheta_{\max/\text{Luft}}$
8	ferritische, und	GX30CrSi7	750 °C
	ferritisch-austenitische	GXCrNiSi27-4	1100 °C
17	austenitische Sorten	GX40CrNiSi25-20	1100 °C
4	Ni- und Co-Basislegierungen	G-NiCr 28 W	1150 °C

Literaturhinweise:

- | | |
|--------------------------------|--|
| Fachzeitschriften | Stahl und Eisen. Verlag Stahleisen, Düsseldorf,
Konstruktion, mit Fachteil Ingenieur-Werkstoffe, Springer-VDI-Verlag |
| Informationen VDEh (Hrsg.): | Stahl-Eisen-Informationszentrum, Breite Straße 69, 40213 Düsseldorf
www.stahl-online.de ; www.vdeh.de |
| Info-Stelle Edelstahl Rostfrei | PF 10 22 05 40013, Düsseldorf, Informationsschriftenreihe
www.edelstahl-rostfrei.de (PDF-Dateien) |
| Bleck, W. u.a. | Grundlagen der integrierten Wärmebehandlung, Stahl und Eisen, 4/1997 |
| Spitzer, H. | Stahl – Entwicklungstendenzen und Perspektiven, VDI-Bericht 670, Bd. I |
| Zimmermann,R. u. K.Günther: | Metallurgie und Werkstofftechnik, ein Wissenspeicher, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig |
| Christianus/Gysel/Werning: | Stahlguss, Herstellung, Eigenschaften und Verwendung. Konstruieren und Gießen, 1988/4 |
| VDI-Bericht 1080 | Leichtbaustrukturen und leichte Bauteile. Stahlwerkstoffe: S. 25-54. 771-799 |
| VDEh (Hrsg.) | Stahl Eisen Liste, 11. Auflage 2003, Verlag Stahleisen
Stahl im Automobilbau. Stahleisen-Verlag 2003,
Stahl Fibel 2002, Stahleisen-Verlag |
| DIN-Taschenbuch 4 | Stahl und Eisen, Güternormen, Beuth-Verlag, 2002 |

5 Stoffeigenschaft ändern

Stoffeigenschaften können in allen Phasen eines Bauteillebens beeinflusst werden. Es beginnt mit der Erzeugung des Werkstoffes, die sich auf den Reinheitsgrad auswirkt und setzt sich bei den Formgebungsverfahren fort.

Durch die hier behandelten Verfahren (Tabelle 5.1 fett gedruckt) werden Eigenschaften von Halbzeugen, Werkzeugen oder Bauteilen zielgerichtet verändert. *Form und Abmessungen* sollen sich dabei nicht ändern (mit Ausnahmen), also kein *Verzug* von Bauteilen auftreten.

Hinweis: Werkstoffeigenschaften, die **an Proben** ermittelt werden, unterscheiden sich von denen **im Bauteil**!

Definition: Stoffeigenschaft ändern ist Fertigen durch Eigenschaftsänderungen z.B. mithilfe von Erzeugung und Bewegung von Versetzungen im Kristallgitter, Diffusion von Atomen oder chemische Reaktionen mit Wirkmedien.

Die hier beschriebenen Verfahren bilden eine Verfahrenshauptgruppe (DIN EN 8580/03¹⁾

5.1 Allgemeines

Die Eigenschaften des Werkstoffes hängen von seiner Struktur ab. Bei allen Verfahren wird in diese Struktur eingegriffen (→). Das läuft bei erhöhten Temperaturen schneller ab, oder wird überhaupt erst möglich. Die ältere Sammelbezeichnung dieser Verfahren war deshalb auch

Wärmebehandlung der Stähle

Sie ist Schwerpunkt dieses Abschnittes. Einige Verfahren sind auch auf andere Metalle und Gusswerkstoffe anwendbar, ebenso die Verfestigung durch Kaltumformen im Randbereich von Bauteilen. Alle Verfahren haben das Ziel, dem Werkstoff ein gewünschtes Eigenschaftsprofil zu geben.

Die Verfahren verändern das Gefüge, teilweise auch die Kristallgitter.

Beispiele:

Kristallgitter	Verzerrung der Gitter durch Kaltumformen oder Abschrecken, Einbringen von Fremdatomen oder Umlagern von Atomen durch Diffusion
Gefüge	Änderung von Größe und Form der Kristalle, sekundäre Ausscheidungen, Abbau innerer Spannungen

Normung: DIN EN 10052/94 Begriffe der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen.

5.1.1 Einteilung der Verfahren

Tabelle 5.1: Stoffeigenschaft ändern DIN EN 8580/03 (Die Dezimalteilung in der Tabelle folgt der Norm)

Gruppen	Untergruppen				
6.1 Verfestigen durch Umformen	6.1.1 Verfestigungsstrahlen	6.1.2 Walzen	6.1.3 Ziehen	6.1.4 Schmieden	
6.2	6.2.1 Glühen	6.2.2 Härteln	6.2.3 Isothermisch Umwandeln	6.2.4 Anlassen, Auslagern	
Wärmebehandeln	6.2.5 Vergüten	6.2.6 Tiefkühlen	6.2.7 Thermochemisches Behandeln		6.2.8 Aushärteln
6.3 Thermo-mechan. Behandeln	6.3.1 Austenitformhärteln		6.3.2 Heißisostatisches Nachverdichten		
6.4 Sintern, Brennen	6.5 Magnetisieren		6.6 Bestrahlen		
6.7 Photo-chemische Verfahren	6.7.1 Belichten				

¹⁾ Eine Übersicht über die Gliederung der anderen Fertigungshauptgruppen gibt Abschnitt 1.6

5.1.2 Zeit-Temperatur-Folgen

Die Behandlung durch „Wärme“ wird mit Ausnahmen in drei großen Schritten durchgeführt (Bild 5.1).

Erwärmen: Die Temperatur der Randschicht eilt vor. Nach der Anwärmzeit t_{an} ist die Haltetemperatur ϑ_h erreicht. Der Kern braucht dazu noch die Durchwärmzeit t_d . Bis dahin ist die Erwärmzeit t_e verstrichen. Mit steigender Wärmegeschwindigkeit und Wanddicke der Teile streben die Kurven auseinander.

Halten: Wärmezzeit t_h mit konstanter Temperatur, die sich auf Ofen, Werkstückoberfläche oder den Querschnitt beziehen kann. Dabei können sich Spannungen und Gefügeunterschiede ausgleichen. Die Länge von t_h ist vom Verfahren abhängig, i.A. möglichst kurz, um Kornwachstum zu vermeiden.

Abkühlen: Abkühlzeit t_{ab} je nach Verfahren kürzer (beim Härteln) oder länger (beim Glühen) und je nach Wanddicke der Werkstücke.

Bei einigen Verfahren sind Erwärmen und Abkühlen in Stufen unterteilt, um z.B. bei großen Querschnitten oder schlechter Wärmeleitfähigkeit legierter Stähle Risse zu vermeiden.

Die Temperaturen hängen vom C-Gehalt des Stahles ab und werden durch die *Haltepunkte* angegeben oder mit den Linien des EKD veranschaulicht (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Haltepunkte, Linien und Umwandlungen in der Stahlecke des EKD

Haltepkt./Linie	Vorgänge/Gefügeänderung	Haltepkt./Linie	Vorgänge/Gefügeänderung
Ar_3	GSK ↓ Abkühlen des Austenits, die Ferritausscheidung beginnt (γ - α -Umwandlung)	Ac_3	GSK ↑ Erwärmen, Ferritumwandlung zu Austenit ist beendet (α - γ -Umwandlung)
Ar_1	PSK ↓ Abkühlen, Austenitzerfall = Perlitzbildung (γ - α -Umwandlung)	Ac_1	PSK ↑ Erwärmen, Auflösung des Perlits zu Austenit (α - γ -Umwandlung)
Ar_{cm}	ES ↓ Abkühlen, Beginn der Sekundärzementitausscheidung (C-Löslichkeit sinkt)	Ac_{cm}	ES ↑ Erwärmen, Einformung des Sekundärzementits (C-Löslichkeit steigt)

Stahlbegleiter und Reinheitsgrad beeinflussen die Vorgänge bei der Austenisierung, die Angaben der Stahlhersteller müssen eingehalten werden. Den Einfluss der Wärmequelle zeigt die Übersicht.

Übersicht: Vergleich der Erwärmungsarten

Wärmequelle	Erwärmungsverlauf, Folgeerscheinungen
Äußere Zufuhr durch Wärmeübertragung über Gase, Schmelzen und elektrische Heizelemente, Strahlen	Wärme gelangt durch Wärmestrahlung, -übergang und -leitung von außen in das Werkstück, ungleichmäßig (der Kern erreicht die Endtemperatur später) und langsam um Spannungen und Rissen vorzubeugen.
Innere Erzeugung durch elektrische Widerstands- oder Induktiverwärmung	Wärme entsteht innerlich durch Wirkung des elektrischen Stromes, gleichmäßig im Querschnitt (niedrige Frequenz → 5.6.2) und schnell

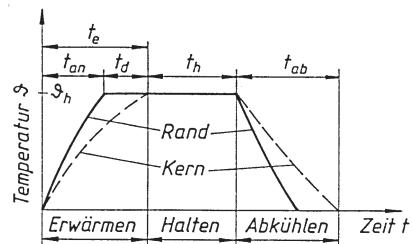


Bild 5.1 Temperatur-Zeit-Folge

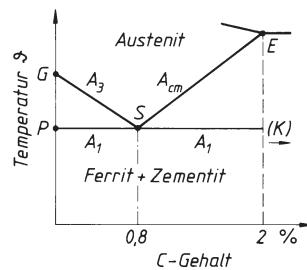


Bild 5.2 Stahlecke des EKD

Durch die Erscheinung der *Hysterese* werden die praktischen Temperaturen gegenüber dem EKD verändert. Bei schneller Erwärmung (z.B. durch Induktion) erhöht sich der Umwandlungspunkt Ac_3 bis zu 300 °C.

5.1.3 Austenitisierung (ZTA-Schaubilder)

Viele Verfahren benötigen den γ -Zustand des Stahles (Austenit), um von da aus bestimmte *Gefügeumwandlungen* zu erreichen. Diese Art des Erwärmens heißt *Austenitisieren*.

Austenitisieren ist das Herstellen eines homogenen, feinkörnigen γ -MK-Gefüges im Stahl. Dazu müssen Ferrit umgewandelt und Carbide gelöst und verteilt werden. Dieser Auflösungs- und Diffusionsvorgang benötigt Zeit. Dabei kann die Korngröße wachsen.

ZTA-Schaubilder (Bild 5.3)

Sie entstehen aus dem EKD durch Antragen einer Zeitachse *senkrecht* zur Ebene des EKD an der Stelle, die sich aus dem C-Gehalt des untersuchten Stahles ergibt.

Damit gelten ZTA-Schaubilder nur für jeweils einen Stahl *bestimmter* Analyse (hier 0,45 % C). Merkmale sind:

- Die Haltepunkte des EKD A₃ und A₁ werden mit schnellerer Erwärmung (kürzere Zeit) stetig nach **oben** verschoben und ergeben die Linien für Ac₁ und Ac₃,
 - oberhalb der Linie Ac₃ liegt noch eine gestrichelte Linie. Sie zeigt an, wann der Austenit *homogen* geworden ist.

Der Grad der Austenitisierung – *Homogenität* und *Korngröße* – beeinflusst sehr stark das bei der Abkühlung entstehende Gefüge. Dabei entsteht ein Zielkonflikt:

- **Homogenität** erfordert *längerer* Halten im Austenitgebiet (Diffusionsvorgänge),
 - **Feinkorn** erfordert kurzes Halten bei Temperaturen im Austenitgebiet, sonst tritt Kornwachstum auf.

Hinweis: Überperlitische Stähle bestehen im austenitisierten Zustand aus feinkörnigem Austenit mit Sekundärcarbiden.

ZTA: Zeit-Temperatur-Austenitisierung

Diese Schaubilder gibt es in zwei Arten, entsprechend der praktisch durchgeführten Erwermung:

- **isotherm:** für Erwärmung bei *konstanter* Temperatur, z.B. in Salzbädern (Bildteil 5.3 links),
 - **kontinuierlich:** für ein Erwärmung bei *fortlaufender* Temperaturänderung, z.B. durch elektrische Widerstands- oder Induktiverwärmung, Schweißen (Bildteil 5.3 Mitte).

Beachte: ZTA-Schaubilder werden mit Hilfe von 2 mm dicken Stahlproben aufgestellt und gelten streng nur dafür und für die untersuchte Schmelze. Die Angaben haben etwa $\pm 10\%$ Messgenauigkeit.

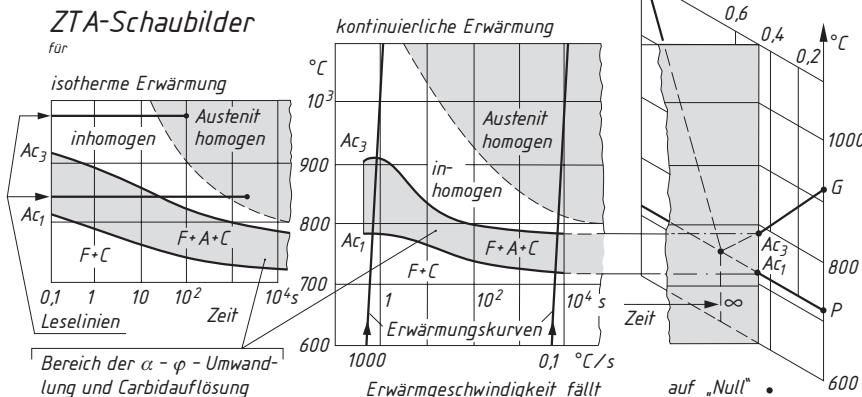


Bild 5.3 ZTA-Schaubilder und Beziehung zum EKD, schematisch für Stahl C 45, A Austenit, C Carbid, F Ferrit. Perlit besteht aus den Phasen Ferrit und Carbid

Das Lesen der ZTA-Schaubilder

Die Umwandlung des Gefüges zu Austenit wird im ZTA-Schaubild für isotherme Austenitisierung auf einer *Waagerechten* verfolgt (Bild 5.3, links). Dabei werden verschiedene Phasenfelder durchlaufen, die durch die Linien der Haltepunkte Ac_3 und Ac_1 begrenzt sind.

Ablesebeispiel (Bild 5.4) ZTA-Schaubild für isotherme Erwärmung:

Von der senkrechten Achse bei $800\text{ }^\circ\text{C}$ waagerecht durch das Diagramm gehen.

Der Haltepunkt Ac_1 ist zu einem *Bereich* erweitert, weil die Carbide des Perlits erst *gelöst* werden müssen.

An der *unteren* Ac_1 -Linie beginnt die α - γ -Umwandlung der Ferritlamellen im Perlit. Zwischen den Schichten entstehen viele kleine Austenitkörner. Sie sind ungesättigt und können die Zementitlamellen lösen. Dabei werden diese aufgelockert. So liegen zunächst *drei* Phasen nebeneinander vor. Erst an der *oberen* Ac_1 -Linie ist die Auflösung der Carbide beendet.

Jetzt wandelt sich der voreutektoid Ferrit um, bis an der Ac_3 -Linie nur noch Austenit vorliegt (inhomogener A., mit ungleichmäßig verteilten C-Atomen). Erst über der gestrichelten Linie liegt *homogener* Austenit vor.

Zusammenfassung: ZTA-Schaubilder lassen erkennen (Bild 5.4):

- Haltepunktstemperaturen liegen bei kurzzeitiger Erwärmung höher (linke Seite) als bei langsamer (rechte Seite). Das ist die Auswirkung der Trägheit der Teilchen (Hysterese).
- Austenit ist nach der Umwandlung zunächst feinkörnig, aber inhomogen.
- Homogener Austenit entsteht bei niedriger Temperatur ($800\text{ }^\circ\text{C}$) erst nach langer Zeit (nach 10^5s , die Diffusion der C-Atome benötigt Zeit).
- Bei hohen Temperaturen ($1000\text{ }^\circ\text{C}$) ist bereits nach 10s ein homogenes Gefüge entstanden. Nur genaues Einhalten der Zeit kann grobkörniges Gefüge vermeiden.

Das Lesen der ZTA-Schaubilder für kontinuierliche Erwärmung erfolgt auf den steil verlaufenden Wärmekurven von unten nach oben (links mit hoher Wärmegeschwindigkeit und rechts mit einer sehr kleinen (Bild 5.3 Mitte).

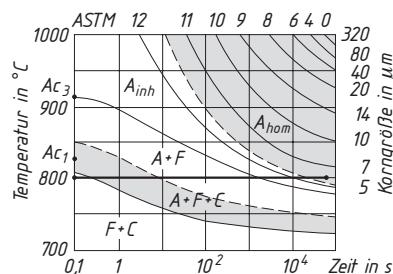


Bild 5.4 ZTA-Schaubild für isotherme Austenitisierung, Stahl mit 0,45 % C (nach Hougardy)

ZTA-Schaubilder können zusätzlich die Austenitkorngröße (nach ASTM) oder auch die erzielbare Abschreckhärte angeben.

ASTM-Klasse	Kornzahl/mm ² Schlifffläche	mittl. Korn-Durchmesser
0 – 5 grob	4 ... 256	320 ... 56 µm
6 – 12 fein	512 ... 32 768	40 ... 5 µm

ASTM: American Society for Testing Materials

Aus dem Schaubild ist zu erkennen, dass ein längeres Verweilen im Temperaturbereich über $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (z.B. Stahlguss und Schmiedeteile nach der Umformung) zu einem groben Korn führen muss.

Bei warmgewalzten Blechen wird deshalb im letzten Verformungsgang mit *niedriger* Endtemperatur gearbeitet. Die sofort einsetzende Rekristallisation erzeugt ein neues Korngefüge, das dann nicht vergröbert.

Hinweis: Überperlitische (-eutektoid) Stähle werden beim Austenitisieren nicht in den g-Bereich erwärmt (über Ac_{cm}), sondern nur über Ac_1 . Eine vollständige Auflösung der sekundären Carbide dauert sehr lange, dabei würde sich ein sehr grobes Korn bilden. Angestrebt wird ein homogener Austenit mit fein verteilten Carbiden.

5.2 Glühverfahren

Wärmebehandlung, bestehend aus **Erwärmen** auf eine bestimmte Temperatur, **Halten** und **Abkühlen** in einer Weise, dass der Zustand des Werkstückes bei Raumtemperatur dem Gleichgewichtszustand näher ist.

Die wichtigsten Verfahren sind nachstehend unter folgenden Gesichtspunkten beschrieben:

- **Verfahrensziel**, Eigenschaften und Gefüge, die durch das Glühen erzeugt werden sollen,
- **Gefügeänderungen**, innere Vorgänge,
- **Verfahren**, Zeit-Temperatur-Folge,
- **Anwendungsbeispiele** und Werkstoffe.

Glühtemperaturen richten sich nach dem C-Gehalt des Stahles und dem Verfahren (Bild 5.5).

5.2.1 Normalglühen

besteht aus Austenitisieren und abschließendem Abkühlen an ruhender Luft.

Verfahrensziel: Herstellung eines *gleichmäßig feinkörnigen* Gefüges – unabhängig von der vorangegangenen Behandlung – mit normalen Eigenschaften, die sich immer wieder herstellen lassen (Reproduzierbarkeit), Bild 5.6 unten. Gewährleistete Eigenschaften beziehen sich oft auf diesen Zustand.

Gussteile besitzen durch die Erstarrungsbedingungen Gefüge mit *ungleichen* Korngrößen (Rand fein, Kern grob) und -formen (Bild 5.6 oben, Widmannstätten'sches Gefüge mit Dentrienen). Hinzu kommt das Kornwachstum bei langsamer Abkühlung. Letzteres gilt auch für Schmiedeteile, die unkontrolliert an der Luft abkühlen.

Gefügeänderungen: (Bild 5.7) Nach der Austenitisierung (\rightarrow 5.2) liegt ein feinkörniges Gefüge vor, das dem Kornwachstum unterliegt. Deshalb wird schnell bis zum Ende der Umwandlungen abgekühlt, um das Feinkorn des Austenits auf das Umwandlungsgefüge zu übertragen. Die Wärmeabfuhr (Masse/Oberflächenverhältnis des Werkstückes) haben Einfluss.

Kaltverfestigungen werden beseitigt und Eigenspannungen reduziert.

Einige Glühverfahren geben dem Werkstoff günstigere Verarbeitungseigenschaften, z.B. zum Fließpressen oder Spanen und erzeugen dazu geeignete Gefüezustände.

Andere Verfahren beseitigen ungünstige Wirkungen vorangegangener Behandlungen, wie z.B. Kaltverfestigung, Grobkorn oder Spannungen.

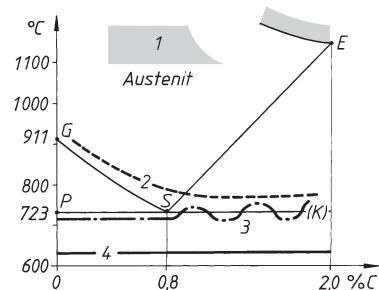


Bild 5.5 Glühtemperaturen der Stähle in Abhängigkeit vom C-Gehalt

1 Diffusionsglühen, 2 Normalglühen,
3 Weichglühen, 4 Spannungsarmglühen

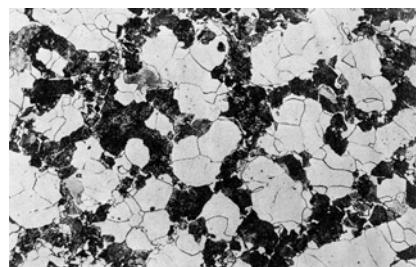
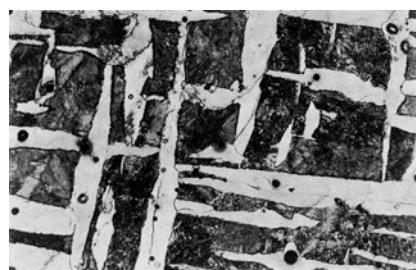


Bild 5.6 Gefüge von Stahlguss GE200 (GS-38), oben Rohgusszustand; unten normalisiert bei 930 °C/3h, Ofenabkühlung 100:1

Verfahren, Zeit-Temperatur-Folge → Bild 5.7:
Nach langsamer Erwärmung bis ca. 600 °C folgt eine *schnellere* im Bereich der Umwandlungen bis auf 30...50 °C über Ac_3 (Linie GSK) und Halten bis der Kern der Teile völlig umgewandelt ist (Erfahrungswert ca. 2 min/mm Wanddicke).

Anschließend wird schnell bis unter Ar_1 abgekühlt, danach beliebig, legierte Stähle langsam, um eine Aufhärtung zu vermeiden. Für sperrige und dickwandige Teile gelten die Regeln des Spannungsarmglühens.

Tabelle 5.3 zeigt den Anstieg **aller** Eigenschaftswerte durch das Normalisieren, insbesondere bei den Verformungskennwerten und der Zähigkeit.

Tabelle 5.3: Wirkung des Normalglühens auf die Eigenschaften von GC25 (GS-C25)

Eigen-schaft	Einheit	Guss-Zustd.	norma-lisiert	Änderung in %
R_m	MPa	430	480	+ 11,6
$R_{p0,2}$	MPa	230	280	+ 21,7
A	%	13	24	+ 69,2
Z	%	14	40	+ 185
KV	J	20,3	65,8	+ 224

Höherfeste Stähle DIN EN 10025-3 und DIN EN 10028-3 (→ 4.3.1) werden im *normalisierend* gewalzten Zustand geliefert. Dabei erfolgt der letzte Walzstich im unteren Austenitbereich mit anschließender Temperaturlösung wie Bild 5.7. Die Rekristallisation erzeugt ein feinkörniges Austenitgefüge, das bei der Umwandlung feinkörnig ferritisches-perlitisch wird.

5.2.2 Glühen auf beste Verarbeitungseigenschaften

Diese Verfahren stellen einen Gefügezustand her, der für die Weiterverarbeitung geeignete Eigenschaften besitzt. Sie unterscheiden sich nach der Art des:

- Fertigungsverfahrens (spanlos, spanend),
- Werkstoffes (C-Gehalt, legiert).

Für die wirtschaftliche Zerspanung von Massenteilen sind Gefüge gefordert, in denen harte Phasen (Carbide) *feinkörnig homogen* verteilt sind.

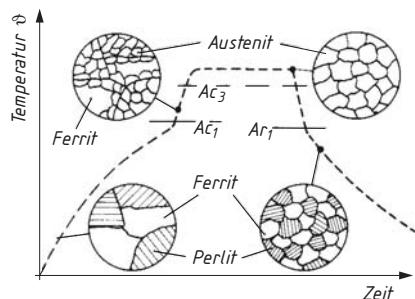


Bild 5.7 Normalglühen, Zeit-Temperatur-Verlauf mit Gefügeumwandlungen

Anwendungen: Guss- und Schmiedeteile nach unkontrollierter Abkühlung. Langzeitig geglühte Teile (nach Diffusionsglühen, Aufkochen u.a.), Schweißkonstruktionen mit Stoßbelastung und kaltgeformte Teile mit kritischen Verformungsgraden.

Nicht normalisierbar sind umwandlungsfreie, ferritische und austenitische Stähle.

Hinweise: Mechanische Eigenschaftswerte sind oft auf den normalisierten Zustand bezogen und mit dem Anhängesymbol +N bezeichnet.

Beispiel: GE200+N, Stahlguss normalisiert, 200 MPa Streckgrenze gewährleistet.

Diese Verfahren werden oft vom Stahlhersteller oder Warmumformer durchgeführt. Dadurch kann u.U. die Warmformwärme zum Glühen ausgenutzt und Energie und Zeit eingespart werden.

Die Verfahren werden oft beim Stahlhersteller bzw. -umformer durchgeführt. Dadurch kann u.U. die Restwärme aus der Warmumformung genutzt werden (Zeit- und Energieeinsparung).

Kaltumformen stellt an den Werkstoff andere Anforderungen als *spanende* Verfahren.

Zeit-Temperatur-Folgen müssen auf unlegierte, legierte, unter- und überperlitische Stähle abgestimmt werden. Legierte und C-reiche Stähle brauchen mehr Zeit zur Carbidauflösung.

Zitat: (Henry Ford) „An den Werkzeugschneiden hängt die Dividende der Aktionäre“.

Grobkornglügen

Verfahrensziel. Der Name gibt das Ziel an: Erzeugung von Grobkorn mit Versprödung des Stahles zur Verbesserung der Spanbarkeit (kurzbrechende Späne). C-arme Stähle sind zäh und ergeben Aufbauschneide und ein Schmieren, das zu schlechter Oberflächenqualität führt.

Gefügeänderung: Bei Halten auf höheren Temperaturen im Austenitbereich wird im Werkstück durch Kornwachstum vorübergehend ein grobkörniges Gefüge hergestellt (Bild 5.3).

Weichglühen

Verfahrensziel: Wärmebehandlungen zum Vermindern der Härte eines Werkstoffes auf einen vorgegebenen Wert.

Dabei werden Eigenschaften angestrebt, welche die mechanische Bearbeitung erleichtern: geringere Kräfte, höhere Standzeiten, oder Standmengen der Werkzeuge bei hoher Oberflächengüte.

Je nach Werkstoff gibt es mehrere Zeit-Temperatur-Folgen, die das Gefüge für das jeweilige Fertigungsverfahren optimieren (Bild 5.8).

Gefügeänderung:: Stähle enthalten den harten Zementit im Perlitannteil als Lamellen im weichen Ferrit eingebettet (Bild 5.9a). Überperlitische Stähle haben zusätzlich Sekundärzementit auf den Korngrenzen. Beide Zementitformen sind die Träger der Härte und ungünstig für die Zerspanung wie auch für die Kaltumformung.

Beim Glühen dicht unter Ac_1 formen sich die Lamellen im Perlit aufgrund der Oberflächen- spannung zu kleineren Körnern um.

Verfahren: Glühen bei $950\ldots1100\text{ }^{\circ}\text{C}/1\ldots2\text{ h}$ mit Ofenkühlung im Bereich von $900\ldots700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ca. 150 K über Ac_3), dann schneller.

Anwendungen: unlegierte Einsatz- und Vergütungsstähle.

Wichtig: Die niedrige Zähigkeit des grobkörnigen Gefüges muss nach der spanenden Bearbeitung durch Vergüten oder Normalisieren der Werkstücke beseitigt werden.

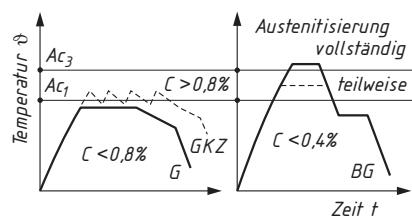


Bild 5.8 Weichglühen, Zeit-Temperatur-Folgen für verschiedene Zustände (\rightarrow Tafel 5.4)

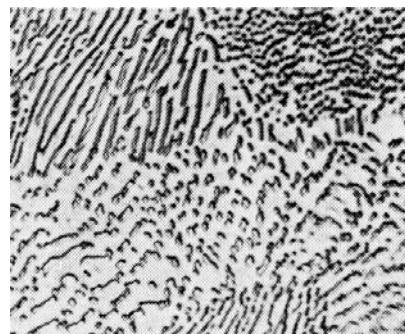


Bild 5.9a Perlit = Zementitlamellen in Ferrit

Tabelle 5.4: Angestrebte Werkstoffzustände (Symbole) beim Weichglühen

Symbol	Ziel: Behandeln auf...	Eigenschaftsänderung	Anwendung auf Stahlsorten
G	niedrigste Härte (HB_{min} gewährleistet)	Konstante Zerspanungsbedingungen	$C < 0,8\%$, Vergütungs-, Wälzlager- und Werkzeugstähle, HS-Stähle
BG	gleichmäßiges Ferrit-Perlit-Gefüge	Umwandlung von Zeilengefügen, durch isotherme Umwandlung i.d. Perlitstufe	Niedriglegierte Stähle
GSK	kugelige Carbide	Niedrigste Formänderungsfestigkeit zur Massivumformung	Fließpressstähle, Werkzeugstähle zum Kalteinsenken
BF	bestimmte Festigkeit (Toleranz-Bereich)	Verbesserung der Spanbarkeit, Vermeiden des Schmierens	C-arme Stähle

Zunächst entsteht ein Netz von Rissen, später streben die Bruchstücke eine eckige bis rundliche Kornform an (Bild 5.9 b).

Das Einformen der Carbidlamellen geht um so schneller, je weniger stabil das Gefüge ist, z.B. abgeschreckt oder kaltumgeformt.

Verfahren: Zeit-Temperatur-Folgen (Bild 5.8).

5.2.3 Spannungarmglühen

Verfahrensziel: Innere Spannungen (sog. Eigenspannungen) sollen verringert werden. Sie sind im Bauteil vorhanden, auch wenn keine äußeren Kräfte wirken und können bei späteren Fertigungsgängen zu Verformungen führen,

- wenn spannungsführende Werkstofffasern einseitig abgespannt werden (→ Beispiel),
- wenn spannungsbehaftete Teile gehärtet werden (Härteverzug).

Innere und betrieblich bedingte Spannungen überlagern sich bei Funktion des Bauteiles und führen zu Verformung oder Bruch

Gefügeänderungen: Bei höheren Temperaturen sinkt die Fließgrenze des Stahles ab (Bild 5.10).

Liegen die inneren Spannungen höher, so gibt der Werkstoff durch plastische Verformung nach. Dabei verringern sich die Spannungen bis auf eine *Restspannung* vom Wert der Fließgrenze bei Glühtemperatur.

Kaltgeformte Teile werden beim Spannungarmglühen rekristallisiert
(Gefahr von Grobkornbildung 5.2.5)

Verfahren: Die Teile werden langsam in den Bereich 550...650 °C erwärmt und bis zu 4 h lang gehalten. Wesentlich ist eine langsame Abkühlung, sodass im Werkstück keine großen Temperaturunterschiede auftreten.

Anwendungen: Schmiede- und Gussteile vor der spanenden Weiterbearbeitung. Teile mit engen Toleranzen nach dem Schruppen, geschweißte Bauteile. Sperrige Schweißkonstruktionen können durch Erwärmen mit Brausebrennern parallel zur Schweißnaht entspannt werden.

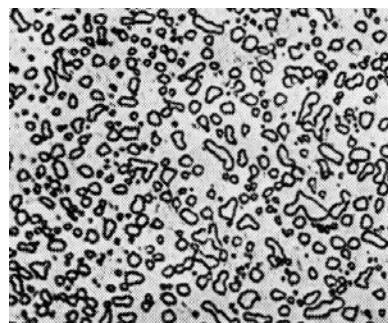


Bild 5.9b Zementitkörper in Ferrit, körniger Perlit

Ursachen der Eigenspannungen:

Wärmespannungen durch behindertes Schrumpfen. Der Werkstückkern hat beim Abkühlen stets eine höhere Temperatur als die Randzone. Der erkaltete Rand behindert das Schrumpfen des noch heißen Kerns ⇒ Zugsspannungen im Kern und Druckspannungen im Rand.

Umwandlungsspannungen entstehen, wenn Gitterumwandlungen (z.B. γ - α -Umwandlung) mit einer Volumenänderung einher gehen und diese nicht in allen Bereichen gleichzeitig stattfindet.

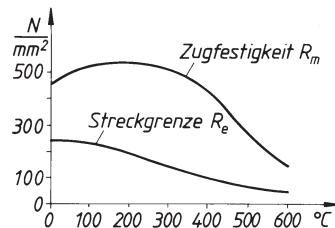


Bild 5.10 Zugfestigkeit und Streckgrenze (Fließgrenze) bei höheren Temperaturen

Kaltumformen ergibt dann Eigenspannungen, wenn nicht alle Werkstoffbereiche gleichmäßig betroffen werden. Beim Rückgang des elastischen Anteils der Verformung behindern die plastisch verformten Bereiche die Rückfederung.

Beispiel: Kalt gezogener Rundstahl steht an der Oberfläche unter Zugspannungen. Beim einseitigen Fräsen einer Nute überwiegen die Zugspannungen an der gegenüberliegenden Seite und versuchen, die Seite zu verkürzen. Dadurch wird die Welle elastisch verbogen. Beim Fräsen von gegenüberliegenden Nuten oder Flächen tritt kein Verzug auf.

Hinweis: Normal- und Weichglühen können mit einem Spannungsarmglühen gekoppelt werden. Dazu ist nach diesem Glühen nur ein langsames Abkühlen aus ca. $600 < ^\circ\text{C}$ erforderlich.

5.2.4 Diffusionsglühen

Verfahrenziel: Ausgleich von Konzentrationsunterschieden im Gefüge durch Diffusion. Die Unterschiede werden gemildert, aber nicht völlig abgebaut (Bilder 5.11 und 5.12).

Gefügeänderung: Diffusion erfordert hohe Temperaturen, Stahl ist dann austenitisch und löst ausgeschiedene Phasen auf. Fremdatome können von Bereichen hoher Konzentration in solche mit niedriger wandern. Dabei wirkt der Konzentrationsunterschied als treibende Kraft.

Verfahren: Der Werkstoff wird langzeitig im Bereich zwischen 1000 und 1300 °C je nach C-Gehalt geeglüht und langsam abgekühlt. Begleiterscheinungen sind:

- Zunderbildung und Randentkohlung, die durch Schutzgas oder Vakuum vermieden werden können.
- Starkes Kornwachstum, das durch nachträgliches Normalisieren behoben werden muss.

Bei Anwendung des Verfahrens auf Rohblöcke werden diese Nachteile durch die Warmumformung aufgehoben. Die Diffusionswege werden verkürzt (kürzere Glühzeiten).

Anwendungen: Verteilung von Korngrenzenseigerungen bei Automatenstählen, die höhere S-Gehalte (als MnS) aufweisen (Bild 5.11).

Das Verfahren kann auf alle anderen metallischen Werkstoffe angewandt werden.

Beispiel: Zur Vorbeugung gegen Spannungsrißkorrosion werden Kaltformteile aus CuZn-Legierungen bei ca. 300 °C spannungsgleichgeglüht.

Konzentrationsunterschiede entstehen beim Erstarren durch *Seigerung* (→ 3.6.5). Ein Ausgleich kann nur stattfinden, wenn die Diffusionswege klein sind, z.B. bei Unterschieden zwischen Kern und Rand eines Kristalls (→ Bild 2.62).

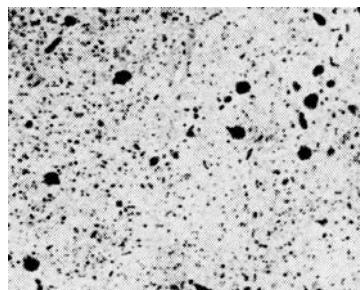
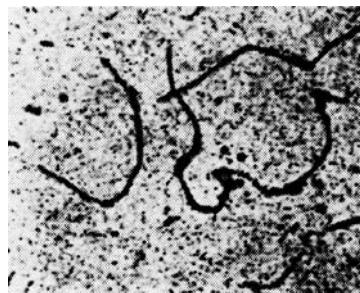


Bild 5.11 Gefügeänderung durch Diffusionsglühen, oben Sulfidseigerungen auf den Korngrenzen, unten nach dem Glühen.

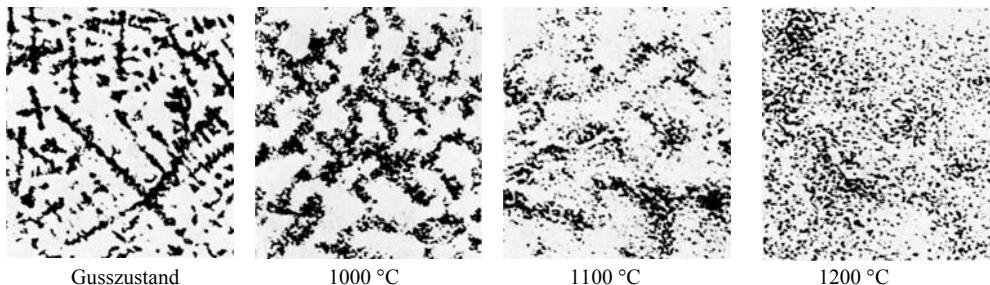


Bild 5.12 Legierter Stahlguss mit groben Primärkristallen aus hochschmelzenden Carbiden. Sie werden mit steigender Temperatur gleichmäßiger über den Querschnitt verteilt (auch Homogenisierungs- oder Verteilungsglühen genannt).

5.2.5 Rekristallisationsglühen

Verfahrensziel: Das Verfahren soll die mit einer Kaltumformung einhergehende Kaltverfestigung wieder rückgängig machen und die plastische Verformbarkeit wiederherstellen.

Gefügeänderungen: Neubildung des Gefüges durch die Rekristallisation. Die gestreckten Kristallite des verformten Gefüges lösen sich auf, es entstehen solche mit normaler polyedrischer Gestalt (Bild 5.13).

Verfahren: Temperatur-Zeit-Verlauf hängen:

- vom Werkstoff ab, es ist für alle Metalle geeignet. Glühen dicht oberhalb der Rekristallisationstemperatur (Tabelle 2.17),
- vom Verformungsgrad, je höher, desto niedriger kann die Glühtemperatur sein.

Glühtemperaturen können den Rekristallisationsschaubildern entnommen werden. Mit steigender Glühtemperatur fällt die Glühzeit stark ab.

Anwendungen: Zwischenglühen beim Ziehen von Draht, Kaltwalzen von Blech, Tiefziehen von Blechteilen, Fließpressen in mehreren Stufen.

Bei umwandlungsfreien (ferritischen und austenitischen) Stählen ist Rekristallisationsglühen die einzige Möglichkeit, ein großes Korn zu beseitigen (Halbzeuge, Rohteile).

Bei stärkeren Kaltumformungen (z.B. Feinblech) muss evtl. zwischen den Walzgängen der verfestigte Werkstoff wieder „weich“ gemacht werden. Das Rekristallisationsglühen wird deshalb auch *Zwischenglühen* genannt.

Hinweis: Abschnitt Rekristallisation 2.4.2 mit Rekristallisationsschaubild.

Geringe Kaltumformung ergibt nach dem Glühen ein *grobkörniges* Rekristallisationsgefuge. Dieser kritische Verformungsgrad (für C-arme Stähle ca. 5...15 %) ist zu vermeiden, oder es muss normalisiert werden.

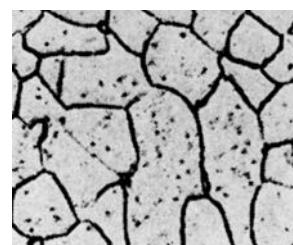


Bild 5.13 Änderung des Gefüges durch Rekristallisationsglühen, oben kaltverformt, unten rekristallisiert

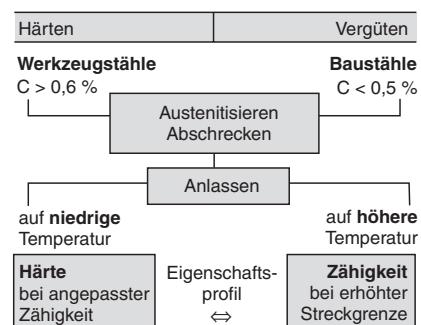
5.3 Härten und Vergüten

5.3.1 Allgemeines

Härte- und Vergütungsverfahren geben dem Werkstoff eine Eigenschaftskombination **Härte-Zähigkeit**, die in Grenzen veränderbar ist und dem Anforderungsprofil des Bauteiles angepasst werden kann.

Sie beruhen auf ähnlichen inneren Vorgängen während der beschleunigten Abkühlung (Abschrecken) des Stahles, führen aber zu unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen und damit Einsatzbereichen (→ Übersicht).

Übersicht: Unterschied Härten/Vergüten



Voraussetzungen für das Härteln des Stahles sind (\rightarrow auch Abschnitt 3.3.2):

- Gitterumwandlung von kfz. Austenit zu krz. Ferrit am Haltepunkt Ar_3 ,
- Verschiebung der Umwandlungspunkte infolge der Hysterese,
- praktische Unlöslichkeit des C im Ferritgitter.

5.3.2 Austenitzerfall

Die Umwandlung des Austenits zu Perlit, wie sie mit Bild 3.7 beschrieben wird, stellt sich nur bei sehr langsamer Abkühlung ein.

Bild 5.14 zeigt, dass sich mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit die Haltepunkte vereinigen und dann ganz verschwinden. Zuvor tritt ein neuer Haltepunkt auf, als Martensit- Startpunkt M_s bezeichnet. Hier beginnt die Umwandlung des Austenits zu **Martensit** (Bild 5.17).

Dann ist die *untere*, kritische Abkühlgeschwindigkeit v_{ucrit} überschritten. Um die Perlitzbildung vollständig zu unterdrücken, muss die *obere*, kritische Abkühlgeschwindigkeit v_{ocrit} überschritten werden.

Bild 5.15 zeigt schematisch die Auswirkung zunehmender Abkühlgeschwindigkeit auf das Gefüge eines Stahles mit 0,4 % C. Die zunehmende Abkühlwirkung wird durch die Abkühlmedien (Luft, Wasser, Öl) erreicht.

Bildteil a: Bei langsamer Abkühlung im Ofen bildet sich ein Gefüge mit etwa gleichen Teilen Ferrit und Perlit mit größeren Körnern (Gefügebild 5.16a).

Bildteil b: Bei Abkühlung an ruhender Luft entsteht ein feinkörnigeres Gefüge aus Perlit mit weniger Ferritkörnern (Gefügebild 5.16b).

Bildteil c: Bei weiterer Steigerung der Abkühlgeschwindigkeit, z.B. im Bleibad, kann die Ferritausscheidung ganz unterdrückt werden, evtl bildet sich sehr feinstreifiger Perlit mit netzförmigem Ferrit (Gefügebild 5.16c).

Bildteil d: Bei Abschrecken in Ölbädern kann eine neue Kristallart, der nadelige Martensit entstehen, neben sehr dichtstreifigem Perlit, der z.T. rosettenförmig von einem Keim aus wächst.

Bildteil e: Bei sehr hoher Abkühlgeschwindigkeit durch Abschrecken in Wasser wird die Perlitzbildung vollständig unterdrückt. Der Austenit wandelt sich in Martensit um (Gefügebild 5.16d).

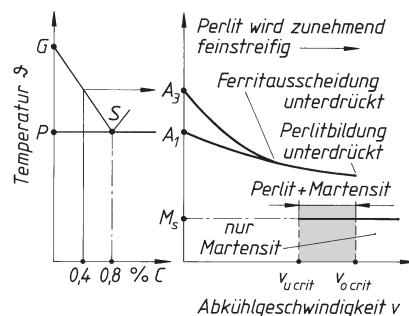


Bild 5.14 Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf die Lage der Haltepunkte Ar_3 und Ar_1 eines Stahles mit bestimmten C-Gehalt

Hinweis: Martensit, Härtungsgefüge des Stahles, nach A. Martens, +1900, Forscher auf dem Gebiet der Werkstoffprüfung

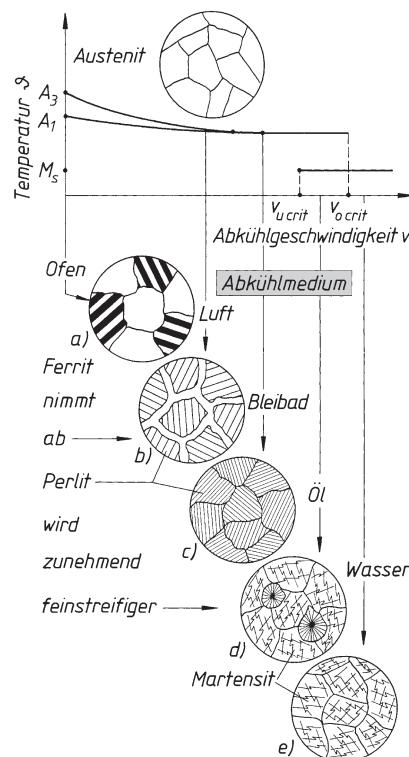
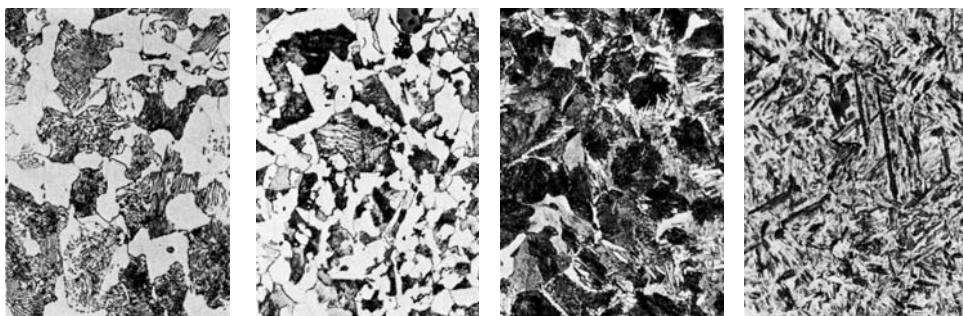


Bild 5.15 Austenitzerfall bei steigender Abkühlgeschwindigkeit, schematisch



a) Ofen, Ferrit + Perlit b) Luft, Ferrit + Perlit c) Öl, feinstreifiger Perlit + Ferritnetz d) Wasser, Martensit

Bild 5.16 Austenitzerfall bei steigender Abkühlgeschwindigkeit, Stahl mit 0,45 % C, bei 860 °C austenitisiert wird in verschiedenen Medien abgekühlt
500:1

Beim Härtung soll Austenit in reinen Martensit umwandeln. Es gilt, die Perlitzbildung vollständig zu unterdrücken. Hierzu muss mit einer Abkühlgeschwindigkeit $v > v_{ocrit}$ abgekühlt werden. v_{crit} hängt von der Stahlanalyse ab (Tabelle).

Kritische Abkühlgeschwindigkeit bei steigendem Manganinhalt

C %	Mn %	v_{crit} in K/s = °C/s
0,6	–	1800
0,6	0,3	750
0,9	1,1	200
0,8	1,5	80

5.3.3 Martensit, Struktur und Bedingungen für die Entstehung

Martensit ist eine Kristallart, die dann entsteht, wenn die Gitterumwandlung des Austenits mit gelöstem Kohlenstoff bei *niedriger* Temperatur erfolgt, sodass die C-Atome *nicht diffundieren* können.

Martensit entsteht durch Umwandlung des kfz-Austenitgitters ohne Platzwechsel der C-Atome (diffusionslose Umwandlung).

Es bilden sich plattenförmige Kristalle, die im Schliffbild als Nadeln oder Spieße erscheinen (Bild 5.20).

Martensit hat ein größeres Volumen als der Austenit, aus dem er entsteht. Die dabei auftretenden Druckspannungen verursachen eine große Anzahl von Versetzungen. Sie sind die Ursache für den hohen Gleitwiderstand (= Härte), aber auch für sein sprödes Bruchverhalten.

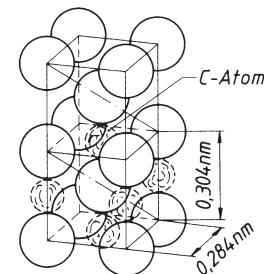


Bild 5.17 Elementarzelle des Martensits. Die gestrichelten Kreise sind die möglichen Zwischengitterplätze für das C-Atom

Im kubisch-raumzentrierten Gitter des α -Eisens ist für das C-Atom normalerweise keine Raum frei. Seine *Zwangslösung* verzerrt das Gitter und weitet es *tetragonale* auf (Bild 5.17).

Ablauf der Martensitbildung

Die Martensitbildung beginnt beim Punkt M_s und verläuft nicht bei konstanter Temperatur, wie z.B. die Bildung eines Eutektikums, oder des Eutektoides Perlit. Martensit entsteht nur bei weiter *fallender* Temperatur.

Bild 5.18 zeigt zwei Linien, die mit steigendem C-Gehalt fallen. Es sind dies die Haltepunkte für die Martensitbildung:

- M_s Beginn (start),
- M_f Ende (finish) der Martensitbildung.

Im schraffierten Bereich bildet sich dann Martensit, wenn vorher austenisiert und überkritisches abgekühlt wurde. Beide Linien werden durch LE nach unten verschoben.

Martensit wächst unter Volumenvergrößerung und schließt unter Druck kleine Reste von Austenit ein, die zunächst nicht mehr umwandeln (Restaustenit).

An der unteren Linie (Bild 5.18) ist zu erkennen: Bei Stählen mit über 0,6 % C-Gehalt liegt der M_f -Punkt unter RT. Sie enthalten nach dem Abschrecken größere Anteile an Restaustenit, der wesentlich weicher ist als Martensit.

Restaustenit führt zu einer geringeren Gesamthärte des Gefüges (Bild 5.19).

Als wichtige Forderung ergibt sich daraus: Überperlitische Stähle dürfen beim Austenisieren nur über Ac_1 erwärmt werden, sonst löst der Austenit weitere C-Atome und wandelt sich nicht vollständig um (Bild 5.20).

Tieftemperaturbehandlung: Restaustenit kann bei ca -100 °C in Martensit umgewandelt werden. Diese Behandlung muss *sofort* nach dem Abschrecken erfolgen. Das Verfahren führt zu einer Erhöhung der Standzeit von Werkzeugschneiden, z.B. bei feinen Messern.

Restaustenit wandelt auch beim nachfolgenden Anlassvorgang direkt in kubischen Martensit um, der sich bei 100...200 °C unter Abnahme der Spannungen bildet.

Hinweis: Restaustenit in bainitschem Gusseisen erhöht die Zähigkeit und Dauerfestigkeit (→ 6.4).

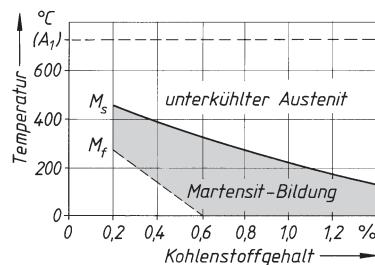


Bild 5.18 Start und Ende der Martensitbildung

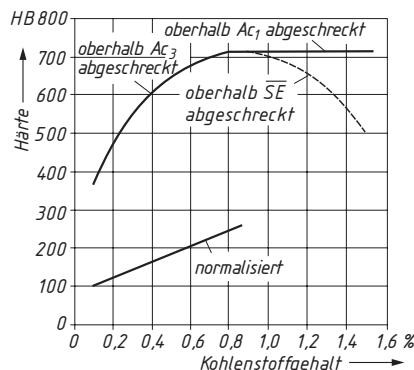


Bild 5.19 Glüh- und Abschreckhärte von Stahl in Abhängigkeit vom C-Gehalt

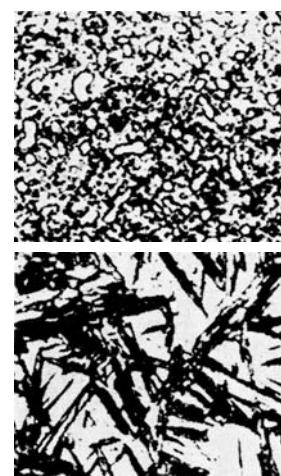


Bild 5.20 Härtungsgefüge eines unlegierten Stahles mit 1,3 % C
a) richtig gehärtet, körniger Zementit in strukturlosem martensitischen Grundgefüge,
b) überhitzt gehärtet, grobe Martensitnadeln in Restaustenit (hell)

5.3.4 Härtbarkeit der Stähle

Beim Abschrecken größerer Querschnitte führt die schlechte Wärmeleitfähigkeit des Stahles zu großen Temperaturunterschieden (Bild 5.21).

Ablesebeispiel: Bei t_1 auf der Zeit-Achse senkrecht nach oben gehen. Der Abstand der beiden Kurven (Punkte) ist $\Delta T \approx 140$ K, die Kerntemperatur ist um diesen Betrag höher.

Bei 500°C auf der Temperatur-Achse (Pfeil) nach rechts gehen. Die Schnittpunkte mit den Kurven auf die Zeit-Achse projizieren. Der Rand ist nach 20 s, der Kern nach 60 s auf 500°C abgekühlt, erreicht die *Perlitstufe* also 40 s später!

Wenn in der Randschicht gerade noch die Abkühlgeschwindigkeit v_{crit} auftrat, so wird sie zum Kern hin mehr und mehr unterschritten.

Unlegierte Stähle erreichen dadurch nur an der Oberfläche eine martensitische Schicht mit hoher Härte (Schalenhärtler). Dicht darunter entstehen die anderen Umwandlungsgefüge, je nach Dicke des Werkstückes (Bild 5.23).

Härtbarkeit ist die Eigenschaft des Stahles, beim Abschrecken Härte anzunehmen. Sie wird mit zwei Werkstoffkennwerten beschrieben, die durch die Werkstoffprüfung ermittelt werden:

- **Aufhärtbarkeit** (Aufhärtung) wird durch die *größte* am Rand erreichbare *Härte* beschrieben und gemessen. Sie wird allein von seinem C-Gehalt bestimmt (Bild 5.19). Mehr als 65 HRC (≈ 720 HB) sind nicht möglich.
- **Einhärtbarkeit** (Einhärtung) wird durch die Einhärtungstiefe der martensitischen Umwandlung beschrieben und gemessen.

Die Härtbarkeit der Stähle wird auch von ihrer Erschmelzungs- und Vergießungsart beeinflusst. Ursache sind hierfür die winzigen, nichtmetallischen Einschlüsse, die je nach Herstellungsverfahren im Stahl vorhanden sind.

Sie stellen *Keime* dar, an denen beim Abschrecken die Perlitzbildung beginnt, was beim Härteln vermieden werden muss.

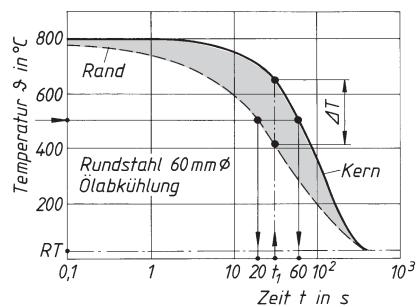


Bild 5.21 Abkühlverlauf in Rundstahl von 60 mm Ø bei Ölabbremsung (nach Hougaardy)

Der Linienabstand (Rasterfläche) steigt mit dem Durchmesser an (größere Wärmeenergie), ebenso mit dem Gehalt an LE (schlechtere Wärmeleitung).

Unlegierte Stähle sind sog. *Schalenhärtler*, sie behalten einen zähnen Kern, für schlagbeanspruchte Werkzeuge und Bauteile geeignet (Kalschlagmatrizen, Ziehringe und -stempel, Sägen für die Holzbearbeitung).

Hinweis: Die Härtbarkeit eines Stahles kann mit der Stirnabschreckkurve beurteilt werden (Bild 5.22). Sie wird mit wenig Aufwand durch den *Stirnabschreckversuch DIN EN ISO 624* ermittelt (\rightarrow 16.7).

Einhärtungstiefe Et ist der Abstand in mm vom Rand senkrecht zum Kern bis zu einer Stelle mit einer vereinbarten **Grenzhärte GH**. GH kann z.B. auf 50 % der Randhärte festgelegt werden (Bild 5.22).

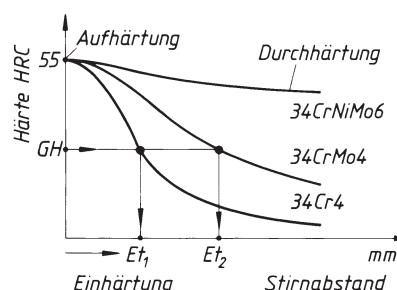


Bild 5.22 Stirnabschreckkurven (schematisch) und Begriffe der Härtbarkeit

Deshalb mindern diese Teilchen die Einhärtung. Damit ergibt sich eine Möglichkeit, die Einhärtung zu vergrößern, nämlich durch eine

Höhere Härtetemperatur. Mögliche Keime für die Perlitzbildung gehen noch in Lösung. Das verzögert die Perlitzbildung. Die kritische Abkühlgeschwindigkeit wird erniedrigt.

Eine weitere Möglichkeit ist das Abschrecken in:

Abschreckmitteln mit angepasster Kühlwirkung. Das ideale *Abschreckmittel* muss seine größte Abschreckwirkung dann entfalten, wenn der *Rand* des Teils ohne Umwandlung in die Perlitzstufe eintritt. Es soll erst dann langsamer wirken, wenn der *Kern* die Perlitzstufe ohne Umwandlung durchlaufen hat (\rightarrow).

Durchhärtung ist die Einhärtung bis hin zum Kern. Sie ist für hochbeanspruchte Werkzeuge und Bauteile (vergütet) erforderlich.

Größere Einhärtung erfordert ein überkritisches Abkühlen bis in größere Tiefe hin zum Kern des Werkstückes.

Verwendung legierter Stähle. Legierungselemente, die bei der Härtetemperatur im Austenit „in Lösung“ sind, müssen bei der Perlitzbildung ebenfalls diffundieren. Sie behindern die Perlitzbildung, die dadurch viel langsamer erfolgt.

Das bedeutet, dass die kritische Abkühlungsgeschwindigkeit *kleiner* wird. Es kann in Öl abgeschreckt werden (Bild 5.23, Kurve 2).

Bei größeren Gehalten an z.B. Mn, Cr und Ni entstehen Stähle, die bei Abkühlung durch bewegte Luft härten, die *Lufthärter* (Bild 5.23, Kurve 3).

Legierungselemente senken die kritische Abkühlungsgeschwindigkeit. Dadurch können milder Abschreckmittel verwendet werden, welche eine Durchhärtung möglich machen.

Hinweis: Stähle gleicher Sorte, aber aus verschiedenen Chargen, haben wegen des verschiedenen Reinheitsgrades ein unterschiedliches Einhärteten (Streuband der Stirnabschreckkurven 16.7).

Diese Maßnahme ist begrenzt durch die Gefahr des Kornwachstums, es entsteht dann ein grobnaeliges Martensitgefüge. Bei überperlitzischen Stählen erhöht sich der Anteil an Restaustenit (Bild 5.20 b).

Beispiel: Das Abschreckmaximum kann bei Wasser durch den Zusatz von 10 % Natronlauge (NaOH) oder durch Cyansalze verbreitert werden (Bild 5.28). Härteöle besitzen gegenüber einfachen Mineralölen ebenfalls ähnlich wirkende Zusätze.

In der längeren Kochperiode wird dem Teil mehr Wärme entzogen, sodass auch im Kern die kritische Abkühlungsgeschwindigkeit überschritten wird.

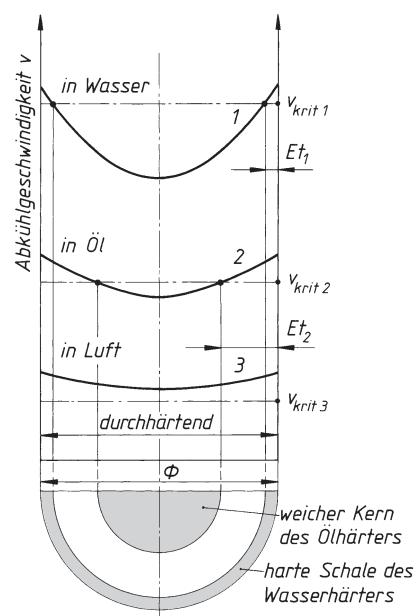


Bild 5.23 Ein- und Durchhärtung bei Stählen verschiedener Analyse (Houdremont Rundstab 100 mm Ø)

5.3.5 Verfahrenstechnik

Härtens läuft in 3 Stufen ab (Bild 5.24):

1. Austenitisieren, d.h. Erwärmen und Halten auf Abschrecktemperatur,
2. Abschrecken mit über v_{crit}^1 ,
3. Anlassen.

Die erreichbare Härte hängt *allein* vom C-Gehalt des Stahles ab (Bild 5.19). Die Legierungselemente (LE) senken allgemein v_{crit} , ihr Gehalt bestimmt das Abschreckmittel.

1) Austenitisieren

Austenitisieren ist unter 5.2 behandelt. Die Temperaturen liegen je nach C-Gehalt 30...50 K *oberhalb* der Linie GSK.

Fehlermöglichkeiten beim Erwärmen sind:

Zu *höhe* Temperaturen (Überhitzen). Sie erzeugen ein gröberes Austenitkorn, das sich ungünstig auf das Härtegefüge auswirkt. Dieses wird dann entsprechend *grobnadlig*. Bei überperlitzischen Stählen tritt dabei noch *Restaustenit* auf, der die Gesamthärte senkt (Bild 5.20b).

Zu *niedrige* Temperaturen (Unterhärtens). Sie lassen Ferritreste im Austenit zurück, die beim Abschrecken nicht zu Martensit umgewandelt werden können. Die Folge ist *Weichfleckigkeit* durch den weichen Ferrit im Martensit. Die max. Härte wird nicht erreicht (Bild 5.25).

Randentkohlung entsteht durch Oxidation im Ofenraum oder durch Salzbäder. Nach dem Abschrecken hat das Teil eine *Weichhaut*. Die Folgen auch einer *sehr dünnen* Weichhaut sind:

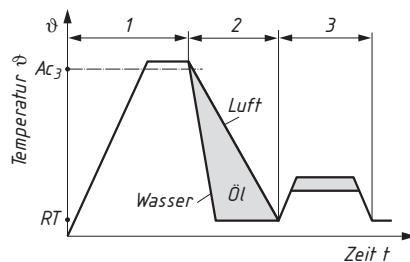


Bild 5.24 Temperatur-Zeit-Verlauf beim Härtens, schematisch

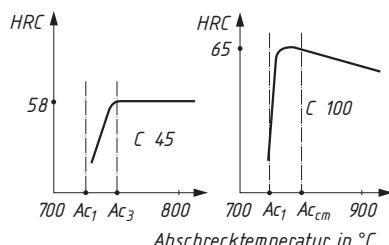
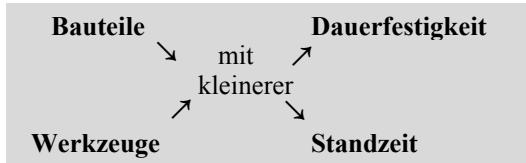


Bild 5.25 Härte unlegierter Stähle bei verschiedenen Abschrecktemperaturen

Hinweis: Der Verlauf der richtigen Härtetemperatur für überperlitzische Stähle ist mit Hilfe des Bildes 5.19 erläutert.

Randentkohlung kann daneben auch beim Überführen des glühenden Werkstückes vom Erwärmen zum Abschreckmittel eintreten. Moderne Verfahren (Vakuumhärtens) vermeiden diese Schwachstelle.



Hinweis: Das *Nitrieren* gehärteter Werkzeuge kann eine evtl. vorhandene Weichhaut durch Härtesteigerung kompensieren.

¹ bei v_{crit} ist immer die obere kritische Abkühlgeschwindigkeit gemeint.

2) Abschrecken

Zur Erzeugung von Martensit muss die Perlitbildung *vollständig* übersprungen werden. Das tritt ein, wenn mit der kritischen Abkühlgeschwindigkeit v_{crit} abgeschreckt wird.

v_{crit} ist eine Werkstoffgröße, die von der Stahlanalyse abhängt. Legierungselemente (LE) senken diese Größe, Mn sehr stark (Tabelle 5.5).

LE senken die kritische Abkühlgeschwindigkeit, dadurch können *milderwirkende Abschreckmittel* verwendet werden.

Höhere Abschrecktemperaturen wirken in die gleiche Richtung.

Die hohe Abkühlgeschwindigkeit braucht nicht bis auf Raumtemperatur eingehalten werden. Bild 5.26 zeigt, dass Perlit im Temperaturbereich der *Perlitstufe* besonders schnell gebildet wird. Dort muss das Abschreckmittel besonders intensiv wirken.

In dieser *Perlitstufe*, im Temperaturbereich um 550 °C, zerfällt Austenit in Bruchteilen einer Sekunde zu *feinstreifigem Perlit*.

Bei tieferen Temperaturen, oberhalb M_s , verläuft die Austenitumwandlung träger. Die hohe Abkühlungsgeschwindigkeit braucht deswegen nicht bis auf Raumtemperatur herunter eingehalten zu werden.

Richtiges Abschrecken soll den Austenit ohne Umwandlung auf Temperaturen dicht über M_s abkühlen.

Abschreckmittel

Abschreckmittel mit fallender Wirkung sind:

- Wasser, evtl. mit Zusätzen,
- Öle,
- Metallschmelzen, Salzschmelzen,
- Wirbelbetten,
- strömende Gase, ruhende Luft.

Flüssigkeiten wie Wasser und Öl entziehen die Wärme dem Bauteil *nicht gleichmäßig*. Nach

Tabelle 5.5: Kritische Abkühlgeschwindigkeit bei steigendem Mangangehalt

C %	Mn %	v_{crit} in K/s = °C/s
0,6	–	1800
0,6	0,3	750
0,9	1,1	200
0,8	1,5	80

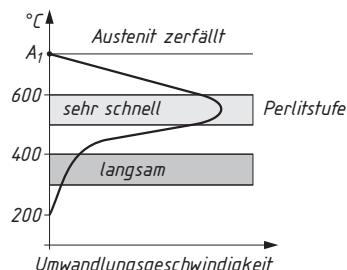


Bild 5.26 Der Zerfall des Austenits in verschiedenen Temperaturbereichen

Anwendung: Feinstreifiger Perlit hat bei hoher Festigkeit noch gute Dehnungswerte, günstig für das *Ziehen von Draht*. Diese Umwandlung wird als *Patentieren* angewandt.

Anwendung: Die Trägheit der Austenitumwandlung dicht oberhalb der M_s -Temperatur wird zum *verzugsarmen Härteten* benutzt (Stufenhärteten, Warmbadhärteten, Bild 5.33). Es besteht aus folgenden Abschnitten:

Schnelles Durchlaufen der Perlitstufe, dann Halten des *unterkühlten* Austenits zum Temperaturausgleich und Abbau der Wärmespansungen. Danach Abkühlung auf RT und Martensitbildung.

Das Abschrecken des Stahles steht unter einem Zielkonflikt:

Abschrecken	Begründung
– so schnell wie nötig	Perlitbildung vermeiden.
– so langsam wie möglich	Spannungen, Verzug, Risse

dem Eintauchen bildet sich ein *Dampfmantel*, der die Wärmeabfuhr verhindert und das Werkstück gegen die Flüssigkeit isoliert. Die Abkühlgeschwindigkeit ist deswegen anfangs noch gering (Bild 5.27).

Später wird der Dampfmantel durchbrochen, und es lösen sich mehr und mehr Dampfblasen ab. Sie entziehen ihre *Verdampfungswärme* dem Werkstück. Dadurch kühlt es schneller ab, seine Abkühlgeschwindigkeit erhöht sich und erreicht in dieser Kochperiode ein Maximum (Nase in Bild 5.27).

Wenn das Werkstück kälter wird, lässt die Dampfentwicklung nach. Schließlich wird die Wärme nicht mehr durch Verdampfung, sondern durch *Wärmeleitung* abgeführt. Dadurch verringert sich die Abkühlgeschwindigkeit.

Der *Bereich der größten Abschreckwirkung* (Nase in Bild 5.27) lässt sich durch Zusätze verschieben oder erweitern (Kurve 3).

Öle haben demgegenüber höhere Siedepunkte und schlechtere Wärmeleitfähigkeit (Kurve 2 in Bild 5.27). Bild 5.28 zeigt die Abkühlzeit in Wasser, Öl und Luft für Rundbolzen mit steigenden Durchmessern.

Salzbäder bestehen aus geschmolzenen Na- und K-Nitraten von 150...550 °C. Sie wirken nur durch Wärmeleitung und dadurch wesentlich milder.

Wirbelbetten arbeiten mit Al-Oxidteilchen, die durch einströmende Luft ein *Fluid* bilden, d.h. sich wie eine Flüssigkeit verhalten.

Ihre Abkühlwirkung (unbeheizt) ist geringer als die von Öl. Sie können aber auch mit *gekühlten Gasen* betrieben werden. Für die Warmbadhärtung von mittel- und hochlegierten Stählen sind sie den Salzbädern gleichwertig.

Bei Einsatz als *Wirbelbett-Ofen* kann mit Stickstoff fluidisiert werden, die Beheizung erfolgt dann indirekt. Ihre Erwärmkurve steht zwischen der im Salzbad und Kammerofen.

Analogie: Wassertropfen auf einer heißen Herdplatte gleiten zischend auf einem Dampfpolster hin und her. Es isoliert und verhindert die spontane Verdampfung.

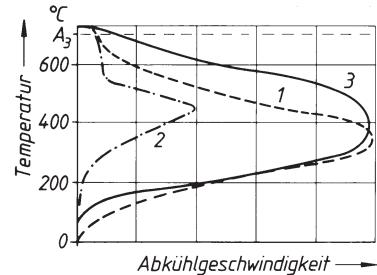


Bild 5.27 Die Abkühlwirkung von Abschreckmitteln bei sinkender Temperatur
1 Leitungswasser, 2 Öl, 3 Wasser mit Zusatz

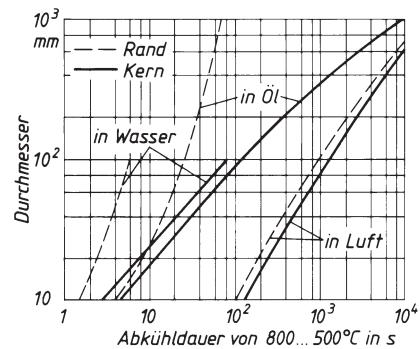


Bild 5.28 Abkühlverlauf von Rundbolzen in verschiedenen Abschreckmitteln

Das Diagramm wird in Verbindung mit ZTU-Schaubildern verwendet, um die unterschiedliche Umwandlung von Rand und Kern zu beurteilen.

Vorteile des Wirbelbettverfahrens für die Wärmebehandlung gegenüber Salzbädern:

Kurzfristige Inbetriebnahme (keine Gefahr des Einfrierens), Gleichmäßigkeit der Temperaturreverteilung, Wegfall der Reinigung der Teile von Salzresten, keine Entsorgungsprobleme.

Nachteil ist die *Schattenwirkung*, d.h. ein ungleichmäßiges Anströmen der Teile, wenn viele in Gestellen eingehängt werden.

Vakuumhärtung ist Erwärmung in evakuierten Retorten mit Stickstofferwärmung im unteren Temperaturbereich (konvektive Erwärmung), im oberen über Strahlung. Das Abschrecken erfolgt im Vakuumofen durch Hochdruckgasabschreckung.

3) Anlassen

Alle richtig abgeschreckten Teile sind *glashart* und auch so *spröde* wie Glas. Zum Gebrauch benötigen sie eine gewisse *Zähigkeit*, damit sie nicht schon durch einfaches Anstoßen zerbrechen.

Diese Zähigkeit wird durch das *Anlassen* erreicht.

Anlassen ist ein *Wiedererwärmen* nach dem Abschrecken.

Die Anlasstemperaturen hängen von der Stahlsorte und dem Verwendungszweck ab, sie liegen im Temperaturbereich von 150 bis 650 °C. Die Eigenschaftsänderungen zeigt Bild 5.29.

Gefügeänderung: Mit steigender Anlasstemperatur können sich die Wärmespannungen ausgleichen, ohne dass die Härte zurückgeht. Dabei verringert sich die Sprödigkeit. Diese *Entspannung* erfolgt bei Temperaturen bis 180 °C (Bild 5.30a).

Mit steigender Temperatur können C-Atome aus ihrer *Zwangslösung* im Martensit immer besser diffundieren.

Der metastabile Martensit versucht die C-Atome aus seinem Gitter zu verdrängen und in die stabile Form des C-freien Ferrits überzugehen.

Zunächst geht bei etwa 200 °C die tetragonale Aufweitung des Martensits zurück. Einzelne C-Atome verlassen das Martensitgitter und bilden feinste Carbideilchen.

Hochdruckgasabschrecken wird mit N₂ oder einem Gemisch aus He/N₂ unter 6 bar mit hoher Geschwindigkeit durchgeführt. Die Abschreckwirkung liegt zwischen der von Öl- und Salzbädern und ist regelbar.

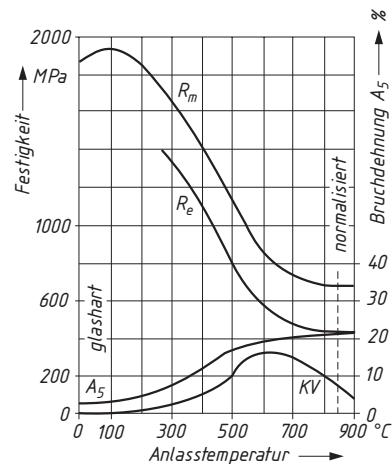


Bild 5.29 Anlassschaubild, Einfluss der Anlasstemperatur auf die Eigenschaften eines glashart abgeschreckten Stahles, 0,45 % C

Härte und die **Festigkeit R_e** sinken bei niedrigen Anlasstemperaturen nur *wenig*, mit steigender Temperatur schnell auf die Werte des normalisierten Zustandes.

Bruchdehnung A und **Kerbschlagarbeit KV** verlaufen umgekehrt. Bei bestimmten Anlasstemperaturen wird ein *Höchstmaß* an Zähigkeit erreicht. In diesem Bereich liegen die Anlasstemperaturen zum Vergüten.

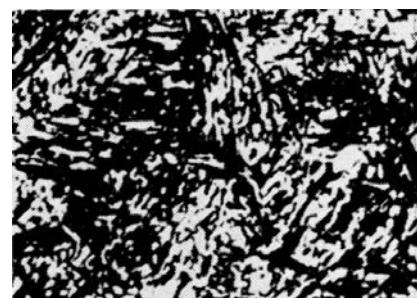


Bild 5.30a Anlassgefüge eines gehärteten Stahles, 0,45 % C
a) bei 150 °C

500:1

Der Restaustenit wandelt sich in kubischen Martensit um. Dies ist ein etwas vergrößertes α -Gitter mit C-Atomen in einigen Elementarzellen. Bild 5.30b zeigt sehr dunkel geätzte Nadeln.

Mit *steigender Anlasstemperatur* kann der Kohlenstoff immer besser diffundieren und sich zu *größeren* Carbiddörnern zusammenballen, sie werden dann im Schliffbild sichtbar.

Durch die Carbidausscheidungen lässt die Härte des Martensits nach. Die feinkörnige, nadelige Struktur bleibt erhalten (Bild 5.30c).

Bei Anlasstemperaturen von 700 °C entsteht ein Gefüge, das dem körnigen Perlit ähnelt (Bild 5.30d). Infolge der Zunahme des Ferritanteils nehmen Dehnung und Zähigkeit zu.

Anlassen ist ein Diffusionsvorgang. Bei legierten Stählen sind diese Vorgänge durch die Anwesenheit der LE-Atome erschwert. Sie benötigen *höhere* Anlasstemperaturen und *längere* Anlasszeiten.

Wirksam sind dabei sowohl Temperatur als auch die Zeit. *Kurzzeitiges Halten auf höherer Temperatur* und *längeres Halten auf tieferer Temperatur* haben gleiche Wirkungen (Bild 5.31).

Warmarbeitsstähle, d.h. Stähle für Gesenke, Pressformen für Kunststoff usw. müssen deshalb um 50...100 °C höher angelassen werden, als sie später im Betrieb erreichen (\rightarrow).

Die Teile werden sofort nach dem Abschrecken je nach ihrer Form und Größe in Öfen oder Salzbädern, evtl. auch im Sandbad oder auf heißen Platten, erwärmt und etwa 2 h auf Anlasstemperatur gehalten.

Nach dem Anlassen soll das Teil langsam auf Raumtemperatur abkühlen, damit nicht neue Wärmespannungen entstehen. Nur für bestimmte legierte Stähle ist ein schnelles Abkühlen aus der Anlasstemperatur vorgeschrieben (Anlasssprödigkeit).

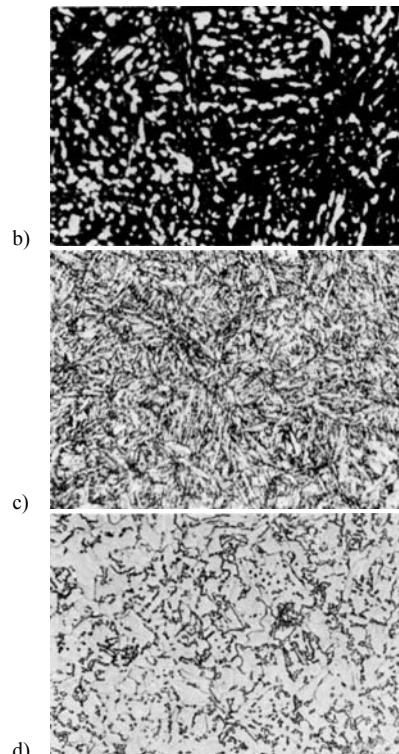


Bild 5.30 Anlassgefüge eines gehärteten Stahles, 0,45 % C, bei b) 400 °C, c) 550 °C, d) 700 °C angelassen
500:1

Hinweis: Die Betriebswärme würde ein weiteres Anlassen mit Härteabfall bewirken. Maß- und Formänderungen sowie verminderte Standmenge oder -zeit wären die Folge.

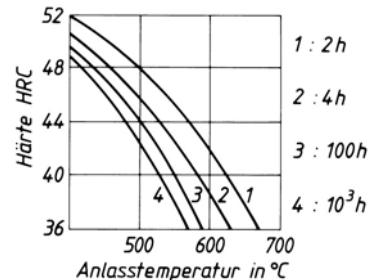


Bild 5.31 Anlassverhalten eines abgeschreckten Warmarbeitsstahles bei verschiedener Anlassdauer

5.3.6 Härteverzug und Gegenmaßnahmen

Wir wissen aus unserer Werkstattpraxis, dass abgeschreckte Teile *Maß- und Formänderungen* aufweisen. Im ungünstigsten Falle treten Risse auf. Sie sind die Folge von inneren Spannungen, die durch den *ungleichmäßigen* Abkühlungsverlauf im Werkstück entstehen.

Spannungen beim Härteln

Beim Eintauchen in das Abschreckmittel wird der Rand sofort kalt und zieht sich zusammen, er wird jedoch vom heißen Kern behindert (Bild 5.32 oben). Es entstehen Zugspannungen im Rand, die zu Rissen führen können. Im weiteren Verlauf versucht der Kern zu schrumpfen, wird aber jetzt vom kalten, starren Rand behindert. Es entstehen Zugspannungen im Kern, evtl. *Schalenrisse* oder Risse im Kern.

Diese Spannungen als Folge *ungleicher Temperaturen im Rand und im Kern* heißen deswegen auch *Wärmespannungen*.

Risse ergeben *Ausschussteile*, Verzug erfordert *Nacharbeit*, was bei dem harten Martensit nur durch Schleifen möglich ist. Daneben gibt es Flächen, die durch ihre Lage oder Form nicht schleifbar sind: Flächen an Schnittplatten oder Kegelräder mit gekrümmten Zahnflanken (Palloidverzahnung).

Eine *wirtschaftliche Fertigung* verlangt ein *verzugsarmes Härteln*, das nur geringste Nacharbeit erfordert. Die Möglichkeiten sind:

Angepasste Abschreckmittel. Das Abschreckmittel wird dem betreffenden Stahl so angepasst, dass es bei jeder Temperatur *keine größere* Abschreckwirkung besitzt, als sie zur Unterdrückung der Perlitstufe gebraucht wird. Dadurch werden die Wärmespannungen so klein wie möglich gehalten.

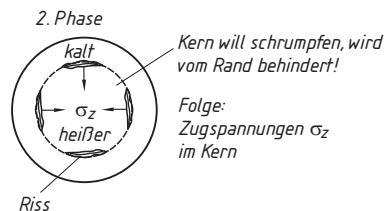
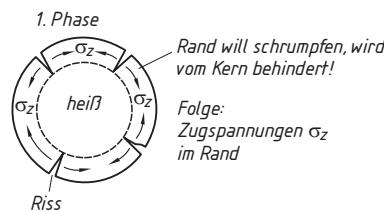


Bild 5.32 Das Entstehen von Wärmespannungen beim Abschrecken

Bei symmetrischen Teilen halten sich diese Spannungen evtl. das Gleichgewicht, während unsymmetrische Teile zu Verzug neigen.

Daneben treten auch noch *Umwandlungsspannungen* auf. Der Martensit mit seinem aufgeweiteten Gitter bewirkt eine Volumenzunahme von 1 %. Wenn der Rand martensitisch wird und im Kern keine Durchhärtung erfolgt, so erhöhen sich dadurch die Zugspannungen im Kern.

Hinweis: Wenn verwinkelte Werkstücke (Werkzeuge, Zahnräder) *Eigenspannungen* besitzen, sollten sie vor dem Härteln noch *spannungsarmgeglüht* werden. Damit kann der mögliche Härteverzug *vermindert* werden.

Zur Anpassung des Abschreckmittels bzw. seine Auswahl aus den angebotenen Härteölen und -salzen können die ZTU-Schaubilder (→ 5.3.7) in Verbindung mit Diagrammen wie Bild 5.28 verwendet werden. (Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Band 1...4, Verlag Stahl-eisen).

Abschrecken in Vorrichtungen. Die Teile werden unter Pressen in Matrizen abgeschreckt. Damit das Öl das Werkstück überfluten kann, müssen sie Durchbrüche und Kanäle besitzen.

Abschrecken in zwei Stufen. Dabei wird der umwandlungsträge Bereiche bei Temperaturen über der Martensitstufe zum Temperatur- und Spannungsausgleich ausgenutzt (Bild 5.26).

1. Stufe: Zuerst wird in einem schroff wirkenden Mittel die Perlitstufe schnell durchlaufen, um den Austenit auf diesen umwandlungsträgen Bereich zu unterkühlen. Die Wärmespannungen werden von dem austenitischen Gefüge (kfz-Gitter) rissfrei abgebaut.

2. Stufe: Anschließend wird in einem milderem Mittel bis auf Raumtemperatur abgekühlt. Erst jetzt treten beim Zerfall des Austenits zu Martensit die Umwandlungsspannungen auf.

Diese Möglichkeit wird bei zwei technisch angewandten Verfahren benutzt (Bild 5.33):

Ein guten Überblick über die Austenitumwandlung und alle damit verknüpften Verfahren geben die ZTU-Schaubilder. Ihnen können wichtige Informationen über die gesamte Wärmebehandlung entnommen werden, z.B. auch die metallphysikalische Voraussetzungen für die nebenstehenden Verfahren (folgender Abschnitt).

5.3.7 Zeit-Temperatur-Umwandlung-Schaubilder (ZTU-Diagramme)

Aus dem Eisen-Kohlenstoff-Diagramm wissen wir, dass sich Austenit unter der Linie PSK (723°C) in Perlit umgewandelt hat. Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf dieser Umwandlung können daraus nicht entnommen werden, es gilt wie alle Zustandsschaubilder nur für sehr langsame Abkühlung.

Anwendung: Bei Werkstücken in größeren Stückzahlen, bei denen eine Nacharbeit technisch oder wirtschaftlich nicht möglich ist.

Beispiele: Tellerräder mit Bogen- oder Palloidverzahnung, Kreissägeblätter.

Gebrochenes Abschrecken (Handwerkliches Verfahren): Der Stahl wird zuerst in Wasser abgeschreckt, dann herausgenommen und in Öl bis auf Raumtemperatur abgekühlt. Die Wahl des richtigen Zeitpunktes für den Badwechsel setzt große Erfahrungen des Härters voraus (Bild 5.33, Kurve 2).

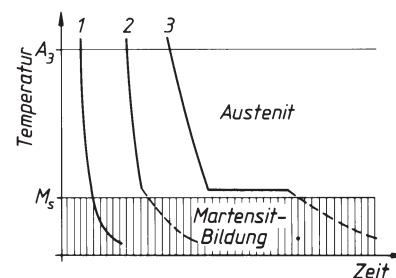


Bild 5.33 Verzugsarme Härteverfahren

- 1 normales
- 2 gebrochenes Abschrecken
- 3 unterbrochenes

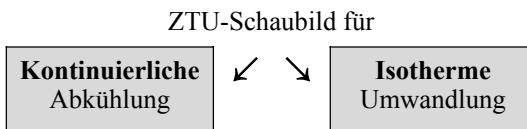
Unterbrochenes Abschrecken (Warmbadhärteten). Als Wärme- und Abschreckmittel dienen beim Warmbadhärteten Salzschmelzen und evtl. heiße Öle mit festen Temperaturen. Der Stahl wird in Stufen erwärmt, zuletzt in einem Bad mit der Härtetemperatur zur Austenitisierung.

Im Abschreckbad wird auf eine Temperatur oberhalb des Martensitpunktes heruntergekühlt und gehalten. Danach kann beliebig bis auf RT abgekühlt werden (Bild 5.33, Kurve 3).

ZTU-Schaubilder werden durch aufwändige Versuchsreihen mit zahlreichen Proben je Stahlsorte aufgestellt und sind in den Normen der härten und vergütbaren Stähle enthalten.

Eine Zusammenfassung von ZTU-Schaubildern ist im Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle Bd. 1 u. 2 zu finden.

ZTU-Schaubilder werden für zwei verschiedene Abkühlarten aufgestellt:



Beide Schaubilder können folgende Fragen beantworten (→):

Zunächst werden zwei Schaubilder für kontinuierliche Abkühlung betrachtet. Sie machen die Wirkung von Legierungselementen auf die kritische Abkühlgeschwindigkeit deutlich.

ZTU-Schaubild für kontinuierliche Abkühlung

Auf der waagerechten Achse ist die Zeit logarithmisch aufgetragen, auf der senkrechten die Temperatur. Die Linien begrenzen Felder, denen bestimmte Gefüge zugeordnet sind. Die schräg verlaufenden Linien sind Abkühlkurven von Austenitisierung- auf Raumtemperatur. Das Durchlaufen der Felder entspricht den Umwandlungsvorgängen im Stahl.

Bei beiden Schaubildern beziehen sich die Abkühlkurven auf Rundstahl von 95 mm Durchmesser, von ca 850 °C in Wasser abgeschreckt.

Beispiel: Unlegierter Stahl C45E (Bild 5.34). Der Rand (untere Kurve) kühlst ab, die Kurve gelangt in den Bereich der Ferritbildung und es entsteht eine bestimmte Menge Ferrit.. Die Kurve verläuft weiter durch den Bereich der Perlitbildung und es entsteht Perlit, ein Rest des Gefüges ist noch austenitisch. Im folgenden Feld, dem Bereich der Zwischenstufe, wandelt sich dieser Rest in Bainit (→) um. Die Kurve für den Kern durchläuft nur die Felder Ferrit und Perlit. Das bedeutet, dass unlegierte Stähle dieser Dicke nicht vergütet werden können.

Beispiel: Niedrig legierter Stahl 41Cr4 (Bild 5.35): Es tritt eine ausgeprägte Zwischenstufe auf, innerhalb der sich das Gefüge Bainit (→) bildet. Beim 41Cr4 entsteht durch Wasserabschreckung im Rand vollständig Martensit, während der Kern etwas Ferrit bildet, dann Bainit, der Rest wird ebenfalls zu Martensit.

Damit lässt sich dieser Stahl mit größerem Querschnitt noch durchvergüten. Dabei ist die Abkühlung so zu führen, dass kein Ferrit gebildet wird, er ist weich und senkt die Streckgrenze.

Kontinuierliche Abkühlung erfolgt stetig von Härtetemperatur bis auf RT in Wasser, Öl, Luft oder kalten Gasen.

Isotherme Umwandlung erfolgt nach schneller Abkühlung des Austenits auf Temperaturen zwischen 700 und 350 °C bei konstanter Temperatur in das gewünschte Gefüge.

Abschätzung von:

- Zeit und Temperatur für den Beginn der Austenitumwandlung,
- Ende der Umwandlung (Zeit, Temperatur),
- Gefügeausbildung (Verteilung der Phasen, Gesamthärte).

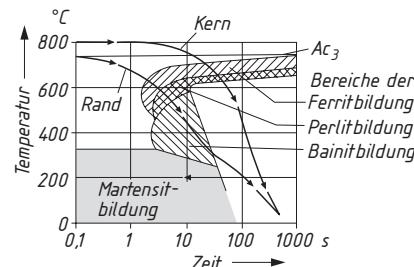


Bild 5.34 ZTU-Schaubild, Stahl C45E (kontinuierliche Abkühlung)

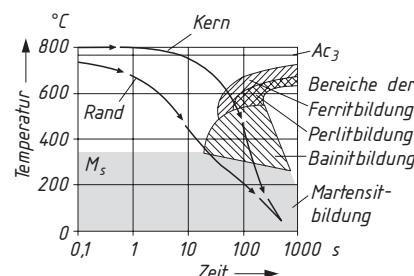


Bild 5.35 ZTU-Schaubild, Stahl 41Cr4 (kontinuierliche Abkühlung)

Bainit (nach E. C. Bain, brit. Forscher 1930) entsteht beim Durchlaufen der sog. Zwischenstufe oder Bainitstufe und ist ein Gemenge aus übersättigtem Ferrit mit eingelagerten Carbiden, deren Form und Größe vom Temperaturverlauf abhängen und damit zu beeinflussen sind.

Im unteren Umwandlungsbereich werden sie sehr feinkörnig und ergeben hohe Zähigkeit bei hoher Streckgrenze (unterer Bainit).

Beim Vergleich der Bilder 5.34 und 5.35 fällt auf, dass die schraffierten Felder nach rechts verschoben sind, Ferrit und Perlitbereiche stärker. Eine Überhitzung des Stahles wirkt ebenso.

Ablesebeispiel ZTU-Schaubild

Bild 5.36 zeigt ein vereinfachtes ZTU-Schaubild, mit nur 4 Abkühlungskurven 1...4 mit unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen, die sich durch Werkstück-Ø und Abschreckmittel unterscheiden. Das Lesen erfolgt längs dieser Abkühlungskurven (→).

- Zahlen am Schnittpunkt mit den Umwandlungslinien geben den Gefügeanteil in % an.
- Zahlen im Kreis am Ende der Abkühlkurve geben die Härte in HRC (hart) oder HV (weicher) an.

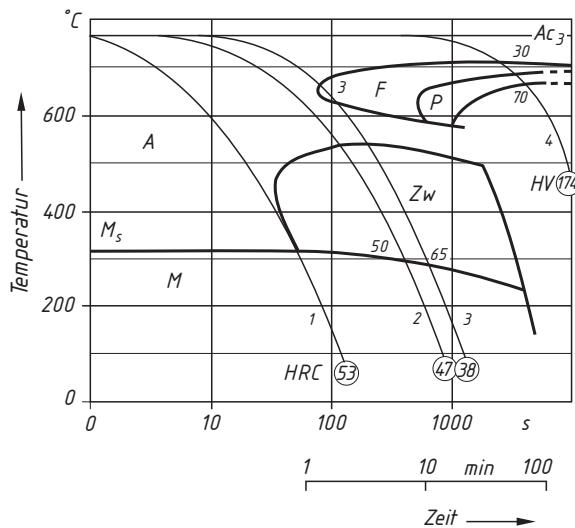


Bild 5.36 ZTU-Schaubild, Vergütungsstahl 36CrNiMo4

ZTU-Schaubilder sind die Grundlage für die Wärmebehandlung der Stähle und auch andere Legierungen, die Umwandlungen im festen Zustand aufweisen. Bei Schweißnähten lässt sich die mögliche Gefügeausbildung in der Wärmeeinflusszone (WEZ) mit ZTU-Schaubildern für kontinuierliche Abkühlung beurteilen.

Die Umwandlungen setzen beim legierten Stahl später ein und verlaufen langsamer. Durch das Zurückweichen der Felder für Ferrit- und Perlitbildung ist es einfacher, auch im Kern ein ferrit- und perlitfreies Gefüge herzustellen.

In den vollständigen ZTU-Schaubildern sind die Abkühlkurven mit den sog. Abkühlparametern λ gekennzeichnet. Sie können aus weiteren Diagrammen abgelesen werden, die z.B. für verschiedene Randabstände von Rundstäben von 50...200 mm Ø bei Abschrecken in Wasser, Öl oder Luft aufgestellt wurden. Mit diesem Parameter lässt sich für ein konkretes Werkstück das zu erwartende Gefüge im ZTU-Schaubild abschätzen.

Stahl-Informations-Zentrum, Merkblatt MB 460, Härtung, Anlassen, Vergüten, Bainitisieren
(www.stahl-online.de)

Ablesebeispiele:

Kurve 1: Kerntemperatur von Stahl 35 mm Ø bei Wasserabschreckung. Sie fällt in der kürzesten Zeit auf RT ab und schneidet das Feld Zw nicht. Der Austenit wandelt sich vollständig in Martensit um, die Härte beträgt 53 HRC.

Kurve 2: Kerntemperatur von Stahl 100 mm Ø bei Ölabschreckung. Sie verläuft durch das Feld Zw und zeigt, dass so dicke Teile in Öl nicht durchhärteten, es entsteht 50 % Bainit in der Zwischenstufe. Der restliche Austenit wandelt sich zu Martensit mit einer Härte von 47 HRC.

Kurve 3: Kerntemperatur von Stahl 170 mm Ø bei Ölabschreckung. Sie zeigt, dass bei noch dickeren Teilen ein geringer Teil Ferrit entsteht (3 %), dann 65 % Bainit, der Rest wird zu Martensit. Die Härte beträgt 38 HRC.

Kurve 4: Werkstücktemperatur bei langsamer Abkühlung im Ofen. Sie zeigt, dass ein ferritisches-perltisches Gefüge nur bei *sehr langsamer* Abkühlgeschwindigkeit von ca. 3 K/min entstehen kann (von 850 bis 550 °C in ca. 100 min). Das Gefüge besteht aus 30 % Ferrit und 70 % Perlit. Die Härte beträgt 174 HV.

ZTU-Schaubild für isotherme Umwandlung

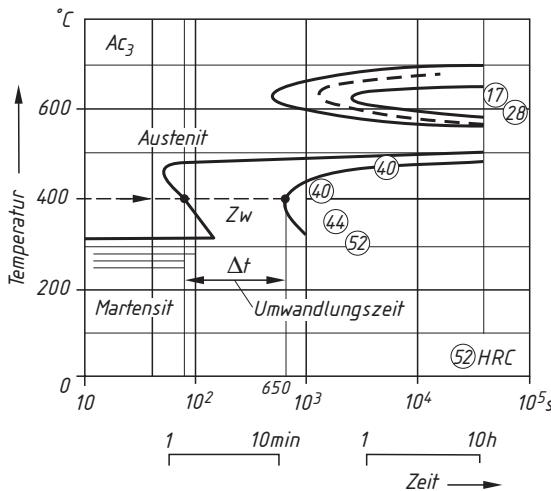


Bild 5.37 ZTU-Schaubild, Vergütungsstahl 36CrNiMo4 (isotherm)

Für die Wärmebehandlung ist es wichtig, dass der Austenit möglichst lange stabil bleibt. Bild 5.37 zeigt, dass beim Abschrecken auf eine Temperatur von 350 °C eine Zeit von ca. 100 s vergehen kann, ehe die Bainitumwandlung einsetzt (→).

5.3.8 Vergüten

Verfahrensziel: Durch Vergüten sollen Stähle folgende Eigenschaftskombination erhalten:

Höhere Streckgrenze $R_{p0,2}$	Höhere zulässige Spannung
Höhere Zähigkeit, Kerbschlagarbeit KV	Sicherheit gegen Sprödbruch, Höhere Dauerfestigkeit

Vergüten ergibt Eigenschaftsprofile, die zwischen den Zuständen **Normalisiert** und **Gehärtet** liegen (Bild 5.38):

- normalisiert: Hohe Bruchdehnung, niedrigste Festigkeit
- gehärtet: höchste Festigkeit, spröde
- vergütet: höchste Verformungsarbeit bis zum Bruch (Fläche unter den σ, ε -Kurven (Bild 5.38)).

Die Schaubilder sind wie folgt zu lesen:

Die schrägen Abkühlungskurven fehlen, weil hier die Umwandlung bei konstanter Temperatur (isotherm) verläuft und auf einer *Waagerechten* verfolgt wird. Damit lassen sich Beginn, Ende und Art der Austenitumwandlung ablesen (Beispiel).

Ablesebeispiel: Die Teile werden aus der Austenisierungstemperatur ($\geq Ac_3$) schnell auf die gewünschte Umwandlungstemperatur gebracht (400 °C). In Richtung der Zeitachse stößt man nach etwa 80 s auf die erste Umwandlungslinie der Zwischenstufe. Es ist der Beginn der Bainitbildung.

In der folgenden Zeit wandelt sich nach und nach der restliche Austenit um, bis nach insgesamt etwa 650 s die Umwandlung beendet ist. Nach weiterer Abkühlung ohne Umwandlung beträgt die Härte 40 HRC.

Warmbadhärten benutzt diese Zeit zum Temperatur- und Spannungsausgleich, ehe dann bei weiterer Abkühlung die verzugsarme Umwandlung zu Martensit erfolgt.

Hinweis: ZTU-Schaubilder Bild 5.42

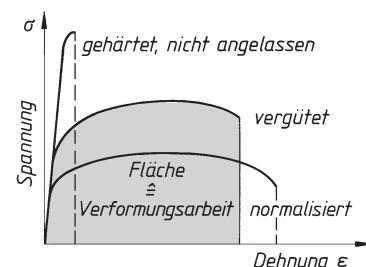


Bild 5.38 Verformungsarbeit eines Stahles bei verschiedenen Gefüezuständen

Der **unterperlitische** Stahl besteht im normalisierten Zustand aus Ferrit und Perlitbereichen. Bei hoher Beanspruchung beginnt die plastische Verformung, (d.h. das Wandern der Versetzungen) **zuerst** an der weicheren Ferritphase.

In den Vergütungsstählen ist der Ferrit dagegen **übersättigt** und mit **feinverteilten** Carbiden durchsetzt. Das Abgleiten tritt erst bei höheren Spannungen ein: Die **Streckgrenze** liegt höher.

Die Kennlinie des vergüteten Stahles kann durch die Anlassstemperatur verändert werden. Das Vergütungsschaubild Bild 5.39 zeigt, wie sich die mechanischen Eigenschaften ändern, wenn abgeschreckte Stähle auf Temperaturen zwischen 450 und 650 °C angelassen werden.

Bei 450 °C ergeben sich höhere Festigkeit R_m und Streckgrenze R_e , dafür sind Dehnung A und Einschnürung Z niedriger, als wenn der obere Anlassbereich gewählt wird

Verfahren

Das Austenitisieren und Abschrecken wird wie beim Härtung durchgeführt. Für Teile mit größeren Querschnitten ist ein Durchhärtung nicht erforderlich, es genügt, wenn im Kern Bainit entsteht.

Anlassen erfolgt im Glühofen oder in Salzschmelzen. Danach sind die Teile so zäh, dass ein Verzug durch *Richten* beseitigt werden kann. Ebenso sind spanende Verfahren wie *Fertigdrehen* oder -fräsen wirtschaftlich durchführbar.

Vergütungsstähle DIN EN 10083/06 (→)

Die Norm (Teil-2) unterscheidet 5 unlegierte Qualitätsstähle (mit max. je 0,045 % P und S) und 7 unlegierte Edelstähle (max. 0,03 % P und 0,035 % S). Legierte Stähle (Teil-3) sind ausnahmslos Edelstähle, 22 Sorten und 6 Borlegierte mit sehr geringen B-Anteilen (0,0005...0,008 %), die aber sehr stark die kritische Abkühlgeschwindigkeit erniedrigen (→ Presshärten 5.5.2).

Zu einigen Sorten gibt es Varianten mit verbesserten Eignung zur spanenden Bearbeitung (siehe Tabelle 5.6, Fußnote).

Vergütbare Stähle sind auch in zahlreichen anderen Normen enthalten (Übersicht).

Übersicht: Vergütungsstähle in anderen Normen

Stahlgruppe	DIN EN-	Tabelle	Stahlgruppe	DIN EN-	Tabelle
Automatenstähle	10087	4..20	Warmfeste Stähle	10028-2	4.18
Einsatzstähle	10084	5.10	Kaltzähe Stähle	10028-4	4.14
Nitrierstähle	10085	5.12	Stahlguss, vergütbar	10293	4.35
Federstähle	10089, 10270	4.27	kaltzäh	10213-3	---

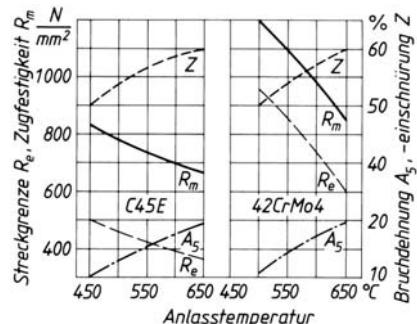


Bild 5.39 Anlassschaubilder von zwei Vergütungsstählen DIN EN 10083

Der Vergleich der beiden Schaubilder zeigt, dass der legierte Stahl bei gleichen Verformungskennwerten (Kurven A und Z) wesentlich höhere Festigkeiten (Kurven R_m und R_e) besitzt

Gefügeänderung: Die Vorgänge zur Bildung von Vergütungsgefügen, d.h. Austenitisieren, Abschrecken und Anlassen sind unter 5.3.5 mit Bildern 5.30 beschrieben.

Vergütungsstähle sind Stähle mit C-Gehalten 0,22 bis 0,5 (0,85) und niedrig legiert mit LE, welche die *kritische Abkühlgeschwindigkeit* senken. Mit zunehmender Wanddicke der Teile sind mehr LE zum *Durchvergüten* erforderlich.

Tabelle 5.6: Vergütungsstähle, Bor-legiert

Kurzname	\varnothing -Bereich $d \leq 16$ mm Flacherzeugnisse $t \leq 8$ mm			
	R_e MPa	R_m MPa	A %	Z %
22MnB5	700	900...1050	14	55
30MnB5	800	950...1150	13	50
38MnB5	900	1050...1250	12	50
27MnCrB5-2	800	1000...1250	14	55
33MnCrB5-2	850	1050...1300	13	50
39MnCrB5-2	900	1100...1350	12	50

Tabelle 5.6: Vergütungsstähle, Fortsetzung

Stahlsort	Kurzname	Durchmesserbereich $d \leq 16$ mm Flacherzeugnisse $t \leq 8$ mm				Durchmesserbereich $16 \leq d \leq 40$ mm Flacherzeugnisse $8 \leq t \leq 20$ mm				Durchmesserbereich $40 \leq d \leq 100$ mm Flacherzeugnisse $20 \leq t \leq 60$ mm				
		R_e	R_{p_0}	A	Z	R_e	R_m	A	Z	R_e	R_m	A	Z	Kurzname
		MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%	J
C22E ①	1.1151	340	500...650	20	50	290	470...620	22	50	35	320	550...700	20	C22E ①
C35E ①	1.1181	430	630...780	17	40	380	600...750	19	45	35	350	600...750	19	C35E ①
C40E ①	1.1186	460	650...800	16	35	400	630...780	18	40	30	350	630...780	17	C40E ①
C45E ①	1.1191	490	700...850	14	35	430	650...800	16	40	25	370	650...800	16	C45E ①
C50E ①	1.1206	520	750...900	13	30	460	700...850	15	35	--	400	700...850	15	C50E ①
C55E ①	1.1203	550	800...950	12	30	490	750...900	14	35	--	420	700...850	15	C55E ①
C60E ①	1.1221	580	850...1000	11	25	520	800...950	13	30	--	450	750...900	14	C60E ①
28Mn6	1.1170	590	800...950	13	40	490	700...850	15	45	40	440	650...800	16	28Mn6
38Cr2	1.7003	550	800...950	14	35	450	700...850	15	40	35	350	600...750	17	38Cr2
46Cr2	1.7006	650	900...1100	12	35	550	800...950	14	40	35	400	650...800	15	46Cr2
34Cr4 ②	1.7033	700	950...1150	12	35	590	800...950	14	40	35	460	700...850	15	34Cr4 ②
37Cr4 ②	1.7034	750	950...1200	11	35	630	850...1000	13	40	50	510	750...900	14	37Cr4 ②
41Cr4 ②	1.7035	800	1000...1200	11	30	660	900...1100	12	35	35	560	800...950	14	41Cr4 ②
25CrMo4 ②	1.7218	700	900...1100	12	50	600	800...950	14	55	50	450	700...850	15	25CrMo4 ②
34CrMo4 ②	1.7220	800	1000...1200	11	45	650	900...1100	12	50	40	550	800...950	14	34CrMo4 ②
42CrMo4 ②	1.7225	900	1100...1300	10	40	750	1000...1200	11	45	35	650	900...1100	12	42CrMo4 ②
50CrMo4	1.7228	900	1100...1300	9	40	780	1000...1200	10	45	30	700	900...1100	12	50CrMo4
34CrNiMo6	1.6582	1000	1200...1400	9	40	900	1100...1300	10	45	45	800	1000...1200	11	34CrNiMo6
30CrNiMo8	1.6580	1050	1250...1450	9	40	1050	1250...1450	9	40	30	900	1000...1300	10	30CrNiMo8
35NiCr6	1.5815	740	880...1080	12	40	740	880...1080	14	40	35	640	780...980	15	35NiCr6
36NiCrMo16	1.6773	1050	1250...1450	9	40	1050	1250...1450	9	40	30	900	1100...1300	10	36NiCrMo16
39NiCrMo3	1.6510	785	980...1180	11	40	735	930...1130	11	40	35	685	880...1080	12	39NiCrMo3
30NiCrMo16-6	1.6747	880	1080...1230	10	45	880	1080...1230	10	45	35	880	1080...1230	10	30NiCrMo16-6
51CrV4	1.8159	900	1100...1300	9	40	800	1000...1200	10	45	35	700	900...1100	12	50CrV4

1) Zu diesen Sorten gibt es je einen Qualitätsstahl (z.B. C35) und eine Variante mit verbesselter Spanbarkeit (z.B. C35R)

2) Zu diesen Sorten gibt es eine Variante mit verbesselter Spanbarkeit (z.B. 34CrS4) erreicht durch leicht erhöhte S-Gehalte von 0,02...0,04 %

Auswahlgesichtspunkte:

Vergütete Stähle werden überall dort verwendet, wo sich mit den Stählen nach DIN EN 10025-2 zu großen Abmessungen ergeben würden, oder für dynamisch belastete Bauteile (→ Beispiele).

Die durch Vergüten erreichbare Streckgrenze R_e ist querschnittsabhängig, da bei dickeren Bauteilen die Umwandlungsvorgänge langsamer verlaufen (→ Bild 5.36).

Eine geringfügig höhere Streckgrenze kann durch eine niedrigere Anlasstemperatur erzeugt werden (Bild 5.39). Das wird mit einer kleineren Zähigkeit erkauft. (Linien für Bruchdehnung A und Bruchbeanschnürung Z).

Für kompliziert gestaltete Teile mit Kerben und starken Querschnittsübergängen, welche zusammengesetzten Beanspruchungen ausgesetzt sind (z.B. Biegung und Torsion) hat ein *zäherer* Stahl die *höhere Dauerfestigkeit*, da er örtliche Verformungen durch geringe plastische Verformungen auffangen kann.

Bild 5.40 zeigt, dass für einen bestimmten Streckgrenzenwert die höhere Zähigkeit durch höhere Anteile an LE erzielt werden kann.

Anlasssprödigkeit

Vergütungsstähle mit den LE Mn, Cr oder Cr+Ni zeigen nach dem Anlassen und *langsamer* Abkühlung eine geringere Kerbzähigkeit.

Bei *schneller* Abkühlung von der Anlasstemperatur tritt diese *Anlasssprödigkeit* nicht auf.

Das Element Molybdän Mo verhindert diese Versprödung, wenn es in Gehalten von etwa 0,4 % zulegiert ist. Mo-legierte Stähle dürfen nach dem Anlassen beliebig abkühlen.

Vergütungsverfahren

Die Eigenschaftskombination hohe Festigkeit und hohe Zähigkeit = **hohe Dauerfestigkeit** kann auf zwei Wegen erreicht werden:

Beispiele für hochbeanspruchte Bauteile in Getrieben, Motoren und Fahrwerken:

- 34CrMo4 für Kurbelwellen,
- 30CrNiMo8 für Drehstabfedern,
- 42CrMo4 für hochfeste Schrauben,
- 41Cr4 für Zahnräder,
- 50CrV4 für warmfeste Federn.

Anwendung der Tafel 5.6: Für ein Bauteil wird Stahl mit einer Streckgrenze von 450 MPa benötigt. Welche Stahlsorte 1 ist je nach Bauteilquerschnitt geeignet? Welche Sorte 2 müsste gewählt werden, wenn höhere Zähigkeit verlangt wird, evtl. mit höherer Streckgrenze?

Ø d in mm	Sorte 1	Sorte 2
12	C40E	28Mn6
20	C50E	28Mn6
60	34Cr4	25CrMo4

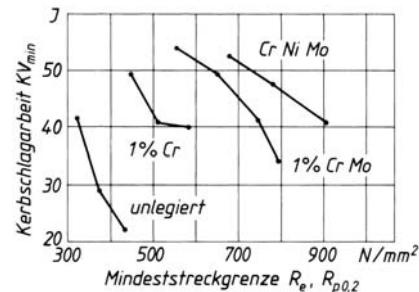


Bild 5.40 Einfluss der LE auf Streckgrenze und Zähigkeit von Vergütungsstählen (40-100 Ø mm)

Ursache der Anlasssprödigkeit sind Ausscheidungen von Phosphor auf den Korngrenzen, die bei Abkühlen im Bereich von 550...450 °C wegen abnehmender Löslichkeit entstehen.

Bei schnellem Durchlaufen dieses Temperaturbereiches werden die Ausscheidungen verhindert.

Anlasssprödigkeit wird beim isothermen Vergüten (Bainitisieren, Folgeabschnitt) umgangen.

Anlassvergütung	Isothermische Umwandlung
Durch Anlassen eines martensitischen Gefüges auf höhere Temperaturen (wie bisher beschrieben)	des Austenits in das Vergütungsgefüge Bainit (Behandlung im folgenden Abschnitt)

2) Vergütung durch isothermische Umwandlung

Abschrecken eines austenitisierten Gefüges auf Temperaturen zwischen M_s und Ar_1 und Halten bei dieser Temperatur bis zur vollständigen Umwandlung, danach beliebige Abkühlung.

Die verschiedenen Verfahren des Härtens und Vergütens lassen sich mit Hilfe der ZTU-Schaubilder anschaulich vergleichen (Bild 5.41).

Oben: für kontinuierliche Abkühlung,
unten: für isotherme Umwandlung

- Kurve 1: Gebrochenes Abschrecken,
- Kurve 2: Warmbadhärten, Rand —, Kern - - -,
- Kurve 3: Patentieren,
- Kurve 4: Zwischenstufenvergüten, Bainitisieren (z.B. Kugelgraphitguss)

Induktive Einzelstabvergüzung auf einer vollautomatischen Anlage (EVA-Anlage, Krupp) ergibt durch induktive Kurzzeiterwärmung eine tiefere Einhärtung (höhere Austenitisierungstemperatur 1000 °C) ohne Grobkorn, ohne Randentkohlung mit hoher Gleichmäßigkeit in Gefüge und Geradheit.

Gegenüber normalem Vergüten werden höhere Streckgrenz- und Kerbschlagarbeitswerte erzielt. Dadurch besteht evtl. die Möglichkeit, auf einen Stahl mit kleinerem LE-Gehalt überzugehen.

5.4 Aushärten

5.4.1 Allgemeines

Die Steigerung von Härte und Festigkeit durch **Martensitbildung** ist auf Fe-C-Basislegierungen und wenige andere begrenzt.

Die Entdeckung des Aushärtens durch Wilm (→ 7.3.7) führte zu einer *universellen* Möglichkeit, die Streckgrenze von Legierungen zu erhöhen, daneben auch von anderen Eigenschaften (thermische, magnetische).

Dieses Verfahren wird isothermes Vergüten oder *Bainitisieren* genannt und wird bei der Herstellung von Federband oder -draht angewendet. Die Umwandlung erfolgt in Salzbädern (ca. 500 °C) oder Luftgebläse (Patentieren). Es entsteht ein sehr feinstreifiger Perlit mit guter Zugfestigkeit und Kaltformbarkeit, günstig für das *Ziehen des Drahtes*.

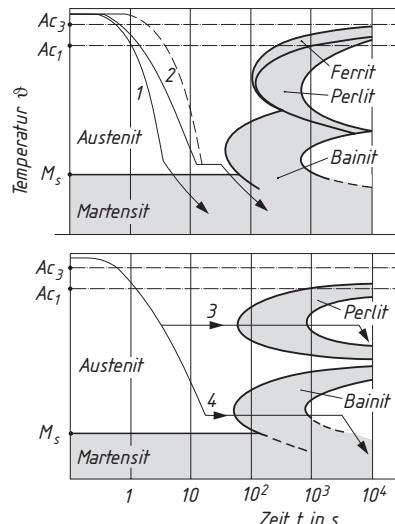


Bild 5.41 Einige Wärmebehandlungen in ZTU-Schaubildern, schematisch

Anwendung: Stabstähle aus unlegierten und legierten Edelbaustählen, nichtrostenden, hitzebeständigen Stählen und Werkzeugstählen von 20...85 mm Ø für z.B. Zahnstangen, Bolzen, Wellen, Achsen,

Martensitbildung ist eine *diffusionslose* Gitterumwandlung, die zu Kristallen mit hoher Versetzungsdichte führt. Sie findet bei *einigen* Legierungen statt, die Phasen mit verschiedenen Kristallgittern bilden (Fe-C, Fe-Ni, Cu-Zn, Co).

Aushärten ist ein diffusionsabhängiger Vorgang in Mischkristallen, der prinzipiell in den meisten Legierungen ablaufen kann, seine technischen Anwendungen sind zahlreich.

Aushärten = Ausscheidungshärten

5.4.2 Innere Vorgänge

Aushärtbare Legierungen müssen im Zustandschaubild ein Mischkristallgebiet mit abnehmender Löslichkeit besitzen (Bild 5.42).

Bei langsamer Abkühlung entsteht ein Mk-Gefüge mit *sekundären Ausscheidungen* auf den Korngrenzen. Die LE haben bei dieser Struktur nur geringen Einfluss auf die Eigenschaften der Basislegierung.

Zum Aushärten wird die Legierung aus dem Mk-Gebiet abgeschreckt, sodass *übersättigte* Mischkristalle entstehen. Sie sind *instabil* und versuchen, den Gleichgewichtszustand des Zustandschaubildes zu erlangen.

Deshalb laufen – evtl. schon bei Raumtemperatur – sehr *langsame Diffusionsvorgänge* ab, bei erhöhter Temperatur *schnellere*.

- Bei RT drängt das Wirtsgitter die zwangsgelösten LE-Atome in Fehlstellen des Gitters (Versetzungen), wo sie als Gleitblockierung das Wandern der Versetzungen (Translation) erschweren.
- Bei Erwärmung können sich Teilchen innerhalb der Mischkristalle bilden, die im Elektronenmikroskop sichtbar sind (Größe ca. 2...10 nm). Oft sind es *harte* intermetallische Phasen. Zum Abgleiten sind jetzt *größere Kräfte* erforderlich, weil die Teilchen dabei *abgesichert* werden müssen (**Schneidmechanismus** genannt).

Bei der Diffusion sind Temperatur und Zeit die wirksamen Verfahrensgrößen. So entsteht bei zu hohen Temperaturen oder zu langem Halten eine *Vergrößerung* der Teilchen.

Sie sind dadurch zum Abscheren zu groß. Weil ihr Abstand jedoch größer geworden ist, verläuft der Abgleitvorgang *zwischen* ihnen, sie werden umgangen (**Umgehungsmechanismus**).

Aushärtung entsteht durch feindisperse harte Teilchen *bestimmter Größe* in *kleinen Abständen* innerhalb der Mischkristalle.

Hinweis: Abschnitt 2.5.7 Ausscheidungen aus übersättigten Mischkristallen

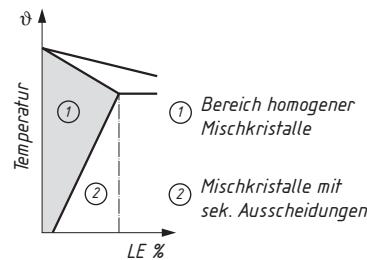


Bild 5.42 Zustandschaubild (schematisch). Mischkristalltyp mit sinkender Löslichkeit

Die diffundierten LE bilden folgende Strukturen *innerhalb* der Mischkristalle:

Cluster sind ungeordnete Ansammlungen der LE im Mischkristall (inhomogener Mk.).

GP-Zonen (nach Guinier und Preston) sind scheibenförmige Teilchen aus einer Atomart von ca. 10 nm Durchmesser (bei Al-Cu beobachtet).

Kohärente Ausscheidungen (Bild 5.43a) behalten noch das Wirtsgitter in *verzerrter* Form bei und wirken sich am stärksten auf die Umgebung aus (starke Gleitblockierung).

Inkohärente Ausscheidungen (Bild 5.43b) besitzen ein *arfremdes* Gitter und verzerrn das Wirtsgitter wenig (geringere Gleitblockierung).

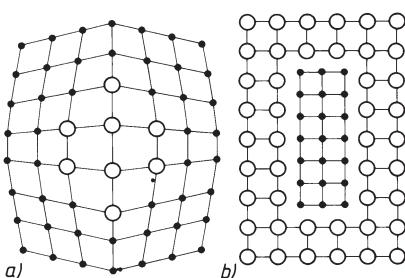


Bild 5.43 Form der Ausscheidungen
a) kohärent, b) inkohärent

Nur dann sind gezielte Eigenschaftsänderungen möglich. Zahlreiche Fälle von Ausscheidungen ergeben ein ungünstiges Eigenschaftsprofil und müssen unterdrückt werden, z.B. *Alterung* oder *Anlasssprödigkeit*.

Hinweis: Ausscheidungsvorgänge sind auch die Ursache für die Eigenschaftsänderungen beim Anlassen gehärteter Stähle.

5.4.3 Verfahren

Aushärten besteht aus einer zweistufigen Wärmebehandlung (Tabelle 5.7):

Tabelle 5.7: Verfahren beim Aushärten

Arbeitsgang	Verfahren, Vorgänge, Auswirkungen
Lösungsbehandeln	Erwärmern und Halten auf Temperaturen, die im Werkstoff ein homogenes Mischkristallgefüge erzeugen (Homogenisieren) Abschrecken (Abkühlen), um Ausscheidungen zu verhindern und Mischkristalle zu übersättigen
Auslagern	Lagern bei Raumtemperatur (Kaltauslagern) oder bei höheren Temperaturen (Warmauslagern) je nach Werkstoffsorte. Die Ausscheidungen laufen in der gewünschten Form und gleichmäßig im Werkstück ab.

Die Temperaturen und Zeiten sind von der Art der Legierung abhängig.

5.4.4 Bedeutung und Anwendung der Aushärtung

Alterung sind Ausscheidungsvorgänge, die zu ungewollten Eigenschaftsänderungen des Werkstoffes führen.

Künstliche Alterung von Stahl ist eine Kombination von Reckalterung mit Warmauslagern. Sie wird angewandt, um die Alterungsanfälligkeit von Stählen zu untersuchen.

Die Proben werden kalt um 10 % ihrer Länge gereckt (verlängert) und 2 h lang auf 250 °C gehalten. Die höhere Temperatur beschleunigt die Ausscheidungsvorgänge, sodass sie statt in Wochen in ca. 1 h ablaufen. Ist der Stahl alterungsbeständig, ändern sich seine Eigenschaften kaum.

Aushärtbare Legierungen sind in zahlreichen Legierungssystemen zu finden. Tabelle 5.8 gibt eine Auswahl mit Hinweisen.

Beispiele: Alterung bei Stählen mit N-Gehalten (früher Thomas-Stähle) durch die Auscheidung von C und N im Ferrit. Dadurch Abfall der Kerbschlagarbeit und Erhöhung der Übergangstemperatur.

Reckalterung ist eine gleichartige Erscheinung, die nach geringer Kaltumformung auftritt. Die Ausscheidungen lagern sich in den Versetzungen ab und blockieren weitere Gleitvorgänge.

Künstliche Alterung wird auch bei genauen Messgeräten und Federn für Messgeräte vor der Eichung durchgeführt, um Konstanz der Messwerte über der Zeit zu gewährleisten.

Aushärtung tritt auch bei PM-Werkstoffen auf. Durch Abschrecken beim Verdüsen von Metallschmelzen entstehen *hochübersättigte* Mischkristalle.

Tabelle 5.8: Auswahl aushärtbarer Legierungen

Werkstoffgruppe	Beispiel	Anwendung	Eigenschaftsverbesserung durch Aushärten
Al-Legierungen (7.3.6)	AlCuMg G-AlCu4Ti	Bleche, Profile Waggondrehgestellteile	Erhöhte Streckgrenze bei kleinem Zähigkeitsabfall Streckgrenze bei hoher Zähigkeit, Dauerfestigkeit
Cu-Legierungen (7.4.4)	AlNiCo CuCr CuBe1, 7	Magnete Elektroden zum Punktschweißen Federn, nichtfunkende Werkzeuge	Verbesserung der Dauermagneteigenschaften Härte und Anlassbeständigkeit bei guter elektrischer Leitfähigkeit Härte, Elastizitätsgrenze, elektrische Leitfähigkeit
HSS-Stähle (4.7.5) ferrit.-perlit. Stähle, ausscheidungshärtend (Tabelle 5.9) perlitärmer Stahlguss	HS6-5-2-5 (E-Mo5Co5) 38 MnVS6 DIN EN 10267 GE8Mn7 mikrolegiert	Zerspanungswerkzeuge Getriebeteile Schweißverbundkonstruktionen	Warmhärte, Anlassbeständigkeit, Warmverschleißfestigkeit Ersatz von Vergütungsstählen Schweißbarkeit, Kaltzähigkeit bei erhöhter Dauerfestigkeit. Knoten für Rohrfachwerke (Off-Shore-Technik)
Martensitaushärtender Stahl	X3NiCoMo18-7	Druckgießformen Flugzeugfahrwerk	Härte und Streckgrenze bei hoher Zähigkeit

Martensitaushärtende Stähle

Ein herausragendes Beispiel für die Änderung des Eigenschaftsprofiles durch Aushärten sind die martensitaushärtenden Stähle. Sie enthalten sehr wenig Kohlenstoff (schweißbar) und sind mit Ni, Co und Mo hochlegiert. Der Aushärtungseffekt wird durch geringe Al- und Ti-Gehalte erreicht.

Wärmebehandlung: Bei 820 °C lösungsgeglüht hat der Stahl ein austenitisches Gefüge, die LE sind im γ -Mischkristall gelöst. Der hohe Ni-Gehalt senkt die γ - α -Umwandlung auf ca. 200 °C, sodass bei Luftabkühlung ein übersättigter α -Mischkristall entsteht. Das Gefüge wird als *Nickelmartensit* bezeichnet, das Warmauslagern findet bei 480 °C/3 h statt.

Zusätzliche Kaltumformung des ausgehärteten Stahles erhöht die Zugfestigkeit auf 2100 N/mm². Dabei ist die Kaltzähigkeit hoch.

Beispiel: Stahl X3NiCoMo18-7-5

Zustand	HRC	R _m	R _{p0,2}	A	Z
lösungsbehandelt	30	1000	800	12	70
ausgelagert	50	1800	1750	10	50

Festigkeit in N/mm², Verformungswerte in %

Anwendung wegen der hohen Werkstoffkosten begrenzt, z.B. für komplizierte Druckgießformen für höchste Stückzahlen, Sicherheitsbauteile an Luftfahrzeugen, Wehrtechnik.

Nickelmartensit ist fast C-frei. Er entsteht durch Austenitumwandlung ohne Diffusion der LE-Atome. Die Festigkeitssteigerung beruht auf starker M_k-Verfestigung und hoher Versetzungsichte. Da die tetragonale Aufweitung fehlt, ist dieser Martensit weniger hart, aber sehr duktil (Beispiel oben).

5.4.5 Unterschied zum Härteln und Vergüten

Aushärtbare Legierungen erfahren durch das Lösungsbehandeln i.a. *keine* wesentliche Festigkeitssteigerung. In diesem Zustand ist eine Endbearbeitung möglich. Während der nachfolgenden Kalt- oder Warmauslagerung bilden sich die Ausscheidungen *langsam* und *gleichmäßig* über den ganzen Querschnitt. Daraus folgen die wesentlichen Unterschiede zum Härteln bzw. Vergüten:

- Eigenschaften sind nicht dickenabhängig,
- keine Gefügeunterschiede zwischen Rand und Kern, die Ursache für Verzug sein können,
- Aushärten spart Energie und Zeit (Bild 5.44),
- Einsparen teurer LE, weil zur Bildung der Ausscheidungsphasen geringste Anteile genügen (mikrolegierter Stahl).

Für diese kostensparende Wärmebehandlung sind Stähle nach Tabelle 5.9 entwickelt worden. Sie werden für bestimmte Anwendungen anstelle von Vergütungsstählen eingesetzt (→).

Das Verfahren erzeugt ein bainitfreies, feinkörniges ferritisches-perlitisches Gefüge.

Vergleich: Vergütungsstahl und ausscheidungshärtender Stahl

Sorte	DIN EN	R _e MPa	A %	Z %
38 Cr2	10083	450	15	40
38MnVS6+P ¹⁾	10267	665	17,5	54

¹⁾ Normbezeichnung enthält ein +P für Zustand ausgehärtet, o.a. Sorte enthält 0,3 % Cr; 0,08-0,2 % V; 0,08 % Mo; und 0,01-0,02 % N zur Nitridbildung, und reduzierte S- und P-Gehalte gegenüber der Norm.

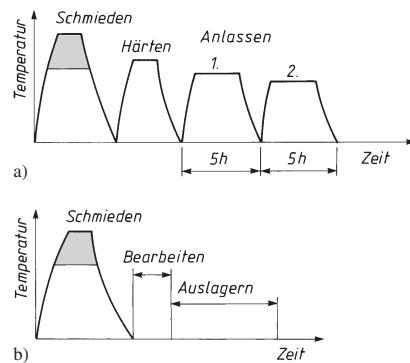


Bild 5.44 Temperatur-Zeit-Schaubild für Schmiedeteile aus: a) Vergütungsstahl
b) mikrolegierter, aushärtbarer Stahl

Beispiel: Exzenterwelle (Valvetronic) zur Ventilsteuerung eines BMW-6-Zylindermotors. Die Oberfläche wird plasmanitrocarburiert.

Tabelle 5.9: Von Warmformgebungstemperatur ausscheidungshärtende, ferritisches-perlitische Stähle, DIN EN 10267/98 (Zustand ausgehärtet)

Sorte ¹⁾	R _m MPa	R _e MPa	A %	Z %
19MnVS6	600-750	390	16	32
30MnVS6	700-900	450	14	30
38MnVS6	800-950	520	13	25
16MnVS6	900-1050	580	10	20
16MnVS3	700-900	450	14	30

5.5 Thermomechanische Verfahren

5.5.1 Allgemeines

Hierbei werden Verfahren der Umformung und Wärmebehandlung unmittelbar (in einer Hitze) verknüpft mit folgenden Zielen:

- Energiesparen durch Ausnutzung der Wärme aus der Warmumformung, z.B. Vergüten aus der Schmiedehitze oder durch normalisierendes Walzen,

Beispiele: Glühverfahren zur besseren Beabeitung (Weichglühen) werden für Draht- und Stabstahl unmittelbar nach der Umformung in Durchlauföfen durchgeführt (sog. Conti-Glühe).

Für **Schmiedeteile** wird auch angewandt:

- isothermes Umwandeln (Zustand BF),
- kontrollierte Abkühlung von Gesenkteilen mikrolegierter Stähle aus der Schmiedehitze (Zustand BY).

- Erzeugung von Gefügezuständen, wie sie durch alleinige Wärmebehandlung nicht erreichbar sind und insbesondere
- Festigkeitssteigerung bei mikrolegierten Baustählen mit niedrigen C-Gehalten, wichtig für Schweißeignung, Kaltformbarkeit und Kaltzähigkeit.

Wesentliche Maßnahme ist die Verformung des metastabilen Austenit unmittelbar vor bis zum Beginn der Umwandlung (→). Dabei erhöht sich die Zahl der Gitterstörung stark, Sie wirken als Keime für das neue Gefüge (Feinkorn) und sind auch Standort für (feindisperse) Ausscheidungen.

5.5.2 Austenitformhärten

Bei legierten Stählen ist der unterkühlte Austenit oberhalb der Martensitstufe einige Zeit beständig. Eine sofortige Verformung unterhalb der Rekristallisationstemperatur ($500\ldots600\text{ }^{\circ}\text{C}$) erzeugt weitere Gitterstörungen, die durch Keimwirkung beim nachfolgenden Abkühlen ein äußerst feinkörniges Martensitgefüge ergeben. Es hat höhere Festigkeit **und** Zähigkeit als normale Vergütungsgefüge (→).

Formhärten (Presshärten) ermöglicht, dünnwandige Verstärkungssteile für Karosserien mit höherer Festigkeit herzustellen, als es mit den hochfesten Stählen zum Kaltumformen möglich ist.

Borlegierte Stähle sind niedrig legierte Vergütungsstähle (Tafel 5.6), geeignet für die Fertigung durch Schneiden, Kaltumformen und Spanen. Die Verarbeitung kann auf zwei Wegen erfolgen:

- Kaltumformen und anschließendes Vergüten.
- Presshärten: Nach Austenisierung unter Schutzgas (→) bei $>950\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird im wassergekühlten Werkzeug umgeformt und dabei auf $100\ldots200\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgekühlt (→). Ein Anlassen ist meist nicht erforderlich.

Das martensitische Gefüge erreicht Zugfestigkeiten bis zu 1350 MPa (bauteilabhängig). Komplexe Teile werden in 2 Schritten gefertigt:

- Vorform durch Kaltumformung,
- Endform durch Presshärten (wie oben).

Flacherzeugnisse (Bleche und Bänder):

Temperaturgeregelte Warmumformung erzeugt durch möglichst niedrige Walz-Endtemperatur mit beschleunigter Abkühlung ein feinkörniges Gefüge mit hoher Kaltzähigkeit.
Es wird **nomalisierendes Umformen** genannt, weil es das Normalglühen entbehrlich macht.

Eine Rekristallisation des Austenits mit Kornwachstum wird dabei unterdrückt. In gleichem Sinne wirken unlösliche Ausscheidungen von Carbiden, Nitriden oder Carbonitriden.

Beispiel: Stahl X41VcrMoV5-1

Zustand	R_m MPa	$R_{0.2}$ MPa	A %
normal vergütet	1900	1600	7
austenitformgehärtet	2600	200	7

Anwendung dieses Verfahrens ist auf Teile mit einfacher Geometrie und aus höher legierten Stählen beschränkt.

Beispiel: Stahl 22MnB5

Zustand	R_m MPa	$R_{0.2}$ MPa	A %
Lieferzustand	600	370	26

Bor senkt in kleinsten Mengen (0,001...0,005 %) die kritische Abkühlgeschwindigkeit.

Schutzgas ist erforderlich, um eine Verzunderung zu vermeiden. Die z.T. abplatzende Schicht verschmutzt Bauteil und Werkzeug.

Zunderschutz: Aufbringen von Sprühlack auf das kaltgeformte Rohteil, einem 6...7 μm dicken Nanokomposit aus Glas, Polymer und Al. Es besitzt zugleich Gleiteigenschaften zur Schonung der Umformwerkzeuge.

(Nano-X GmbH)

Nachteil ist die Verweilzeit im Werkzeug nach der Umformung (8...10 s), dadurch nur ca. 2...3 Stück/min.

Verwendung: Sicherheitsbauteile in Karosserien wie z.B. A- und B-Säulenverstärkung (Vectra), Schweller, Seitenaufprallschutz, Stoßfänger, Rahmenenteile, Bodenplatte (Passat).

5.5.3 Thermomechanische Behandlung TM

Verfahren wurden zunächst für warmgewalzte Flacherzeugnisse entwickelt, um C-arme Stähle mit geringen LE-Anteilen (wichtig für Schweißeignung und Kaltformbarkeit) eine höhere Streckgrenze zu geben. Die Stähle enthalten V, Ti und Nb < 0,1 % (mikrolegiert), die als Carbonylitide *mehrach* wirken:

- Sie begrenzen das Kornwachstum im austenitischen Zustand,
- verzögern die Rekristallisation, dadurch
- sehr feinkörnige Umwandlung des verformten Austenits zu übersättigtem Ferrit, der bis zum Aufhaspeln warmauslagert.

TM-Behandlungen erzeugen Gefügezustände, die allein durch Wärmebehandlung nicht herstellbar sind. Der Vorgang kann nicht wiederholt werden!

Die Verfahren unterscheiden sich durch den Zeitpunkt der Verformung (Bild 5.45):

- **vor/während** oder **nach** der Umwandlung des Austenits

und in der Lage der Umwandlungstemperatur:

- Umwandlung in der **Perlit-**, **Bainit-** oder **Martensitstufe**.

Die Anwendung der thermomechanischen Behandlung hat sich von den Flacherzeugnissen auch auf andere Erzeugnisse erweitert.

Hochfester Federstahl für den Fahrzeugbau

Das Vormaterial des Stahles 54CrSi6 wird in zwei Stufen bei 900 °C und bei 750 °C gewalzt, dann die Feder gewickelt, martensitisch umgewandelt und angelassen. Es entsteht ein sehr feinkörniges Gefüge ohne Carbidsäume auf den Korngrenzen mit Steigerung der Zähigkeit und Dauerfestigkeit.

Wälzgerstahl 100Cr6. Rohrvormaterial wird thermomechanisch reduziert und noch warm in einem Trennprozess (→) die weichen Rohlinge abgetrennt. Es entsteht eine feinere Carbidverteilung als beim konventionellen GKZ-Glühen, das damit eingespart werden kann.

Bei den unlegierten Baustählen wurden die Festigkeitsstufen durch steigende C-Gehalte (Zementitgehalt). in Verbindung mit Mischkristallverfestigung durch die LE erreicht. Damit sinken die Eignung zum Kaltumformen und Schweißen sowie die Zähigkeit als Sicherheit gegen Sprödbruch.

Bei den höherfesten Baustählen wird deshalb der Gehalt an Kohlenstoff und LE niedrig gehalten, und höhere Festigkeit durch das Zusammenwirken von festigkeitssteigernden Maßnahmen (→ Tafel 2.15 und Bild 4.1) erreicht.

Beispiel: mikrolegierter, perlitischer Stahl

	R_m MPa	$R_{0.2}$ MPa	A %	KV J	T_u °C
normalisiert	550	450	30	92	-80
TM-behandelt	710	610	21	61	-60

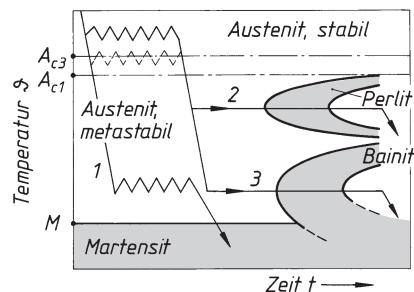


Bild 5.45 Schematische Darstellung theromechanischer Behandlungen im ZTU-Schaubild:
1 Austenitformhärten und TM-Behandlungen mit Umwandlung in der 2 Perlitstufe, 3 Bainitstufe

Hinweis: Einer der Stahl-Innovationspreise 2006 für das Max-Planck-Institut für Eisenforschung.

Die Festigkeit steigt auf 2300 MPa. Dadurch sind Federn mit **15 % weniger Gewicht** möglich. Das Verfahren ist für eine wirtschaftliche Serienfertigung geeignet und ergibt reproduzierbare Eigenschaften.

Trenpro®-Verfahren reduziert das bisherige vielstufige Verfahren bis zum (noch ungehärteten Weichring) auf drei Arbeitsgänge. Der eigentliche Trennprozess liefert je nach Durchmesser bis zu 1000 Ringe/min.

(Mannesmann-TU-Freiberg)

5.6 Verfahren der Oberflächenhärtung

5.6.1 Überblick

Die Eigenschaften Härte und Zähigkeit verlaufen in Werkstoffen fast immer entgegengesetzt, beide lassen sich in **einem** Gefüge nicht maximieren. Viele Bauteile (→) benötigen jedoch an den Be- rührungsstellen mit anderen Bauteilen hohen Verschleißwiderstand (Oberflächenhärte) und einen zähen Kern als Sicherheit gegen spröde, verformungslose Brüche. Hierzu sind zahlreiche Verfahren entwickelt worden (Tabelle 5.10).

Beispiele für Bauteile: Kurbel-, Nocken- und Keilwellen, Zahnräder, Kupplungssteile, Ketten- und Raupenantriebe, Werkzeuge

Auswahl der Verfahren geschieht technisch nach:

- Gestalt, Größe und Werkstoff, wirtschaftlich nach
- Masse und Stückzahl

Tabelle 5.10: Übersicht: Stoffeigenschaftändern für die Oberfläche (DIN 8580)

Verfahrensgruppe	Verfahren, Hinweise auf Abschnitte im Lehrbuch
Verfestigen durch Umformen	5.6.6 Verfestigungswalzen, oder Verfestigungsstrahlen
Wärmebehandlung	5.6.1 Randschichthärteten (Flamm-, Induktions- und Laserhärten, Umschmelzhärten) 5.6.3 Einsatzhärten, 5.6.4. Nitrieren 5.6.5 Borieren, Chromieren, Aluminieren

5.6.1 Randschichthärteten

Bei diesen Verfahren wird das Gefüge nur in einer Randschicht austenitisiert bzw. aufgeschmolzen, so dass nach sofortiger, schneller Abkühlung martensitische bzw. ledeburitische Gefüge entstehen. Dazu sind Energiequellen hoher spezifischer Leistung erforderlich, damit nur die Randschicht die Abschrecktemperatur erreicht.

Verfahren der Randschichthärtung. Die Benennung erfolgt nach der Wärmequelle:

- **Flammhärten** mit Brenngasen,
- **Induktionshärten** über Induktionsspulen,
- **Laserhärten** mit Laserstrahlen.

Mit steigender **spezifischer Leistung** (→) sinken Verzug beim Härteten, Randhärtetiefe und die Größe der Wärmeeinflusszone (WEZ).

Begriff: Spezifische Leistung, Quotient aus Leistung (in kW) und Fläche A (in cm^2). Die Verfahren unterscheiden hierbei stark.

Wärmequelle	Spez. Leistg. kW/cm ²
Schmelzen (Salze, Metalle)	0,1
Flammen von Brenngasen	1
Induktions- und Wirbelströme	10
Laser- und Elektronenstrahlen	100

Die schnelle Erwärmung verschiebt die Umwandlungspunkte nach oben (Hysterese), so das höhere Temperaturen als beim normalen Härteten erforderlich sind, damit die Austenitisierung vollständig abläuft. Die Martensitzzone reicht nur so tief, wie das Gefüge austenitisiert und mit $> v_{\text{crit}}$ abgeschreckt wurde.

Vorteil des Randschichthärtens: Sperrige Teile, die zu Verzug neigen oder zu groß sind, brauchen nicht durchgreifend erwärmt werden. Sie können partiell, d.h. nur an den verschleißbeanspruchten Stellen gehärtet werden.

Gehärtet wird meist im vergüteten Zustand. Dabei entsteht zwischen vergütetem Kern und hartem Rand eine weichere Zwischenschicht, die Wärmespannungen ausgleichen kann.

Einflussgrößen für Härte und Randhärtetiefe sind:

Die Härte **steigt** mit dem C-Gehalt des Stahles.
Die Randhärtetiefe **steigt** mit dem Gehalt an LE und **sinkt** mit steigender spez. Leistung.

Flammhärtén:

Wärmquelle sind gasbetriebene Brenner, deren Formen den Konturen des Werkstückes angepasst sind. Brenner und Werkstück führen gesteuerte Bewegungen aus, wofür spezielle Härtemaschinen, z.T. Automaten eingesetzt werden.

Linienhärtung wird für größere Flächen, z.B. an langen Wellen, Führungsbahnen und breiten Zahnrädern angewandt. Brenner und Brause bewegen sich dicht hintereinander über die Fläche (Bild 5.46). Der Vorschub muss so bemessen sein, dass die Randschicht in der gewünschten Tiefe austenitisch ist, ehe die Abschreckung durch die Brause erfolgt

Mantelhärtung ist für kleine Oberflächen geeignet. Der Brenner überdeckt die zu härtende Fläche oder führt Pendelbewegungen aus, um sie zu überdecken. Zylindrische Teile rotieren vor dem Brenner, bis ein „Mantel“ die Abschrecktemperatur besitzt und eine Brause das Abschrecken übernimmt.

Induktionshärtén

Energiequelle ist der elektrische Strom. Er wird mit wassergekühlten Spulen oder Schleifen als Induktor durch Induktion im Werkstück erzeugt (Transformatorprinzip).

Das Werkstück ist Eisenkern, die Randschicht stellt die kurzgeschlossene Sekundärspule dar. Ein physikalischer Effekt bewirkt, dass die Induktionsströme mit steigender Frequenz (→) in die Randzone abgedrängt werden (Skineffekt = Hautwirkung). So wird die eingebrachte Energie dort konzentriert und die Randschicht schnell erwärmt.

Das Abschrecken erfolgt mit Wasser, bei sehr dünnen Querschnitten (Sägeblätter) durch Selbstabschreckung über den kalten Kern.

Anwendung auch zum Erwämen von Werkstücken bei der Warmumformung und zum Löten.

Werkstoffe für die Randschichthärtung

Geeignet sind Vergütungsstähle DIN EN 10083. Bessere Eignung für rissfreie Aufnahme der Spannungen durch Temperaturwechsel haben:

Stähle für Flamm- und Induktionshärtén, DIN 17212 (zurückgezogen):

- unlegiert: Cf35...Cf70 (4 Sorten),
- niedrig- 45Cr2; 38Cr4; 42Cr4;
- legiert: 41CrMo4; 49CrMo4.

Stahlguss für Flamm- und Induktionshärtung SEW-835 mit ähnlichen Zusammensetzungen:

- G36Mn5; G46Mn4; G42CrMo4;
- G50CrMo; G50CrV4.

Gusseisen und Temperiung sind härtbar, wenn das Gefüge vorwiegend perlitisches und der Graphit feinlamellar oder kugelig vorliegt.

- **Gusseisen:** GJL-400, GJS-600-3, GJS-700-2
- **Temperiung:** GJMB-450-6; GJMB-550-4; GJMB-650-2

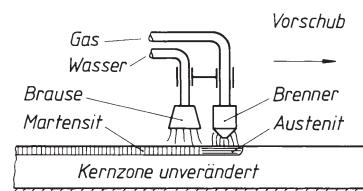


Bild 5.46 Linienhärtung

Gegenüber dem Flammhärtén wird die 10-fache Energie eingeleitet. Es ist auch für Teile mit dünnen Querschnitten geeignet. Die Randhärtetiefe ist frequenzabhängig (Tabelle):

Bereich	Frequenz	Härtetiefe mm
Netzfrequenz	50 Hz	bis 70
Mittelfrequenz	1...10 kHz	16...5
Hochfrequenz	0,25...30 MHz	1,0...0,3

Vorteile: Das Verfahren erzeugt keine Abgase, Verzunderung, Verzug und Energieverbrauch sind gering, die Behandlungszeit kurz. Die räumlich kleinen Anlagen lassen sich gut in Fertigungsstraßen einstellen

Nachteile: Höhere Kosten für Stromerzeuger und Regelgeräte.

Laserhärteln

Wärmequellen sind Laserstrahlen mit hoher spez. Leistung, so dass die Randschicht in Sekunden die Abschrecktemperatur erreicht. Der kleine Brennfleck erfordert eine schwingende Bewegung des Strahles durch Spiegel um eine Fläche in Spuren „abzurastern“.

Durch die Konzentration der eingebrachten Energie auf kleinstem Raum ist die Erwärmung in die Tiefe gering. Dadurch ist Selbstabschreckung durch die noch kalte Kernzone möglich.

Laser-Verfahren sind günstig für linienförmige Härtezonen, wie z.B. Verschleißkanten von Werkzeugen zum Schneiden und Umformen und schwer zugängliche Bereiche von Werkstücken, z.B. Sacklöcher.

Laser-Umschmelzhärteln

Die Verfahren sind nur für graphitische Eisen-Gusswerkstoffe geeignet. Die Härtesteigerung beruht nicht auf Martensitbildung, sondern auf der schnellen Erstarrung des Gusseisens zu Hartguss mit ledeburitischem Gefüge (→ Bild 6.3).

Bei schnell abgekühltem Gusseisen entsteht ein ledeburitisches Gefüge, der gesamte C-Gehalt liegt dann im Fe₃C, Zementit vor.

Beim Umschmelzhärteln wird ein ähnliches Gefüge durch schnelles Aufschmelzen einer Oberflächenschicht mit nachfolgender Selbstabschreckung erzeugt.

Zum Härteln von Flächen werden schmale Streifen durch Pendelbewegungen des Lasers aufgeschmolzen. Durch den Vorschub des Teiles werden diese zur gewünschten Fläche überlappend nebeneinander gereiht.

Laserhärteln kommt ohne Abschreckmittel aus und gewinnt deshalb an Bedeutung bei der Entwicklung zur „trockenen Fabrik“, die möglichst auf Wasser, Öle, Salzbäder usw. verzichtet, um Probleme und Kosten mit Emissionen und Entsorgung der Reststoffe zu vermeiden. Hierzu gehört auch das Tauchhärteln, bei dem die Werkstücke in Salzbädern kurz erwärmt und sofort abgeschreckt werden.

Erzeugung der Laserstrahlen mit Hochleistungsdioden bis zu 6 kW Leistung.

Daten: Spurbreiten bis zu 40 mm, bei einem Vorschub von 700...200 mm/min, je nach Randhärtetiefe bis zu 2 mm.

Geeignete Werkstoff sind z.B.: **C45, C60, 42CrMoV4, 100Cr6** vergütet,

Beispiele: Führungsleisten, Lagersitze Kurvenscheiben. Turbinenschaufeln: Laserbehandlung der Eintrittskante führt zu verminderter Kavitationsverschleiß und erhöhter Lebensdauer (IWS Dresden).

Hinweis: Ledeburit, das Eutektikum der Legierung Fe-C, besteht aus 64,5 % Eisencarbid in Ferrit mit einer Gesamthärte von 50 HRC.

Wichtig: Unter der aufgeschmolzenen Zone liegt eine austenitisierte Schicht, die bei kaltem Kern wegen der schnellen Wärmeabfuhr zu Martensit umwandelt (unter Volumenvergrößerung). Zur Vorbeugung gegen Risse werden die Teile vorgewärmt (ca. 400 °C) behandelt.

Randhärten betragen 55...60 HRC je nach Vorwärmung bis in 1 mm Tiefe.

Normung: Ermittlung der Schmelzhärtetiefe nach DIN 50190-4/99.

Anwendung: Nockenwellen- und Kipphobelflächen, Umlenkrollen, Führungsbahnen von Werkzeugmaschinen, Härteln von Zylinderlaufbuchsen von Großdieselmotoren im Kompressionsbereich (MAN). Ölverbrauch und Verschleiß sinken. Es werden einzelne Spuren nach verschiedenen Mustern gelegt.

Die Paarung Ledeburit-Ledeburit ist bei höheren Kräften verschleißärmer als Martensit-Ledeburit.

Weitere Nutzungen der Laser:

Laserbeschichten mit Aufschmelzen der Randschicht unter Zufuhr harter, hochschmelzender Stoffe zum Verschleißschutz, auch zur Aufarbeitung verschlissener Flächen (Ventilsitze).

Materialbearbeitung zum Herstellen dünner Bohrungen und Mikrostrukturen (0,5 µm Breite).

Thermochemische Verfahren

Allgemeines Kennzeichen dieser Verfahren ist die chemische Veränderung der Randschicht durch zugeführte Stoffe. Sie dringen aus dem *Spendermittel* über die Oberfläche in das Werkstück ein. Das geschieht durch Diffusion unter folgenden Bedingungen:

- Ein Stoffangebot (Konzentration im Spendermittel ist höher als die im Bauteil,
- bestimmte Temperatur-Zeit-Verläufe.

Spendermittel können *Pulver* (meist als Granulat), *Pasten*, *Salzschmelzen* oder *Gase* sein, sie geben dem Verfahren den Namen.

Die Stoffen gehen in Lösung und/oder bilden intermetallische Phasen. Von großem Einfluss ist die Abkühlgeschwindigkeit. Von ihr hängt es ab, ob Martensit, übersättigte Mischkristalle oder Ausscheidungen entstehen.

Die Struktur der Randschichten lässt sich in Grenzen durch die Verfahrensbedingungen anpassen:

- Stoffangebot (Konzentration des Elementes),
- Temperatur und Einwirkzeit,
- Bauteilwerkstoff (legiert, unlegiert),
- Aktivierung durch Plasmatechnik

Am meisten werden Einsatzhärte- und Nitrierverfahren angewandt. Dazwischen liegen zwei Verfahren, die Kombinationen aus beiden darstellen: Carbonitrieren und Nitrocarburieren

Sie unterscheiden sich in den Arbeitstemperaturen, dadurch wird auch ein verschiedener Schichtaufbau erzeugt (→ Übersicht).

5.6.3 Einsatzhärten

Älteste Verfahren, früher für z.B. Schwertklingen angewandt, um Bauteilen mit weichem, zähen Kern eine harte verschleißfeste Oberfläche zu geben.

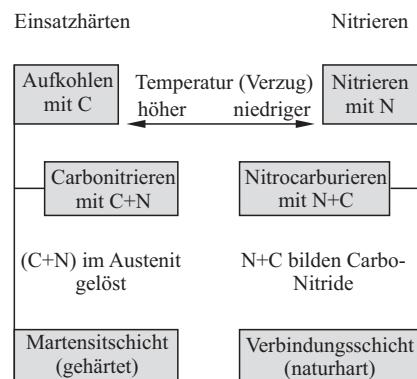
Heute ist es zusätzlich die Dauerfestigkeit von dynamisch belasteten Bauteilen, die durch Einsatzhärten erhöht wird.

Die wichtigsten zugehörigen Verfahren sind:

Verfahren	Element	Zweck
Einsatzhärten	C	Härte, Dauerfestigkeit
Carbonitrieren	C+N	zusätzl. Verschleiß- und Korrosionswiderstand
Nitrieren	N	
Nitrocarburieren	N+C	

Die möglichen Diffusionswege sind klein und zeitabhängig. Die Eindringtiefen der Atome oder Ionen können je nach Verfahren bis zu 2 mm betragen.

Übersicht: Einsatzhärten/Nitrieren



Einsatzhärten ist ein aufwändiges Verfahren. Dafür liefert es unter allen Verfahren die höchste Steigerung der Zahnlankentragfähigkeit (Widerstand gegen die Zerrüttung der Oberfläche durch Grübchenbildung, Pittings) bei zähem Kern mit hoher Dauerfestigkeit (Zahnfußfestigkeit).

Einsatzhärten besteht aus zwei Arbeitsgängen:

- **Aufkohlen** von C-armen Stählen bis zu einer bestimmten Aufkohlungstiefe und dem
- **Härteln** nach Abkühlen aus der Aufkohlungswärme, oder
- **Direkthärten** aus der Aufkohlungswärme (zeit- und energiesparend).

Einsatzstähle sind C-arme Stähle (max. 0,22 % Tabelle 5.10). Weitere Legierungselemente sollen die Durchvergütung auch größerer Querschnitte ermöglichen (Cr, Mn, Mo und Ni), höchste Zähigkeit haben Ni-legierte Sorten (Tabelle 5.11).

Stähle hoher Zähigkeit müssen C-arm sein, dann nehmen sie beim Abschrecken aber nur eine geringe Härte an. Durch Zufuhr von C-Atomen in die Randzone entsteht dort ein härbarer Stahl (mit ca. 0,8 % C). Beim Abschrecken wird der Rand *gehärtet*, der Kern schwach *vergütet*.

Unlegierte Sorten sind für kleine Bauteile geringerer Belastung geeignet,
Mn-Cr-Stähle sind preisgünstig, sie neigen jedoch zur Grobkornbildung,
Mo-Cr-Stähle sind für die *Direkthärtung* geeignet, sie neigen nicht zu Grobkorn,

Tabelle 5.11: Einsatzstähle, Auswahl nach DIN EN 10084/98, mechanische Eigenschaften

Kurzname	Stahlsorte Werkst.- Nummer	HB 30 geglüht (+ A)	Stirnabschreckversuch ¹⁾ Härte HRC (Stirnabstand)				Anwendungsbeispiele
			1,5	5	11	25 mm	
C10E+H	1.1121	131	—				kleine Teile mit niedriger Kernfestigkeit: Bolzen, Zapfen, Büchsen, Hebel
C15E+H	1.1141	143	—				desgl. mit höherer Kernfestigkeit
17Cr3+H	1.7016	174	39	-	-	-	Zahnräder und Wellen im
16MnCr5+H	1.7131	207	39	31	21	-	Fahrzeug- und Getriebebau
20MnCr5+H	1.7147	217	41	36	28	21	besonders für die Direkthärtung
20MoCr4+H	1.7321	207	41	31	22	-	für größere Querschnitte
22CrMoS3-5+H	1.7333	217	42	37	28	22	Getriebeteile höchster Zähigkeit
20NiCrMo2-2+H	1.6523	212	41	31	20	-	mittlere Getriebeteile
17CrNi6-6+H	1.5919	229	39	36	30	22	hochbeanspruchte
18CrNiMo7-6+H	1.6587	229	40	39	36	31	Wellen, Zahnräder

1) Mindestwerte des Streubandes (Stirnabschreckversuch 16.7) für Stahlsorten mit normalen Härtbarkeitsanforderungen (H-Sorten)

Aufkohlen

Stahl kann nur im austenitischen Zustand C-Atome lösen, dazu ist ein Erwärm auf über Ac_3 erforderlich, also über 900 °C. Sofern Kohlenstoff von außen her im Überschuss vorhanden ist, wandern C-Atome in das Randgefüge ein und weiter nach innen. Je höher die Temperatur, umso schneller verläuft dieser Diffusionsvorgang.

C-Gehalt (Randhärte) wird durch das C-Angebot (C-Pegel des Kohlungsmittels), Aufkohlungstiefe (At) durch Zeit und Temperatur beeinflusst.

Hinweis: Ältere Bezeichnungen für Aufkohlen sind *Zementieren* und *Einsetzen*.

Nach dem EKD kann Austenit bei 1147 °C max. 2 % C-Atome auf Zwischengitterplätzen einbauen (Einlagerungs-MK), bei niedrigeren Temperaturen entsprechend der Linie SE.

Einflussgrößen beim Aufkohlen sind:

- C-Gehalt (Randhärte) wird durch das Kohlungsmittel (C-Pegel) gesteuert,
- Aufkohlungstiefe (At) durch die Zeit.
- Höhere Temperaturen erleichtern die Diffusion und verkürzen die notwendige Zeit für eine bestimmte At (Bild 5.47).

Aufkühlungstiefe ist der Abstand senkrecht von der Oberfläche ins Innere bis zu einer Stelle mit 0,3 % C-Gehalt (Bild 5.50).

Bezeichnung $At_{0,3} = 0,8$ mm heißt: Der C-Gehalt ist 0,8 mm unter Oberfläche vom Randwert auf 0,3 % C abgefallen.

Erwünscht ist ein nicht zu *steiler* Abfall des C-Gehaltes von der Randschicht (0,8 %) zum Kern (C-Gehalt des Einsatzstahles).

Kohlenstoff wird über *Spendermittel*, die es in allen drei Aggregatzuständen gibt, an das Werkstück herangebracht:

- gasförmig, Gasaufkühlung, wichtigstes Verfahren für Massenteile,
- flüssig, Salzbadaufkühlung, universell,
- fest Pulveraufkühlung, partielles Tiefaufkohlen großer Teile.

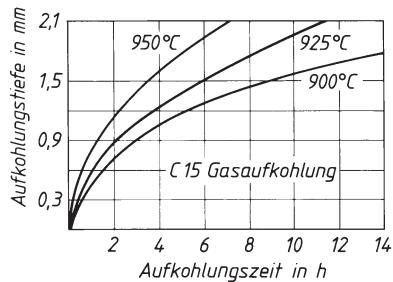


Bild 5.47 Aufkühlungszeit und -temperatur

Erschmelzung und Analyse des Stahles beeinflussen ebenfalls die Aufkühlung. Fremdatome im Austenit behindern die Diffusion der C-Atome. Deshalb brauchen legierte Stähle längere Aufkühlungszeiten. Stähle gleicher Sorte aus verschiedenen Chargen können sich unterschiedlich verhalten.

Pulveraufkühlung

Die Teile werden in Kästen oder Töpfen in Kohlungspulver (Granulat) eingerüttelt, abgedichtet und bei etwa 900 °C geglüht. Das Härteln kann erst nach dem Abkühlen und Auspacken erfolgen.

Vorteile: Günstig für Teile großer Masse mit *stellenweiser* Aufkühlung. Dann ist die Zeit für das Ein- und Auspacken klein gegenüber der Gesamtzeit. Große Aufkühlungstiefen mit *geringen* Kosten herstellbar.

Nachteile: Aufwändiges Ein- und Auspacken, Staubentwicklung, längere Erwärmungszeiten, da das Kohlungspulver ein schlechter Wärmeleiter ist. Ungleichmäßige Temperaturverteilung im Ofenraum führt zu *ungleichmäßiger* Aufkühlung. Der Verlauf des Aufkohlens ist durch Pulver und Temperatur festgelegt und nicht regelbar. Eine Direkthärtung kann nicht durchgeführt werden.

Kohlungspulver enthalten Holzkohle, Koks oder Knochenkohle und Alkaliverbindungen in einer Körnung von 0,5...6 mm. Bei der Aufkühlungstemperatur entsteht ein Gasgemisch aus CO und CO₂. Bariumoxid und -carbonat wirken aktivierend, d.h. sie verkürzen die Kohlungszeit.

Am Werkstück zerfällt das Gasgemisch in



CO₂ reagiert mit dem Kohlenstoff des Spenders nach:



Der C-Gehalt der Randzone erhöht sich zu Anfang schnell, dann langsamer und strebt einem Wert zu, der bei der Temperatur vom CO/CO₂-Verhältnis abhängt, das während des Pulveraufkohlens nicht von außen her beeinflusst werden kann.

Aufkohlung in Salzbädern

Die Teile werden vorgewärmt in wasserfreie Salzschmelzen eingehängt. Die Temperaturen liegen bei 850...930 °C.

Vorteile: Schnelle, gleichmäßige Wärmeübertragung auf alle Werkstücke und kurze Anwärmzeiten. Hohes C-Angebot verkürzt die Aufkohlung. Eine Direkthärtung aus dem Salzbad ist möglich. Lange Werkstücke können teilweise eingehängt werden.

Nachteile: Eine konstante Kohlungswirkung der Bäder verlangt ständige Kontrollen. Die hochgiftigen Cyanidbäder sind durch neue sog. *Regenerationsbäder* ersetzt worden. Cyanid entsteht nur während des Vorganges im Bad. Moderne Anlagen bereiten keine Probleme mit Spülwässern und Altsalzensortung. Damit sind frühere Nachteile der Salzbäder behoben.

Als Salze werden handelsübliche Gemische mit Kaliumcyanat (KCNO) als C-Träger und Carbonaten verwendet.

Das Cyanat zerfällt bei hoher Temperatur und gibt atomares C und N an das Werkstück ab. Bei den hohen Temperaturen wird überwiegend C aufgenommen. Stickstoff erhöht die Löslichkeit des Austenits für C-Atome im Bereich 800...900 °C und begünstigt die Aufkohlung.

Als Tiegelwerkstoff für diese Beanspruchung (Hochtemperaturkorrosion) hat sich Titan bewährt.

Anwendung: Aufkohlung im Salzbad ist günstig für die vollständige Aufkohlung kleinerer Massenteile bei kleinen Kohlungstiefen, auch für Teile, die einseitig aufgekohlt und deshalb teilweise in das Kohlungsbad gehängt werden müssen.

Gasaufkohlung

Die Teile werden mittels gasdichter Retorten in Öfen eingehängt. Massenteile werden meist in Durchlauföfen behandelt. Spendermittel ist ein Kohlenwasserstoff, meist Propan, C_3H_8 , das zu einem Trägergas dosiert zugegeben wird. Es sorgt für *gleichmäßige* Umspülung und Temperaturverteilung.

Das Trägergas entsteht durch unvollkommene Verbrennung von Erdgas und wird von schädlichen Stoffen befreit (SO_2 , H_2O , CO_2). Die Kombination N_2 und Methanol, CH_3OH wird ebenfalls verwendet.

Vorteile: Durch ständige Überwachung und Regelung des Gasgemisches kann die Aufkohlung optimiert werden, sodass der gewünschte C-Verlauf in kürzester Zeit erreicht, Überkohlung und Entkohlung vermieden werden können (Bild 5.48). Sauberes, ungiftiges Verfahren, gut in eine Fließfertigung einzugliedern.

Nachteile: Hohe Anlagekosten für Geräte zur Herstellung und Regelung des Gasgemisches.

Die chemischen Vorgänge gleichen denen der Pulveraufkohlung. Weiterhin laufen ab:

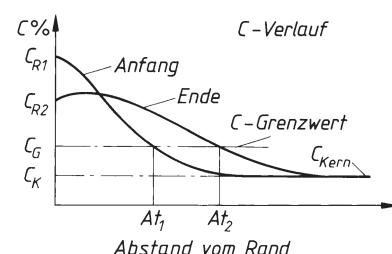
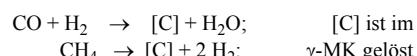


Bild 5.48 C-Verlauf in der Randschicht beim Gasaufkohlen in zwei Phasen:

Phase 1: Mit hohem C-Pegel wird ein überhöhter C-Gehalt im Rand erzeugt, steiler Verlauf bis zur Aufkohlungstiefe At_1 .

Phase 2: Bei niedrigem C-Pegel Diffusion der C-Atome nach innen, bis der gewünschte C-Gehalt im Rand und At_2 erreicht sind.

Carbonitrieren

Carbonitrieren findet bei Temperaturen *über* A_{C1} statt, also im Bereich zwischen den Linien GS und PS (im EKD), das Gefüge besteht aus Ferrit und Austenit.

Infolge der niedrigeren Temperaturen (700...800 °C) wird der Randzone mehr N und weniger C zugeführt als beim Aufkohlen.

Innere Vorgänge: Durch Stickstoff N treten folgende Änderungen ein:

Streng genommen ist die Aufkohlung im Salzbad auch ein Carbonitrieren, da diese Bäder neben C auch etwas N abgeben, der auch in die Randschicht eindiffundiert.

Carbonitriert werden Einsatz- und Vergütungsstähle. Die Schichten haben meist eine Einsatzhärtungstiefe CHD von < 0,5 mm,

Nach dem Anlassen auf 180 °C sind die Teile einbaufertig.

Änderung	Auswirkung
N senkt die Austenitisierungs-Temperatur,	Rand wird durch die (C + N)-Aufnahme während des Carbonitrierens austenitisch,
N senkt die kritische Abkühlgeschwindigkeit, N beschleunigt die Diffusion des C, N ist auch im Martensit enthalten.	mildere Abschreckmittel möglich, kleinerer Verzug, kürzere Zeit bzw. größere Aufkohlungstiefe At, der Adhäsionsverschleiß wird verringert.

Vorteile: Geringer Verzug, da niedrigere Härte-temperatur und mildere Abschreckmittel möglich werden. Die Randschicht erhöht die Steifigkeit dünner Teile und deren Dauerfestigkeit.

Isolierung. Vielfach soll nicht die gesamte Oberfläche aufgekohlt werden. Diese Stellen können mit Pasten oder Lehm (mit Fasern) abgeschirmt werden, galvanisch aufgebrachte Cu-Schichten sind auch für Salzbäder geeignet. Sicherste, jedoch aufwändige, Methode ist das Anfertigen dieser Stellen mit Übermaß und Abspangen vor dem Härteln.

Härten der Einsatzstähle

Nach dem Aufkohlen besteht das Werkstück aus zwei Stahlsorten, die Härtetemperaturen sind verschieden:

Beide Werkstückbereiche sind durch die Aufkohlung *grobkörnig*. Ein sofortiges Abschrecken ergibt dann bei normalen Einsatzstählen:

Kernzone: Unveränderter Einsatzstahl mit ca. 0,2 % C, nicht härtbar! Durch Abschrecken erhöhen sich die Festigkeiten und die Kerbschlag-zähigkeit. Die Abschrecktemperatur liegt zwischen **850 und 900 °C**.

- grobkörniges Kerngefüge mit geringerer Zähigkeit und hoher Übergangstemperatur;
- grobnadeligen Martensit im Rand (überhitzt gehärtet): höherer Anteil an Restaustenit,
- keine maximale Härte.

Für das sofortige Abschrecken sind geeignet:

Randzone: Auf etwa 0,65...0,8 % C aufgekohlter Stahl, dadurch härtbar. Durch richtiges Abschrecken entsteht Martensit mit einer Härte bis zu 64 HRC. Die Härtetemperatur liegt zwischen **770 und 830 °C** je nach Sorte des Einsatzstahles.

Direkhärtestähle, mit Nb, Ti oder B legiert, deren Carbide beim Aufkohlen nicht gelöst sind und das Kornwachstum hindern.

Die Cr-Gehalte sind gesenkt und durch Mo ersetzt, was die Bildung von Restaustenit verringert (Tabelle 5.10).

Bei der Wahl des Härteverfahrens (Bild 5.49) nach dem Aufkohlen (Carbonitrieren) muss das Anforderungsprofil des Bauteiles herangezogen werden (→):

Direkthärten ist Abschrecken aus der Salzbads- oder Gasaufkohlung, günstig durch das Einsparen von Energie und Behandlungszeit. Härteverzug und Restaustenitgehalt werden verringert, wenn die Teile aus der Aufkohlungstemperatur auf die Randhärtetemperatur von 840°C abkühlen (Verschlagenlassen), ehe sie im Warmbad abgeschreckt werden.

Einfachhärten erfolgt nach Abkühlen auf niedrige Temperaturen. Durch die γ - α -Umwandlung ergibt sich eine **Kornfeinung**.

- Erwärmen auf **Kernhärtetemperatur** über Ac_3Kern und Abschrecken in Öl, Warmbad, bei unlegierten Stählen in Wasser, ergibt optimale Kerneigenschaften bei leicht überhitztem Rand. Bei zu hohen C-Gehalten entsteht Restaustenit (geringere Härte).
- Erwärmen auf **Randhärtetemperatur** über Ac_1Rand und Abschrecken ergibt optimale **Randeigenschaften**, der Kern ist unterhärtet, d.h. nicht vollständig austenitisiert, dadurch geringere Zähigkeit und Dauerfestigkeit als möglich.

Doppelhärten war die Aufeinanderfolge der beiden o.a. Verfahren nacheinander mit hohem Verzug und hohen Energie- und Arbeitskosten.

Einfachhärten mit Zwischenglühen wird zum Erleichtern der Bearbeitung angewandt, wenn aufgekohlte Stellen abgespannt werden müssen ($630\ldots650^{\circ}\text{C}$, Bild 5.49).

Einfachhärten mit isothermischer Umwandlung bei etwa $580\ldots680^{\circ}\text{C}$ in der Perlitstufe erzeugt bei legierten Stählen ein günstiges Ausgangsgefüge für die Austenitisierung.

Einsatzhärtungstiefe CHD ist der Abstand eines Messpunktes vom Rand bis zu einer Stelle, welche die **Grenzhärte** (GH) besitzt. GH beträgt 550 HV 1.

Je nach Anforderung ist zu wählen zwischen:

- höchster **Verschleißfestigkeit** der Randschicht (z.B.: Wälzfestigkeit bei Zahnrädern, Wälzlagern, Werkzeugen) oder
- höchster **Dauerfestigkeit** des Kernes (Kerbdauer- und Zahnußfestigkeit).

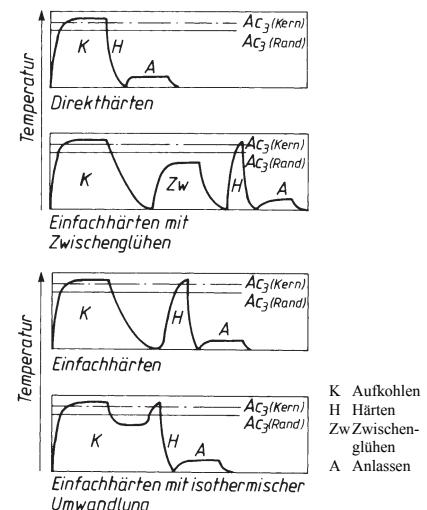


Bild 5.49 Temperatur-Zeit-Schaubilder zum Einsatzhärten

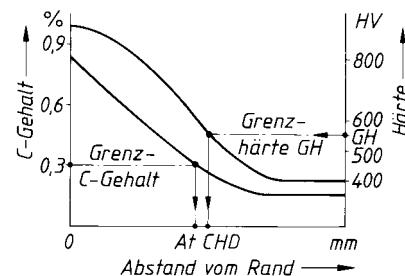


Bild 5.50 Aufkühlungstiefe At und Einsatzhärtungstiefe CHD nach DIN EN ISO 2639/03

Fehler, die beim Einsatzhärten vorkommen, sind: **Weichfleckigkeit** durch ungleichmäßige Aufkohlung bei unsauberen Teilen oder Graffiti-ausscheidungen an der Oberfläche; auch durch Entkohlung beim Wiederwärmern oder zu niedrige Härtetemperatur. Führt zu geringerer Dauerfestigkeit.

Anlassen. Im Anschluss an alle Härteverfahren werden die Teile 1...2 h im Heißluftstrom auf 150...200 °C angelassen.

Schalrenisse nach dem Abschrecken entstehen, wenn der C-Gehalt des Randes zu steil zum Kern hin absinkt. Die harte Schale mit geringerer Dehnung löst sich vom Kern.

5.6.4 Nitrieren, Nitrocarburieren

Verfahrensziel: Nitrierschichten verbessern Verschleißverhalten, Dauerfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Bauteile, diese Eigenschaften bleiben bis unterhalb der Entstehungstemperatur erhalten.

Die Eigenschaften beruhen auf einer Randzone mit *Nitriden* bzw. *Carbonitriden* (Bild 5.51), die durch Aufnahme von Stickstoff N (oder N+C) entstehen. Die Temperaturen liegen zwischen 500...580 °C. Es erfolgen kein Abschrecken und keine Gefügeumwandlung. Die Maßänderungen sind klein, eine Nacharbeit ist meist nicht erforderlich.

Nitrieren wird bei Fertigteilen angewandt.

Nitrier- und Carbonitierschichten sind zweilagig aufgebaut:

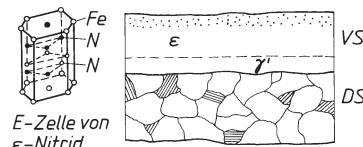


Bild 5.51 Nitridschicht, schematisch (H. Kunst)

Verbindungsschicht VS, 0...30 mm dick, mit Fe-Nitriden, mit einem Porensaum, der etwa 30...50 % der Schichtdicke ausmacht. Die Härte liegt zwischen 500...1000 HV 0,1.

Diffusionsschicht DS (Ausscheidungsschicht), 20...1000 mm dick, mit zwangsgelöstem N oder ausgeschiedenen Nitriden (bei langsamer Abkühlung). Die Härte liegt zwischen 300...1200 (1500) HV 0,1.

Gefügeänderung

Stahl ist bei den o.a. Temperaturen ferritisch und löst nur ca. 0,1 % N auf Zwischengitterplätzen. Der Überschuss bildet die sog.

Verbindungsschicht (VS) aus den Fe-Nitriden, bei Anwesenheit von LE auch Sondernitriden. Die Zusammensetzung der VS kann beim Plasmanitrieren gesteuert werden (monophasige VS). Mit C wird die ε-Phase bevorzugt gebildet.

Der *Porensaum* kann durch eine oxidierende Behandlung verdichtet werden (Korrosion!).

Darunter liegt die wesentlich dicke Diffusionsschicht (DS), in der die N-Atome gelöst sind (Mischkristallschicht). Durch Übersättigung und Ausscheidungen steht sie unter Druckeigenspannungen, wichtig für die Dauerfestigkeit der Bauteile.

In der VS kommen zwei Fe-Nitride vor:

γ-Phase (Fe_4N : kubisch-flächenzentr.) E-Zelle mit N im Würfelzentrum), zäher als die
ε-Phase ($\text{Fe}_{2,3}\text{N}$, hexagonal), N-reicher und korrosionsbeständiger.

Sondernitride werden von z.B. Al, Cr, Mo und V, gebildet, sie haben größere Härtegrade und sind in den *Nitrierstählen* enthalten.

Carbonitride bilden sich, weil C- und N-Atome ähnliche Atomdurchmesser haben und sich gegenseitig ersetzen können. Sie sind weniger spröde und haben kleinere Reibzahl.

Der Stickstoffgehalt fällt zum Kern hin langsam ab, so dass eine gute Verankerung von Schichten und Kern besteht. Als Maß für die Dicke der Nitrierschichten gilt die **Nitrierhärtetiefe Nht**. Es ist der Abstand eines Messpunktes von der Oberfläche, der die sog. Grenzhärte (GH) besitzt. Sie liegt 50 HV 0,5 über der Kernhärte (KH): $GH = KH + 50 \text{ HV } 0,5$ (Bild 5.52).

Gegenüber dem Martensit (Metallbindung) geben Nitridschichten (Metall-Nichtmetall) dem Bauteil andere Eigenschaften:

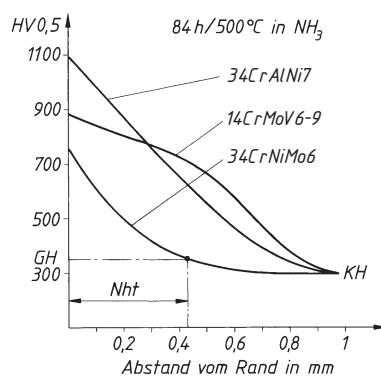


Bild 5.52 Härteverlauf bei verschiedenen Stählen nach dem Gasnitrieren und Nitrierhärtetiefe nach DIN 50 190-3/79

Tabelle 5.12: Eigenschaften der Schichten

Eigenschaften		Ursache, Auswirkung
Höhere Härte (700...1500 HV)		Nitride sind naturharte intermetallische Phasen (Einlagerungsstrukturen, ähnlich TiC) mit ca. 2000 HV 0,05
Anlassbeständigkeit bis etwa zur Bildungstemperatur		Bei langsamer Abkühlung entstehen keine metastabilen Gefüge
Geringere Adhäsionsneigung (Fressen) gegenüber Metallen		Typische Eigenschaften der Nitride, kleinere Reibzahl m, geringe Neigung zum Kaltschweißen (adhäsiver Verschleiß)
Hoher Korrosionswiderstand durch Nachoxydation erhöht		Geringe Reaktionsbereitschaft der N-haltigen Phasen, chemische Verbindung mit gesättigter Elektronenschale

Nitrierstähle sind *Vergütungsstähle*, weil die dünne Schicht (0,1...0,3 mm) bei hohen Flächenpressungen in einen zu weichen Kern eingedrückt würde. Als Nitridbildner enthalten sie Mo, V und Al (Tabelle 5.13).

Eine Vorbehandlung der Teile besteht i.A. in folgenden Arbeitsgängen

- Vergüten (Stützwirkung für die Schichten),
- Spannungsarmglühen (Verzugsfreiheit),
- Reinigung (Gleichmäßigkeit der Schicht).

Tabelle 5.13: Nitrierstähle DIN EN 10085/01

Stahlsorte Kurzname	Werkst. Nummer	Eigenschaften vergütet					Eigenschaften und Anwendungsbeispiele
		Durchmesser- bereich mm	$R_{p0.2}$ N/mm	A %	KV J	HV1	
31CrMo12	1.8215	... 40	850	10			warmfest, für Teile von Kunststoffmaschinen
		41 ... 100	800	11	35	800	
31CrMoV9	1.8519	... 80	800	11	35	800	ionisierte Zahnräder hoher Dauerfestigkeit
		81 ... 150	750	13	35		
15CrMoV-9	1.8521	... 100	750	10	30	800	größere Nitrierhärtetiefe, warmfest
		101 ... 250	700	12	35		
34CrAlMo5	1.8507	... 70	600	14	35	950	Druckgießformen für Al
35CrAlNi7	1.8550	70 ... 250	600	15	30	950	für große Querschnitte

Formelzeichen: $R_{p0.2}$ 0,2-Dehngrenze, A Bruchdehnung, KV Kerbschlagarbeit (ISO-V-Probe)

Grundsätzlich können alle Eisenwerkstoffe durch Nitrieren behandelt werden. Dabei ist oft nicht die Oberflächenhärte das Ziel, sondern die Zunahme der **Dauerfestigkeit** infolge der Druckeigenspannungen, welche in der Diffusionsschicht entstehen, besonders nach einem Abschrecken (Tenifer-Verfahren).

Die Korrosionsbeständigkeit von nitrocarburierten Schichten wird durch eine Nachoxydation erhöht (Stellung in der Spannungsreihe zwischen Cu und Ag).

Nitrierverfahren

Ausgehend vom *Gasnitrieren* haben sich weitere Verfahren entwickelt. Sie arbeiten mit anderen Spendermitteln und Verfahrensbedingungen und können Schichten mit unterschiedlicher Struktur in *kürzeren* Zeiten herstellen.

Gasnitrieren bei ca. 520 °C in Ammoniak, NH₃. Durch katalytische Wirkung des Fe spaltet das NH₃ atomaren Stickstoff ab. Nitriertiefen sind werkstoffabhängig (Bild 5.53), größere erfordern lange Zeiten bis zu 100 h.

Kurzzeitgasnitrieren mit Gasmischungen, die auch C und O enthalten. Dadurch werden die langen Glühzeiten reduziert (etwa auf 50 %).

Plasmanitrieren (KLÖCKNER Ionitrieren) und Plasmanitrocarburieren

Die Teile werden in einer Vakuumkammer als Kathode eingebracht. Durch eine Spannung ab 350 V werden die Spendergase ionisiert und prallen mit hoher Geschwindigkeit auf das Werkstück.

Hinweis: Die Temperaturen der Verfahren müssen vom Vergüten zum Nitrieren hin abfallen, damit das Vergütungsgefüge nicht durch Nachanlassen verschlechtert wird.

Je nach Anforderungsprofil können dadurch höchste Härte, gute Gleiteigenschaften und Dauerfestigkeit, jeweils in Verbindung mit erhöhter Korrosionsbeständigkeit oder Anlassbeständigkeit, erreicht werden.

Anwendung: Schnecken und Zylinder für Kunststoffpressen und -extruder, Großzahnräder, Spindeln für Werkzeugmaschinen, Gehäuse für Differentialgetriebe.

Volumenzunahme beim Nitrieren entsteht durch die Zufuhr von Materie und Bildung weniger dichter Kristallarten. Sie muss bei kleinen Toleranzen berücksichtigt werden. Kantenaufwölbung entsteht bei rechtwinkligen Absätzen (Nuten). Die Grate sind sehr spröde und neigen zum Ausbrechen. Abhilfe durch Abziehen mit Ölstein oder – wenn möglich – vorheriges Fasen.

Begriff: Plasma. Gase werden in Vakuum durch elektrische Felder *ionisiert*, d.h. in gleich viele Ladungsträger zerlegt:

Positive Gas-Ionen + Negative Elektronen

In diesem Plasmazustand können sie in elektrischen Feldern beschleunigt werden.

Verfahrensmerkmale	Beschreibung, Auswirkung
Aufheizung des Werkstückes (350...580 °C).	Kinetische Energie setzt sich in Wärme um.
Der Aufprall der Teilchen lässt Fe-Teilchen abstäuben, Entstehung von oberflächlichen Gitterfehlern, die Diffusion wird beschleunigt.	Behandlungszeit sinkt (60...360 min.), die Verbindungsenschicht wird dünner und zäher.
Regelbarkeit der Gasatmosphäre.	Möglichkeit einphasiger Schichten (γ' oder ε)
Nicht zu härtende Stellen können zuverlässig abgeschirmt werden.	Abdecken der Stellen mit Pasten oder Blechblenden, Gewinde mit Stopfen

Im Unterschied zu anderen Nitrierverfahren besteht die Möglichkeit, den Schichtaufbau durch Änderung der Verfahrensbedingungen zu gestalten, auch während des Nitrierens.

Salzbadnitrieren erfolgt durch Einhängen in Salzschröpfen von 550...580 °C. über 30...180 min. Durch besseren Wärmetransfer sind kürzere Behandlungszeiten möglich. Bei diesen Temperaturen wird vom Ferrit überwiegend Stickstoff aufgenommen. Je nach Art des Werkstoffes lassen sich folgende Verbesserungen erzielen:

Hochlegierte Werkzeugstähle werden fertigbearbeitet (gehärtet und angelassen) bei einer Temperatur behandelt, die 30...50 °C unter der letzten Anlasstemperatur liegen muss. Dann wird das Härtungsgefüge nicht verändert.

Es werden 3...4-fache Standzeiten gegenüber nichtnitrierten Werkzeugen beobachtet, wobei die Nitrierbehandlung nur Minuten bis 0,5h dauert.

Unlegierte Stähle erhalten mangels besonderer Nitridbildner eine weichere Verbindungszone von ca. 400 HV5 mit gutem Verhalten gegenüber adhäsivem Verschleiß.

Tenifer®-Verfahren ist Badnitrieren unter Belüftung. Die Sauerstoffzufuhr beschleunigt die Stickstoffaufnahme und verkürzt die Tauchzeiten. Wasserabschreckung (Quench) aus dem Nitrierbad erzeugt eine Diffusionsschicht aus stickstoffübersättigtem Ferrit. Sie bewirkt eine Steigerung der Biegefestigkeit um 40...100 % (Bild 5.53).

Dadurch können unlegierte Stähle, z.B. C15E, C45E, anstelle von niedrig legierten Stählen verwendet werden. Der abgeschreckte Zustand ist metastabil, so dass bei späterer Erwärmung Ausscheidungsvorgänge ablaufen, die zu weiterer Versprödung der Nitrierschicht führen.

QPQ-Verfahren (Quench-Polish-Quench) verbessert die Korrosionsbeständigkeit weiter durch ein zwischen geschaltetes Polieren, Läppen oder Strahlen mit Nachoxidation bei 370 °C/Wasser.

Verfahrensbedingungen sind: Temperatur, Spannung, Strom, Gasart und Druck. Damit lassen sich für jeden Fe-Werkstoff die günstigsten Werte einstellen.

Nitriersalze sind Kaliumcyanat mit Kaliumcarbonaten gemischt. Cyanat zerfällt unter Wirkung von Sauerstoff in Carbonat und gibt sowohl N als auch C ab. Die Umweltgefährdung durch Abluft und Abwasser nebst Abfallentsorgung wird bei neuen Anlagen minimiert.

(Durferrit).

- Die Oberflächenhärte steigt von 64 HRC (ca. 868 HV) auf max. 1400 HV,05,
- eine evtl. vorhandene Weichhaut infolge Randentkohlung verschwindet,
- Reibungsverminderung bei Werkzeugen der spanlosen Formung, höhere Standzeiten auch bei Warmarbeitswerkzeugen.
- Nitrierschichten verhindern die Aufbauschneide bei der Zerspanung.

Für nur mittelbeanspruchte Stähle ist das Nitrocarburieren günstiger als Einsatzhärten, da wegen des geringeren Verzugs das Nachschleifen entfallen kann.

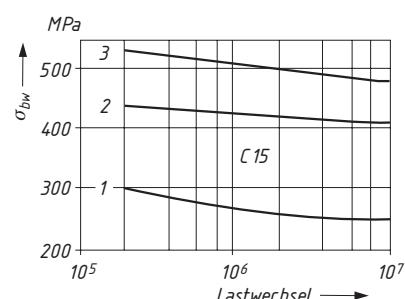


Bild 5.53 Erhöhung der Dauerfestigkeit durch Nitrieren (DEGUSSA)
1 unbehandelt, 2 badnitriert Luftabkühlung,
3 Tenifer-Verfahren, Wasserabkühlung

Anwendungen: Die dekorative, reflexfreie, schwarze Oberfläche ermöglicht einen Ersatz für Brüniere, Phosphatieren, Hartchrom- oder Zinkschichten, je nach Anforderung.

Anwendung: Nitrocarburieren wird für Teile des Fahrzeug- und Motorenbaus angewandt, wenn sie nicht zu großen **Flächenpressungen** unterliegen und wechselnd oder schwelend auf Biegung beansprucht werden (→):

Beispiele: Zahnräder für Getriebe, Wasser- und Ölpumpen; Kipphebel, Zylinderbuchsen, Steuereteile in der Hydraulik; Stanz- und Automatenteile für Nähmaschinen, Büro-, Textil- und Verpackungsmaschinen.

5.6.5 Weitere Verfahren (Auswahl)

Borieren (Tabelle 5.14), ähnlich dem Pulveraufkohlen oder Pastenborieren, erzeugt Schichten bis 250 mm Dicke in ca. 5 h bei 900 °C. Dadurch können keine gehärteten Teile behandelt werden.

Die hohe Härte ergibt hohen Widerstand gegen *abrasiven* Verschleiß durch harte körnige Stoffe (dafür dickere Schichten > 150 mm). Das Fe₂B ist stabil bis zu 1000 °C und neigt nicht zum Fressen (Adhäsionsverschleiß). Dafür reichen dünnere Schichten aus.

Anwendung: Alle Stähle, Gusseisensorten und Sintereisen für Werkzeuge und Bauteile, die mit verschleißenden Massen in Berührung stehen. Wegen der umständlichen Handhabung wird es dort eingesetzt, wo andere Verfahren geringere Verschleißbeständigkeit ergeben.

Anwendungsgrenzen: Stähle mit höherem Si-Gehalt und auch HSS-Stähle sind nicht borierbar. Werkzeuge müssen in milden Abschreckmedien gehärtet bzw. vergütet werden, um ein Abplatzen der Schicht zu vermeiden.

Die Schichten aus FeB und Fe₂B wachsen stängelartig auf und haben gute Verankerung zum unlegiertem Stahl. Mit zunehmendem Gehalt an LE nimmt diese Struktur und auch die Zähigkeit ab. Deshalb sind dünne Schichten auf niedriglegierten Stählen günstiger, ebenso wie einphasige aus dem zäheren Fe₂B.

Die Maßzunahme beträgt ca. 25 % der Dicke der Boridschicht und wird am besten durch Vorversuche geklärt, wenn Teile mit Untermaß gefertigt werden sollen.

Beispiele: Sieblochbleche und Strangpressmatrizen für keramische Massen, Extruderschnecken, Glasformwerkzeuge, Loch- und Prägestempel, Kugelhahnküken, Ölpumpenräder, Armaturen für die Förderung verschleißender Flüssigkeiten (z.B. Kalkmilchpumpen).

Hinweis: Wegen der Unlöslichkeit von C und Si in der Boridschicht werden diese Elemente nach innen abgedrängt. Dadurch könnte unter der Schicht ein ferritischer Stahl entstehen, der nicht austenitisierbar ist.

Tabelle 5.14: Weitere thermochemische Verfahren

Verfahren	Element	Spender-Mittel	Arbeits-Temperatur	Phase	Härte HV 0,1	Schichteigenschaft, (Schutz gegen ...)
Aluminieren	Al	P, B	800...1100	Al-MK, Al ₂ O ₃		zunderbeständig bis 950 °C, zum Schutz C-armer Stähle
Borieren	B	P	800...1000	Fe ₂ B (FeB)	...2000 ...2100	Abrasionsverschleiß, Tribooxydation, evtl. Härtung muss nachträglich erfolgen
Chromieren	Cr	P, B	900...1200	Fe-Cr-Mk		korrosionsbeständig durch über 13 % Cr
Sherardisieren	Zn	P	400	Fe-Zn		korrosionsbeständig, für Kleinteile (Schrauben, Muttern), auch vergütet!
Silizieren	Si	P, G		Fe-Si		in Verbindung mit Al angewandt
Sulfonitrieren	N, S	B	< 600	FeS		Adhäsionsverschleiß
Vanadieren	V	P, B	1000...1100	VC, V ₂ C	350...400	Festkörperreibung, Spindeln, Werkzeuge

Spendermittel: P Pulver (Granulat), B SalzsSchmelze, G Gas

5.6.6 Mechanische Verfahren

Die Verfestigung einer dünnen Randschicht durch Druckkräfte erzeugt einen Eigenspannungszustand. Die Oberflächenschicht müsste durch Verformung länger und dünner werden. Da sie vom Basiswerkstoff daran gehindert wird, gerät sie unter Druckspannungen.

Bei Belastung entstehen max. Biege-Zugspannungen in der Randfaser, insbesondere auch im Grunde von Kerben. Druckeigenspannungen vermindern sie um ihren Betrag. Meist wird durch die Verfestigung die Rauhtiefe kleiner. Als Folge dieser beiden Veränderungen werden Anriss und Rissausbreitung behindert. Die Teile ermüden erst bei höheren Spannungen.

Druckeigenspannungen erhöhen die Dauerfestigkeit der Bauteile (Bild 5.54).

Verfestigungswalzen

Rotationssymmetrische Bauteile können durch angepresste Walzen oder Rollen (abgestützt) behandelt werden, meist vergütet oder auch im badnitrierten oder einsatzgehärteten Zustand.

Um eine Schädigung des Werkstoffs zu vermeiden müssen die Einflussgrößen

- Rollen-Durchmesser
 - Rundungsradius
 - Walzkraft
- } Verformungsgrad
 } und
 } Tiefenwirkung

durch Versuche optimiert werden, um die Dauerfestigkeit maximal zu steigern. Damit kann der Einfluss der Kerben auf die Dauerfestigkeit kompensiert werden (Bild 5.55).

Verfestigungsstrahlen (Kugelstrahlen)

Teile, die nicht rotationssymmetrisch geformt sind, können oberflächlich durch Bestrahlung mit kleinen Stahlkugeln verfestigt werden.

Schmiede- und Warmbehandlungsteile weisen oft eine geringe Randentkohlung oder -oxydation auf. Das ergibt geringere Oberflächenhärte und auch geringere Dauerfestigkeit des Bauteils. Auch hier kann durch Bestrahlung diese Erscheinung wieder rückgängig gemacht werden.

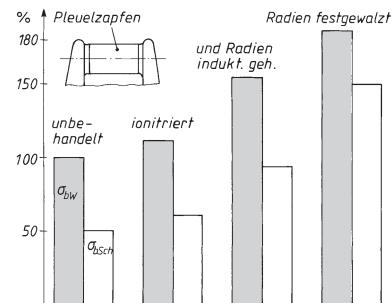


Bild 5.54 Steigerung der Dauerfestigkeit von Kurbelwellen aus GJS-700-2 durch verschiedene Verfahren

Anwendung: Festwalzen von Übergangsradien, Rillen und Nuten an z.B. Kurbelwellen im vergüteten Zustand mit einer Erhöhung der Dauerfestigkeit um 80...150 %.

Bekannt ist die höhere Dauerfestigkeit von Schrauben mit gerollten Gewinden gegenüber solchen mit geschnittenen. Dabei ist der Anstieg größer, wenn nach dem Vergüten das Gewinde gerollt wird, allerdings bei kleinerer Standzeit der Werkzeuge.

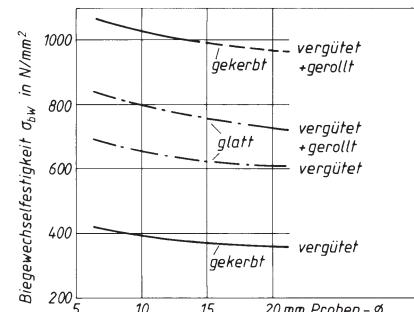


Bild 5.55 Aufhebung der Kerbwirkung durch Verfestigungswalzen

Anwendung: Schmiedeteile mit Zunderschichten, z.B. Pleuelstangen, Fahrwerksteile, Schrauben- und Blattfedern.

Durch eine Vorspannung während des Bestrahlens werden die Eigenspannungen erhöht und in die Tiefe verlagert. Das ergibt eine weitere Steigerung der Biegewechselfestigkeit.

Literaturhinweise

Fachzeitschriften Stahl und Eisen. Verlag Stahleisen, Düsseldorf

HTM Zeitschrift für Werkstoffe-Wärmebehandlung-Fertigung, Hanser-Verlag, München

Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle 1...4. Verlag Stahleisen

VDI-Bildungswerk: BW 34-05-08 Grundlagen und praktische Anwendung der Wärmebehandlungsverfahren metallischer Werkstoffe – Glühen – Härteln – Anlassen- Vergüten, Oberflächenhärteln

Verfasser	Titel
Hougardy, H.:	Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle. Verlag Stahleisen 2003
Kunst, H.:	Nitrocarburieren zur Verbesserung der Schwingfestigkeits-, Korrosions- und Verschleißeigenschaften. VDI-Bericht 852, S.559...570
Liedke,D u. Jönsson,R.:	Wärmebehandlung, Grundlagen und Anwendung für Eisen-Werkstoffe, expert-Verlag 2004
Macherauch, E.:	Praktikum in Werkstoffkunde, Vieweg Verlag 1999
DIN TB 218	Werkstofftechnologie, Wärmebehandlungstechnik, Beuth-Verlag 2002 (2007)
DIN EN 10052/94	Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen, Fachbegriffe und -ausdrücke
DIN 6773/01	Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen, Darstellung und Angaben wärmebehandelter Teile in Zeichnungen.
DIN 17021-1/76	Werkstoffauswahl aufgrund der Härtbarkeit
DIN 17022-1/94	Verfahren der Wärmebehandlung – Härteln, Bainitisieren, Anlassen und Vergüten von Bauteilen. T-2/86 Härteln und Anlassen von Werkzeugen; T-3/89 Einsatzhären; T-4/98 Nitrieren und Nitrocarburieren; T-5/00 Randschichthären
Stahl-Informations-Zentrum	Merkblätter zur Wärmebehandlung von Stahl über MB 447/05: Nitrieren und Nitrocarburieren; M B460/05: Härteln, Anlassen, Vergüten, Bainitisieren; MB 452/95: Einsatzhären (auch als pdf-Dateien) www.stahl-online.de

Weitere Informationen

Thema	Titel und Quelle	Internet: www.
Die Umwandlung der Kohlenstoffstähle	In mancherlei Gestalt. Rose, A. u. Hougardy, H.: Leihfilm von IWF, Göttingen	iwf.de
Wärmebehandlung	Böhlerstahl über www.rubig.com/upload/Haertetechnik	
Gefügebilder	Informationen zu Wärmebehandlung mit Gefügebildern	metallograf.de

6 Eisen-Gusswerkstoffe

6.1 Übersicht und Einteilung

Eisen-Gusswerkstoffe sind durch die Steigerung der Festigkeit und Qualität auch für die Serienfertigung hochbeanspruchter Teile eingeführt, weil sie oft *wirtschaftlichere* Lösungen bieten als Schmiede- oder Schweißkonstruktionen.

Die Entwicklung verlief auf mehreren Ebenen:

- **Metallurgische** Verfahren mit verbesserten Öfen, Verfahren und Messtechnik ergeben höhere Treffsicherheit der Schmelzanalysen (konstante Qualität).
- **Formtechnik** mit Feinguss und verlorenen Modellen führte zu hoher Oberflächengüte und engeren Toleranzen sowie größerer Freiheit in der Gestaltung.
- **Gießtechnik** mit besserer Kenntnis des Einströmens der Schmelze, der Formfüllung mithilfe der Anschnitt- und Speisergestaltung ergibt Gussteile ohne Lunker und Porositäten (Qualitätssicherung, Nullfehlerproduktion).

Die Verbesserungen der Werkstoff- und Fertigungstechnik des Gusseisens haben dazu geführt, dass die verschiedenen Eisen-Gusswerkstoffe ihr Eigenschaftsprofil den Knetwerkstoffen (Stahl) genähert und zum Teil angeglichen haben, besonders hinsichtlich der Duktilität (Bruchdehnung A Bild 6.1.)

6.1.1 Vorteile der Gusskonstruktionen

Gießen ist eine der Möglichkeiten, endkonturgetreue oder endkonturnahe Rohteile zu fertigen und damit aufwändige Nacharbeit, meist durch Spanen, zu vermindern bzw. ganz einzusparen.

Bei allen *dynamisch* beanspruchten Teilen ist nicht die Dauerfestigkeit des Werkstoffes allein maßgebend. Auch die *Gestalt* des Bauteils beeinflusst die Spannung, bei der das Teil bricht. Durch Gießen lassen sich Absätze, Querschnittsübergänge und Rippen leichter ohne Kerbwirkung gestalten.

Hinweis: Die systematische Benennung der Gusseisensorten DIN EN 1560 ist im Anhang A.2 beschrieben.

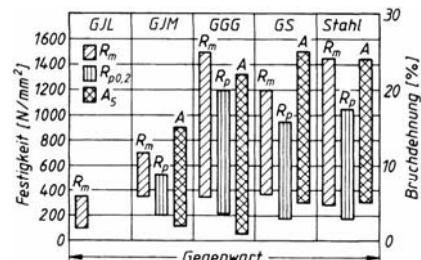


Bild 6.1 Vergleich der Eigenschaften: Allgemeine Bau- und Vergütungsstäbe mit den gegenwärtig erzeugbaren Gusseisenwerkstoffen (K. Herfurth)

Bei der Auswahl von Werkstoffen rücken damit die Gusswerkstoffe in die vordere Reihe, besonders, wenn nicht nur mechanische Eigenschaften berücksichtigt werden, sondern das gesamte Eigenschaftsprofil, einschließlich der Freiheiten in der Formgestaltung.

Die günstigste Gestalt hinsichtlich Spannungsverteilung und Werkstoffausnutzung

- kann durch rechnergestützte Konstruktion CAD mit der Finite Elemente Methode (FEM) ermittelt werden und
- lässt sich am einfachsten durch Gießen herstellen.
- Gießgerechtes Gestalten wird durch Computersimulation der Einström- und Erstarzungsverläufe und der Temperaturverteilung im Gussteil vereinfacht.

Zahlreiche Verfahren zur Herstellung einer Form in Verbindung mit verschiedenen Formstoffen und Gießverfahren bieten sowohl Fertigungsmöglichkeiten für alle Stückzahlen als auch für Kleinteile bis hin zu Großgussstücken aus Fe-Gusslegierungen oder NE-Metallen.

Übersicht: Gießen

Modelle	Verlorene Modelle aus Wachs, Paraffin oder Hartschaumstoff. Das ungeteilte Einformen ergibt große Freiheit in der Formgestaltung (z.B. Hinterschneidungen). Dauermodelle aus Gips, Holz, Kunststoff oder Metall für Hand-, Maschinen- und Maskenformerei mit Abformungen je nach Modellgüteklaasse von 5 (Großmodelle aus Holz) bis 1000, Kunststoff bis zu 30000, Metall bis zu 50000 Stück.
Formen	Einmalformen: Sandformerei für alle Metalle und auch Großteile (300 t). Maschinenformerei für kleine bis mittlere Teile und mittlere bis große Stückzahlen. Wachsaußschmelzverfahren in keramisch beschichteten Formen für Feinguss und auch für alle Stahlgussarten und hochschmelzende Metalle geeignet. Teile von 1 g bis 50 kg Maskenformen: Kunsthärzgebundene Formschalen ergeben hohe Oberflächengüte und geringsten Versatz. Teile bis 150 kg. Dauerformen: Kokillen aus GJL und Druckgießwerkzeuge aus Warmarbeitsstahl für Gussteile aus NE-Metallen in großen Stückzahlen
Gießen	Schwerkraftguss für alle Teile möglich. Druckguss (→ 7.8) in komplizierten und dünnwandigen Formen für NE-Metalle. Niederdruck- und Vakuum-Druckguss führen zu besserem Einströmen der Schmelze und ergeben dichtere Gefüge, bei Al-Legierungen auch schweißbare Werkstücke. Thixoforming im Erstarrungsbereich (ca. 40 % Schmelzanteil)
Sonderverfahren	Schleuderguss für Rohre aus Gusseisensorten, Mehrschichtlager, verfahren Strangguss für Halbzeug aus Gusseisen. Druckdichte Gefüge für Hydraulikteile

Durch *Rapid Prototyping* (→) können Modelle für das Wachs-Ausschmelzverfahren hergestellt werden. Damit sind auch komplizierte Erstbauteile von Neuentwicklungen schnell verfügbar, wichtig zur Verkürzung der Entwicklungszeiten.

Innovative Gusskonstruktionen

Die Deutschen Gießerei-Verbände veranstalten jährlich einen, von der ZGV (→) durchgeführten, Wettbewerb

„Konstruieren mit Gusswerkstoffen“.

Dabei werden Schweißkonstruktionen durch günstigere Gusskonstruktionen ersetzt.

Wie das Beispiel zeigt (→), werden neben der Masse auch die Anzahl der Teile verringert und Zeit für Bearbeitung und Montage eingespart.

Entscheidend für den Erfolg solcher Änderungen ist die Einbeziehung der Gießerei in die Entwicklung von *Anfang an*, um optimale Fertigungsbedingungen zu erreichen!

Rapid Prototyping: Schnelle Herstellung von Erstbauteilen (Prototypen) nach verschiedenen Verfahren. Sie werden mithilfe der Daten aus der CAD-Konstruktion in *Schichten* aus lichthärtenden Kunststoffen, Papierlagen oder lagenweise aufgespritzten Metallen erzeugt. Auch zur Herstellung von Einmalformen aus Kunsthärzsand angewandt (→ Urformen 1.6).

ZGV: Zentrale für Gussverwendung im Deutschen Gießereiverband (DGV), Sohnstraße 70, 40237 Düsseldorf

Beispiel: Vorderachssystem für Leicht-Lkw

	Früher	Heute
Fertigung Querlenkers	Stahlblech-Schweiß-Montagekonstruktion	Gießen
Werkstoff	Stahl	GJG-400
Masse	10 kg	9 kg
Einzelteile	18	4
Kosten	100 %	87 %

Die Einsparung (13 %) summierte sich bei der großen Stückzahl auf ca. 2,3 Mio. DM/Jahr.

Gießeigenschaften sind für eine fehlerfreie und wirtschaftliche Fertigung wichtig (→ Übersicht).

Umweltverträglichkeit: Eisen-Gusswerkstoffe werden überwiegend aus Recyclingmaterial gewonnen (Stahlschrott, Gussbruch und Kreislaufmaterial der Gießerei). Roheisen wird nur zu 15 % eingesetzt. Die Erschmelzung des Roheisens benötigt sehr viel mehr Energie (16 GJ/t RE) als die Einschmelzung von Recyclingmaterial (d.h. Energiebedarf und CO₂-Ausstoß werden verringert).

Übersicht: Eigenschaften der Gusswerkstoffe

Eigenschaft	Auswirkungen
Schmelztemperatur niedrig	Kosten für Energie und feuerechte Stoffe in Öfen, Pfannen und Formen sind niedrig
Schwindmaß klein	Geringe Neigung zu Lunkerbildung und Eigenspannungen
Formfüllungsvermögen	Abgüsse werden scharf und formtreu, kleinere Wanddicken sind möglich
Spanbarkeit	niedrige Kosten für die Fertigbearbeitung

6.1.2 Einteilung der Gusswerkstoffe

Stahlguss ist in Formen gegossener Stahl, ist also graphitfrei. Deshalb wird er im Abschnitt Stahl behandelt (→ 4.8). Von allen Fe-Gusswerkstoffen besitzt er die o.a. Eigenschaften in geringstem Maße. Stahlguss wird statt Gusseisen verwendet, wenn höhere Zähigkeit, Warmfestigkeit oder Korrosionsbeständigkeit verlangt werden.

Gusseisen wird nach der *Graphitform* (Tabelle 6.1), die überwiegend im Gefüge auftritt, in verschiedene Sorten eingeteilt. Eine zusätzliche Untergliederung ist durch die Art des *Grundgefüges* möglich. Es besitzt starken Einfluss auf Festigkeit und Zähigkeit und kann wie bei den Stahlsorten ferritisches, perlitisches usw. ausgebildet sein.

Tabelle 6.1: Einteilung der Gusswerkstoffe nach Graphitform (Bild 6.4) und Grundgefüge

Grundgefüge					
Graphit-form ↓	Ferrit ⇒ Ferrit/Perlit ⇒ Perlit Übergangsformen	Bainit	Austenit	Lebedurit	
lamellar	Gusseisen mit Lamellengraphit DIN EN 1561/97 GJL-150 ⇒ GJL-350 (GG-15 ⇒ GG-40 DIN 1691/Z)			Austenit.-Gusseisen DIN EN 13835/02	
flockig (Temperkohle)	Temperguss (weiß/schwarz) DIN EN 1562/97 GJMW-350-4 ⇒ GJMB-650-2 (GTW-35-04 ⇒ GTS-70-02 DIN 1692/Z)	GJMW-550-4, GJMB-700-2, GJMB-800-1			Temperrohguss
Kugelform	Gusseisen mit Kugelgraphit DIN EN 1563/05 GJS-350-22 ⇒ GJS-700-2 (GGG-35 ⇒ GGG-70 DIN 1693/Z)	Bainitischer Kugelgraphitguss DIN EN 1564/97	Austenit.-Gusseisen DIN EN 13835/02		
Wurmform	Gusseisen mit Vermiculargraphit GJV-300 ⇒ GJV-500				
graphitfrei	Stahlguss (→ 4.8), DIN EN 10293/05, u.a.	Vergütungsstahlguss	Nichtrost. Stahlguss	Verschleißbeständiges Gusseisen DIN EN 12513/01	

Temperguss ist ein Fe-C-Gusswerkstoff, dessen gesamter C-Anteil im Gusszustand (Temperrohguss) zunächst als Fe-Carbid (Zementit) vorliegt. Durch Glühen (Tempern) zerfällt Zementit ganz oder teilweise in Temperkohle (Flockengraphit).

Das reine Eisencarbid Fe₃C ist nur bis ca. 700 °C beständig. Es zerfällt nach:

$\text{Fe}_3\text{C} \Rightarrow 3 \text{Fe} + \text{C}$ in Austenit + Temperkohle.
C-Atome können dabei nach außen diffundieren und werden oxidiert (entkohlendes Glühen).

Sonderguss: Hierzu zählen alle Fe-Gusswerkstoffe, die nicht in die o.a. Gliederung passen. Sie sind z.T. hochlegiert und haben bestimmte Eigenschaften, z.B.:

- Warm- und Zunderfestigkeit,
- Nichtmagnetisierbarkeit,
- besondere Wärmedehnung,
- Säurebeständigkeit.

Sondergussarten sind z.B.

- säurefester Guss mit 15 % Si legiert,
- verschleißfester Guss mit hohem Carbidanteil in ledeburitischer Grundmasse,
- austenitisches Gusseisen nach DIN 1694/Z mit 22 Sorten, Ni-hochlegiert und mit Lamellen- und Kugelgraphit (DIN EN 13835/03).

6.2 Allgemeines über die Gefüge- und Graphitausbildung bei Gusseisen

6.2.1 Gefügeausbildung

Die Gefüge der Fe-C-Legierungen mit C-Gehalten von 2,5...4 % sind *heterogen*. Im Grundgefuge sind Graphitkristalle eingebettet (→), sodass die Eigenschaften des Bauteiles von der Kombination beider abhängen.

Grundgefuge

Grauguss gehört zunächst zum stabilen System der Legierung Fe-C (der gesamte C-Gehalt liegt elementar als Graphit im Gefüge vor).

Zwischen diesen Grenzfällen liegen wichtige Sorten, die beide Erstarrungsformen, also Graphit und Zementit, *nebeneinander* im Gefüge haben. Dabei erstarrt die Schmelze zunächst stabil (Austenit + Graphit). Die folgende γ - α -Umwandlung vollzieht sich ganz oder teilweise metastabil:

Dabei zerfällt Austenit zu Perlit, dessen Zementitlamellen teilweise zu Ferrit werden, während sich die C-Atome an die vorhandenen Graphitkristalle anschließen. (Bild 6.2)

Einflüsse auf die Gefügebildung

Für die Keimbildung von reinen C-Kristallen müssen die relativ wenigen C-Atome lange Wege zurücklegen, dadurch braucht die Graphitbildung viel Zeit. Bei Zementit Fe_3C verlaufen Keimbildung und Wachstum wesentlich schneller, weil beide Atomarten in der Schmelze dicht nebeneinander zur Verfügung stehen.

Zusätzlich haben die Legierungselemente Einfluss auf die Art der Kristallisation des Kohlenstoffs (→):

Auswirkungen: Durch den hohen C-Gehalt liegen die Werkstoffe in der Nähe des Eutektikums (im EKD) und

- haben niedrige Schmelztemperaturen,
- lassen sich leicht überhitzten und dadurch zu komplizierten Formen vergießen.
- Die Graphiteinschlüsse erleichtern die Zerspanung und sind wirksam als Schwingungsdämpfung und Festschmierstoff.

Erinnerung: Stahlguss erstarrt wie Stahl metastabil (der gesamte C-Gehalt liegt als Zementit im Gefüge vor). Stahl darf wegen der geforderten Schmiedbarkeit keinen Graphit enthalten.

Bei Temperaturen > 700 °C zerfällt Zementit. Durch Mischcarbidbildung mit Mn oder anderen Carbiddbildnern entstehen *stabile* Carbide. Deshalb muss Mn immer auch in unlegierten Stählen enthalten sein.



Bild 6.2 Gusseisen mit Lamellengraphit in ferritischer-perlitischer Grundgefuge 500:1

Einfluss der Legierungselemente:

Mn, Mo, Cr bilden *Mischcarbide* und begünstigen die Carbidbildung beim Austenitzerfall, z.B. im verschleißfesten Gusseisen.

Damit liegen zwei Einflussgrößen vor, mit denen sich die Gefügebildung steuern lässt.

Graphit entsteht bei Si-Gehalten und langsamer Abkühlung,

Zementit entsteht bei Mn-Gehalten und schneller Abkühlung.

Si, P, Ni behindern die Carbidbildung und fördern die Graphitausscheidung. (Si liegt im PSE unter dem C in der gleichen Hauptgruppe und hat die gleiche Anordnung der Außenelektronen).

Hinweis: Die Abkühlgeschwindigkeit eines Gussstückes ist indirekt durch seine Wanddicke festgelegt.

Wanddickenempfindlichkeit

Der Zusammenhang dieser Einflussgrößen wird in Bild 6.3 (Schaubild nach Greiner-Klingenstein) dargestellt. Darin kann man die zu erwartende Gefügeausbildung, abhängig vom $(C + Si)$ -Gehalt und der Wanddicke, ermittelt werden.

- Dicke Querschnitte neigen zu ferritischem Grundgefüge,
- dünne Querschnitte können graphitfrei (zu Hartguss) erstarren.

Ein Gussteil wird selten eine durchgehend gleiche Wanddicke besitzen. Dadurch entstehen in einem Werkstück, das aus einer Schmelze abgegossen wurde, verschiedene Gefüge mit unterschiedlicher Härte. Das ist für die Eigenschaften von Bedeutung (z.B. für die Zerspanbarkeit).

In Gussteilen mit wechselnden Wanddicken entstehen unterschiedliche Gefüge mit wechselnder Härte.

Gießkeilprobe. Schnelle Kontrolle der zu erwartenden Gefügeausbildung durch Abguss einer keilförmigen Probe, die abgeschreckt und längs gebrochen wird. Die Bruchfläche zeigt von der Spitze her ein *ledeburitisches* (weißes) Eisen, das nach dem dicken Ende hin in perlitisches-ferritisches Gefüge mit Graphit übergeht (graues Eisen). Die Länge der weiß erstarnten Zone gibt Aufschluss über das zu erwartende Verhalten in der Form.

6.2.2 Graphitausbildung

Form und *Größe* der Graphitkristalle lassen sich sehr unterschiedlich ausbilden. Sie üben den stärksten Einfluss auf Zugfestigkeit und Bruchdehnung aus. Bild 6.4 zeigt die Grundformen, die den Guss-eisensorten den Namen geben.

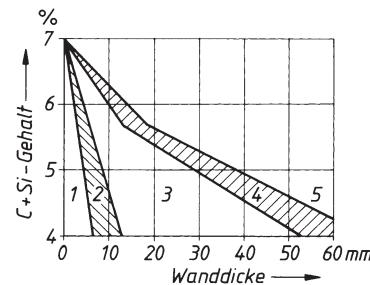
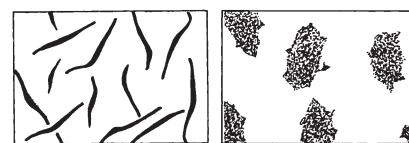


Bild 6.3 Gefügeausbildung in Abhängigkeit vom $(Si + C)$ -Gehalt und der Wanddicke

- 1 ledeburitischer Hartguss,
- 2 meliertes Eisen,
- 3 Perlitzguss,
- 4 ferritisches-perlitisches Grauguss,
- 5 ferritisches Grauguss

Ablesebeispiel: Um ein rein ferritisches Gefüge zu erhalten, muss bei Wanddicken < 10 mm der $(C + Si)$ -Gehalt etwa 7 % betragen.

Ferritisches Gefüge (5) hat niedrigste Härte und Festigkeit. Steigender Perlitanteil erhöht diese Eigenschaftswerte und die Verschleißfestigkeit. Meliertes Eisen ist ledeburitisch mit Graphit. Hartguss (1) ist graphitfrei.



a) groblamellar GJL b) flockig, knotig GJM



c) wurmförmig GJV d) kugelförmig GJS
Bild 6.4 Graphitausbildung schematisch

Durch *Graphitverfeinerung* steigen Festigkeit und Zähigkeit. Bild 6.5 zeigt schematisch, wie der Kraftfluss durch Lamellen stark, durch Kugeln wenig gestört wird. Daher ist Kugelgraphitguss GJS in seinen Eigenschaften stahlähnlich. Temperguss GJMW (GTW) oder GJMB (GTS) und Guss-eisen mit Vermiculargraphit GJV (GGV) liegen mit ihren mechanischen Eigenschaften zwischen GJL (GG) und GJS (GGG).

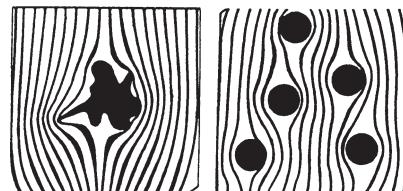


Bild 6.5 Gestörter Kraftfluss

6.3 Gusseisen mit Lamellengraphit GJL, DIN EN 1561/97

[1]

Herstellung

Als Einsatzmaterial wird vorwiegend Kreislaufschrott (Eingüsse, Speiser, Fehlgüsse), unlegierter Stahlschrott oder paketierte Späne verwendet. Den kleineren Anteil haben Gießereiroheisen I...IV (steigende P-Gehalte) oder P-armes Hämatitroheisen mit Zusätzen.

Schmelzanlagen sind der Gießereischachtofen (Kalt- und Heißwindkupolofen), Induktionsofen (bei hohem Anteil an Stahlschrott und zum Legieren) und Flammofen (bei Großschrott).

Gattierung: ist die berechnete Zusammenstellung der Einsatzstoffe aufgrund ihrer Analyse, unter Berücksichtigung des Ab- und Zubrandes von Elementen, um eine bestimmte Gusseisenschmelze zu erhalten.

Entschwefelung: erfolgt durch Zugaben von Soda Na_2CO_3 , Kalk CaO oder Calciumcarbid CaC_2 , z.T. in Schüttelpfannen, die in etwa 5 min bei einer CaC_2 -Zugabe von 0,4...0,5 % auf S-Gehalte von 0,02 % entschwefeln.

Tabelle 6.2: Eigenschaftsprofil von Gusseisen mit Lamellengraphit

Eigenschaft	Beschreibung, Ursachen, Auswirkung
Gießbarkeit	günstig , da niedrige Schmelztemperatur (1200...1400 °C) und Schwindmaß von 0,6...1,4 %. Verwickelte Formen sind gut gießbar.
Zerspanbarkeit	günstig , die Graphitlamellen wirken als Festschmierstoff und Spanbrecher. Mit steigender Härte (steigender Perlitannteil) sinkt die Zerspanbarkeit.
Dehnung	gering , da die Graphitlamellen eine Verformung nicht mitmachen
Druckfestigkeit	hoch , sie beträgt etwa das Dreifache der Zugfestigkeit
Dämpfung	hohe Schwingungsdämpfung durch den weichen Graphit. Sie nimmt mit steigender Festigkeit ab (weniger Ferrit, mehr Perlit)
Gleiteigenschaften	mittel , Graphit wirkt als Notlaufschmierstoff, die Perlitbereiche wirken tragend und ergeben geringeren Verschleiß
Korrosions-beständigkeit	ausreichend bei unverletzter Gusshaut, die aus dem Formsand Si aufgenommen hat. Hohe Si-Gehalte ergeben Säurebeständigkeit
Wachsen des Gusseisens	Volumenvergrößerung durch Zementitzerfall und Oxidation bei ca. 400 °C beginnend. Zusätze von Cr und höhere Si-Gehalte stabilisieren den Zementit, wichtig für den Einsatz bei höheren Temperaturen

Die Sorten sind nach Zugfestigkeit (Tabelle 6.3) oder Härte in je 5 Sorten eingeteilt und danach benannt mit Gewährleistung unter bestimmten Bedingungen.

Zufestigkeit R_m . Probstücke zum Nachweis werden je nach Wanddicke hergestellt. (→) Die daraus ermittelten Werte unterscheiden sich je nach Abkühlbedingungen. Bild 6.6 zeigt die Beziehung zwischen Mindestzugfestigkeit und Wanddicke von Gussstücken einfacher Gestalt.

Härte HB, gemessen im Wanddickenbereich 40...80 mm. Für die Härtemessung an Großteilen werden angegossene Kegelstümpfe abgetrennt (evtl. nach Wärmebehandlung). Die 6 Sorten sind:

EN-GJL-HB155 (175, 195, 215, 235, 255).

Zwischen *Zugfestigkeit* und *Härte* besteht keine strenge mathematische Beziehung, nur eine durch Versuche ermittelte mit breiter Streuung.

Beachte: Im Gussstück kann entweder die Mindestzugfestigkeit **oder** die Härte an ver-einbarten Stellen gewährleistet werden.

Für die Auswahl der Sorten sind neben der Festigkeit oft andere Eigenschaften wie z.B. Druck-, Biege- und Dauerfestigkeit wichtig.

Kokillen- und Horizontalstrangguss ergeben ein dichteres Gefüge mit verbesserten mechanischen Eigenschaften. Anwendungen für z.B. Hydraulikteile, Schlitten für Werkzeugmaschinen, Profilbarren für Führungsleisten, Zahnstangen, u.ä.

Tabelle 6.3: Eigenschaften von Gusseisen mit Lamellengraphit nach DIN EN 1661/97 (in getrennt gegossenen Proben von 30 mm Rohdurchmesser)

Eigenschaft	Sorte					EN-GJL-
	- 150	- 200	- 250	- 300	- 350	
Zugfestigkeit R_m MPa	150...250	200...300	250...350	350...400	350...450	
0,1 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ MPa	98...195	130...195	165...228	195...260	228...285	
Bruchdehnung A %	0,8...0,3	0,8...0,3	0,8...0,3	0,8...0,3	0,8...0,3	
Druckfestigkeit σ_{dB} MPa	600	720	840	960	1080	
Biegefesteitkig σ_{bB} MPa	250	290	340	390	490	
Torsionsfestigkeit τ_{tT} MPa	170	230	290	345	400	
Biegewechselfestigkeit σ_{bW} MPa	70	90	120	140	145	

Meehanite-Guss: 28 Sorten mit Lamellen- und Kugelgraphit. Durch eine patentierte Pfannenbehandlung mit graphitisierenden Impfstoffen wird ein sorbo-perlitisches Gefüge mit feiner Graphitausbildung erzielt. Gegenüber DIN-Sorten haben sie höhere Festigkeiten (bis max. 1000 MPa) und geringere Wanddickenempfindlichkeit.

Bezeichnung von Gusseisen mit Lamellengraphit kann erfolgen nach der:

- Mindestzugfestigkeit R_m
z.B. **EN-GJL-150**
- Durchschnittshärte HB,
z.B. **EN-GJL-HB155**

Probstücke:

Herstellung des Probstückes	Festigkeitswerte sind...	Anhängerzeichen
getrennt gegossen	verbindlich	S
angegossen ¹⁾	verbindlich	U
dem Gussstück entnommen ¹⁾	Erwartungswerte	C

¹⁾ Gussstücke > 200 kg und Wanddicke > 20 mm

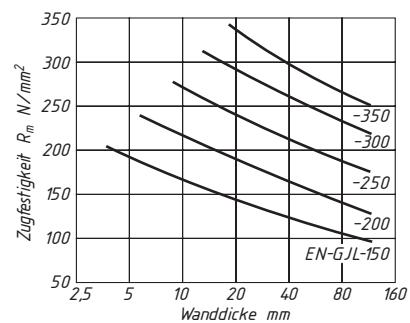


Bild 6.6 Beziehung zwischen Festigkeit und Wanddicke bei Gusseisen mit Lamellengraphit

Meehanite-Guss gibt es in 4 Anwendungskategorien (allgemeine, korrosionsbeständige, verschleißfeste und hitzebeständige Sorten).

Nodular ist Meehanite-Gusseisen mit Kugelgraphit in 10 Sorten.

Arbeitsgemeinschaft der deutschen Meehanite-Gießereien, Alexanderstraße 51, 70182 Stuttgart.

6.4 Gusseisen mit Kugelgraphit GJS, DIN EN 1563/05

[5]

Der Werkstoff ist auch als *sphärolithisches* Gusseisen (Sphäroguss) oder *duktiles* Gusseisen bekannt (duktil = bildsam). Bild 6.7 zeigt die Kugelform der Graphitkristalle.

Herstellung

Einsatzmaterialien sind Sonderroheisen, d.h. wenig S, frei von As, Pb, Bi, Ti und sortierter Stahlschrott ohne Legierungselemente und frei von Öl und Rost.

Schmelzanlagen sind meist Induktionstiegelöfen evtl. mit Vorschmelzen im Heißwindkupolofen. Damit lässt sich die Abstichtemperatur von ca. 1500 °C leichter einstellen und es gibt keine Anreicherung von Schwefel aus dem Heizmaterial.

Vorbehandlung zum Erzeugen der Kugelform des Graphits. Nach dem Abstich in spezielle Gießpfannen erfolgen noch drei Schritte, die zum gewünschten Gefüge führen:

Wärmebehandlung. Die gewünschten Gefüge (damit die Sorte) können auch *nachträglich* durch eine Wärmebehandlung eingestellt werden. Dann kann mit einer Art Einheits-Schmelze (mit größerer Analysenstreuung) abgegossen werden.

- Austenitisieren (15 min – 4 h bei 880...940 °C) und langsames Abkühlen im Umwandlungsbereich und Halten unterhalb oder nochmaliges Erwärmen auf ca. 720 °C ergibt ferritisches Gefüge (*Ferritisieren*).
- Schnelles Abkühlen im Umwandlungsbereich ergibt perlitisches Gefüge, evtl. auch durch Normalisieren (*Perlitisieren*).
- Randschichthärtung ist ebenfalls möglich.
- Isotherme Umwandlung ergibt ein bainitisches Gefüge (→ Bainitisches Gusseisen ADI).

Eigenschaftsprofil, Normung

GJS hat stahlähnliche Eigenschaften, dabei die gute Gießbarkeit des Gusseisens mit Lamellengraphit, allerdings geringere Dämpfung und Wärmeleitfähigkeit (→). In Tabelle 6.4 sind die genormten Sorten mit ihren mechanischen Eigenschaften aufgeführt.

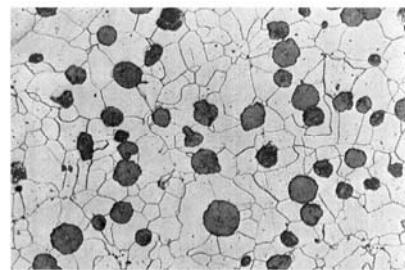


Bild 6.7 Gusseisen mit Kugelgraphit in ferritischem Grundgefüge 100:1

Übersicht: Vorbehandlung der Schmelze

Entschwefeln

Zugabe von CaC₂ unter Badbewegung in Schüttelpfannen oder durch Rührgeräte und Reduktion auf ≤ 0,02 % S, auch durch Einblasen mit Tauchrohren, als Voraussetzung für den nächsten Schritt.

Mg-Behandlung

Wegen der Verdampfung des ReinhMagnesiums (Explosionsgefahr) meist mit Mg-Vorlegierungen (FeSiMg, NiMg) nach verschiedenen Verfahren.

Impfen

Zugabe von feinkörnigem FeSi (mit geringen Anteilen von Al, Ca, Zr oder seltenen Erden) in die Gießpfanne oder in den Gießstrahl als Graphitkeime (Anzahl und Größe der Sphärolithe), Einstellung des gewünschten Grundgefüges.

Ursachen: Durch die Kugelform des Graphits wird die starke Kerbwirkung der Lamellen vermieden (→ höhere Festigkeit und Zähigkeit). Dagegen haben die Lamellen eine größere Oberfläche, wodurch Dämpfungsfähigkeit bei Schwingungsbeanspruchung und elektrische Leitfähigkeit höher sind als bei der Kugelform.

Tafel 6.4: Gusseisen mit Kugelgraphit DIN EN 1563/05

Kurzname EN-GJS-	$R_{p0,2}$ MPa	$\tau_a = \tau_t$ MPa	κ_{lc} in ²⁾ MPa \sqrt{m}	σ_d MPa	σ_{bb} ³⁾ MPa	σ_{bb} ⁴⁾ MPa	Gefüge	Anwendungsbeispiele
-350-22 ¹⁾	220	315	31		180	114	Ferrit	
-400-18 ¹⁾	250	360	30	700	195	122	Ferrit	Windenergieanlagen
-400-15	250	360	30	700	200	124	Ferrit	Preßholm für 6000 t-Presse, 47 t
-450-10	310	405	23	700	210	128	Ferrit	Pressenständer (165 t)
-500-7	320	450	25	800	224	134	Ferrit/Perlit	Zylinder für Diesel-Ramme, 1,7 t
-600-3	380	540	20	870	248	149	Ferrit/Perlit	Kolben (Großdieselmotor)
-700-2	440	630	15	1000	280	168	Perlit	Planetenträger, Kurbelwelle VR5
-800-2	500	720	14	1150	304	182	Perlit/Bainit	
-900-2	600	810	14	----	317	190	Martensit, wärmebehandelt	

¹⁾ Hierzu gibt es Sorten mit gewährleisteter Kerbschlagarbeit bei Raumtemperatur (-RT) oder tiefen Temperaturen (-LT) → Tabelle.

²⁾ Bruchzähigkeit;

³⁾ Umlaufbiegeversuch, ungekerbte Probe;

⁴⁾ Umlaufbiegeversuch, gekerbte Probe; Werte für getrennt gegossene Probestücke.

Kurzname	Mindestwerte f. d. Kerbschlagarbeit in J bei Temperatur		
EN-GJS-	RT	-20 °C	-40 °C
-350-22-LT	---	---	12
-RT	17	---	---
-400-18-LT	---	12	---
-RT	14	---	---

Anwendung: Gusseisen mit Kugelgraphit wird für Bauteile aller Größen verwendet,

- die in Stahlguss sehr schwierig zu gießen sind (komplexe Gestalt, kleine Wanddicke),
- Gusseisen mit Lamellengraphit zu spröde ist (Stoßbelastungen) und
- Temperguss wegen der Größe ausscheidet.

GJS füllt auf Grund seines Eigenschaftsprofils die Lücke zwischen Stahl- und Temperguss. Für die endgültige Wahl entscheiden die Kosten.

Beispiele: Der Kfz.-Bau ist mit einem Anteil von 40 % der Gesamtproduktion an GJS der größte Abnehmer. 70 % der Kurbelwellen in PkW-Motoren bestehen aus GJS-600; LkW-Radnaben aus GJS-600-3; Lenk- und Getriebegehäuse für Landmaschinen und Sonderfahrzeuge GJS-500-7; Kolben für Dieselmotor aus GJS-600-3 (68 kg); Einteiliger Pressenständer aus GJS-400-22-LT (165 t); Tische, Quer balken und Planscheiben für Werkzeugmaschinen aus GJS-600-3; Gondelrahmen für Windkraftanlagen GJS-400-18-LT.

Bainitisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI): hat zähhartes Gefüge aus übersättigtem Ferrit mit Carbidsäumen und Restaustenit. Es wird durch eine isotherme Umwandlung bei 270...450 °C erzeugt. Für größere Wanddicken wird es mit Cu, Ni, und Mo niedriglegiert, damit die Perlitumwandlung beim Abkühlen umgangen werden kann. Der Restaustenit führt bei Verformungen zu geringer Martensitbildung (Verschleißwiderstand steigt) mit Druckeigenspannungen. Dadurch wird ein evtl. Risswachstum behindert (Dauerfestigkeit steigt).

ADI: Austempered Ductile Iron [3, 4]

Normung: DIN EN 1564/97, VDG-W-52

Sorte EN-GJS-	$R_{p0,2}$ MPa	A %
-800-8 (GGG-80B)	500	8
-1000-5 (GGG-90B)	700	5
-1200-2 (GGG-120B)	850	2
-1400-1 (GGG-140B)	1100	1

Anwendung: Stahlwerkswalzen, Tellerräder u. Radnaben für Lkw, Gehäuse von Pressluft hämmern, Pickelarme für Gleisbaumaschinen

6.5 Temperguss GJMW/GJMB, DIN EN 1562/97

[4, 5]

Temperguss wird in zwei Arten hergestellt, die sich in Analyse, Wärmebehandlung und die entstehenden Gefüge unterscheiden (→).

GJMB muss etwas weniger C-Gehalt haben, da nichts entfernt wird (→). **GJMW** verliert beim Glühen einen Teil, deswegen kann die Schmelze mehr enthalten. Schmelz- und Gießbarkeit sind dadurch besser. Für beide Sorten ist der (Si+C)-Gehalt gleich und ergibt auch bei kleinen Wanddicken ein ledeburitisches (graphitfreies) Gefüge.

Herstellung von Temperguss

Erschmelzung erfolgt im Kupolofen aus Sonderroheisen, Bruch und Stahlschrott. GJMB wird in einem zweiten Ofen (meist Induktionsofen) fertiggeschmolzen, da der niedrigere C-Gehalt im Kupolofen schwierig zu erreichen ist.

Erstarrung. Temperrohrguss muss *graphitfrei* erstarrn (Bild 6.8). Damit ist die Masse von Tempergussteilen nach oben begrenzt. Sie liegt bei etwa 100 kg und Wanddicken von max. 60 mm.

Hinweis: Für GJMW ist die Wanddicke auf ca. 25 mm begrenzt, damit die Entkohlung mit wirtschaftlichen Glühzeiten möglich ist.

GJMW (GTW, weißer Temperguss) ist *entkohlend* geglüht. Der Rand wird völlig entkohlt, zum Kern hin sinkt der C-Gehalt ab. Die Gefügeausbildung ist perlisch mit **weißer Bruchfläche**.

GJMB (GTS, schwarzer Temperguss) ist *nicht entkohlend* geglüht. Der gesamte C-Gehalt liegt als Temperkohle im Gefüge vor. *Temperkohle* ist Graphit in flockiger Form mit **grau-schwarzer Bruchfläche**.

Vergleich: Temperguss, Rohgussanalysen:

Sorte	C	Si	Mn	S in %
GJMB	2,5	1,3	0,45	0,12
GJMW	3,2	0,6	0,45	0,12...0,25



Bild 6.8 Temperrohrguss, Perlit (dunkel) in ledeburitischem Grundgefüge 200:1

Wärmebehandlung für GJMB. Bild 6.9 zeigt den Zeit-Temperaturverlauf beim Tempern.

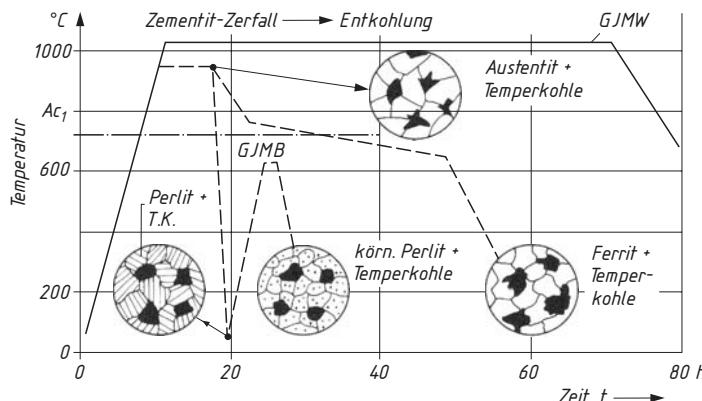


Bild 6.9
Wärmebehandlung von
Temperguss, *t,T*-Diagramm

Schwarzer Temperiung, **GJMB** wird in neutraler Atmosphäre gegläut. Es erfolgt nur der Zementitzerfall, die Glühzeiten sind kürzer.

Legende zu Bild 6.9

- Langsames Durchlaufen der γ - α -Umwandlung (760...680 °C). Hierbei muss der im Austenit gelöste Kohlenstoff ausscheiden und kann an die entstandene Temperkohle ankristallisieren. Auch bei der Gitterumwandlung gliedern sich die restlichen 0,8 % C an die Temperkohle an. Es entsteht ferritischer Temperiung **GJMB-350-10** aus Ferrit und Temperkohle (Bild 6.10).
- Schnelles Durchlaufen der Umwandlung durch Abkühlung an der Luft lässt den Austenit zu Perlit umwandeln, sodass der perlitzische Temperiung entsteht, z.B. **GJMB-550-4** (Bild 6.11).

Durch entsprechende Abkühlung entstehen ferritisch-perlitische Grundgefüge (**GJMB-450-6**).

Weißer Temperiung, **GJMW** wird in oxydierenden Mitteln gegläut, meist in geregelter Gasatmosphäre. Dabei verbrennt der Kohlenstoff der zerfallenden Verbindung Fe_3C und auch der im Austenit gelöste (Randentkohlung). Aus dem Kern diffundieren C-Atome nach außen, sodass bei kleinen Wanddicken (max. 8 mm) ein **rein ferritisches** Gefüge entsteht.

- Der Rand ist entkohlt und ferritisch, die
- Übergangszone besteht aus Ferrit + Perlit + Temperkohle,
- der Kern aus Perlit + Temperkohle.

Grundgefüge mit körnigem Perlit besitzt der **GJMW-450-7** durch ein anschließendes Weichglühen (Bild 6.12).

Wegen der Diffusionswege sind die Glühzeiten lang (Bild 6.9). Bei größeren Wanddicken bleiben C-Atome im Kern zurück. Das Gefüge ist dann wanddickenabhängig.

Die schweißgeeignete Sorte GJMW-360-12 ist so legiert, dass sie tief entkohlt. Gussteile können mit Walzstahl verschweißt werden, eine Wärmenachbehandlung ist nicht nötig.

Vergütungsgefüge mit Temperkohle werden durch Ölvergütung und abschließendem Anlassen erzeugt. Dadurch ergeben sich Sorten mit höherer Festigkeit (**GJMB-700-2**, Tabelle 6.5).

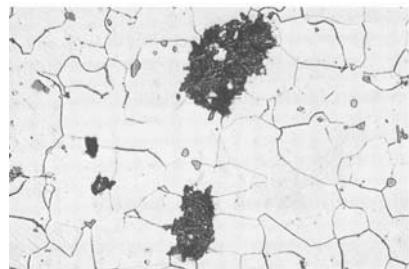


Bild 6.10 Temperiung GJMB-350-10, Temperkohle in ferritischem Grundgefüge 200:1

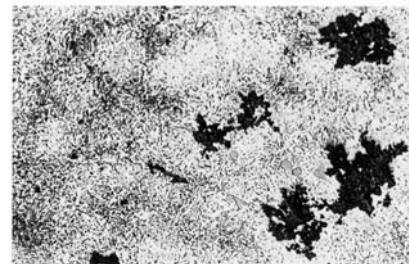


Bild 6.11 GJMB-550-4, Temperkohle in perlitzischem Grundgefüge 200:1

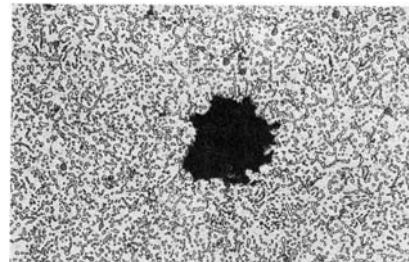


Bild 6.12 GJMW-450-7, Temperkohle in Grundgefüge aus körnigem Perlit 200:1

Beispiel: Pkw-Radlenker, Stahlblechschale mit gegossenem Lagergehäuse verschweißt. [6]

Temperiung ist wenig kerbempfindlich und damit für schwingbeanspruchte, komplizierte Bauteile mit hoher Formzahl k_t günstiger als hochfeste Stähle (z.B. Lkw-Pleuel aus GJMB-700-2).

Eigenschaften Normung

Nach dem Temperiern ist der Werkstoff zäh und schlagfest bis zu Temperaturen von -70°C . Die Zerspanbarkeit ist bei GJMB besser als bei GJMW. Randschichthärtung ist bei perlitischem Grundgefüge möglich (entkohlte Randschicht bei GJMW entfernen).

Tabelle 6.5: Eigenschaften von Temperierte Guss nach DIN EN 1562/97

Werkstoffbezeichnung DIN EN 1562	$R_{p0.2}$ MPa	HBW 30 →	Anwendungsbeispiele (Härte HB nur Anhaltswerte)
EN-GJMW- Entkohrend geeglühter (weißer) Temperierte Guss			
-350-4 GTW-35-04	—	max. 230	Für normalbeanspruchte Teile, Fittings, Förderketten, Schlossteile
-360-12 GTW-S38-12	190	max. 200	Schweißgeeignet für Verbunde mit Walzstahl, Teile für Pkw-Fahrwerk, Gerüststreben
-400-5 GTW-40-05	220	max. 220	Standartwerkstoff für dünnwandige Teile, Schraubzwingen, Kanalstreben, Gerüstbau, Rohrverbinden
-450-7 GTW-45-07	260	max. 220	Wärmebehandelt, höhere Zähigkeit Pkw-Anhängerkupplung, Getriebeschaltthebel
-550-4	340	max. 250	
EN-GJMB- Nicht entkohrend geeglühter (schwarzer) Temperierte Guss			
-300-6 GTS-35-10	—	max. 150	Anwendung, wenn Druckdichtheit wichtiger als Festigkeit und Duktilität ist
-350-10 GTS-35-10	200	max. 150	Seilrollen mit Gehäuse, Möbelbeschläge, Schlüssel aller Art, Rohrschellen, Seilklemmen
-450-6 GTS-45-06		150 ... 200	Schaltgabeln, Bremsträger
-500-5 GTS-550-04	300	165 ... 215	
-550-4 GTS-55-04	340	180 ... 230	Kurbelwellen, Kipphebel für Flammhärtung, Federböcke, Lkw-Radnabe
-600-3	390	195 ... 245	
-650-2 GTS-65-02	430	210 ... 260	Druckbeanspruchte kleine Gehäuse, Federauflage für Lkw (oberflächengehärtet)
-700-2 GTS-70-02	530	240 ... 290	Verschleißbeanspruchte Teile (vergütet), Kardangabelstücke, Pleuel, Verzurrvorrichtung für Lkw
-800-1	600	270 ... 310	Verschleißbeanspruchte kleinere Teile (vergütet)

Die Werkstoffbezeichnung enthält an erster Stelle die Zugfestigkeit in MPa und an zweiter Stelle die Bruchdehnung A in Prozent. Die Werte gelten für Probestäbe von 12 oder 15 mm Ø.

Anwendung: Temperierte Guss hat gute Eignung

- für dünnwandige Bauteile mit
- verwickelter Form, die auch
- stoßfest sein müssen.

Für solche Teile ist Stahlguss wegen seiner gießtechnischen Schwierigkeiten unwirtschaftlich und Gusseisen GJL kommt wegen mangelnder Zähigkeit nicht infrage. Es sind vorwiegend Serien- und Großserienteile zwischen wenigen Gramm bis zu max. 100 kg, meistens weniger als 10 kg, Wanddicken über 20 mm sind die Ausnahme. Sicherheitsbauteile an Fahrzeugen.

Hauptabnehmer der Temperierte Gussproduktion

Branche	Anteil	Branche	Anteil %
Fahrzeugbau	37,4	Fittings	28,2
Maschinenbau	4,8	Sonstige	29,6

Vorbundkonstruktionen aus GJMW-369-12W mit Blech oder Profilstahl für Pkw-Achsen oder Schrägenker, Ventilgehäuse z. Einschweißen, Schaltgabel für Lkw-Getriebe aus GJMB-550-4 mit induktiv gehärteten Schaltklauen, Stell- und Befestigungselemente für Gerüst- und Schalungsbauten aus GJMW-400-5, Tellerräder mit fertiggegossener Verzahnung für landwirtschaftliche Maschinen aus GJMB-550-4 u. GJMB-700-2.

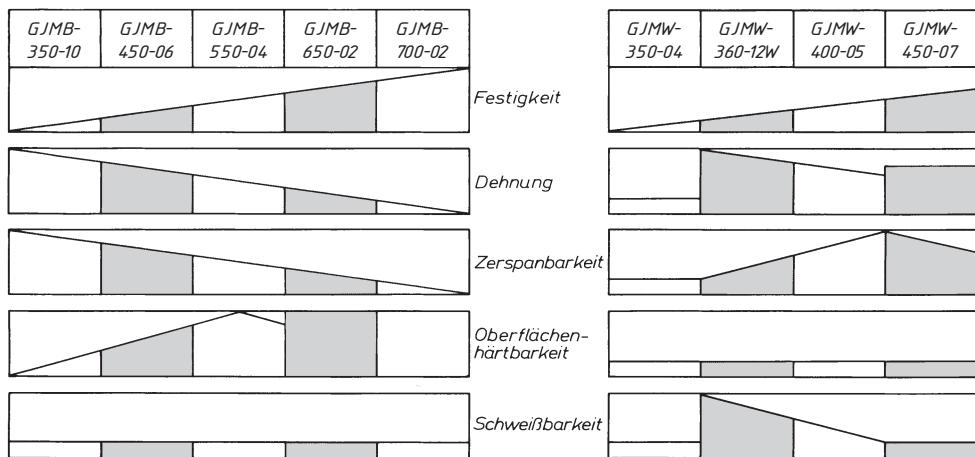


Bild 6.13 Eigenschaftsprofil der Tempergusssorten (H. Kowalke)

6.6 Gusseisen mit Vermiculargraphit

[7]

Vermiculargraphit ist *wurmförmiger* Graphit, eine Art Zwischenform von Lamelle zur Kugel (Bild 6.14).

Herstellung in ähnlicher Weise wie GJS mit einer Mg-Behandlung von S-armen Roheisen nach 3 verschiedenen Verfahren. Durch einen Rest-Mg-Gehalt wird die *lamellare* Graphitausbildung unterdrückt, die kugelförmige aber nicht ganz erreicht.

Erstarrung. Es besteht eine starke Wanddicken-abhängigkeit: In dünnen Querschnitten überwiegenden Kugeln, in dicken die wurmartigen Graphitkristalle. Meist entsteht ein ferritisches Grundgefüge, dünnwandige Gussstücke brauchen nicht gegläut zu werden.

Wegen der ähnlichen Herstellungsweise ist GJV kaum kostengünstiger als GJS. Die Sicherung konstanter Qualität im Gussteil ist aufwändiger (Ultraschallprüfungen).

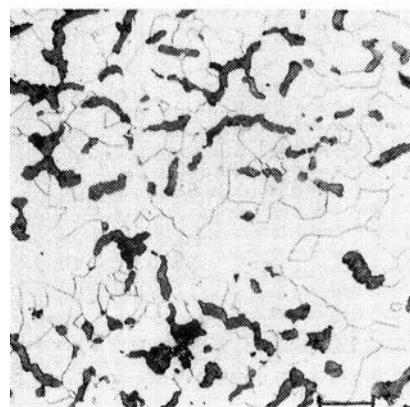


Bild 6.14 Gusseisen mit Vermiculargraphit
GJV-300 200:1

GJV hat wegen seiner Graphitstruktur Eigenschaften, welche zwischen denen der beiden anderen Gusswerkstoffe GJL und GJS liegen:

Tabelle 6.6: GJV-Sorten VDG-Merkblatt W-50/02

Symbol	R_m ¹⁾	$R_{p0,2}$	A_{min}	HBW 30
GJV-300	300...375	220...295	1,5	140...210
GJV-350	350...425	260...335	1,5	160...220
GJV-400	400...475	300...376	1,0	180...240
GJV-450	450...525	340...415	1,0	200...250
GJV-500	500...575	380...455	0,5	220...260

1) Werte steigen mit fallender Wanddicke

Die VGD-Norm enthält u.a. 3 Diagramme der Wanddicken-abhängigkeit zur Wahl der getrennt gegossenen Probestücke für die maßgebliche Wanddicke des Gussteils.

Eigenschaften. Die Kombination aus kleinerem E-Modul, höherer Wärmeleitfähigkeit und geringere Wärmedehnung gegenüber GJS macht sich in kleineren thermischen Spannungen bei Temperaturwechseln bemerkbar: d.h. weniger Rissneigung oder Verzug.

Die innere Oxydation von GJL bei höheren Temperaturen, die längs der zusammenhängenden Graphitlamellen verläuft, findet bei Wurmgraphit nicht statt. Daher kein „Wachsen“ des Bauteils, wichtig bei thermischer Beanspruchung.

6.7 Sonderguss

Für besonders hohe Anforderungen an Korrosions- und Verschleißbeständigkeit oder bei thermischen Beanspruchungen sind weitere Gusswerkstoffe entwickelt worden, die unter dem Begriff Sonderguss laufen.

Säurebeständiges Gusseisen mit 14...17 % Si bei 0,6...0,9 % C ist außerordentlich hart und spröde und gehört trotz des niedrigen C-Gehaltes nicht zur Werkstoffgruppe Stahl, da die Schmiedbarkeit fehlt.

Schalenhartguss wird in Kokillen vergossen, so dass durch die Abschreckwirkung der Rand weiß erstarrt, während nach dem Kern hin zunehmend Graphit auftritt.

Verschleißbeständiges Gusseisen DIN EN 12513/01 (DIN 1695 Z)

[9]

Widerstand gegen furchenden Verschleiß (Abrasion) bringen steigende Anteile von Carbiden, in denen das Fe durch Cr ersetzt ist oder Sondercarbide, die auch Mo enthalten und wesentlich härter sind als Zementit. Sie liegen in einer martensitisch-austenitischen Grundmasse, die bei Abkühlung aus dem Gusszustand entsteht oder durch Wärmebehandlung erzeugt wird.

Vergleich von GJV mit GJL und GJS

GJV ist günstiger in folg. Eigenschaften als GJL in		GJS in
Festigkeit, Zähigkeit		Gießeigenschaften
Steifigkeit		Zerspanbarkeit
Dauerwechselfestigk.		Dämpfungsfähigkeit
Oxidationsbeständigk.		Formbeständigkeit
Temperaturwechsel-beständigk.		bei Temperatur-wechseln (Verzug)

Anwendungen: Thermisch beanspruchte Bauente wie z.B. Abgaskrümmer, Abgasturboladergehäuse, Kupplungsscheiben, Zylinderköpfe für stationäre Dieselmotoren 200 kg, Motorblock für Opel-Kfz. (Rennversion), Stahlwerkskokille 23 t, AUDI/BMW-Achtzylindermotor für Dieselmotor.

Für Bauteile mit umfangreichen Zerspanungsarbeiten ist GJV kostengünstiger als GJS, wenn dessen höhere mechanischen Eigenschaften nicht erforderlich sind, GJL aber nicht ausreicht, z.B. Getriebegehäuse, Grundplatte für Großdieselmotor.

Beispiel: GJH-X70Si15 ist gegen heiße Säuren beständig, für Pumpenteile und Armaturen in der chemischen Industrie, Anoden für den kathodischen Korrosionsschutz.

Anwendungsbeispiele: Walzen aller Art, die keiner Stoßbelastung ausgesetzt sind, hohlgossene Nockenwellen für BMW-V8-Dieselmotoren, Oberflächenhärte 50...55 HRC.

Die bisherigen Bezeichnungen ließen die chemische Zusammensetzung erkennen. Die neuen geben nur die Vickershärte an (→).

Die Sorten haben ein graphitfreies Gefüge aus überwiegend Martensit (Anteile von Bainit und Austenit), z.T nach normaler Abkühlung. Die C-Gehalte liegen von 2,6 bis 3,6 %. Wichtigstes LE ist Cr, daneben Ni und Mo.

Cr stabilisiert die graphitfreie Erstarrung, bei geringen Si-Gehalten (< 1%) und bildet härtere Cr-Mischcarbide. Der nicht gebundene Anteil (im Mischkristall gelöste) steigert Härtbarkeit und Korrosionsbeständigkeit.

Austenitisches Gusseisen DIN EN 13835/03 [8]

Die mit Ni hochlegierten Sorten 12...35 %) verbinden die hohe Korrosionsbeständigkeit und evtl. Hitzebeständigkeit der entsprechenden Stahlgusssorten mit der leichteren Gießbarkeit eutektischer Fe-C-Legierungen, d.h. niedrige Schmelztemperaturen, geringere Lunkerneigung und gutes Formfüllungsvermögen. Der Aufwand beim Formen, Schmelzen und Gießen ist jedoch höher als bei den GJS-Sorten.

Die Sorten unterscheiden sich durch abgestuften Ni-Gehalte und weitere LE, die in Kombination bestimmte Eigenschaften bewirken sollen (Tabelle 6.7).

Tabelle 6.7: Wirkung der Legierungselemente

LE	LE- %	Wirkung
C	2,6...3	Wegen der Gießbarkeit wird eine naheutektische bis eutektische Zusammensetzung angestrebt. Da Ni den eutektischen Punkt im EKD nach links verschiebt, genügen dazu 2,6...3 % C
Ni	12...35	Hauptlegierungselement, stabilisiert den Austenit bis zu tiefen Temperaturen. Wird darin unterstützt von Mn, Cr und Cu. Ni ergibt bei ca. 35 % Anteil Sorten mit geringster thermischer Ausdehnung
Cr	1...5,5	Cr- Gehalt wegen der Gefahr der Cr-Carbidbildung niedrig (Versprödung). Cr ist aber wichtig für dichten Guss, die Korrosionsbeständigkeit und Schweißeignung
Mn	0,5...7	Unterstützt die Wirkung des Ni, hat aber keine Wirkung auf Korrosions- und Hitzebeständigkeit, deshalb nur bei nichtmagnetisierbaren Sorten in höheren Anteilen (3 Sorten)
Si	1...6	Notwendig für die Graphitbildung, erhöht bei hohen Ni-Gehalten die Zunderbeständigkeit durch Bildung einer SiO ₂ -Schicht (in 2 Sorten enthalten)
Nb	...0,2	Verbessert die Schweißeignung, 1 Sorte für Bauteile mit Fertigungs-/Konstruktionsschweißungen

Durch ca. 2 % Mo wird die Warmfestigkeit weiter erhöht. Mo ist in den genormten Sorten nicht enthalten

Sortenvergleich

DIN EN 12513	DIN 1695 Z	Handelsname
Chrom-Nickel-Gusseisen, 3 Sorten		
GJN-HV520	G-X260NiCr 2	Ni-Hard 2
GJN-HV550	G-X330NiCr 4 2	Ni-Hard 1
GJN-HV600	G-X300CrNiSi 9 5 2	Ni-Hard 4
Hochchromhaltige Gusseisen, 4 Sorten ¹⁾		
GJN-HV600(XCr14)	G-X 300 CrMo 15 3	
GJN-HV600(XCr23)	G-X 300 CrMo 27 1	

¹⁾ Innerhalb jeder Sorte gibt es drei Varianten mit gestuften C-Gehalten zwischen 1,8 und 3,6 %. Mit jeweils abnehmender Zähigkeit und Durechhärtung.

Hinweise: Diese Werkstoffe sind seit Jahren unter der geschützten Bezeichnung *Ni-Resist* in zahlreichen Sorten im Handel. Die EN-Norm hat ihre Anzahl auf 2 Sorten mit Lamellengraphit (GJLA- und 10 mit Kugelgraphit (GJSA-reduziert

Austenitisches Gefüge kann bei tiefen Temperaturen oder örtlich bei mechanischer Beanspruchung zu Martensit umwandeln (nicht zu Perlit, da keine C-Diffusion stattfinden kann). Die Folgen sind Versprödung und der vorher unmagnetische Werkstoff wird magnetisierbar (dadurch Nachweismöglichkeit einer evtl. Umwandlung).

Tabelle 6.8: Austenitisches Gusseisen, Auswahl

Sorte	R_m MPa	A %	Eigenschaften	Anwendungsbeispiele
GJLA-XNiCuCr15-6-2	170...210	2	Gute allg. Korrosionsbeständigkeit und Gleiteigenschaften (Lamellengraphit, hohe Wärmedehnung und Dämpfungsfähigkeit)	Kolbenringträger für Leichtmetallkolben, gering mechanisch beanspruchte Teile
GJSA-XNiCr20-2	370...480	7	w.o. mit höherer Zähigkeit, hohe Hitzebeständigkeit	Pumpen, Ventile, Zylinderbuchsen
GJSA-XNiMn23-4	440...480	25	kaltzäh bis -196°C, nicht magnetisierbar, hohe Dehnung und Zähigkeit	Gussteile für die Kältetechnik
GJSA-XNiSiCr35-5-2	370...450	7	Höchste Hitze- und Temperaturbeständigkeit (960 °C) geringe Wärmedehnung	Abgaskrümmer für hochbelastete Motoren BMW), Turboladergehäuse (Porsche)

Tabelle 6.9: Daten zur Gusserzeugung 2005 (nach DGV)

Branche	Abnahme in 1000 t		Sorten	Erzeugung in 1000 t	
		%			%
Fahrzeugbau	2 352	56,0	Stahlguss	201,6	4,8
Maschinenbau	1 008	24,0	GJL (GG)	2461,2	58,6
Rohre-/Formstücke	138,6	3,3	GJS (GGG)	1482,6	35,3
Sonstige	701,4	16,7	GJM (GT)	54,6	1,3
	4,1 Mill. t			4,2 Mill. t	

Literaturhinweise:

- Fachzeitschriften** Konstruieren und Gießen (K+G), ZVG, Zentrale für Gussverwendung, Giesserei, VDG-Verlag, beide 40010 Düsseldorf, PF 10 19 61 (www.dvg.de)
- [1] Deike, R. u.a.: **Gusseisen mit Lamellengraphit**, Eigenschaften und Anwendungen. K+G, 2000/2
 - [2] Herfurth, Röhrig u.a.: **Gusseisen mit Kugelgraphit**. K+G, 2007/2 (auch Sonderdruck)
 - [3] Schock, D.: **Bainitisches Gusseisen mit Kugelgraphit** – Ein Werkstoff mit großem Entwicklungspotential. K+G 2000/4
 - [4] Röhrig, K.: Europäische ADI-Entwicklungskonferenz – Eigenschaften, Bauteilentwicklung und Anwendungen. K+G, 2003/1
 - [5] Engels, A. u.a.: **Duktiles Gusseisen, Temperguss**. K+G, 1983/1+2
 - [6] Werning, H.: **Schwarzer Temperguss** – Herstellung, Eigenschaften und Anwendungen. K+G, 2000/1; Schweißkonstruktionen mit weißem Temperguss. K+G, 1995/2
 - [7] Röhrig, K.: **Gusseisen mit Vermiculargraphit** – Herstellung, Eigenschaften, Anwendung. K+G, 1991/1
 - Ludwig, Pusch u.a.: Mechanische und bruchmechanische Kennwerte für unterschiedlich behandeltes Gusseisen mit vermicularer Graphitausbildung, K+G. 2006/3
 - [8] Röhrig, K.: **Austenitisches Gusseisen**, Eigenschaften und Anwendung. K+G, 2004/2
 - [9] Röhrig, K.: **Verschleißbeständige Gusseisen**, von DIN 1695 zu DIN EN 12513, K+G, 2001/2
 - Werning, H.: Verschleißbeständige weiße Gusseisenwerkstoffe. K+G, 1999/1
 - Röhrig, K.: Gusseisen-Strangguss, Wärmebehandlung, Beschichten, Anwendungen. K+G, 2005/3
 - Siefer, W.: Bestellung von Werkstücken aus Gusseisen mit Kugelgraphit – Was der Konstrukteur auch noch wissen sollte. K+G, 1994/1
 - Wolters, Diether, B.: Wärmebehandlung von Gusseisen mit Lamellen- oder Kugelgraphit. K+G, 1996/2
 - Oldewurtel, A.: Werkzeug(Guss)-werkstoffe für Großwerkzeuge. K+G, 20003/1

7 Nichteisenmetalle

7.1 Allgemeines

In Tabelle 7.1 sind die Anteile der wichtigsten Metalle angegeben, die in der Erdrinde enthalten sind. Aluminium ist das *häufigste* (→).

Die anderen *Nicht-Eisen-Metalle*, kurz NE-Metalle, sind wesentlich seltener. Sie können wirtschaftlich nur gewonnen werden, weil sie vielfach in Erzgängen, Erznestern oder Schichtablagerungen *konzentriert* anstehen.

Meist sind *mehrere* Metallverbindungen miteinander verwachsen, ihre Trennung ist umständlich und teuer. Die Erzeugung beträgt nur einen Bruchteil der Eisen- und Stahlproduktion.

So erklärt sich der z.T. hohe Preis. Der Einsatz der NE-Metalle und ihrer Legierungen ist deshalb auf solche Fälle beschränkt, bei denen ihre besonderen Eigenschaften gegenüber Stahl benötigt werden.

Übersicht: Besondere Eigenschaften der NE-Metalle

Eigenschaften	Metalle und Legierungen
Niedrige Dichte (kg/dm ³)	Magnesium (1,75), Aluminium (2,7), Titan (4,5)
Niedriger Schmelzpunkt (Gießbarkeit)	Blei 327, Zink 420, Magnesium 650, Aluminium 660 °C
Korrosionsbeständigkeit	Aluminium, Kupfer, Nickel, Titan u. Legierungen
Warmfestigkeit, Hitzebeständigkeit	Wolfram, Kobalt, Nickel, Chrom, Molybdän u. ihre Legierungen
Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität	Silber, Kupfer, Aluminium
Gleiteigenschaften (Lagermetalle)	Blei, Zinn, Kupfer, Aluminium (nur als Legierungen)
Neutronenaufnahme (Reaktorbau)	Zirkonium (gering), Cadmium, Hafnium (hoch)

7.2 Bezeichnung von NE-Metallen und -Legierungen

7.2.1 Übersicht

Wie bei Stahl gibt es Bezeichnungssysteme nach

- Werkstoffnummern und
- Kurzzeichen mit chemischen Symbolen.

Durch Wegfall der DIN 1700 *Bezeichnungen für NE-Metalle* gelten die Regeln für die einzelnen Legierungssysteme wie sie in den Normen zu finden sind, z.B. für Al und seine Legierungen (→).

Tabelle 7.1: Anteil wichtiger Metalle an der Erdrinde

Element	Al	Fe	Mg	Ti	Zn	Ni	Cu
Anteil %	7,5	4,7	1,9	0,58	0,02	0,02	0,01

Trotzdem hat Al nicht die Bedeutung des Eisens erlangt. Die Gründe dafür sind:

- Al ist in vielen nicht abbauwürdigen Erden und Gesteinen enthalten,
- Al benötigt zur Darstellung aus den Rohstoffen viel elektrische Energie, die erst im Jahre 1880 (Werner v. Siemens) erzeugt werden konnte, während Eisen und seine Herstellung schon im Altertum bekannt war,
- Al ist nicht durchhärbar, es scheidet als Werkstoff für höher beanspruchte Werkzeuge aus.

Beispiel: AL und Al-Legierungen – Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug

DIN EN	Bezeichnung
573-1/05	Bezeichnungssysteme mit Werkstoffnummern
573-2/94	mit chemischen Symbolen
573-3/03	Chemische Zusammensetzung
573-4/04	Erzeugnisformen
515/93	Bezeichnung der Werkstoffzustände

Die vollständige (eindeutige) Bezeichnung von Produkten aus NE-Metallen erfolgt in der unten angegebenen Reihenfolge, jeweils mit Kurzzeichen (Symbolen). Vollständige Regeln für die Benennung der Legierungen sind im Anhang unter A. 3 zu finden.

Legierung	Zustand ¹⁾	Erzeugnis
Werkstoffnummern oder chemische Symbole geben die Zusammensetzung an	Zustandsbezeichnungen (mit Bindestrich angehängt) geben Herstellungsart, Wärmebehandlung, Festigkeit oder Härte an.	Abmessungen und Norm der Erzeugnisform (Bleche und Bänder, Rohre, Stangen usw.)

¹⁾ Die Herstellungsart prägt den Gefügezustand entscheidend und legt damit die Eigenschaften des Produktes fest.

7.2.2 Werkstoff

Für Metalle werden die chemischen Symbole verwendet. Wenn es auf die Reinheit ankommt (Korrosionsbeständigkeit, Duktilität, elektrische Leitfähigkeit), wird der Metallgehalt in Prozenten nachgestellt (→).

Verunreinigungen bewirken eine Zunahme der Festigkeit und Härte mit Abnahme der Bruchdehnung (Beispiel →).

In anderen Fällen werden nach den jeweiligen Normen Zähzliffern angehängt (→).

7.2.3 Zustandsbezeichnungen

Nachgestellte Symbole (Tabelle 7.2) können entweder *keine bestimmten*, oder aber gewährleiste Festigkeits- oder Härtegrade markieren. Für einige Werkstoffgruppen (Al- und Cu-Legierungen) sind DIN EN-Normen erschienen, die mit neuen Bezeichnungssystemen arbeiten (Anhang, Tabellen A.16...A.18).

Die Festigkeitsstufen werden durch die Kaltverfestigung beim Umformen erzielt. Die Zahlen in Tabelle 7.3 zeigen, dass dabei die Bruchdehnung sinkt. Rückglühen steigert sie wieder, *ohne* dass die Festigkeit stark abfällt. (Bedeutung der Anhängezeichen → Tabelle Anhang A.16).

Die Metalle Blei, Zinn und Zink können nicht auf diese Weise in Halbzeugen mit erhöhter Festigkeit geliefert werden, da sie bei Raumtemperatur rekristallisieren.

Beispiele: Bezeichnung reiner Metalle

Al 99,9 Aluminium mit 99,9 Metallgehalt

Ni 99,2 Nickel mit 99,2 Metallgehalt

Beispiel: Einfluss von Verunreinigungen auf die Eigenschaften bei Al-Strangpressprofilen

Werkstoff	R_m	$R_{p0,2}$	A5
	MPa		%
Al 99,8	55	20	25
Al 99	75	30	18

Beispiel: Bezeichnung von unlegiertem Titan. DIN 17850: 4 Sorten T1, T2, T3, T4 mit steigendem O-Gehalt.

Tabelle 7.2: Beispiele, Zustand von Halbzeugen

EN-Norm	Bedeutung	früher	Symbol DIN Z
M, D	stranggepresst f. Cu, gezogen F f. Al gewalzt	ohne bestimmte Festigkeit	p zh wh
-O	weichgegl.	$R_m > 100$ MPa	W10
-H16	kaltverfestigt	$R_m > 160$ MPa	F16
-H26	kaltverfestigt + rückgeglüht	$R_m > 140$ MPa	G16

Tabelle 7.3: Beispiel, Zustände bei Al 99,8¹⁾:

Kurz-Zeichen	R_m MPa	$R_{p0,2}$ MPa	A_{50mm} %	Biegeradius r
A199,8 - O	80...90	15	18	0 t
- H12	80...120	55	7	0,5 t
- H22	80...120	50	11	0,5 t
- H14	100...140	70	5	1,0 t
- H16	110...150	80	3	1,0 t
- H18	125	105	2	2,5 t

¹⁾ Erzeugnisdicke, Blech $t = 1,5$ mm

Neben Normbezeichnungen sind für viele NE-Metalllegierungen noch überlieferte Namen in Gebrauch, wie z.B. Messing, Bronze, Neusilber, Rotguss, auch nicht genormte Legierungen unter meist geschützten Namen (→).

Legierungen auf der Basis von Al, Cu, Mg, Ni und Ti werden nach der Art der Verarbeitung eingeteilt in *Knetlegierungen* und *Gusslegierungen*.

7.2.4 Knetlegierungen

Hauptanforderung ist gute *Formbarkeit* kalt oder warm. Das ist bei homogenem Gefüge der Fall, d.h. wenn die LE in Mischkristallen vollständig gelöst vorliegen. Dann ist allerdings eine Zerspanung schwierig. Knetlegierungen neigen dabei zum Schmieren, d.h. ergeben *raue* Oberflächen. In den Zuständen mit höherer Festigkeit (halbhart, hart) ist die Zerspanbarkeit besser. Für Teile mit größeren Zerspanungsarbeiten sind Automatenlegierungen günstiger (→).

7.2.5 Gusslegierungen

Hauptanforderungen sind gute Gießeigenschaften (6.1) und leichte Zerspanbarkeit. Sie haben deshalb andere Analysen als Knetlegierungen und meist heterogene Gefüge. Die sprödere Kristallart wirkt damit von selbst spanbrechend. Die Sorten sind oft *eutektisch* oder *naheutektisch* mit niedrigen Schmelztemperaturen und Schwindungen.

Die Gießart (Tabelle 7.4) beeinflusst das entstehende Gefüge und damit die mechanischen Eigenschaften (Tabelle 7.5). Gewährleistete Abnahmewerte gelten für größere Wanddicken. Je nach Erstarrungsbedingungen lassen sich höhere Werte erzielen (Rücksprache mit der Gießerei!).

Kokillenguss erstarrt durch die bessere Wärmeleitung in der Metallform schneller und feinkörniger als Sandguss.

Schleuderguss besitzt dichtere Gefüge, weil Gasblasen und Schlackenteilchen unter Wirkung der Fliehkraft innen verbleiben (z.B. bei Zahnränen).

Beispiele für Handelsnamen:

Ni-Werkstoffe: *Inconel®*, *Nimocast®*, *Nimonic®*, *Coronel®*, *Nicorros®*, *Magnifer®*.

Cu-Werkstoffe: *Carobronze®*, *Nidabronze®*.

Al-Werkstoffe: *Alufont®*, *Durfondal®*, *Veral®*.

Begriff: *Kneten* ist ein Oberbegriff für die Umformverfahren (→ 1.6), z.B. Walzen, Ziehen, Fließpressen, Strangpressen u.a.

Lieferformen der Knetlegierungen sind Bleche und Bänder, Stangen, Rohre, Drähte, Strangpressprofile und Barren zum Gesenk- und Freiformschmieden mit jeweils eigenen Normen.

Automatenlegierungen haben Anteile von Pb oder S und lassen sich ähnlich wie Automatenstähle leichter und mit guter Oberfläche zerspanen. Die Kurzzeichen dieser Sorten enthalten ein nachgestelltes Pb, evtl. mit Prozentzahl.

Normalsorte	CuZn37	(Ms 63)
Automatensorte	CuZn36Pb1,5	(Ms 63Pb)

Tabelle 7.4: Anhängezeichen für die Gießart

Regelwerk		
Gießart	DIN-EN	DIN (bisher)
Sandguss	– G	GS-
Kokillenguss	– GM	GK-
Druckguss	– GP	GD-
Strangguss	– GC	GC-
Schleuderguss	– GZ	GZ-

Die Zeichen werden nach gültigen DIN EN-Normen nach die Kurzbezeichnung gesetzt. DIN Normen stellten sie vor.

Tabelle 7.5: Einfluss der Gießart auf die Eigenschaften von CuAl10Ni

Gießart	R_m MPa	$R_{p0,2}$ MPa	A_5	HB 10/1000
Sandguss	600	270	12	140
Kokillenguss	600	300	14	150
Schleuderguss	700	300	13	160
Strangguss	700	300	13	160

Strangguss weist ähnlich gute Werte auf (Tabelle 7.5).

Druckguss hat durch das verwirbelte Einströmen in die Form Lufteinschlüsse und dadurch geringe Bruchdehnung und keine Schweißeignung.

Neue Gießverfahren ergeben bessere Zähigkeit und Schweißeignung: Niederdruck-Gießen, Vakuum-Druckguss, Squeeze-Casting (→) und Thixoguss (Gießen im halbfest-flüssigem Zustand).

Festigkeitswerte der genormten Gusslegierungen werden an Probstäben ermittelt, deren Herstellung mit dem Gusslieferanten zu vereinbaren ist:

- Abgießen der Charge in getrennter Form;
- Angießen von Probeleisten für die Probe,
- Herausarbeiten aus dem Gussteil (Stichprobe).

Squeeze-Casting. Pressgießen, Gießen mit langsamer Formfüllung und hohem Stempelnachdruck in Druckgießformen ergibt porenfreien Guss. Anwendung z.B. für Sicherheitsbauteile an Fahrzeugen.

7.3 Aluminium

7.3.1 Vorkommen und Gewinnung

Wichtigster Rohstoff ist der *Bauxit*, nach dem Ort Les Baux südlich Avignon benannt, wo dieses Verwitterungsgestein erstmals abgebaut wurde (Entdeckung 1821) Tabelle 7.6.

Tabelle 7.6: Zusammensetzung des Bauxits

Stoff	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	H ₂ O
Anteil in %	55...65	...28	...7	12...30

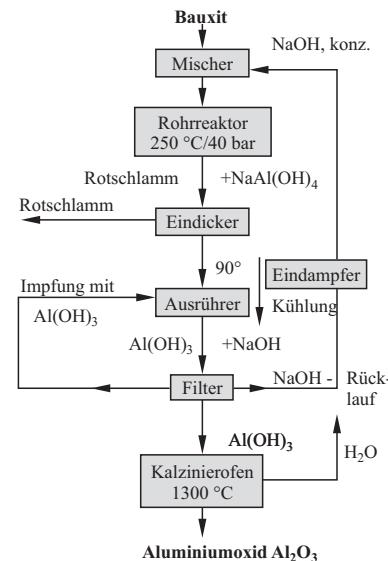
Hauptlagerstätten sind in Südfrankreich, Ungarn, Jugoslawien, Griechenland, Indien, Brasilien und Westafrika.

Aufbereitung. Dieses Erz muss zunächst von den Fremdstoffen befreit werden. Tabelle 7.7 zeigt den Ablauf des BAYER-Verfahrens (1892).

Durch Behandlung mit heißer Natronlauge NaOH wird das AL-Oxid in die wasserlösliche Verbindung *Natriumaluminat* NaAl(OH)₄ umgewandelt. Sie kann durch Filtrieren von den anderen unlöslichen Stoffen getrennt werden. Der eisenhaltige Filterrückstand, als Rotschlamm bezeichnet, wird von den Hochofenwerken und der keramischen Industrie abgenommen.

Aus der Aluminatlösung wird durch Kristallisation das Al-Hydroxid Al(OH)₃ gewonnen, gewaschen und in Drehrohröfen geäugt (kalziniert). Dabei wird Wasser ausgetrieben und technisch reine Tonerde Al₂O₃ bleibt zurück. Sie ist das Einsatzmaterial für den nachfolgenden Reduktionsprozess zu **Primär-Aluminium** (→).

Tabelle 7.7: BAYER-Verfahren, schematisch



Neben dem Primär-Aluminium aus Bauxit hat das Sekundär-Aluminium aus dem Recycling einen großen Anteil an der Gesamterzeugung in der Bundesrepublik Deutschland von 1,34 Mill t:

2003	sekundär	660 000 t
	primär	680 000 t

Schmelzfluss-Elektrolyse (Bild 7.1)

Al und die anderen Metalle der ersten beiden Gruppen des PSE (Be, Ca, K, Mg und Na) haben zum Sauerstoff eine viel größere Bindungsenergie (= -wärme) als der Kohlenstoff. Die endotherme Energie, welche die Reduktion erfordert, muss deshalb vom elektrischen Strom aufgebracht werden.

Das Verfahren wird in Wannenöfen mit Kohlestampfmasse (Kathode) durchgeführt (Bild 7.1). Das Al-Oxid ($T_m > 2000^\circ\text{C}$) muss dazu geschmolzen werden. Flussmittel ist Kryolith, der Al-Oxid bei einer Arbeitstemperatur von 950°C löst (1886 von Heroult entdeckt). Bei 5 V Gleichspannung und $70 \dots 140\text{ kA}$ Strom werden die Al-Ionen an der Kathode reduziert.

Als Anoden dienen Kohleblöcke. Das frei werdende O bindet den Kohlenstoff zu CO. Das flüssige Al sammelt sich am Boden und wird periodisch abgepumpt, verbrauchtes Al-Oxid ebenso nachgefüllt.

Tabelle 7.8: Stoff- und Energiebilanz für die Erzeugung von 1 t Aluminium (Al-Zentrale)

Verfahrensschritt	Rohstoffe	Energie-Bedarf
Oxid-Gewinnung	4 t Bauxit ergeben 2 t Al-Oxid	8400 kWh Wärmeenergie
Elektrodenherstellung	0,55 t Petrokoks + Steinkohlenteerpech	85 kWh Wärmeenergie
Schmelzfluss-Elektrolyse	2 t Al-Oxid + 0,05 t Kryolith 0,5 t Elektrodenverbrauch	13500 kWh Gleichstrom

7.3.2 Einteilung der Al-Knetwerkstoffe

Die Al-Knetwerkstoffe sind in DIN EN 573 genormt. Die Einteilung in 8 Legierungsreihen 1000 bis 8000 nach den Hauptlegierungselementen (Tabelle 7.9) folgt dem Internationalen Legierungsregister der Aluminium Association (AA).

Gegenüber der Norm DIN 1725 hat sich die Anzahl der Sorten erhöht (Tabelle 7.9), weil zu den *Originalsorten* zahlreiche nationale Varianten und Legierungsabwandlungen kommen. Sie haben nur geringe Unterschiede zum Original. Zahlreiche Sorten werden nur in kleinen Mengen und für spezielle Anwendungen hergestellt (z.B. Luftfahrtwerkstoffe).

Die technische Herstellung des Al war erst dann möglich, als elektrische Energie wirtschaftlich mit der Dynamomaschine erzeugt werden konnte (Siemens 1866).

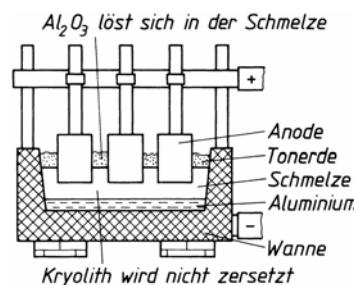


Bild 7.1 Wannenofen zur Schmelzfluss-Elektrolyse des Aluminiums

Tabelle 7.9: Gliederung der Al-Legierungen nach chemischer Zusammensetzung (DIN EN 573-3)

Leg.-Reihe	Haupt-LE	weitere LE	Sorten Anzahl ¹⁾
1 xxx	Al	Al > 99 %, unlegiert	7 (17)
2 xxx	Cu	Mg, Mn, Bi, Pb, Si	10 (17)
3 xxx	Mn	Mg, Cu	5 (15)
4 xxx	Si	Mg, Bi, Fe, CuNi	10 (14)
5 xxx	Mg	Mn, (Cr, Zr)	14 (54)
6 xxx	MgSi	Mn, Cu, Pb	13 (33)
7 xxx	Zn	Mg, Cu, Ag, Zr	26 (27)
8 xxx	Sonst.	Fe, FeSi, FeSiCu	8 (13)

¹⁾ Originalsorten (Gesamtzahl in Klammern).

Das Herstellverfahren bestimmt den Zustand des Erzeugnisses und damit seine mechanischen Eigenschaften. Sie sind in den Normen (Tabelle 7.10) festgelegt und werden durch die angehängten **Zustandszeichen** (→) markiert.

Nach DIN EN 573-4 werden die bisherigen F-Zahlen ($1/10 R_m$) nicht mehr verwendet, sondern Symbole aus Buchstaben und Ziffern (→). Zwischen dem Zustand *geglüht* (weich) und der höchsten Verfestigung *vollhart* sind vier Stufen der Verfestigung zwischengeschaltet (viertel-, halb- und dreiviertelhart) und durch die zweite Ziffer hinter dem H gekennzeichnet. Die Festigkeitswerte lassen sich daraus nicht ablesen, sie sind Teil der jeweiligen Erzeugnisnormen.

7.3.3 Unlegiertes Aluminium, Reihe 1000

Al bildet wegen seiner großen Affinität zum Sauerstoff an der Luft eine dünne, aber dichte, festhafende Oxidschicht, die ihr Kristallgitter auf dem des Grundwerkstoffes aufbaut (Epitaxie) und die es vor weiterem Angriff schützt. Laugen und manche Säuren (HCl) und Salze (Halogenide) lösen sie auf. Dagegen ist Al nicht beständig. Die Oxidschicht kann durch *anodische* Oxidation verstärkt werden (→ Oberflächenbehandlung).

Verwendung des Reinaluminiums: Lager- und Transportfässer, Verpackungsmittel, Haus- und Küchengerät, elektrische Leitwerkstoffe für Kabel, Stromschienen und Freileitungen (hartgezogen), Kondensatoren und Kabelmäntel.

Eloxierte Halbzeuge im Bauwesen und Fahrzeugbau zur Dekoration und hochglänzend für Reflektoren, Plattierwerkstoff für Al-Legierungen. Al ist *Reduktionsmittel* (Granulat) für hochschmelzende Metalle (Thermit-Verfahren), Al-Pulver für Farben (Hammerschlaglack).

Wirkung der Legierungselemente. Die LE sollen die niedrige Streckgrenze anheben, ohne dass die Korrosionsbeständigkeit verloren geht. Das kfz. Al-Gitter kann nur wenige Prozente dieser LE lösen und Mischkristalle bilden. Die Fremdatome erhöhen den Gleitwiderstand (damit die Streckgrenze) bei Erhalt der Verformbarkeit.

Zustandsbezeichnungen DIN EN 515/93

Symbol ¹⁾	Bedeutung
-F	Herstellungszustand, keine Grenzwerte der mech. Eigenschaften
-O	Weichgeglüht (O1, O2, O3)
-H1 -H12	nur kaltverfestigt (viertelhart)
-H14	(halbhart)
-H16	(dreiviertelhart)
-H18	(vollhart)
-H2	kaltverfestigt und rückgeglüht
-H3	kaltverfestigt und stabilisiert
-H4	kaltverfestigt und einbrennlackiert
-W	lösungsgeglüht (instabiler Zustd.)
-T4	lösungsgeglüht + kaltausgelagert
-T6	lösungsgeglüht + warmausgelagert

¹⁾ -H2, -H3 und -H4 ebenfalls mit 2, 4, 6, 8 oder 9 kombinierbar.
→ Anhang, Tabellen A.16...18.

Aluminium-Eigenschaften

+	Niedrige Dichte, $\gamma = 2,7 \text{ kg/dm}^3$, gute Witterungsbeständigkeit, Wärme- und Stromleitfähigkeit hoch, Polierbarkeit, anodisch oxidierbar
-	Niedrige Festigkeit und Streckgrenze, unbeständig gegen basische Stoffe, Löten u. Schweißen nur mit Flussmitteln

Festigkeiten MPa	Temperaturen °C
R_m 40...80	Schmelzen 660
$R_{p0,2}$ 10...30	Schmieden 300...500
E -Modul $7,2 \cdot 10^4$	Rekristallisieren > 250
G -Modul $2,7 \cdot 10^4$	
Härte HB 2,5 12...20	

Wichtige LE sind **Mn, Mg, Si, Cu** und **Zn**, die bei höheren Anteilen mit dem ungelösten Teil intermetallische Phasen bilden, die hart und spröde sind. Durch sie wird Härte und Festigkeit erhöht, jedoch geht die Verformbarkeit verloren. Knetlegierungen enthalten deshalb wenig LE, insgesamt meist 3...5 % (Cu evtl. mehr).

Al-Mischkkristalle haben eine mit sinkender Temperatur abnehmende Löslichkeit (Bild 2.66). Bei der Abkühlung finden sekundäre Ausscheidungen statt (Segregat an den Korngrenzen). Dadurch sind einige Legierungstypen aushärtbar.

Korrosionsbeständigkeit. Das edlere Element Cu vermindert schon in Anteilen von 0,1 % die gute Beständigkeit des reinen Al. AlCu-Legierungen sind deshalb nicht ausreichend witterungsbeständig. Sie können als Blech und Band mit Rein-Al plattierte geliefert werden.

Oberflächenbehandlung

Bei allen Al-Legierungen lässt sich die natürliche Oxidschicht verstärken. Sie ist elektrisch isolierend, hart und mikroporös, sodass sie Farben und Schmiermittel in geringem Maße festhalten kann.

Dekorativ wirkende Schichten (gleichmäßige Färbung und hochglänzend) lassen sich nur mit bestimmten Sorten erzielen (Glanzlegierungen mit 99,5 % Al, Mg und ohne Cr), Verschleißschutzschichten (hartanodisieren) auf allen Sorten.

Die Aushärtung ist für Al-Legierungen sehr wichtig. Erst dadurch kommen sie in den Festigkeitsbereich der unlegierten Stähle und ermöglichen Leichtbaukonstruktionen. Nur die Legierungen der Reihen 2000, 6000 und 7000 sind aushärtbar.

Hinweis: Beim Recycling von Al-Schrott kann Cu nicht entfernt werden. Dieses Umschmelzaluminium wird bei der Herstellung als Verschnitt für das Primärmetall verwendet. Die so erschmolzenen Gusslegierungen enthalten höhere Anteile an Cu als solche aus Primärmetall, Kennzeichnung erfolgte durch ein nachgestelltes (Cu).

Chemische Oxidation in sauren oder alkalischen Bädern nach verschiedenen patentierten Verfahren erzeugt *Chromat-* oder *Phosphat-*Schichten von 1...3 mm Dicke in verschiedenen Farbtönen. Viele dienen als Haftgrund für Farbanstriche (Alodine-, Bonder- und a. Verfahren).

Anodische Oxidation in schwefelsauren Bädern erzeugt Schichten bis zu 60 µm mit hoher Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit (Härte HV = 1100) nach Eloxal, Veroxal-Verfahren).

Tabelle 7.10: Erzeugnisformen für Al-Legierungen, Normen für mechanische Eigenschaften

Erzeugnisformen	Normen DIN ...	Werkstoff-Sorten ¹⁾	Erzeugnisformen	Normen DIN ...	Werkstoff-Sorten ¹⁾
Gesenkschmiedestücke, Vormaterial	EN 586-2/94 EN 603-2/96	2000, 5000 6000, 7000	Stranggepresste Stangen, Rohre, Profile	EN 755-2/97 (9 Teile)	außer 4000 und 8000
Drähte, Anforderg. Drähte, mech. Eig.	EN 1715-2	alle bis auf 4000	Bleche, Bänder, Platten	EN 485-2/95 (Entwurf 99)	alle Reihen
Gezogene Stangen, Rohre	EN 754-2/97 (8 Teile)	1000, 2000 5000, 6000 7000	Folien Butzen zum Fließpressen TL	EN 546-2/96 (4 Teile) EN 570/94	1000, 6000 1000, 6000
Vormaterial für Wärmetauscher	EN 683-2/96	1000, 3000 6000, 8000	HFgeschweißte Rohre	EN 1592-2/97	3000, 5000. (6000) 7000
Vormaterial für Dosen und Deckel		3000, 5000, 6000, 8000	für Kontakt mit Lebensmitteln ungeeignet sind 2000, 7000 und Pb-, Bi- und Li-haltige Sorten		

¹⁾ jeweils die Hauptsorten innerhalb der Reihen

7.3.4 Nicht aushärtbare Legierungen

Diese Sorten erhalten höhere Festigkeiten durch die Mischkristallverfestigung der LE in Verbindung mit der Kaltverfestigung, die sich bei der Herstellung einstellt, z.B. Kaltwalzen von Blech.

Die Festigkeiten im Halbzeug liegen zwischen 100...310 MPa je nach Legierung und dem Grad der Kaltumformung. Ein Schweißen führt zum Festigkeitsabfall in der WEZ.

Reihe 3000 Al Mn (+Mg)

Eigenschaften wie bei Al19,9 mit etwas höheren Festigkeiten und Beständigkeit gegen Alkalien. Gut löt-, schweiß- und kaltumformbar. Mn erhöht die Rekristallisationsschwelle und dadurch die Warmfestigkeit.

Stoff-Nr.	Sorten EN AW Chemische Symbole mit Zustandsbezeichnung	R_m MPa	A_{50} %	(Werte für Blech 0,5...1,5 mm) Beispiele
3103	Al Mn1-F (W9) Al Mn1-H28 (F21)	90 185	19 2	Dächer, Fassadenbekleidung, Profile
3004	Al Mn1Mg1-O (W16) Al Mn1Mg1-H28 (F26)	155 260	14 2	Niete, Kühler, Klimaanlagen, Rohre, Fließpressteile Getränkedosen, Bänder für Verpackung

Reihe 4000 Al Si (+Fe, Mg, Ni)

Si erniedrigt den Schmelzpunkt (bei 12,5 % eutektischer Punkt) und ist mit 0,8...13,5 % enthalten. Eine aushärtbare Sorte (Al Si1Fe) wird für Bleche eingesetzt.

Reihe 5000 Al Mg (+Mn)

Erhöhte Korrosionsbeständigkeit gegen Seewasser, stärker verfestigend als AlMn. Gute Schweißeignung bei > 2,5 % Mg-Gehalt, bei niedrigen (Mg + Mn)-Gehalten gut kaltformbar.

Stoff-Nr.	Sorten EN AW Chemische Symbole mit Zustandsbezeichnung	R_m MPa	A_{50} %	(Werte für Blech 3...6 mm) Beispiele
5005	Al Mg1-O (W10)	100...145	22	Fließpressteile, Metallwaren
5049	Al Mg2Mn0,8-O (W16) -H16 (F26)	190...240 265...305	8 3	Bleche für Fahrzeug u. Schiffbau
5083	Al Mg4,5Mn0,7-O (W28) -H26 (G35)	275...350 360...20	15 2	Formen (hartanodisiert), Schmiedeteile Masch. Gestelle, Tank u. Silofahrzeuge

7.3.5 Aushärtbare Legierungen

Zustandsbezeichnungen T1...T9 (Tabelle A.16) geben die Art der Wärmebehandlung an.

Reihe 6000 Al MgSi (+ Mn, Cu)

Kalt- und warmaushärtbare Legierungen, davon 4 für die E-Technik. Die Aushärtung wird durch die Phase Mg₂Si bewirkt. Die Sorten sind schweißbar, korrosionsbeständig, jedoch nicht dekorativ anodisierbar. Die beiden niedrigerlegierten Sorten sind besser strangpressbar.

Anwendung: für Dachdeckung und Fassaden, Geräte der Nahrungsmittelindustrie, Kernwerkstoff von lotplattiertem Blech für Wärmetauscher. MnMg-legierte Sorten für Blechverpackungen.

Anwendung: Schweißzusatzdrähte (wenig Si), Schmiedekolben: 4032 [Al Si12,5MgCuNi] mit geringer Wärmedehnung,

Lotplattierung: 4343 [Al Si7,5] oder 4045 [Al Si10] auf 3103 [Al Mn1] für Wärmetauscherbleche.

Anwendung: Statisch beanspruchte Konstruktionsteile im Fahrzeug- und Schiffbau (Bootsrämpfe), Untertagegeräte. Mn ergibt höhere Festigkeit bei Strangpressprofilen und bessere Warmfestigkeit gegenüber AlMg-Sorten.

Hinweis: In Gebrauch sind auch noch die älteren Bezeichnungen: **ka** für kaltausgehärtet und **wa** für warmausgehärtet.

Anwendung: Profile für alle Zwecke im Bauwesen, für Fahrzeug- und Schiffsaufbauten, Wärmetauscher, Rolltore, Wagontüren, Höckerplatten für transportable Brücken. Schmiedelegierung 6082 für Beschläge an Fördergeräten. Sonderlegierungen für Karosseriebleche enthalten etwas Cu, zum Vermeiden von Fließfiguren beim Tiefziehen.

Stoff-Nr.	Sorten EN AW Chemische Symbole mit Zustandsbezeichnung	R_m MPa	A_{50} %	Werte jeweils für das Beispiel
6060	Al MgSi-T4	130	15	Strangpressprofile aller Art, Fließpressteile
6063	Al Mg0,7Si-T6	280		Pkw-Räder u. Pkw-Fahrwerksteile
6082	Al MgSi1gMn-T6	310	6	Schmiedeteile, Sicherheitsteile am Kfz
6012	Al MgSiPb-T6 (F28)	275	8	Automatenlegierung, Hydr.-Steuerkolben

Reihe 2000 Al Cu (+ Mg, Mn, Si, Pb)

Hochfeste Legierungen mit hoher Bruchdehnung (max. 13 %). Sie werden kaltausgehärtet (T4) eingesetzt, durch den Cu-Gehalt haben sie nur geringe Korrosionsbeständigkeit, besonders im Zustand warmausgehärtet (T6). Verbindung durch Nieten, Druckfügen u.a., da beim Schweißen eine Entfestigung eintritt.

Anwendung: Hochbeanspruchte Bauteile im Fahrzeug-, Ingenieur- und Maschinenbau, wenn die geringe Korrosionsbeständigkeit nicht stört: Zahnräder, Pressbleche, Formwerkzeuge für Kunststoffe (hartanodisiert), Bleche und Schmiedeteile für Flugzeugbau, Grubensteinpumpe, Schildvortrieb für Grubenausbau.

Stoff-Nr.	Sorten EN AW Chemische Symbole mit Zustandsbezeichnung	R_m MPa	A_{50} %	Werte jeweils für das Beispiel
2117	Al Cu2,5Mg-T4 (F31 ka)	310	12	(Drähte < 14 mm), Niete, Schrauben
2017A	Al Cu4MgSi-T42	390	12	Platten für Vorrichtungen, Werkzeuge
2024	Al Cu4Mg1-T42	420	8	(Blech < 25 mm) Flugzeuge, Sicherheitsteile
2014	Al Cu4SiMg-T6	420	8	(Schmiedestücke), Bahnhalslagergehäuse
2007	Al CuMgPb-T4 (F34 ka)	340	7	Automatenlegierung, Drehteile

Die Automatenlegierungen werden nur in Form von Stangen und Rohren geliefert und haben warmausgehärtet ausreichende Beständigkeit.

Die Nietlegierung Al Cu2,5Mg kann im kaltausgehärteten Zustand geschlagen werden.

Reihe 7000 AlZn (+ Mg,Cu)

Konstruktionslegierungen höchster Festigkeit mit geringerer Beständigkeit. Für die Luftfahrt werden deshalb Bleche mit AlZn1 plattiert.

Anwendung ähnlich wie Reihe AlCu: Gesenk- und Frästeile für den Flugzeugbau, hartanodisierte Formen zum Tiefziehen von Al-Blech.

Stoff-Nr.	Sorte EN AW Chemische Symbole mit Zustandsbezeichnung	R_m MPa	A_{50} %	(Werte für Bleche < 12 mm) Beispiele
7020	Al Zn4,5Mg1-O -T6	220	12	Cu-frei, nach dem Schweißen selbst-aushärtende Legierung
		350	10	Masch.-Gestelle, } überaltert (T7) gut beständig gegen SpRK
7022	Al Zn5Mg3Cu-T6 (F45wa)	450	8	
7075	Al Zn5,5MgCu-T6 (F53wa)	545	8	Schmiedeteile }

7.3.6 Aluminium-Gusslegierungen

Die Einteilung in drei Gruppen mit steigenden Festigkeiten nach DIN 1725-2/Z ist in der Norm DIN EN 1706 aufgehoben und nach steigenden Werkstoffnummern gegliedert worden. Die Zahl von 14 Sorten wurde auf 37 erhöht, davon 7 für Fein- und 9 für Druckguss (→ Tabelle 7.11).

Bei Gusslegierungen wird die Festigkeitssteigerung durch Mischkristallverfestigung der LE bewirkt, zusätzlich durch Korngrenzenverfestigung über die Ausbildung feinkörniger Gefüge (→).

Auch die Gießart hat Einfluss auf das Gefüge. Durch schnellere Abkühlung beim Kokillenguss (K) wird gegenüber Sandguss (S) ein feinkörnigeres Gefüge erzeugt, Festigkeit und Bruchdehnung steigen (→ Eigenschaftsvergleiche).

Durch Teilchenverfestigung (Aushärten) wird eine weitere Steigerung der Streckgrenze erreicht, wobei die Bruchdehnung wieder sinkt (→).

Veredeln von G-AlSi12 ist eine metallurgische Behandlung der Schmelze mit Na-Metall oder Salzen. Diese stören die Kristallisation, sodass Unterkühlung auftritt und ein feinkörniges Eutektikum entsteht. Andere Sorten werden zum gleichen Zweck mit Al-Borid, TiC oder ZrC geimpft.

Eigenschaftsvergleiche: (Tabelle 7.11 in Zeile 3), **Al Si10Mg(a)**. Die Festigkeitswerte gelten für Sandguss (S) im Gusszustand (F), desgl. für Kokillenguss (K) und warmausgehärtet (T6).

Durch eine **Teilaushärtung** (T64) lässt sich eine etwas geringere Streckgrenze mit höherer Bruchdehnung kombinieren (hierzu auch **Al Si7Mg0,3** in Tabelle 7.11).

Tabelle 7.11: Aluminium-Gusslegierungen, DIN EN 1706/98, Auswahl aus 37 Sorten

Kurzname, Gießart Stoff-Nr. nach DIN EN 1706 EN AC----	Gieß- art, Zustd. ¹⁾	R _m	R _{p0,2}	A _{50 mm}	HB	Gießen ²⁾ Schweißen Polieren Beständigk.	Bemerkungen
-Al Cu4MgTi S, K, L -21000	S T4 K T4 L T4	300 320 300	200 220 220	5 8 5	90 90 90	C/D D B D	einfache Gussstücke hochfest und -zäh, Waggondäne und -fahrgestelle
-Al Si7Mg0,3 S, K, L -42100	S T6 K T6 T64	230 290 250	190 210 180	2 4 8	75 90 80	B B C B	Sicherheitsbauteile: Hinterachslenker, Vorderradnabe, Bremssättel, Radträger
-Al Si10Mg(a) S, K -43000	S F K F K T6	150 180 260	80 90 220	2 2,5 1	50 55 90	A A D B	Motorblöcke, Wandler- und Getriebegehäuse, Saugrohr für Kfz
-Al Si12(a) S, K -44200	S F K F	150 170	70 80	5 6	50 60	A A D B	dünnwandige, stoßfeste Teile aller Art
-Al Si8Cu3 S, K, D -46200	S F K F	150 170	90 100	1 1	60 100	B B C D	warmfest bis 200 °C, für dünnwandige Teile, Kfz-Kurbelgehäuse
-Al Si12CuNiMg K -48000	K T5 T6	200 280	185240 < 1 < 1	90 100	A A C C		erhöhte Warmfestigkeit bis 200 °C, Zylinderkopf
-Al Mg3(b) S, K -51000	S F K F	140 150	70 70	3 5	50 50	C/D C A A	Beschlagteile f. Bau- u. Kfz-Technik, Schiffbau

¹⁾ **Gießart:** S: Sandguss; K: Kokillenguss, D: Druckguss, L: Feinguss, das Zeichen wird nachgestellt!

Beispiel: EN 1706 AC-Al Cu4MgTiKT4 oder EN 1706 AC-21000KT4: bedeutet Kokillenguss (K), kaltausgehärtet (T4). Zustände Tabelle A.16 Anhang.

²⁾ **Wertung:** A ausgezeichnet, B gut, C annehmbar, D unzureichend.

7.3.7 Aushärten der Aluminium-Legierungen

Der Aushärtungseffekt (→) wurde 1906 von A. Wilm an AlCuMg-Legierungen entdeckt und später von weiteren Forschern bei vielen anderen Legierungen. Das Leichtmetall Al ist erst dadurch

Hinweis: Die Wärmebehandlung „Aushärten“ ist im Abschnitt 5.4 Stoffeigenschaften allgemein behandelt.

zum wichtigen Werkstoff für Leichtbaukonstruktionen geworden.

Aushärtbare Legierungen müssen im Zustandschaubild ein Mischkristallgebiet besitzen. Gleichzeitig muss die Löslichkeit mit der Temperatur abnehmen (Bild 7.2).

Wärmebehandlung

Nach langsamer Abkühlung bestehen aushärtbare Legierungen aus Al-Mischkristallen und sekundären Ausscheidungen in grober Form.

Das Aushärten besteht aus zwei Arbeitsgängen.

- Lösungsbehandeln:** Durch Glühen im Bereich der homogenen Mk (Bild 7.2) erhöht sich das Lösungsvermögen der Mk (Linie AB), die Ausscheidungen werden wieder gelöst. Glühdauer für Knetlegierungen bis 30 min, Gusslegierungen 3...6 h.

Anschließend erfolgt ein Abschrecken in Wasser. Die Ausscheidung unterbleibt, und es entstehen übersättigte Mischkristalle. Die Festigkeit der Legierungen erhöht sich unwesentlich, sie können während 1...2 h noch kalt verformt werden.

- Auslagern:** Einfaches Liegenlassen bei Raumtemperatur (Kaltauslagern →) oder bei genau einzuhaltenden höheren Temperaturen (Warmauslagern).

Übersättigte Mischkristalle versuchen, ihren gesättigten Zustand wiederzuerlangen, indem die überschüssigen LE-Atome ausgedrängt werden. Wegen der tiefen Temperaturen ist die Diffusion erschwert (→ Bild 7.3, Kurve -20 °C).

Das „Einfrieren“ der Aushärtung wird bei Nieten angewandt. Lösungsbehandelte Niete müssen sofort verarbeitet werden, da im ausgehärteten Zustand kein rissfreier Schließkopf entsteht. Nicht verarbeitete Niete können durch Tiefkühlung im weichen Zustand gehalten und nach dem „Auftauen“ geschlagen werden. Danach härteten sie im eingebauten Zustand aus.

Aushärtung entsteht durch Ausscheidungsvorgänge in übersättigten Mischkristallen, die zu Gleitblockierungen führen (Behinderung von Versetzungsbewegungen). Eigenschaftsverbesserungen bei Al-Legierungen sind (→ Tabelle 7.11, Zustände T4, T6):

- Erhöhung der niedrigen Streckgrenze,
- geringerer Abfall der Zähigkeit als bei kaltverfestigten Legierungen, dadurch gleichzeitig höhere Dauerfestigkeit.

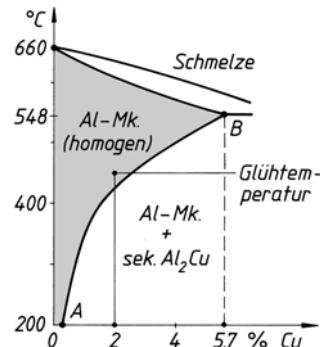


Bild 7.2 Zustandsschaubild AlCu, linke Seite

Kaltauslagern. Im Mischkristall entstehen Bereiche (lichtmikroskopisch nicht erkennbar), in denen sich die LE-Atome anreichern und als Gleitblockierung wirken. Da keine zweite Kristallart auftritt, ist die Korrosionsbeständigkeit besser als im weichen Zustand (mit sekundären Ausscheidungen).

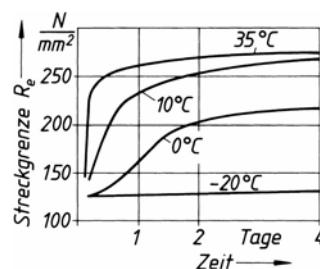


Bild 7.3 Aushärtung von AlCuMg. Anstieg der Streckgrenze beim Kaltauslagern unter verschiedenen Temperaturen

Diffusionsbehinderung: Bild 7.3, Kurve -20 °C lässt erkennen: Bei 0 °C ist erst nach 2 Tagen eine gewisse Steigerung der Streckgrenze eingetreten. In dieser Zeit wird bei 35 °C ein wesentlich höherer Wert, fast das Maximum, erreicht.

Warmauslagern. Bei einigen Legierungen verlaufen die Ausscheidungen erst bei höheren Temperaturen, sie müssen warm ausgelagert werden (Bild 7.4).

Kurve 1: Niedrige Temperatur, der Höchstwert wird erst nach 20 h erreicht.

Kurve 2: Temperatur zu hoch. Der Scheitelpunkt der Kurve wird bereits nach 1 h erreicht, bei Überschreiten der Zeit fällt die Streckgrenze stark ab (Vergrößerung der Ausscheidungen).

Kurve 3: Optimale Temperatur. Scheitelpunkt, nur wenig niedriger als nach Kurve 1, wird bereits nach 8 h erreicht.

Bild 7.4 zeigt, dass es für einen bestimmten Werkstoff eine optimale Temperatur und Haltezeit für das Warmauslagern gibt.

Hinweis: Kurve 3 zeigt auch, dass warmausgehärtete Al-Legierungen nicht warmfest sind, sie erweichen bei höheren Temperaturen.

Warmfeste Al-Legierungen sind deshalb **dispersionsverfestigt** (→). Die Wirkungsweise ist ähnlich. Die Teilchen müssen im Al-MK **unlöslich** sein und dürfen bei langzeitiger thermischer Beanspruchung nicht zusammenwachsen. Dabei werden etwa die doppelten Festigkeitswerte im Bereich von 250...300 °C erreicht.

Selbstaushärtung. Bei einigen Legierungen entstehen durch die beschleunigte Abkühlung, z.B.

- beim Kokillenguss (Gießen in Metallformen) oder nach dem Schweißen von Blech infolge der guten Wärmeleitfähigkeit des Al

unbeabsichtigt übersättigte Mischkristalle, die nicht im Gleichgewicht sind und bei der folgenden Lagerung aushärten. Dadurch steigt die Härte an.

7.3.8 Neuentwicklungen

Zur Steigerung der Warmfestigkeit und Steifigkeit von Al-Legierungen werden neben der Dispersionsverfestigung auch neue Legierungssysteme mit Lithium entwickelt mit Schwierigkeiten beim Legieren durch seine starke Reaktionsfähigkeit.

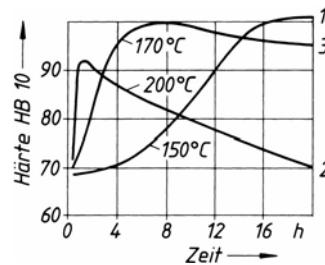


Bild 7.4 Aushärtung von G-AlSiMg. Anstieg der Härte beim Warmauslagern unter verschiedenen Temperaturen

Warmauslagern: Bei höheren Temperaturen können sich submikroskopische Teilchen der sekundären Ausscheidung bilden, die bei zu hoher Auslagerungstemperatur größer werden und dann auch mikroskopisch zu erkennen sind. Dann verlaufen die Gleitvorgänge **zwischen** den größeren Teilchen, die Streckgrenze fällt wieder ab.

Dispersionsverfestigte Legierungen werden meist pulvemetallurgisch hergestellt (→ Sprühkomprimieren 8.2).

Weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Warmfestigkeit sind die Faserverbundwerkstoffe mit Al-Matrix, z.B. in Kolben oder Pleuelstangen für Verbrennungsmotoren.

Hinweis: Bei Gusslegierungen werden wegen der Ausscheidungsvorgänge die Festigkeitsproben erst nach 8 Tagen genommen, um die Diffusionsvorgänge ablaufen zu lassen.

Eine speziell entwickelte, selbstaushärtende Legierung ist **AlZn4,5Mg1**. Sie kann im ausgehärteten Zustand geschweißt werden, entfestigt zunächst in der WEZ, härtet aber nach 1...3 Wochen von selbst wieder aus.

Lithium ergibt auf Grund seiner Dichte von 0,534 g/cm³ bei nur 3 % Gehalt einen Werkstoff, der ca. 10 % leichter und 10 % steifer ist (E-Modul). Damit können 15 Massenprozente eingespart werden.

Beispiel: System **AlLiCuMgZr** mit ähnlichen Festigkeitseigenschaften wie AlCuMg.

Al-Legierungen werden zunehmend im Kfz.-Bau eingesetzt (Übersicht), doch stehen sie in Konkurrenz zu Mg-Gusslegierungen für z.B. Getriebegehäuse und Mg-Bleche für Innenteile der Karosserie, daneben auch zu GMT (glasfaserverstärkten Thermoplasten) für z.B. Kotflügel.

Übersicht: Aluminium-Verwendung im europäischen Automobilbau

(GDA)

Jahr	Masse Al/ PkW	Motor/ Antrieb %	Räder Fahrwerk %	Karosserie %	Ausstattung %
1978	32 kg	11	20	–	1
1988	60 kg	25	30	–	5
1998	85 kg	35	35	5	10
2002	120 kg	38	40	28	14

7.4 Kupfer

7.4.1 Unlegiertes Kupfer

Kupfererze haben i.A. einen geringen Metallgehalt, sie werden angereichert und in Trommelkonvertern (ähnlich Roheisenmischern) zu einem Rohkupfer erschmolzen, das noch raffiniert werden muss.

Feuerraaffination im Schmelzfluss unter Luftzufuhr. Dabei entsteht zunächst das Cu-Oxid, das sich im Bad löst und dann die Beimengungen oxidiert. Das überschüssige Cu₂O wirkt versprödend und muss entfernt werden (Desoxidation). Es geschieht hier durch Eintauchen von frischen Holzstämmen und wird Polen genannt. Zunächst spülen die Gase aus dem Holz das entstehende SO₂ hoch, später reduzieren sie das Cu-Oxid. Das entstehende Hüttenkupfer enthält noch Oxide mit O-Gehalten von 0,015...0,04 %.

Elektrolyse. Hierzu wird ein vorraffiniertes Cu mit 99 % Gehalt als Anodenplatte in eine wässrige Lösung aus Cu-Sulfat und Schwefelsäure eingehängt. Bei einer Gleichspannung von 0,2...0,35 Volt wird reines Cu an der Kathode (Minus-Pol) abgeschieden. Die anderen Elemente gehen im Bad in Lösung oder fallen als **Anodenschlamm** zu Boden.

Das entstehende Kathoden- oder Elektrolytkupfer enthält 99,99 % Cu und besitzt höchste elektrische Leitfähigkeit und Bruchdehnung.

Auf die Konkurrenz der Leichtmetalle und Legierungen antwortet die Stahlindustrie mit der Entwicklung höherfester Bleche in Verbindung mit geschweißten Platinen, die kleinere Blechdicken zulassen, oder auch Rohrteile, durch Innen-Hochdruck-Umformung zu Hohlprofilen gefertigt (Tailored Blanks, – Tubes → 4.5.2).

Rohkupfer enthält 97...99 % Cu und viele Verunreinigungen wie z.B. As, Bi, Sb, Pb, sowie Ni, Ag und Au in Spuren.

Die elektrische Leitfähigkeit wird durch die löslichen Elemente P, As und Al sehr stark herabgesetzt, sie müssen entfernt werden.

Begriff: Raffination = Reinigung, Veredlung von Naturstoffen (Zucker- und Ölraffination)

Sauerstoff liegt chemisch gebunden als Cu₂O vor. Damit bildet das Cu eine eutektische Legierung. Sauerstoffhaltiges Cu hat dadurch ein Gefüge aus Cu-Kristallen mit einem dünnen Netzwerk des Eutektikums. Durch Warmumformen wird es in kleine Körner zerteilt. Innerhalb der angegebenen Gehalte an O haben sie wenig Einfluss auf Eigenschaften und auch auf die Leitfähigkeit. Sie sind aber die Ursache der sog. *Wasserstoffkrankheit* des Kupfers (siehe folgende Seite).

Elektrolytkupfer ist Ausgangsmaterial für hochkupferhaltige Legierungen und die sog. Leitbronzen (niedriglegiertes Cu mit höherer Festigkeit bei guter Leitfähigkeit).

Anodenschlamm enthält die edleren Metalle Ag, Au, Pt und andere Platinmetalle, z.T. an Selen und Tellur gebunden, die in aufwändigen chemischen Verfahren voneinander getrennt werden.

Ni ist als Sulfat im Elektrolyten enthalten und wird vom Cu-Sulfat abgetrennt, das in den Kreislauf zurückgeht.

7.4.2 Eigenschaften, Verwendung

Die Bedeutung des Werkstoffes Cu liegt in der Kombination von sehr guten Werten für

- **Leitfähigkeit** für Elektrizität und Wärme
- **Kaltumformbarkeit**,
- **Korrosionsbeständigkeit** gegen Außenklima und Wasser.

Nachteilig sind seine schlechten technologischen Eigenschaften für

- **Gießen** (Wasserstoffsaufnahme) und
- **Zerspanen** (Neigung zum Schmieren).

Cu ist *unbeständig* gegen Schwefel (z.B. im vulkanisierten Gummi) und oxidierende Säuren (z.B. Salpetersäure, HNO_3).

Beständigkeit. Cu bildet im Laufe der Zeit an der Oberfläche eine Schicht aus, die aus grünem, basischen Cu-Carbonat besteht (durch Industrie-luft auch aus basischem Cu-Sulfat).

Sie entsteht durch Reaktion mit den Stoffen der Umgebungsluft (O_2 , CO_2 , SO_2 , H_2O), ist festhaftend und damit ein Schutz gegen weiteren Angriff (Patina-Schicht). Kupfer verbindet sich unter Druck mit Äthin, $\text{C}_2 \text{ H}_2$ (Acetylen) zu einer explosiblen, chemischen Verbindung.

Wasserstoffkrankheit (→) ist das Entstehen von Rissen und Hohlräumen in *sauerstoffhaltigem* Cu bei höheren Temperaturen bei Kontakt mit H_2 -haltigen Gasen (Schweißen, Löten).

Cu-Sorten werden deshalb nach ihrem O-Gehalt (als Cu_2O) in drei Gruppen unterteilt (Tab. 7.12).

Vergleich einiger guter Leitwerkstoffe für Wärme und elektrischen Strom. Relative Werte für Reinmetalle, Cu = 100 gesetzt!

Leitwert für	Ag	Cu	Au	Al	Fe
Elektrizität	106	100	72	62	17
Wärme	108	100	76	56	17

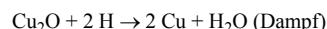
Hauptverbraucher von Cu-Halbzeug in der BRD:

Elektro-Industrie	60	Masch.- u. App.	10
Sanitär-, Bauwesen	14	Verkehr	10
Konsumgüterindustrie	4	(in Prozent)	

Werkstoffkennwerte des Kupfers

Festigkeiten	MPa	Temperaturen für (°C)
R_m	200...250	Schmelzen 1083
$R_{p0,2}$	40...80	Schmieden 950...800
E-Modul E	$12,5 \cdot 10^3$	Rekrist.-Gl. 400...100
Dichte 8,93 kg/cm ³		Bruchdehnung $A=45\%$
Kristallgitter kfz		-einschnürung $Z=75\%$

Wasserstoffkrankheit (-versprödung) wird durch die Reaktion der eindiffundierten H-Atome mit dem enthaltenen Cu_2O bewirkt:



H_2O -Dampf kann in Metallen nicht diffundieren (Molekülgröße) und sprengt das Gefüge.

Sauerstoffhaltiges Cu muss mit oxidierender Flamme oder Schutzgas behandelt werden. Die sauerstofffreien Sorten sind gut löt- und schweißbar. Die P-Sorten haben steigende Gehalte an P (0,003...0,04 %) und fallende Leitfähigkeiten.

Tabelle 7.12: Vergleich der Roh-Cu-Sorten DIN EN 1976/98 und DIN 1708 (Z)

O-haltiges Cu EN 1976 (DIN 1708)	O-freies Cu, nicht desoxidiert EN 1976 (DIN 1708)	O-freies Cu mit P desoxidiert EN 1976 (DIN 1708)	Bedeutung der Zeichen
Cu-ETP1 (--)	Cu-OF, (OF-Cu)	Cu-PHC (SE-Cu)	1: höchster elektr. Leitwert 58,58
Cu-ETP, (E1-Cu58)	Cu-OFE ¹⁾ (--)	Cu-PHCE (--)	E (vorn): elektrolytisch raffiniert
Cu-FRHC (E2-Cu58)		Cu-DLP (SW-Cu)	E (hinten): vakuumgeeignet
Cu-FRTCP (F-Cu)		Cu-DHP (SF-Cu)	F: feuerraffiniert
		Cu-DXP (--)	LP: P- % niedrig HP: P- % höher
			OF: Oxygen free, TP: zähgepolt
			HC: high conductivity (Leitfähigkeit)

¹⁾ Sorte mit geprüfter Haftung der Zunderschicht

Tabelle 7.13: Kupfersorten für Drahtbarren, Walzplatten und Rundblöcke DIN EN 1976/98

Kurzzeichen	Eigenschaften und Verwendung
Cu-ETP	E-Technik, Elektronik, bei Anforderung an höchste Leitfähigkeit
Cu-FHRC	wie oben, auch für Schmiedestücke allgemeiner Verwendung
Cu-OF	wie oben, nicht desoxidiert, wasserstoffbeständig, schweiß- und lötgeeignet
Cu-PHC -PHCE	E-Technik, hohe Leitfähigkeit und Umformbarkeit, Plattierwerkstoff Freiformschmiedestücke für allgemeine Verwendung, Vakuumtechnik
Cu-DLP	Allgemeine Verwendung, für Apparatebau, gut löt-, schweiß- und kaltformbar
Cu-DHP	Allgemeine Verwendung, für Rohrleitungen, Bauwesen, Apparate bei hohen Anforderungen an Schweiß-, Löt- und Umformbarkeit, auch Schmiedeteile
CuAg0,10	insgesamt 10 Ag-haltige Sorten (0,04, 0,07 und 0,1 %), anlassbeständig, mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, O-haltig, P-oxidiert oder O-frei

7.4.3 Normen für Kupfer und Kupferlegierungen

Die DIN EN-Normung gibt den **Erzeugnisnormen** die Priorität (Tab. 7.15). Diese enthalten dann alle **Cu-Knetlegierungen**, die für das jeweilige Erzeugnis geeignet und lieferbar sind, mit Analyse- und Eigenschaftsangaben. Alle **Cu-Gusslegierungen** sind in der Norm DIN EN 1982 enthalten.

Tabelle 7.14: Ältere DIN-Normen

Leg.-System	Knetlegierung	Gusslegierung
CuZn (+ LE)	17660 Z	1709 Z
CuSn (Zn)	17662 Z	1705 Z
CuSnPb	--	1716 Z
CuNiZn	17663 Z	--
CuNi	17664 Z	17658 Z
CuAl	17665 Z	1714 Z

Tabelle 7.15: Normenübersicht mit Anzahl der Sorten

DIN EN	Bezeichnung	Legierungssysteme, Anzahl der Sorten					
Norm/Jahr	Kupfer u. Kupferlegierungen	Cu u. Cu-niedrigleg.	CuAl	CuNi	CuNi Zn	CuSn (+ Zn)	CuZn (+ LE)
Blockmetalle und Gussstücke							
1976/98	– gegossene Rohformen	4+ 9	10	2	–	–	12+12
1982/98	– Blockmetalle und Gussstücke	5 –	6	4	–	5+9	– 14
Walzprodukte							
1652/98	– Platten, Bleche, Bänder, Streifen und Ronden f. allgemeine Verwendung	5+ 6	1	4	5	5	9+ 7
1653/00	– Platten, Bleche und Ronden für Kessel, Druckbehälter, Warmwasserspeicher	2	3	2	–	–	– 4
1654/98	– Bänder für Federn u. Steckverbinder	6	–	5	–	5	– 4
Rohre							
12449/99	– nahtlose Rundrohre f. allg. Verwendung	1+ 3	–	2	2	5	15+ 9
12451/99	– nahtlose Rundrohre f. Wärmeaustauscher	1 –	1	3	–		– 3
12452/99	– nahtlose Rippenrohre f. Wärmeaustauscher	1 –	–	2	–	–	– 2
Stangen, Profile, Drähte							
12163/98	– Stangen f. allgemeine Verwendung	3+11	6	2	2	4	10+10
12164/00	– Stangen f. spanende Bearbeitung	4	–	–	4	4	16+ 7
12166/98	– Drähte f. allgemeine Verwendung	1+12	–	–	7	4	16+ 4
12167/98	– Profile und Rechteckstangen f. allg. Verw.	2+ 9	6	–	7	2	24+12
12168/00	– Hohlstangen f. spanende Bearbeitung	1+ 2	–	–	–	–	14+ 5
Schmiedestücke und Schmiedevormaterial							
12165/98	Vormaterial für Schmiedestücke	4+ 9	10	2	–	–	12+12
12420/99	Schmiedestücke	2+ 4	4	2	–	–	10+ 4

7.4.4 Niedriglegiertes Kupfer

Reinkupfer hat die größte Leitfähigkeit, es hat aber nur geringe Festigkeit und Härte. Im Mischkristall gelöste Atome senken die elektrische Leitfähigkeit (Bild 7.5), am geringsten die LE Cd, Ag, Zn und Ni. Hohe Festigkeit bei wenig gesenkten Leitwerten wird durch Aushärtung erreicht (Tabelle 7.16).

Bild 7.5 Einfluss einiger LE und Verunreinigungen auf die Leitfähigkeit von Reinkupfer

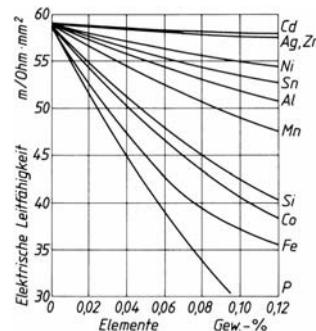


Tabelle 7.16: Auswahl von Kupfer-Knetlegierungen, niedriglegiert (früher DIN 17666 Z)

Sorte	Eigenschaften, Anwendung
CuFeP2	Kombination von Eignung für Stanzen, Kalt- und Warmumformen, Löten, Schweißen. Anlauf- und korrosionsbeständig, hohe Leitfähigkeit für Wärme und Strom
CuBe1,7	Wärmetauscher, Federn warmaushärtbar bis $R_m = 1300$ MPa für Kontaktfedern, CuBe2 für nichtfunkende Werkzeuge
CuCrZr	warmaushärtbar bis $R_m = 470$ MPa, hohe Leitfähigkeit, Elektroden zum Punktschweißen, Schleifringe, Kollektorlamellen
CuNi2Si	warmaushärtbar bis $R_m = 640$ MPa, mittl. Leitfähigkeit, rauchgasbestg., Freileitungsarmaturen, Federn.

7.4.5 Allgemeines zu den Kupfer-Legierungen

Legierungselemente sollen die niedrige Festigkeit des reinen Cu erhöhen, ohne dass seine Duktilität zu stark sinkt, die gute Beständigkeit soll erhalten und für stärkere Korrosionsbeanspruchung erhöht werden. Die LE erhöhen die Festigkeit durch verschiedene Mechanismen (→):

Die Korrosionsbeständigkeit wird durch gelöste edlere LE wie Ni und Sn verbessert oder durch Schutzschichtbildung wie bei CuAl.

Die Zustandsschaubilder der meisten Cu-Legierungssysteme sind sehr kompliziert. Die Löslichkeit der Legierungselemente (LE) ist wegen der Unterschiede zum Cu in

Atomdurchmesser, Kristallsystem, Wertigkeit, Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe

nur klein und liegt zwischen 10 und 37 % des jeweiligen LE (mit Ausnahme von Cu-Ni mit vollständiger Löslichkeit, Grundtyp I). Die Knetlegierungen haben deshalb *niedrige* Gehalte an LE, damit *homogene* Werkstoffe mit guter Verformbarkeit entstehen.

Mischkristallverfestigung, unterschiedlich stark je nach Atom-∅ der LE (→ Bild 2.43). Es entstehen homogene MK-Legierungen für die Kaltumformung. Sie sind in den Erzeugnisnormen für Platten, Bleche und Bänder enthalten.

Kaltverfestigung bei Erzeugnissen, die durch Kaltumformen hergestellt werden. Kennzeichnung durch Anhängesymbole (↓).

Symbol	Eigenschaft nach Kaltumformung
-A005	Bruchdehnung $A = 5\%$
-R700	Zugfestigkeit $R_m = 700$ MPa
-Y350	Streckgrenze $R_{p0,2} = 350$ MPa

Verfestigung durch geringe Anteile von **intermetallischen Phasen** im Gefüge, das dadurch heterogen wird und an Duktilität verliert. Diese höher legierten Sorten sind mehr für Warmumformung und spanende Fertigung geeignet. Sie sind in z.B. in Normen für Stangen, Strangpressprofile und Schmiedeteile enthalten.

Korngrenzenverfestigung durch Ausbildung feinkörniger Gefüge mithilfe von Schmelzzusätzen (wichtig für Gusslegierungen, bei denen die Kaltverfestigung nicht möglich ist).

Bild 7.6 zeigt als Beispiel dafür das System Cu-Zn (Messing). Bis < 37 % Zn entstehen homogene Gefüge aus kfz-Mischkristallen (α -Messing). Die Festigkeit und Dehnung steigen mit dem Zn-Gehalt an (Diagramm 7.6). Sorten in diesem Bereich sind sehr gut bis gut kaltumformbar. (Drück- und Tiefziehmessing).

Nach rechts, mit höheren Gehalten des LE, schließen sich zahlreiche Felder an, in denen intermetallische, spröde Phasen vorliegen. Die Legierungen dieser Analysen sind meist technisch unbrauchbar (Tabelle 2.29).

Beim System CuZn liegt in diesen Bereichen zunächst die β -Phase vor, kub.-raumzentriert, aber hart, spröde und nur **warmumformbar** zwischen 600...700 °C. Durch steigende Gehalte der β -Phase steigen Härte und Festigkeit an, die Dehnung fällt auf null. Sorten in diesem Bereich sind gut warmumformbar, wenn sie nicht zuviel von der spröden Phase enthalten (Schmiedemesing). Der Bereich der technisch nutzbaren Cu-Zn-Legierungen geht dadurch bis etwa 45 % Zn (→ Bild 2.67, Tabelle 2.29).

7.4.6 Kupfer-Zink-Legierungen

Cu-Zn-Legierungen Cu-Zn ohne weitere Zusätze

Bis zu 37 % Zn sind die Werkstoffe homogen. Hauptlegierung sind CuZn36 und CuZn37 die in den meisten Halbzeugarten hergestellt werden. Verarbeitung durch Ziehen, Drücken, Stauchen, Walzen und Gewinderollen. Sorten mit weniger Zn sind noch stärker kaltformbar und haben höhere elektrische Leitfähigkeit.

Die Sorte CuZn40 hat heterogenes ($\alpha+\beta$)-Gefüge, ist gut kalt- und warmformbar und wird als Einzige dieser Gruppe auch für Schmiedestücke eingesetzt.

Kupfer-Zink-Legierungen mit Bleizusatz

Blei ist im α -Kristall unlöslich und scheidet sich an den Korngrenzen ab. Es wirkt kornfeinend und spanbrechend. Die Eignung zum Schmelzschweißen wird verringert. Die ersten drei Sorten sind noch gering kaltumformbar. Alle Sorten sind gut warmumformbar, mit steigendem Zn-Gehalt (und damit β -Anteil) sehr gut.

Teilchenverfestigung durch Aushärtung ist bei einigen Systemen möglich.

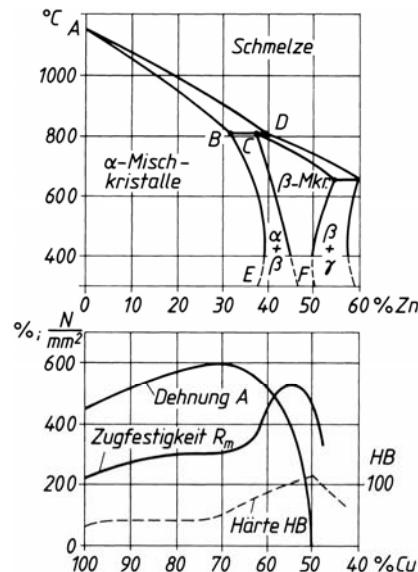


Bild 7.6 Zustandsschaubild Cu-Zn und Verlauf von Festigkeit, Härte und Bruchdehnung (A-Werte $\times 0,1$) bei steigendem Zn-Gehalt

Hinweis: Für CuZn-Legierungen ist der historische Name *Messing* weiterhin in Gebrauch.

Cu-Zn-Legierungen Werte für Blech < 2,5 mm

Kurzzeichen-Nummer	Zustand	A %	Verwendungsbilderbeispiele
CuZn5 CW500L	R250 R340	36 4	elektr. leitfähig, Dämpferstäbe
CuZn10 CW501L	R240 R350	36 4	Plattierwerkstoff, z. Emaillieren
CuZn15 CW502L	R260 R350	38 4	Federbänder, Druckmessgeräte, Hülsen
CuZn20 CW503L	R270 R400	38 5	Metallschläuche
CuZn30 CW505L	R280 R420	40 6	Federn, Tiefziehteile
CuZn33 CW506L	R280 R420	40 6	Drahtgeflecht, Ätz-Platten
CuZn37 CW508L	R300 R480	38 3	Stangen, Profile, Drück-, Prägeteile
CuZn40 CW509L	R340 R470	33 6	Stangen, Profile Schloss- und Be-schlagteile

Mit der hohen Anzahl der Sorten lassen sich vielseitige Anforderungen an die Kombination von Spanbarkeit, Kaltformbarkeit und Fertigungsverfahren erfüllen. Die Hauptlegierung ist hier CuZn39Pb3 als Automatenlegierung für Formdrehteile aller Art. Für dünnwandige Schmiedeteile ist CuZn40Pb2 besonders geeignet.

Cu-Zn-Knetlegierungen mit weiteren Zusätzen

Als weitere LE sind Al, Sn, Si, Ni, Mn und Fe in kleinen Mengen enthalten z.T. in zwei- oder dreifacher Kombination (Sondermessing).

- Sie verschieben die Phasengrenzen, d.h. sie wirken sich auf das Verhältnis zwischen den Phasen α und β aus (Gefügeeinfluss),
- die Festigkeit wird durch MK-Bildung in beiden Phasen erhöht,
- bessere Gleit- und Verschleißeigenschaften, die Korrosionsbeständigkeit wird durch Bildung von Deckschichten erhöht.

Die Kaltumformbarkeit ist mittel bis gering, deswegen sind nur die Sorten bis 38 % Zn als Blech herstellbar, die anderen als Rohre, Stangen und Strangpressprofile.

Alle Al-haltigen Sorten sind schlecht lötbar und nur mit Schutzgas gut schweißgeeignet.

CuZnPb-Legierungen (Auswahl aus 24 Sorten)

Kurzzeichen Nummer	Zustand $R_m/A^1)$	Eigenschaften, Beispiele
CuZn35Pb1 CW600N	R290/40 R470/5	gut warm-, kaltform- und spanbar
CuZn36Pb2As CW602N (neu)	R280/30 R430/15	entzinkungsbeständig, gering kaltformbar
CuZn39Pb3 CW614N	R380/18 R430/10	Formdrehteile auf Automaten
CuZn40Pb2 CW617N	R380/35 R600/8	Warmpressteile
CuZn43Pb2 CW623N	R430/15 R480/5	dünnwandige Strangpressprofile

CuZn-Legierungen + Legierungselemente (Auswahl aus 22 Sorten)

Kurzzeichen (alte Bez.)	Nummer $R_m/A^1)$	Eigenschaften, Beispiele
CuZn20Al2As (CuZn20Al2)	CW702R R300/35	geglüht beständig g. Seewasser, SpRK
CuZn31Si1 ²⁾ (CuZn31Si1)	CW708R R440/22	kaltformbar, Rohre, Lagerbuchsen
CuZn38Mn1Al1 (CuZn37Al1)	CW716R R440/20	witterungsbeständig für Gleitelemente
CuZn40Mn2Fe1 (CuZn40Mn2)	CW723R R440/20	lötabar, Armaturen

¹⁾ Zahlen für Dehnung sind nur Anhaltswerte

²⁾ Auch als Gusswerkstoff „Ecocast“[®], feinkörnig, kalt- und warmformbar (Wieland Werke)

Tabelle 7.17: CuZn-Gusslegierungen, Auswahl aus 14 Sorten nach DIN EN 1982/98

Bezeichnungen n. DIN EN 1982 Kurzname (DIN 1709Z)		Gieß- art	R_m MPA	$R_{p0,2}$ MPA	A %	HB	Eigenschaften, Beispiele
CuZn33Pb2-C -Cu33Pb)	CC750S	-GS, -GZ	180	70	12	45 50	beständig gegen Brauchwässer bis 90°C, gut spanbar
CuZn15As-C (G-CuZn15)	CC760S	-GS	160	70	20	45	sehr gut lötgeeignet, meerwasserbeständig, für Flansche
CuZn16Si4-C (G-CuZn15Si4)	CC761S	-GS-- -GM	400 500	230 300	10 8	100 130	meerwasserbeständig, dünnwandig vergießbar, schweißbar
CuZn25Al5Mn4Fe3-C (G-CuZn25Al5)	CC762S	-GS-- -GM	750 750	450 480	8 8	180 180	höher belastete Gleitlager und Schneckenradkränze (niedrige Gleitgeschwindigkeit)
CuZn34Mn3Al2Fe1-C (G-CuZn34Al2)	CC764S	-GS-- -GZ	600 620	250 260	15 15	140 150	statisch hoch belastete Ventil- und Steuerungsteile
CuZn35Mn2Al1Fe1-C (G-CuZn35Al2)	CC765S	-GS-- -GC	450 500	170 200	20 18	110 120	Druckmuttern, Gleit- u. Gelenksteine, Schiffspropeller
CuZn37Al1-C (G-CuZn37Al1)	CC766S	-GM	450	170	25	105	mittlere Festigkeit, nur für Kokillenguss

7.4.7 Kupfer-Zinn-Legierungen

Gegenüber den Messing-Legierungen haben sie eine höhere Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit, sind lötbar, aber teurer.

Die geringe Übereinstimmung der Elementdaten von Cu und Sn ($\rightarrow \varnothing$ - Unterschiede) führen zu

- **Kristallseigerungen** beim Erstarren, bis 10 % Konzentrationsunterschiede im Mischkristall,
- niedriger **Diffusionsgeschwindigkeit**. Real erstarrte Legierungen entsprechen im Gefüge deswegen nicht dem Zustandsschaubild.

Bis 8 % entstehen homogene Mk.-Gefüge mit hoher Beständigkeit und Kaltumformbarkeit bei starker Verfestigungsneigung. Höchste Festigkeit bei 12 %, höchste Bruchdehnung bei 9 % Sn (Bild 7.7).

Bei höheren Sn-Gehalten bilden sich spröde Phasen, welche die Verformungskennwerte abstürzen lassen, während die Härte weiter steigt. Gusslegierungen enthalten max. 12 % Sn (Glockenguss 20 %, nicht genormt).

Knetlegierungen werden wegen der hohen E-Grenze und der Beständigkeit für federnde Bauenteile aller Art eingesetzt. Die Leitfähigkeit ist bei CuSn2 am besten (z. B. für Kontakte).

Durch Zusatz von 2 % Ni werden Festigkeit und Dehnung erhöht, Ni ist deshalb in fast allen Gusslegierungen enthalten.

Gusslegierungen sind korrosionsbeständige, verschleißfeste Werkstoffe mit sehr guter Zerspanbarkeit und Lötbarkeit. CuSn wird wegen der Seigerungen meist im Schleuderguss verarbeitet.

Einige Sorten sind mit Pb legiert, das im festen Zustand fast unlöslich ist und bei 327 °C zu schmelzen beginnt. Es fördert die Zerspanbarkeit und Notlaufeigenschaften auf Kosten der Festigkeit.

Schleuderguss entsteht je nach Form und Größe des Teiles für Schneckenradkränze mit senkrechter Achse bis zu 2,5 m Ø, für Rohre und Buchsen größerer Ø mit waagerechter Achse.

Hinweis: Historische Bezeichnung Bronze (Zinnbronze), auch heute noch geläufig.

Unterschiede der Komponenten Cu und Sn:

	Wertigkeit	Gitter	Atom-Ø pm	Schmelzpkt.	$U^1)$
Cu	1	kfv	128	1083 °C	-0,14
Sn	4	tetr	151	232 °C	+0,34

¹⁾ U in Volt. Elektrochemische Spannungsreihe

Durch die Unterschiede ist die Löslichkeit gering. Das Zustandsdiagramm zeigt große Abstände zwischen Liquidus- und Soliduslinie und zahlreiche intermetallische Phasen, die sich im festen Zustand noch umwandeln.

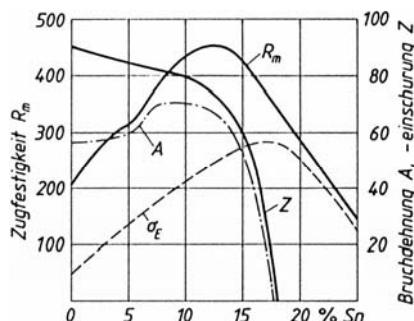


Bild 7.7 Festigkeitseigenschaften der Cu-Sn-Legierungen, weichgeglüht (Kupfer-Institut)

CuSn-Knetlegierungen

Kurzzeichen	R_m MPa	Verwendung
CuSn4	290...610	Metallschlüsse
CuSn5	350...690	Kontaktfedern, -drähte
CuSn8	370...740	Rohre, Lagerbuchsen
CuSn3Zn 9	320...660	Federn, Faltenbälge, Siebbleche, Gewebe

Carobronze® ist CuSn8/CuSn8P von hoher Reinheit mit besseren Gleit- und Warmfestigkeitseigenschaften als genormte Sorten.

CuSn-Gusslegierungen (Auswahl aus 5)

Kurzzeichen (alte Bez.)	Gießart	R_m MPa	$R_{p0,2}$ MPa	A %	HB
CuSn11Pb2-C (CC482K)	-GS -GC	240 280	130 150	5 5	80 90
CuSn12Ni2-C (CC484K)	-GS -GC	280 300	160 180	12 10	85 95

Senkrechtstrangguss für dünnwandige Rohre bis zu 30 t/Stück, Horizontalstrangguss für Stangen und Rohre mit kleinem Durchmesser.

CuSn-Gusslegierungen für Schnecken- und Zahnkränze, Gleitlager und -elemente für höchste Beanspruchungen.

CuSnZn-Gusslegierungen sind weniger fest, sind aber besser gieß- und spanbar und werden für Pumpen-, Ventil- und Zählergehäuse, Fittings und als Lagerwerkstoffe eingesetzt.

CuSnZn-Gusswerkstoffe¹⁾ DIN EN 1982/98

Kurzzeichen (alte Bez.)	Gießart	R_m MPa	$R_{p0,2}$ MPa	A %	HB
CuSn5Zn5Pb5-C (CuSn5ZnPb)	-GS	200	90	13	60
	-GM	220	110	6	60
CuSn7Zn2Pb3-C (CuSn6ZnNi)	-GS	230	120	15	60
	-GC	260	120	12	70
CuSn7Zn4Pb7-C (CuSn7ZnPb)	-GS	230	120	15	60
	-GM	230	120	12	60

¹⁾ Hierfür wird auch noch die ältere Bezeichnung Rotguss verwendet.

7.4.8 Kupfer-Aluminium-Legierungen

Die besonderen Eigenschaften des Al prägen auch die der CuAl-Legierungen (→). Cu kann nur wenig vom dreiwertigen Al lösen. Einphasige M_k-Legierungen sind deshalb nur bis 8 % Al möglich.

Bei höher legierten Sorten entsteht eine zweite β-Phase, die bei Abkühlung auf 565 °C eine martensitische Umwandlung erleidet. Diese spröde Phase verhindert Festigkeit und Dehnung.

Deshalb müssen weitere LE zulegiert werden, um die ungünstigen Wirkungen aufzuheben. Es ergeben sich dann heterogene Gefüge, wie auch bei den Gusslegierungen, und die Möglichkeit einer Wärmebehandlung (→ Beispiel).

- Fe wirkt kornverfeinernd und erhöht die Festigkeit (je Prozent um 30 MPa),
- Ni erhöht die Korrosionsbeständigkeit und Dauerschwingfestigkeit in Seewasser,
- Mn desoxidiert die Schmelze und erhöht die Warmfestigkeit.

Tabelle 7.18: CuAl-Knetlegierungen (Mechanische Eigenschaften gelten für das jeweilige Halbzeug)

Kurzzeichen Nummer (DIN 17675)	Zustand ¹⁾	$R_{p0,2}$ MPa	A %	Eigenschaften, Anwendungen
CuAl8Fe3 CW303G (CuAl8Fe3)	-R450 -R480	200 210	30 30	korrosionsdauerfest, Platten u. Bleche f. allg. Verwendung und für Kessel, warmfest bis 300 °C, Schmiedestücke
CuAl9Ni3Fe2 CW304G (CuAl9Ni2)	-R490	180	20	sehr gut schweißbar, Verbunde aus Guss/Knetwerkstoff, Platten u. Bleche für Kessel, warmfest
CuAl10Fe3Mn2 CW306G (neu)	-R590 -R690	330 510	12 6	zunderfest, Stangen, Schmiedestücke für Maschinen, Schrauben, Spindeln, Zahn- u. Schneckenräder
CuAl10Ni5Fe4 CW307G (neu)	-R590 -R620	230 250	14 14	warmfest, kavitationsfest, Platten u. Bleche für Kessel, Stangen. Mech. und chem. hochbeanspruchte Teile
CuAl11Fe6Ni6 CW308G (CuAl11Ni6Fe5)	-R750	450	10	Stangen für allg. Verwendung, höchste Festigkeit, für stoßbelastete Verschleißteile, Umformwerkzeuge

¹⁾ Für den Zustand Rxxx sind Streckgrenzen- und Bruchdehnungswerte nicht gewährleistet.

Eigenschaften der CuAl-Legierungen			
+ Korrosionsbeständigkeit wie CuSn, Dichte auf 8,2...7,5 g/cm ³ erniedrigt, höhere Festigkeit als CuSn, kaltzäh			
- Al-Zusatz erschwert Löten und Schweißen (Oxidbildung), elektrische und Wärmeleitfähigkeit sinken auf 20...10 % des Cu-Wertes			

Beispiel: Wärmebehandlung von CuAl10Ni5Fe5

Zustand	R_m MPa	$R_{p0,2}$ MPa	A %
stranggepresst	727	365	18
900 °C abgeschreckt	784	432	5,5
550 °C/1 h nachgelagert	767	518	11

Kupfer-Aluminium-Gusslegierungen

haben ähnliche Zusammensetzung wie die heterogenen Knetlegierungen, erreichen aber nicht deren Festigkeits- und Dehnungswerte.

Es sind seewasserbeständige, unmagnetische Legierungen mit hoher Zeitfestigkeit in Meerwasser oder Salzlösungen und bestimmten Lauge. Sie haben mittlere Zerspanbarkeit und sind unter Schutzgas schweißgeeignet.

Anwendung: Schiffspropeller, Stevenrohre, Pumpengehäuse und -laufräder, Teile für Meerwassерentsalzung und Offshoretechnik, Heißdampfarmaturen, Gleitlager mit hoher Stoßbelastung, Schnecken- und Schraubenräder für höchste Flächenpressungen, Maschinen der Lebensmittelverarbeitung, Beizkörbe.

CuAl-Gusslegierungen DIN EN 1982

Kurzzeichen Nummer (DIN 1714Z)	Gießart	R_m MPa	$R_{p0,2}$ MPa	A %	HB
CuAl9-C (neu) CC330G	-GM	500	180	20	100
	-GZ	450	160	15	100
CUAl10Ni3Fe2-C CC332G (G-CuAl9Ni)	-GS	500	180	18	100
	-GM	600	250	20	130
	-GC	550	220	20	120
CuAl10Fe5Ni5-C CC333G (G-CuAl10Ni)	-GS	600	250	13	140
	-GM	650	280	7	150
	-GZ	650	280	13	150
CuAl11Ni6Fe6-C (CC334G) (G-CuAl11Ni)	-GS	680	320	5	170
	-GM	750	380	5	185
	-GZ	750	380	5	185

Hinweis zur Tabelle Gusslegierungen: Ein Vergleich der Sorten zeigt, dass durch Kokillenguss (-GM) oder Strangguss (-GC) gegenüber Sandguss (-GS) höhere Streckgrenzen bei gleichen oder evtl. höheren Dehnungen erreicht werden, dadurch liegen auch die Dauerfestigkeiten höher.

7.4.9 Kupfer-Nickel-Legierungen

Die Komponenten bilden eine lückenlose Mischkristallreihe (Diagramm → Bild 2.59). Jede Sorte besteht aus kfz CuNi-Mischkristallen. Die Wirkung der LE ist verschieden:

- Cu ergibt hohe Verformbarkeit (Dehnung),
- Ni steigert Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit.

Ab 15 % Ni verschwindet die rote Farbe des Kupfers (Münzlegierungen). Je 1 % Fe + Mn ergeben durch Schichtbildung hohe Beständigkeit gegen fließendes Meerwasser.

Al und Mn erhöhen die Entfestigungstemperatur, sodass kaltverformte Teile bis 500 °C beansprucht werden können.

Die Mischkristallverfestigung wird bis zu 30 % Ni ausgenutzt, höhere Festigkeiten sind in Halbzeugen durch Kaltumformung und Kaltverfestigung möglich (Anhängesymbol R). Dabei sinkt die Bruchdehnung stark ab (Tabelle).

Münzen aus CuNi25

Anwendung: Teile in Meerwasserkühlsystemen und -entsalzungsanlagen (Fe-haltig), Kfz-Bremsleitungen, Münzen (CuNi25).

Durch kleine Anteile Cr oder Nb entstehen aushärtbare Sorten (z.B. G-CuNi30Cr R1000, nicht genormt).

Kurzzeichen	Nummer	Symbol ¹⁾	A %	Halbzeuge
CuNi25	CW350H	R290	40	Platten, Bleche, Bänder, Ronden
CuNi9Sn2	CW351H	R340 / R560	30.. / 2	w. o., Federband, Schmiedestücke aushärtbar
CuNi10Fe1Mn	CW352H	R300 / R320	30 / 15	w. o., Rohre, Stangen, Schmiedestücke
CuNi30Mn1Fe	CW354H	R350 / R410	35 / 14	w. o., Rohre, Stangen, Schmiedestücke

¹⁾ Symbol R ist Anhängesymbol für die Zugfestigkeit in MPa. Die Hauptlegierungen (fett) sind auch als CuNi-Gusslegierungen in DIN EN 1982 enthalten.

7.4.10 Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen

Das teure LE Nickel kann teilweise durch das preiswerte Zink ersetzt werden(→). Die Cu-NiZn-Werkstoffe dienten früher als Silberersatz für Tafelgeräte. Die Eigenschaften der Sorten liegen zwischen denen der CuZn- und der Cu-Ni-Legierungen.

Zn erhöht Warmformbarkeit und Verfestigungsfähigkeit auf Kosten der Korrosionsbeständigkeit. Die Gefügeausbildung ähnelt dem System CuZn, da sich Cu und Ni im Mischkristall gegenseitig ersetzen können.

Mit dem Ni-Zusatz steigt die Anlaufbeständigkeit. Blei-Zusatz wirkt günstig bei der Zerspannung, senkt aber die Zähigkeit und macht warmirisempfindlich (Blei schmilzt). Tabelle 7.19 enthält 3 bleihaltige Automatenlegierungen.

Hinweis: Ältere Bezeichnungen sind Neusilber, German Silver und Alpaka, die nicht in den Normen enthalten sind.

Eigenschaften von CuNiZn-Legierungen	
+	kaltzäh, auch kalt verformt, unmagnetisch, warmfest bis 300°, zunderbest. bis 400 °C polierbar, hart- und weichlötbare,
-	schlechtere Leiter für Wärme und Strom als CuZn, weniger beständig gegen Korrosion als CuNi, aber besser als CuZn (Messing)

Tabelle 7.19: Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Auswahl aus 9 Sorten)

Kurzzeichen	Nummer	R _m MPa	Eigenschaften , Anwendungsbeispiele
CuNi12Zn24	CW403J	350...620	sehr gut kaltformbar, emaillierfähig, Tafelgeräte, Federn
CuNi18Zn20	CW409J	380...620	gut kaltformbar, anlaufbeständiger, Brillen, Kontaktfedern
CuNi18Zn27	CW410J	500...600	nur Bänder und Bleche, stark kaltverfestigend, Federn
CuNi7Zn39Pb3 Mn2	CW400J	520...600	warmpressbar, wenig kaltformbar, Bohr, Frä- und Drehteile für optische Geräte
CuNi12Zn30Pb1	CW406J	500...600	gut kaltformbar und zerspanbar, Sicherheitsschlüssel, Drehteile für die feinmechanische Industrie
CuNi18Zn19Pb1	CW408J	440...530	Stangen und Profile, anlaufbeständiger, sonst wie vor, Schmuckwaren

Festigkeitsangaben für Bleche und Bänder 0,2...5 mm, bei Automatenlegierungen für Stangen

7.5 Magnesium

7.5.1 Vorkommen und Gewinnung

Mg ist mit einem Anteil von ca. 2 % der Erdrinde nach Al das am häufigsten vorkommende Leichtmetall, der größte Teil davon im Meerwasser gelöst. Seine Herstellung verläuft aufwändig in mehreren Stufen:

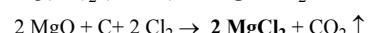
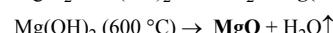
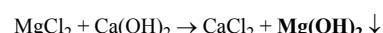
- Ausfällen aus dem Meerwasser mit gebranntem Dolomit als unlösliches Mg-Hydroxid
- Brennen des Mg-Hydroxids zu Mg-Oxid.
- Umsetzen mit Kohlenstoff und Chlor zu MgCl₂.

Das MgCl₂ muss schmelzflüssig reduziert werden,

Meerwasser enthält Magnesiumchlorid und Mg-Sulfat (ca. 1,3 kg Mg/Liter) gelöst.

Hinweis: Ein Würfel Meerwasser von 1 km Kantenlänge enthält damit 1,3 10⁶ t Mg.. mehr als eine Weltjahreserzeugung.

Reaktionsgleichungen:



Der Schmelzpunkt wird durch Zugabe von Flussspat CaF₂ auf ca. 700 °C erniedrigt.

da sich bei nasser Elektrolyse Wasserstoffgas abscheiden würde:

- Elektrolyse des geschmolzenen Chlorids mit hohem Energieverbrauch (17 kWh/kg Mg).

Die andere Möglichkeit ist der thermische Weg:

- Dolomit-Aufbereitung durch Brennen zu CaO-MgO (Austreiben des CO₂),
- Thermische Reduktion mit FeSi nach (→):

Nach diesem Verfahren werden ca. 25 % Mg erzeugt.

Ein großer Teil des Magnesiums wird nicht als Werkstoff eingesetzt (→).

- Mg ist das häufigste LE für Al-Legierungen.
- Wichtiges Reduktionsmittel in der Metallurgie bei der Erschmelzung von Titan und Zirkon, der Desoxidation von Nickel und der Herstellung von Kugelgraphitguss.

7.5.2 Eigenschaften von Magnesium

Unlegiertes Mg hat eine zu geringe Festigkeit, so dass als Strukturwerkstoff nur die Legierungen eingesetzt werden.

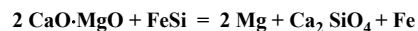
Mg ist das leichteste technische Metall, es ist mit 1,74 g/cm³ Dichte ca. 30 % leichter als Al und war als *Elektron* im Kriege im Flugzeugbau im Einsatz, später in der Automobilindustrie (→).

Trotzdem konnten sich Mg-Legierungen gegenüber denen aus Al nur langsam verbreiten. Die Gründe dafür lagen im höheren Metallpreis (ca. das Doppelte von Al), aber auch in den technologischen Eigenschaften, die besondere und damit kostentreibende Maßnahmen erfordern:

- Mg ist sehr reaktionsfreudig: Die Schmelze reagiert mit dem Luftsauerstoff, da die entstehende MgO-Schicht lückenhaft ist und die Entflammungstemperatur etwa der Gießtemperatur entspricht. Das erfordert besondere Maßnahmen (→).
- Kleine Mg-Teilchen mit großer Oberfläche (Späne, Stäube) können sich entzünden. Beim Löschversuch mit Wasser wird der Wasserstoff reduziert, Explosionsgefahr.

Schmelzflusselektrolyse (→ ähnlich Bild 7.1) ist mit ca. 75 % Anteil das wichtigste Verfahren der Magnesiumreduktion.

Die wichtigsten Mg-Mineralien sind die Carbonate **Magnesit** MgCO₃ und **Dolomit**, CaMg(CO₃)₂ und das Chlorid: **Carnalit**, KMgCl₃·6 H₂O.



Mg fällt wegen seines niedrigen Siedepunktes von 1107 °C dampfförmig an und muss ohne Verunreinigungen kondensieren.

Abnehmer von Mg-Metall

Branche	Anteil %
Al-Legierungen (→ Tafel 7.9)	43
Mg-Druckguss	30,5
Metallurgie (Ti → 7.6.1)	16,5
Pharmaindustrie, Medizin	10

Werkstoffkennwerte des Magnesiums

Festigkeiten MPa	Temperaturen °C
R _m	Schmelz-
R _{p0,2}	bereich 470 620 °C
E - Modul 45 500	Schwindmaß 4 %
G - Modul 17 000	Umformen > 300 °C
A = 2...15 %	Dichte ρ = 1,74 kg/dm ³

Mg-Druckgusslegierungen waren schon beim ersten VW-Käfer für Kurbel- und Getriebehäuse in Anwendung (ca. 20 kg). Sie wurden durch korrosionsbeständigere Al-Legierungen ersetzt. Neuere, **hochreine** Legierungssorten (Zusatz-Zeichen hP, high purity) haben wesentlich kleinere Gehalte der edleren Metalle Fe-, Ni- und Cu. Die Korrosionsbeständigkeit wird (z.B. im Salzsprühtest) vervielfacht.

Schutzmaßnahmen beim Gießen durch Salzabdeckung oder Vergießen unter Schutzgas mit SF₆-Anteilen (Schwefelhexafluorid). Wegen der Klimagefährdung durch SF₆ (es hat den 24.000-fachen Treibhauseffekt gegenüber CO₂) wird als Ersatz ein SO₂/N₂-Gemisch verwendet.

Weniger umweltbelastend sind O₂-freie, gasdruckdichte Ofen- und Gießanlagen, die auch keine Verunreinigungen der Schmelze bewirken.

- Mg ist unedel und liegt in der Spannungsreihe bei $-3,4\text{ V}$. Es ist durch eine Oxidschicht beständig in trockenen oder basischen Medien, jedoch korrosionsgefährdet in saurer Umgebung. Anwendung nur im Innenbereich, sonst ist Oberflächenschutz erforderlich (\rightarrow).

Geringe Anteile von Cu Fe, Ni verstärken die Korrosionsneigung.

Der unedle Charakter des Mg wird beim katodischen Korrosionsschutz ausgenutzt (\rightarrow).

- Mg hat ein hP-Kristallgitter und dadurch wenige Gleitmöglichkeiten, bei über $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht sich ihre Zahl. Knetlegierungen müssen deshalb in diesem Temperaturbereich verformt werden.

Oberflächenschutz durch anodische Oxidation. Sie erzeugt eine konturenreue $15...20\text{ }\mu\text{m}$ dicke Schicht aus MgO, verschleißfest und elektrisch isolierend (Magoxid-Coat®, AHC).

Bimetallkorrosion (Kontaktkorrasion) beim Zusammenbau mit edleren Metallen muss durch Isolation vermieden werden (z.B. Montage von Deckel und Gehäuse durch Stahlschrauben mit Polyamidaulage, einfacher durch Schrauben aus Al-Legierung).

Opferanoden aus Mg (\rightarrow 12.7.2)

Kaltumformung ist deshalb nur sehr begrenzt möglich. Bei über $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden weitere Gleitebenen aktiviert. Sie liegen auf Pyramidenflächen, die auf der Basisfläche der E-Zelle errichtet werden können.

Magnesium-Gusslegierungen

Durch Legieren werden einige ungünstige Eigenschaften verbessert, so dass zunächst Druckgusslegierungen eine breite Anwendung fanden.

Mg-Legierungen enthalten bis zu 10 % LE. Die Zustandsschaubilder zeigen ein schmales Mischkristallfeld mit sinkender Löslichkeit und anschließenden Feldern mit heterogenen Gefügen, z.T. mit intermetallischen Phasen (ähnlich Bild 2.66).

Die Steigerung der Festigkeit beruht auf Mischkristall- und Teilchenverfestigung durch Bildung intermetallischer Phasen, die feindispers verteilt sein müssen, deshalb wird ein homogenisierendes Glühen angewandt und schnell abgekühlt. Das Aushärten kann kalt oder warm erfolgen.

Kurzzeichen für Mg-Legierungen: Neben den nach DIN EN-Normen sind im Handel Symbole nach ASTM eingeführt (Tabelle 7.20).

Tabelle 7.20: Kurzzeichen (KZ) der Mg-Legierungen nach ASTM

KZ	Element	KZ	Element	KZ	Element	KZ	Element	KZ	Element	KZ	Element
A	Al,	D	Cadmium	H	Thorium	M	Mangan	Q	Silber	T	Zinn
B	Wismut	E	Seltene Erden	K	Zirkon	N	Nickel	R	Chrom	W	Yttrium
C	Kupfer	F	Eisen	L	Lithium	P	Blei	S	Silicium	Z	Zink

Nachgestellte Ziffern geben den Gehalt der LE in gleicher Reihenfolge in Prozenten an. Nachgestellte Buchstaben A...D geben den zeitlichen Entwicklungsstand (D neu) an.

Vorteile von Mg-Druckgusslegierungen gegenüber Al-Legierungen:

- Geringere Schmelzviskosität, dadurch sind dünnwandige, filigrane, auch großflächige Teile (→) mit niedrigeren Drücken vergießbar.
- Der kleinere Wärmehinhalt (kleinere Masse) der Mg-Legierung lässt kürzere Taktzeiten zu (z.B. 5 kg-Teile, 100 Schuss/h auf Warmkammermaschinen).
- Mg löst im Gegensatz zu Al kein Fe: Schmelzen kann in Fe-Tiegeln erfolgen, kein Kleben in der Form, damit höhere Standmengen.
- Mg-Legierungen lassen sich mit geringerem Energieverbrauch zerspanen, die Standzeiten der Werkzeuge liegen 5...10 fach höher.

Dadurch ist die Anwendung von Mg-Druckguss vor allem im Fahrzeugbau stark angestiegen (→)

Die Schwierigkeiten beim Gießen infolge der hohen Reaktionsfähigkeit des Mg werden verringert beim **Thixoguss** (→)

Wegen der verminderten Reaktionsfähigkeit (niedrigere Temperatur, keine offene Schmelze) sind die Schutzmaßnahmen beim Gießen einfacher.

Anwendungen: Gehäuse für handgeföhrte Arbeitsgeräte wie z.B. Motorsägen.

Versteifungen von z.B. Aktenkoffern aus Kunststoffschalen.

Kfz.-Druckgußteile für Konsolen, Airbag- und Zündschloßgehäuse, Saugrohr, Konsole für Gangschaltung, Innenteile der Karosserie. Getriebegehäuse (Passat).

Ersatz vielteiliger Konstruktionen durch *ein* Gussteil (z.B. Armtureenträger im Kfz.).

Neue Entwicklungen erhöhen Festigkeit, auch bei erhöhten Temperaturen, durch Werkstoffverbund, hier Eingießen von C-faserverstärkten Formlingen (Preform aus MMC) zur lokalen Verstärkung hochbeanspruchter Bereiche im Bauteil.

Verbrauch	1996	2006
Mg-Druckguss	5 000	35 000

Begriff: Thixotropie = Verhalten von fest-flüssigen Phasengemischen, bei Scherbeanspruchung dünnflüssiger zu werden, z.B. thixotrope Farben, die zunächst pastös sind und erst durch den Pinseldruck flüssig werden.

Thixogießen: Gezielte, induktive Erwärmung eines zylindrischen Rohlings in den halbfest-flüssigen Zustand, danach Pressen, meist von unten, in die Form. Führt zu weniger Turbulenzen bei der Formfüllung und kleinerer Schwindung.

Tabelle 7.21: Mg-Gusslegierungen, Auswahl aus 9 Sorten DIN EN 1753/97 (getrennt gegossene Proben)

Kurzzeichen W-Nummer EN-MC	Gieß- arten	Zu- stand	R_m MPa	$R_{p0,2}$ MPa	A %	Beispiele
MgAl9Zn1 21120 (AZ91)	-GS -GM -GP	F T4 (ka) T6 (wa) F	160 240 240 200-260	90 110 150 140-170	2 6 2 1-6	Beste Gießeignung und Spanbarkeit. Getriebegehäuse, Gehäuse für Laptops, Kameras und Mobiltelefone, Teile für elektronische Drucker- und Speicherlaufwerke,
MgAl6Mn 21230 (AM60)	-GP	F	190-250	120-150	4-14	Für Kfz.- Teile im Innenbereich: Sitzrahmen, Instrumententräger, Lüfterräder
MgAl5Mn 21220 (AM50)	-GP	F	180-230	110-130	5-15	Hohe Bruchdehnungen ergeben hohe Energieaufnahme bei Stoßbelastung.
MgAl2Mn 21210 (AM20)	-GP	F	150-220	80-100	8-18	Radfelgen, crash-relevante Teile.
MgRE2Ag2Zr1 65210 (QE22)	-GS -GM	T6 (wa)	240	175	2	Luftfahrtlegierung, höchste stat. u. dyn. Festigkeit, wärmfest bis 200 °C WIG-schweißbar, schlecht gießbar.

Hinweis: Beim Vergleich der Druckgusslegierungen AZ91 mit den AM-Legierungen fällt der Anstieg der Bruchdehnung bei sinkender Streckgrenze auf, eine Folge des sinkenden Al-Gehaltes.

Mg-Knetlegierungen hatten im Kfz.-Bau wegen des Preises, der geringen Tiefziehfähigkeit und der mangelnden Korrosionsbeständigkeit nur geringe Anwendung gefunden.

Neue Entwicklungen versuchen, diese Werkstoffe für Leichtbau-Konstruktionen verwendbar zu machen. Dabei ist der Automobilbau mit seinen hohen Stückzahlen impulsgebend (→). Höhere Forderungen an Komfort, Sicherheit und evtl. Leistung führen zu höheren Fahrzeuggewichten, was durch höheren Mg-Einsatz ausgeglichen werden könnte. Die Forschungen laufen in mehreren Bereichen:

Herstellverfahren für Flachprodukte verbessern (→):

- Walzen von Strangpress-Vormaterial verfeinert das Gefüge und ergibt Bleche mit höherer Streckgrenze und Bruchdehnung (Tabelle 7.22)
- Konti-Verfahren (ThyssenKrupp) erzeugt Bleche von 5...6 mm Dicke durch Gießen des Mg in den Walzspalt.

Umformtechnik an die Eigenschaften der Mg-Knetlegierungen anpassen. Beheizte Tiefziehwerkzeuge mit segmentiertem, elastischem Niederhalter, der sich den örtlichen Fließanforderungen anpasst.

Superplastisches Umformen auch komplizierter Teile ist möglich bei ca. 500 °C und niedriger Umformgeschwindigkeit.

Fügetechnik (Schweißen, Clinchen, Klebfalzen) ist wichtig für Werkstoffverbunde mit Al- oder Polymerteilen (→).

Korrosionsbeständigkeit: Für Bauteile im Innenbereich ist i.A. kein Schutz erforderlich. Bei Verbundkonstruktionen mit Al muss ein elektrischer Kontakt durch Isolierung vermieden werden, damit keine Bimetall-Korrosion (früher Kontakt-K.) auftreten kann.

Neue Legierungen: Lithium, Li als LE senkt die Dichte noch weiter (bis ca 1,4 g/cm³). Legierungen bestehen bei > 11 % Li aus krz. Mischkristallen mit stark erhöhter Duktilität.

Die Norm für Knetlegierungen DIN 1729-1/82 ist zurückgezogen. Sie enthielt 4 Sorten mit 3...8 % Al und Zn zur Verbesserung der Kaltformbarkeit.

Hierzu sind zahlreiche Vorhaben der großen Forschungsinstitute unter Mitwirkung der Hersteller, z.T. mit Unterstützung der EU, auf den Weg gebracht worden, z.B.:

MIA, Magnesium im Automobil, ein BMBF-Verbundprojekt.

WING → Abschnitt 1.2 Leichte Werkstoffe und Strukturen.

Tabelle 7.22: Mechanische Werte für Mg-Knetlegierungen

	Strangguss	Walzplatten mm	
		100	10-20
Zugfestigkeit R_m MPa	210- 220	230- 250	245- 260
Dehngrenze $R_{p0.2}$ MPa	50-	140-	150-
	70	180	190
Bruchdehnung A %	8-	10-	12-
	12	14	18

Mg-Feinblech AZ31, Dicke 1,5 mm, geglättet

EN-MW (ASTM)	R_m MPa	$R_{p0.2}$ MPa	A %
Mg Al3Zn1 (AZ31B-O)	240- 260	140- 180	17-23

(SMT) Salzgitter-Magnesium-Technologie

Anwendungen: Karosserie-Leichtbaukonzepte aus Verbunden für Heckklappen, Türmodule, Konsolenteile, Sitzschalen, Radkörper und Felgen.

Oberflächenschutz durch Passivierung (Mag-pass®) oder anodische Oxydation (z.B. Magoxid®). Die Schichten sind verschleißfest und auch ein wirksamer Haftgrund für organische Beschichtungen und Verklebung.

Hinweis: Mg-Schaum in Hohlprofilen wird als leichter Crashabsorber im Kfz.-Bau eingesetzt → Verbundwerkstoffe MMC.

7.6 Titan

Aluminium kann die gestiegenen Anforderungen aus dem Flugkörperbau (Warmfestigkeit und Steifigkeit) aufgrund der niedrigen Schmelztemperatur nicht erfüllen. Dadurch ist Ti wegen seines Schmelzpunktes von 1727 °C mit einer Dichte von 4,5 kg/dm³ und der Festigkeit von Stahl als Leichtbauwerkstoff interessant geworden.

7.6.1 Metallgewinnung

Das Erz wird mit Chlorgas aufgeschlossen, wobei sich die flüssige chemische Verbindung Titan(IV)-chlorid bildet. Sie kann durch Destillation von den anderen Bestandteilen getrennt werden.

Weil Ti einen Schmelzpunkt von über 1700 °C hat und bei hohen Temperaturen begierig Gase aufnimmt, ist eine Reduktion schwierig. Sie erfolgt meist nach dem Kroll-Verfahren (→).

7.6.2 Eigenschaften und Anwendung

Neben einer hohen spezifischen Festigkeit (Reißlänge → Abschnitt 10.3) besitzt es Korrosionsbeständigkeit gegen

- oxidierende Säuren und Mischsäuren,
- Chloridlösungen,
- Loch- und Spannungsrißkorrosion

durch Bildung einer festhaftenden Oxidschicht. Es kriecht bei RT und nimmt beim Glühen > 500 °C Wasserstoff auf, der durch Vakuumglühen entfernt werden kann. Über 700 °C wächst die Oxidschicht weiter durch Aufnahme und weiteres Eindiffundieren von O und N. Die geringe Zähigkeit des hex. Ti wird dadurch weiter verringert.

Zur Wärmebehandlung wird deshalb Schutzgas oder Vakuum angewandt, oder die Schicht wird abgetragen. Ti reagiert mit Fe-Oxiden (Desoxidation), deshalb sollen stählerne Tragvorrichtungen in Öfen zunderfrei sein.

Unlegiertes Titan ist in vier Sorten genormt (Tabelle 7.23). Sie überstreichen die Zugfestigkeits- und Streckgrenzenwerte der unlegierten Stähle. Das festigkeitssteigernde Element ist hier der Sauerstoff durch Bildung von Einlagerungs-MK.

Titan wurde bereits 1795 von Klapproth im Rutil entdeckt, aber erst seit 1949 technisch hergestellt. Seine Erzeugung ist aufwändig, sodass sie sich erst nach einer entsprechenden Nachfrage durch die Flugzeugindustrie lohnte. Titanrohstoffe sind:

Ilmenit (Eisentitanat) FeTiO_3 mit 30 % Ti,
Rutil Titan(IV)-Oxid, TiO_2

Kroll-Verfahren: Das Titan-Chlorid wird in einer Argon-Atmosphäre mit flüssigem Mg reduziert. Dabei entsteht zunächst ein poröses Metall in Brocken, der Titan-Schwamm. Er wird durch Vakuum-Destillation von Mg-Resten befreit.

Das Niederschmelzen zu massiven Barren erfolgt in einem Vakuum-Lichtbogenofen (→ ähnlich Bild 3.25) ohne Verunreinigung durch Gase oder Tiegelmaterial.

Werkstoffkennwerte des Titans

Festigkeiten MPa	Temperaturen °C
R_m 300...750	Schmelzen 1727
$R_{p0.2}$ 185...580	Schmieden 1000
E -Modul 110 000	bis 700
G -Modul 45 000	Rekristallisat. > 600
A 15...30 %	Dichte $\rho = 4,5 \text{ kg/dm}^3$
Z 30...35 %	
Ti ist polymorph:	$\alpha\text{-Ti}, < 882 \text{ °C (hdP)}$ $\beta\text{-Ti}, > 882 \text{ °C (krz.)}$

Tabelle 7.23: Titan unlegiert, DIN 17850/90

Sorte	O %	R_m MPa	$R_{p0.2}$ MPa	A %	HV30
Ti1	0,1	300...420	200	30	100
Ti2	0,2	400...550	250	22	120
Ti3	0,25	470...600	360	18	160
Ti4	0,3	550...750	420	16	180

Anwendung: Unlegiertes und niedriglegiertes Ti wird vorwiegend im chemischen Apparatebau und in der Galvanotechnik für Behälter, Rohleitungen und Armaturen eingesetzt. Es ist biokompatibel und für Implantate und Geräte im medizinischen Bereich geeignet.

Dabei sinkt die Bruchdehnung. Zum Kaltumformen sind mit steigendem O-Gehalt größere Biegeradien erforderlich. Nur Ti1 ist tiefziehfähig, die anderen Sorten kalt-warm bei 400...250 °C.

Niedriglegiertes Titan in vier Sorten Ti1Pd, Ti2Pd und Ti3Pd haben bei ähnlichen Festigkeitseigenschaften (Tabelle 7.23) höhere Beständigkeit in reduzierenden Säuren durch geringe Anteile von Palladium Pd, bzw Ni und Mo (Sorte TiNi0,8Mo0,3).

7.6.3 Titanlegierungen (DIN 17 851/90)

LE verschieben mit steigenden Gehalten die Umwandlungstemperatur so, dass zwei Phasen unterschieden werden:

- Elemente wie z.B. **Al, Sn, O** und **N** erweitern den **hexagonalen** Bereich nach **höheren** Temperaturen (Bild 7.8). Sie ergeben die sog. α -Legierungen.
- Die LE **V, Cr, Cu** und **Mo** erweitern den **kubisch-raumzentrierten** Bereich nach **tieferen** Temperaturen. Dadurch kann die krz. Phase bei RT stabil erhalten werden. Sie ergeben die sog. β -Legierungen. Ihre weniger dichte Packung begünstigt die Diffusion.

Übersicht: Gefüge von Ti-Legierungen

Legierungs-Typ, Gitter	Eigenschaften	Max. Temp. °C
α-Typ: hdP	Kaltzäh, schweißbar mit mittleren Festigkeiten. Durch die hex. dichteste Packung sind sie unempfindlich für das Eindiffundieren von Nichtmetallatomen bei hohen Temperaturen.	ca. 550
β-Typ krz.	Die schweren LE erhöhen die Dichte bis zu 4,85 kg/dm ³ und ergeben höhere Festigkeiten. Das krz. Gitter lässt sich besser kaltumformen, ergibt aber Kaltsprödigkeit (Steilabfall).	ca. 320
($\alpha+\beta$)-Typ hdP+krz.	Anteile hängen vom Verhältnis der LE Al und V ab. Ihre Eigenschaften stellen Kompromisse aus Dichte, Kaltformbarkeit und Warmfestigkeit der reinen α - und β -Sorten dar.	ca. 430

Umformverhalten: Bei den Ti-Legierungen liegt die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ dicht an der Zugfestigkeit R_m (hohes Streckgrenzenverhältnis von ca 0,9). Die Folge ist ein nur kleiner Bereich zur plastischen Verformung bei RT. Das Umformen der Halbzeuge findet deshalb bei Temperaturen über 500 °C statt. Die Oxidschicht wirkt mit Graphit/Molybdandisulfid als Schmiermittel. Nach dem Umformen wird bei 650...800 °C weich oder bei 500...675 spannungsarm geglüht.

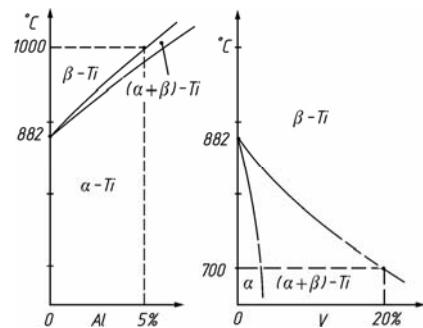


Bild 7.8 Einfluss von Al und Mo auf die Lage des Haltepunktes bei 882 °C von Titan

α -Gefüge (stabil bis ca 1000 °C) sind mit geringen Al-Anteilen möglich.

β -Gefüge entstehen bei normaler Abkühlung durch hohe V- und Mo-Anteile (hohe Dichte). Durch schnelle Abkühlung und Warmauslagern wird ein kfz.-Gefüge mit kleineren Anteilen der schweren Elemente erreicht (near- β Typen).

($\alpha+\beta$)-Gefüge entstehen durch Kombination der unterschiedlich wirkenden LE.

Hinweis: Bei Blechen und dünnwandigen Profilen aus TiAl6V4 ist superplastisches Umformen möglich.

Anwendungen: Neben dem Flugzeug- und Flugkörperbau sind Chemieanlagen die Hauptanwendungsbereiche von Titan und -legierungen in Form von Profilen, Rohren, Stangen und Schmiedeteilen.

Randschichthärtung. Eine Behandlung in Salzschnelzen bei 800 °C/2 h lässt die Elemente N, O und C eindiffundieren und erzeugt Schichten von 40...60 µm Dicke mit einer Härte von 750...850 HV0,025. Neben der Verschleißfestigkeit steigt auch die Dauerfestigkeit (Tiduran-Verfahren®).

Hochdruck- oder Plasmanitrieren (TIDUNIT®) und Laserlegieren in N-haltiger Atmosphäre liefern Schichten mit 1000...1500 HV.

Einsatz von Titan-Halbzeug 2003 (Airbus)

Anwendungsbereich	Anteil %
Chemieanlagen, Offshoretechnik	40
Zivilflugzeuge	40
Militärflugzeuge	10
Andere Anwendungen	10

Normen zu Titan und -legierungen:

DIN 17869/92 Werkstoffeigenschaften von Ti und Ti-Legierungen.

DIN 65084/90 Wärmebehandlung von Titan

Tabelle 7.24: Auswahl von Titanlegierungen (8 hochlegierte Sorten DIN 17851/90)

Sorte	Gefüge	R_m MPa	R_e MPa	A %	$R_{m,450^\circ}$ ²⁾ MPa	Anwendungen
TiAl5Sn2,5	α	880	840	18	500..550	Strahltriebwerksteile, Brandschotte, Implantate für die Chirurgie
TiV13Cr11Al3	β	1270	1200	15	950..1000	höchste Festigkeit, gut kaltformbar
TiAl6V4 ¹⁾	($\alpha+\beta$)	1150	1030	10	600..650	meist verwendet, für Triebwerksteile im Flugzeug- und Rennfahrzeugbau, Rotorköpfe von Hubschraubern

¹⁾ warmausgehärtet, ²⁾ Warmzugfestigkeit

Titan-Gusslegierungen

Als Gusswerkstoffe werden meist verwendet

- unlegiertes Titan G-Ti99,4 und G-Ti99,2Pd und die
- Hauptlegierung G-TiAl6V4.

Die hohen Schmelztemperaturen fordern besondere Formstoffe aus E-Graphit mit organischem Binder. Sie werden nach Austreiben des Binders in einem längeren Graphitisierungsprozess zu temperaturfesten Formen gebrannt.

Titan-Aluminide ist die Bezeichnung für Ti-Legierungen mit > 40 % Al. Bedeutung gewinnt die intermetallische γ -Phase TiAl. Sie hat bei niedriger Dichte von ca. 3,84 g/cm³ einen Schmelzpunkt von ca. 1460 °C und ist bis ca. 750 °C kriechfest und oxidationsbeständig, so dass sie als Ersatz für die schwereren Ni-Basis-Legierungen infrage kommt, die z.B. für die Laufschaufern von Strahltriebwerken eingesetzt werden.

Sie sind auch für temperaturbeanspruchte, beschleunigte Bauteile in hochtourigen Kolbenmotoren in Erprobung.

Anwendung von Ti-Gusslegierungen:

Zahnmedizin: Implantate

Luftfahrt: Feingeschmiedete wie Beschläge, Instrumentengehäuse, Teile der Kraftstoffversorgung

Rumpfspant 160 kg, Hubschrauber-Rotorteile 150 kg

Chemische Apparate: Pumpengehäuse 65 kg, Ventilgehäuse 22 kg, Lagerringe 250 kg

Normung: DIN 17865/90 Gussstücke aus Titan

TiAl ist tetragonal-flächenzentriert, hat aber als IP nur geringe Gleitmöglichkeiten bei RT. Eine wirtschaftliche Bauteilfertigung ist schwierig. Zur Verbesserung sind in Entwicklung:

- Abgewandelte Legierungen mit Cr, Nb, Mo, die heterogene Gefüge besitzen und etwas zäher sind,
- Feinkornausbildung durch Strangpressen isothermisches Schmieden oder Wärmebehandlung,
- Pulvermetallurgische Fertigungslinie.

Anwendungen für z.B. Auslassventile und Pleuelstangen sind in Erprobung.

7.7 Nickel (DIN 17743)

Ni ist ein ferromagnetisches Schwermetall mit hoher Korrosionsbeständigkeit (nicht gegen Schwefel) und mechanischen Eigenschaften ähnlich Cu, aber wesentlich teurer. Es ist kaltzäh bis -200°C . Ni-Legierungen sind zahlreich und z.T. unter geschützten Namen im Handel.

Korrosionsbeständige Legierungen vom Typ NiCu(Fe) sind meerwasserbeständig, mit weiteren Zusätzen von Cr, Mo und Ti beständig gegen unterschiedlich wirkende Säuren.

Hochtemperaturlegierungen auf Ni-Basis sind die z.Zt. am höchsten in der Kombination thermisch, mechanisch und korrosiv belastbaren Werkstoffe. Es können bis zu 15 LE enthalten sein, die mehrfach wirken (\rightarrow), z.T. auch ungünstig. Der Schmelzpunkt (1455°C) wird durch die LE z.T. erniedrigt.

Magnetwerkstoffe (weichmagnetisch) für Eisenkerne von Relais, Magnetverstärkern oder Fernsprechtrafos (z.B. NiFe25) oder Ni-Co25Fe30, Perminvar).

Verwendung: Bei besonders hoher thermischer und/oder korrosiver Beanspruchung (Heißgas-Korrosion). Rein-Nickel wird als Überzug für medizinische Geräte zum Korrosionsschutz angewandt

Handelsnamen sind z.B.: Nicorros, Nicrofer, Hastalloy, Incoloy

Mischkristall- und Dispersionsverfestigung mit den Carbiden der LE und Zusätzen wie z.B. Bor. Sie bilden ein feines, temperaturstables Carbidnetzwerk und behindern das Korngrenzgleiten.

Handelsnamen: Nimonic, Hastelloy.

Tabelle 7.25: Nickellegierungen, Auswahl DIN 17743/02

Sorte	Name	R_m	$R_{p0,2}$	A	$R_{m/600\text{ °C}}$	Verwendung
Korrosionsbeständige Legierungen						
NiCu30Fe	Monel-400, Nicorros	540	270	36	240	chemischer Apparatebau, Wärmetauscher, seewasserfest
NiCu30Al2,5Ti	Monel K-500	1035	760	30	580	Turbinenlaufräder, Wellen, Federn
Hochwarmfeste Legierungen						
NiCr15Fe8	Inconel 600	620	240	30	$<1100^{\circ}\text{C}$	Bauteile für Ofenanlagen, Glühtöpfen
NiCr20	Cronix	650	300	20	$<1250^{\circ}\text{C}$	Heizleiterlegierung
NiCr22Fe18Mo9	Hastelloy X	800	360	40	$R_{m1000\text{h}/800\text{ °C}} = 80 \text{ MPa}$, Brennkammern, Überheizer	
NiCr15Co15Al5 Mo4Ti4	Nimonic115	1400	980	15	$R_{m1000\text{h}/800\text{ °C}} = 330 \text{ MPa}$, Gasturbinenschaufeln	

7.8 Druckgusswerkstoffe

Beim Druckgießverfahren wird flüssiges Metall unter Druck mit großer Geschwindigkeit in stählerne Dauerformen "geschossen". Die Leistung der Druckgießmaschinen beträgt je nach Größe des Teiles und Art der Maschine 25...700 Schuss/h, bei kleinen Teilen auf Automaten auch mehr.

Die nachstehende Übersicht stellt die Merkmale des Verfahrens den Auswirkungen auf das Werkstück und die Wirtschaftlichkeit gegenüber.

Daten zum Druckgießen	
Einströmgeschwindigkeiten	20...70 m/s
Arbeitsdrücke	...300 MPa
Entsprechend groß sind die Schließkräfte, welche die Maschine aufbringen muss, um die Formhälften gegen den Druck dicht zu halten	
Schließkräfte	5000...50 000 kN

Schließkraft $F = \text{Arbeitsdruck} \times \text{projizierte Fläche des Bauteils in der Schließebene}$.

Übersicht: Druckgießen

Merkmale des Druckgießens	Auswirkungen
Abbildungsgenauigkeit, Oberflächengüte hoch	Nacharbeit am Gussteil gering
Gestaltungsfreiheit, kleine Maßtoleranzen	Bearbeitungszugaben klein
Eingussanteil gering	Weniger Kreislaufmaterial, höheres Ausbringen
Dünnwandige Gussstücke möglich	Verkleinerung der Werkstückmasse möglich
Verbundguss durch Eingießteile	Montagearbeit geringer
Metall strömt turbulent ein ¹⁾	Feinste Luft- und Gaseinschlüsse, Oxidhäute
Hoher Druck in der Form	Hohe Schließkräfte (bis zu 25 000 kN)
Gratbildung an Trennfugen	Nacharbeit (bei verschlissener Form)
Hohe Herstellkosten für Dauerformen	Mindeststückzahl zur Wirtschaftlichkeit erforderlich, Änderungen am Bauteil sind nur begrenzt möglich
Hohe Wärmebeanspruchung der Formen	Formverschleiß, Bauteilloberfläche wird schlechter
Produktionsleistung hoch	Lohnkosten/Stück niedrig

¹⁾ Moderne Gießverfahren vermeiden die Turbulenzen und ergeben porenfreie Teile ohne Oxidhäute mit Schweißeignung

Um die negativen Auswirkungen klein zu halten, sollten Druckgusslegierungen deshalb das folgende Eigenschaftsprofil besitzen:

Werkstoffeigenschaft	Auswirkung, Einfluss
Niedrige Schmelztemperatur	Geringer Formverschleiß, hohe Standmenge
Fließ- und Formfüllungsvermögen hoch	Scharfe, dünnwandige Abgüsse möglich
Kleines Schwindmaß	Geringe Warmrissneigung in der Form
Niedrige Gasaufnahme der Schmelze	Geringe Porosität des Gefüges
Maß- und Gefügebeständigkeit	Funktionsfähigkeit, Lebensdauer

Die Anforderungen werden am besten von den Zn-Legierungen erfüllt, weniger von den Leichtmetallen Al und Mg. Trotzdem sind diese für Teile großen Volumens wirtschaftlicher, weil sich dann die hohe Dichte des Zn (6,7 kg/dm³) auswirkt und den Vorteil seiner hohen Standmenge zurückdrängt (Tafel 7.26).

Für die Taktzeiten ist der Wärmeinhalt der Legierung wichtig, weil die Kristallisationswärme des Teiles abgeführt und seine Temperatur abgesenkt werden muss, um es rissfrei auszustoßen. Hier ist Al ungünstiger als Mg.

Cu-Legierungen stehen wegen der hohen Schmelztemperaturen in der Bedeutung hinter den links genannten zurück, ebenso die Pb- und Sn-Legierungen.

Die Porosität der Druckgussteile wird vermindert durch Vakuum in der Form, oder langsameres Einströmen in geneigte Formen, so dass die Luft besser entweichen kann.

Hinweis: neue Gießverfahren, wie Squeeze-Casting und Thixoguss → 7.2.5).

Tabelle 7.26: Druckgusslegierungen

Kurzzeichen	Dichte ρ g/cm ³	Dehn- grenze $R_{F0.2}$	Zug- festigkeit R_m	Bruch- dehnung A %	Harte HB10	Schmelz- temperatur °C	Gieß- bar- keit	Span- bar- keit ca.1(0)	Stand- menge ca.1(0)	Wand- dicke s_{min})	Masse m_{max} kg	Anwendung	Eigenschaften
Zink-Legierungen DIN EN 1774- 97(Auswahl aus 8 Sorten)													
ZnAlM	ZL0400 (Z400)	6,7	160...170 180...240	250...300	1,5...3 2...3	70...90 80...100	380...386	1	1	500	0,6 bis 2	20	Plattenteller Vergasergehäuse, Pk.W.-Scheinwerferrahmen, -Türschlösser, -Übergriffe
ZnAlCu	ZL0410 (Z410)												dekorativ galvanisierbar wenig kaltzäh, Basis Feinzink 99,99
Aluminium-Legierungen DIN EN 1706 / 98 (Auswahl aus 9 Sorten)													
AC-Al Si12(Fe) (230)	2,55	140...180	230...280	1...3	60...100	57,5	2	2...3					Hydraulische Getriebeteile, druckdichte Gehäuse, Trittschufen f. Rolltreppen, E-Motorengehäuse, Kolben, Zylinderkopfe, Nahmaschinen
AC-Al Si9Cu3(Fe) (226)	2,75	160...240	240...320	0,5...3	80...110	510...620	2	2					Getriebe f. Haushalts-, Büro- und optische Geräte
AC-Al Si12CuNi (239)	2,65	190...230	260...320	1...3	90...120	570...585	2	2...3	80	1 bis 3	3,5		Dekorativ anodisierbar, korrosionsbeständig
AC-Al Mg9 (349)	2,6	140...220	200...300	1...5	70...100	520...620	3...4	1					
Magnesium-Legierungen DIN EN 1753 / 97(Auswahl aus 8 Sorten)													
MCMgAl9Zn AZ 91		140...170	200...260	1...6	65...85	470...600	1...2						Rahmen f. Schreinmaschinen und Tonhängegeräte,
MCMgAl6Mn AM 60	1,8	120...150	190...250	4...14	55...70	470...620	1...2	1	100	1 bis 3	15		Gehäuse f. tragbare Werk- zeuge u. Motoren.
MCMgAl5Si AS 41		120...150	200...250	3...12	55...60	580...620	2						Gehäuse f. Kfz. Getriebe, Radfelgen
Kupfer-Legierungen DIN EN 1992 / 98													
CuZn39Pb1Al-C	8,5	(250)	(350)	(4)	(110)	880...900	3	3	10	2 bis 4	5		höhere Festigkeit und Zahligkeit, hoher Formverschleiß durch hohe Gießtemperatur
CuZn16Si4-C	8,6	(370)	(530)	(5)	(150)	830	2	3					
Zinn-Legierungen DIN 1742 / 71													
GD-Sn80Sb	7,1		115	2,5	30	250...320	1	2					Teile von Messgeräten
													Höchste Marktbeständigkeit, kalt- formbar, korrosionsbeständig

Literaturhinweise und Informationsquellen

- Aluminium-Verlag, Düsseldorf Aluminium-Taschenbuch, 15. Auflage 2002 www.alu-verlag.de
- GDA Gesamtverband der AluminiumIndustrie Technische Merkblätter zu Al-Werkstoffen, Verarbeitung und Anwendungen W1/04: Werkstoff Aluminium; W2/03: Al-Knetlegierungen ; W3/03: Formguss von Al-Werkstoffen; W7: Wärmebehandlung von Al-Knetlegierungen; W8: desgl. von Al-Gusslegierungen www.aluinfo.de
- Deutsches Kupfer-Institut Düsseldorf (DKI), Auskunfts- und Beratungsstelle f. d. Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen. Am Bonneshof 5, 40474 Düsseldorf www.kupferinstitut.de.
- DKI-Informationsdrucke: daneben auch DKI-Sonderdrucke) DKI-Fachbücher über Kupfer und -legierungen i.004 Kupfer-Vorkommen Gewinnung Eigenschaften Verarbeitung Verwendung i.5 Kupfer-Zink-Legierungen i.6 Kupfer-Aluminium-Legierungen i.8 Niedriglegierte Kupferwerkstoffe i.13 Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen i.14 Kupfer-Nickel-Legierungen i.15 Kupfer-Zinn-Legierungen (Zinnbronzen, Rotguss)
- Beck, A. Magnesium und seine Legierungen. Springer 2001
- Magnesium-Taschenbuch Aluminium-Verlag 2002
- Zink Zinkberatung e.V.. Friedrich-Ebert-Str.37/39, 40210 Düsseldorf Schriftenreihe, Bestellung über www.zinkberatung.de
- NE-Metalle Al, Cu, Mg, Ti Legierungen und Anwendungsbeispiele aus den Bereichen Luftfahrt Fahrzeug- und Maschinenbau, Bauwesen www.otto-fuchs.com
- DIN-Taschenbücher Beuth-Verlag, Berlin
459/03 Blei, Magnesium, Nickel, Titan, Zink, Zinn und deren Legierungen
455/05 Gießereiwesen 2, Nichtmetallguss
450/05 Aluminium 1. Bänder, Bleche, Platten, Folien Butzen, Ronden, geschweißte Rohre, Vormaterial
451/02 Aluminium 2. Stangen Rohre, Profile, Drähte, Vormaterial
452/02 Aluminium 3. Hüttenaluminium, Aluminiumguss, Schmiedestücke, Vormaterial
456/04 Kupfer 1. Walzprodukte und Rohre
457/04 Kupfer 2. Stangen Drähte, Profile, Gussstücke und Schmiedestücke

8 Anorganisch – nichtmetallische Werkstoffe

8.1 Einteilung und Abgrenzung

In diesem Abschnitt sind Werkstoffe behandelt, die nicht zu den Metallen oder Polymeren zählen. Ihre Rohstoffe gehören zur unbelebten Natur (anorganisch) und bestehen oft aus Gemischen chemischer Verbindungen von Metallen der ersten drei Gruppen des PSE und Verbindungen des Siliciums, das in der Erdrinde mit ca. 25 % enthalten ist. Ihre Kristallgitter sind weniger dicht gepackt als die der Metalle und haben ionische oder kovalente Bindungen. Nach Aufbereitung werden die pulvriegen Stoffe geformt und erhalten je nach Art der Stoffe ihre Konsistenz (→ Übersicht).

Die Stoffe werden in vielen Technikbereichen genutzt, Tabelle 8.1. gibt einen Überblick.

Der Abschnitt beschränkt sich auf die Stoffe, die durch ihr Eigenschaftsprofil als **Ingenieur-Keramik** für Bauteile im Maschinenbau und Feinwerktechnik verwendet werden können.

Keramik gehört zu den ältesten Werkstoffen der Menschheit. Es waren Naturstoffe mit ortsabhängiger Zusammensetzung.

Durch Verwendung reinerer Ausgangsstoffe wurden diese Produkte für die moderne Technik verwendbar, wie z.B. Porzellan als Isolator für die E-Technik.

Übersicht:

Stoffgruppe	Verfestigung
Keramische Stoffe, Tonwaren, Porzellan	Sinterung (Brennen)
Gläser (unterkühlte Flüssigkeiten)	Zähigkeit steigt mit Sinken der Temperatur
Bindemittel mit Füllstoffen Zement, Kalk, Gips	Erhärten hydraulisch durch Kristallisation mit H ₂ O

Tabelle 8.1: Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe in der Technik

Technik-Bereich	Produkte / Stoffe
Bautechnik	Betonwerkstein, Stahl- und Spannbeton, Ziegel, Flachglas
Rohrleitungen	Rohre aus Glas, Ton, Steinzeug und Schleuderbeton
Chemieanlagen	Beschichtungen von Bauteilen mit Emaille, Glas- und Steinzeugprodukte
Optik	Gläser verschiedener Brechung, Absorption oder Reflexion
Elektronik	Halbleiter, Sensoren, Piezokristalle
Metallurgie	Feuerfeste Stoffe zur Auskleidung von Schmelzgefäßen, Graphitelektroden
Maschinenbau	Schneidkeramik, technische Keramik für Bauteile

8.2 Struktur und Eigenschaften keramischer Stoffe

Neue Stoffe und Verfahren haben technische Keramik für den Maschinenbau interessant gemacht. Sie besitzen eine Kombination von Härte, Verschleißwiderstand und Korrosionsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen, die selbst Ni-Basis-Superlegierungen nicht aufweisen.

Schwierigkeiten bereiten die mangelnde Zähigkeit und die Qualitätssicherung, d.h. Einhaltung der Maßtoleranzen und Werkstoffgüte in der Serienfertigung. Die Konstanz der Eigenschaften hängt von der hohen Reinheit der Stoffe ab. Tabelle 8.2 gibt einen Überblick über die gängige Einteilung der Stoffe.

Tabelle 8.2: Einteilung der Keramik in drei Gruppen

Silikatkeramik		Oxidkeramik		Nichtoxidkeramik	
Sorten	Beispiele	Sorten	Beispiele	Sorten	Beispiele
Steinzeug	Muffenrohre, Sanitärkeramik	Al-Oxid	Schneidplatten, Hüftgelenke	Si-Carbid,	Schleifscheiben, Düsen
Porzellan	Hochspannungs- isolatoren	Zr-Oxid	Zieh- und Umformwerk- zeuge	SiC	Brenner, Wälzkörper
Steatit, maßhaltige Iso- lationsteile		Al-Titanat	Bauteile in Kontakt mit NE-Metallschmelzen	Si-Nitrid, SN	
				Bornitrid, BN	Schleif- und Schneid- körper

Ingenieur-Keramiken gehören zu den beiden rechten Gruppen der Tabelle 8.2. Ihre Kristallgitter sind **weniger dicht** gepackt als die der Metalle und haben andere Bindungsarten (→):

Die Bausteine dieser chemischen Verbindungen liegen überwiegend im oberen Bereich des PSE (Tabelle 8.3), es sind damit

- Elemente **geringer Dichte** mit
- **kleinen Atomradien**, dadurch z.T.
- **kleinen Abständen** im Kristallgitter und
- **großen Bindungskräften**.

Daraus ergeben sich die wesentlichen Eigenschaftsunterschiede zu den Metallen (Tabelle 8.4).

- **Oxidkeramik**, sie besitzt überwiegend Ionenbindung zwischen Metall- und Nichtmetallionen
- **Nichtoxidkeramik** (Carbide und Nitride) ist kovalent gebunden: Elektronenpaar-Bindung überwiegend zwischen Nichtmetallen.

Tabelle 8.3: Bausteine der Ingenieurkeramik und Stellung der Elemente im PSE

Periode	Hauptgruppe						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
1	Li	Be	B	C	N	O	F
2	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
3				Ti			
4				Zr			

Tabelle 8.4: Struktur- und Eigenschaftsvergleich Metall – Ingenieur-Keramik

Kriterien	Metalle (technische)	Ingenieur-Keramik
Bindungsart	Metallbindung und einfache Metallgitter, freie Elektronen	Ionenbindung (Oxide), andere mit hohem Atombindungsanteil, z.T. komplizierte Kristallgitter
und daraus resultierende Eigenschaften	Gute Wärmeleiter Lineare Längenausdehnung α von 4,5 (W) bis 25,8 (Mg)... $\times 10^{-6}/K$. Weiche Stoffe (z.T. härbar), je nach Kristallgitter ist plastische Verformbarkeit gering bis hoch, als Folge können Verformungsbrüche auftreten Schmelztemperaturen mittel $T_m = 649 \text{ }^\circ\text{C}$ (Mg) bis $1670 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ti) wenige sind warmfest bis max. $800 \text{ }^\circ\text{C}$	Schlechte Wärmeleiter , Carbide sind metallähnlich Kleine Längenausdehnung α von 1 (Quarz) bis 13 (ZrO_2) $\times 10^{-6}/K$ Naturharte Stoffe , über 2000...6000 HV 1 im Endzustand ist keine plastische Verformung möglich, als Folge können Sprödbrüche auftreten, $\sigma_{\text{bB,Keramik}} \ll \sigma_{\text{bB, Metalle}}$. Schmelztemperaturen hoch $T_m > 2000 \text{ }^\circ\text{C}$, allgemein warmfest zwischen 900...1700 $^\circ\text{C}$
Qualitäts sicherung	Relative Konstanz der Eigenschaften bei Massenfertigung Einfachere Prüfverfahren	Starke Streuung der Eigenschaften, abhängig von der Reinheit der Ausgangsstoffe, den Herstellverfahren und dem Schrumpfen beim Sintern Prüfung aufwändig (Klang-, Röntgen- evtl. auch Tomografieprüfungen)

Die Entwicklung der Ingenieur-Keramik zielt auf eine Verbesserung der Zähigkeit (Biegefesteitgkeit) durch folgende Maßnahmen:

- Kleinste Korngröße der Ausgangsstoffe (→ Bild 8.1),
- Reinheit der Pulver und enge Korngrößenverteilung,
- Verstärkung durch infiltrierte Stoffe oder Fasern (→ Verbundwerkstoffe).

Die Maßnahmen zur Erhöhung der Zähigkeit werden als Duktilisierung bezeichnet und sind mit größerem Aufwand verbunden (z.B. Fertigung unter Reinraumbedingungen). Hierzu gehören auch **neue Verfahren** zur synthetischen Erzeugung der Pulver mit höherer Reinheit, kleinerer Korngröße und engerer Korngrößenverteilung.

Biegefesteitgkeit ist die wichtigste mechanische Eigenschaft (DIN EN 843-1/95).

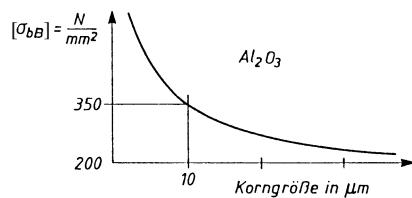


Bild 8.1 Korngröße und Biegefesteitgkeit

Mit sinkender Korngröße (bis in den Nano-Bereich) steigen Aufwand für Reinheit, Pulverherstellung, Sintern mit Wärmebehandlung und damit der Preis.

Hinweis: Neue Verfahren (→ Abschnitt 8.5).

8.3 Bearbeitung der Werkstoffe

Aufgrund des Eigenschaftsprofils (hart und spröde) sind nicht alle Fertigungsverfahren anwendbar. Nach dem Pressen der Rohmasse erfolgt die Bearbeitung der geformten Rohteile in Stufen (→).

Mit den Verfahrensstufen steigen Härte der Rohteile und damit Kosten der Bearbeitung.

Die Fertigung durch Formung aus Pulvern mit anschließendem Sintern (Brand) hinterlässt mit großer Wahrscheinlichkeit *Störungen* im Gefüge, z.B. Risse, Poren und Verunreinigungen. Sie wirken als innere Kerben, d.h. als *Risskeime* (→).

Volumeneinfluss: Mit zunehmenden Bauteilvolumen steigt die Zahl der inneren Fehler, damit sinkt die zulässige Spannung stark ab.

Bearbeitungsstufen sind :

- **Grünbearbeitung** erfolgt am ungesinterten Rohteil,
- **Weißbearbeitung** am vorgebrannten (hilfsverfestigten) Rohteil, dabei werden die organischen Bindemittel ausgetrieben,
- **Hartbearbeitung** am fertiggesinterten Bau teil. Eine Übersicht der möglichen Fertigungsarten gibt Tabelle 8.5.

Folgen: Breite *Streuung* der mechanischen Eigenschaften. Die Festigkeitswerte vieler Proben liegen nicht innerhalb der sog. Glockenkurve (Normalverteilung), sondern innerhalb einer breiteren, unsymmetrischen Kurve (sog. Weibull-Verteilung).

Tabelle 8.5: Fertigungsverfahren für keramische Stoffe

Fertigungshauptgruppe	Fertigungsverfahren (siehe auch 1.6)
Urformen	Meist durch Pressen der pulverförmigen Ausgangsstoffe, Schlickerguss für technische Keramik anwendbar, PM-Spritzguss für Kleinteile bis 300 g, Plasmaspritzen für Hohlkörper
Umformen	Nur im Grünzustand möglich
Trennen	Schleifen mit Diamant- oder Borcarbidscheiben, laserunterstütztes Drehen, elektroerosive Bearbeitung möglich bei Leitwerten > 0,01 S/cm (z.B. Si-Carbid)
Verbinden	Reib- und Diffusionschweißen, Löten nach Metallisierung, Reaktionslöten auch von Metall mit Keramik möglich (DVS 3102/05).
Beschichten	Thermisches Spritzen (bis 20 mm), CVD- und PVD-Verfahren (< 20 μm)

8.4 Werkstoffsorten

8.4.1 Oxidische Werkstoffe

Aluminiumoxid, Al_2O_3 wird am häufigsten verwendet. Es hat wegen der kleinen Ionenabstände eine große Bindungsenergie. Daraus ergibt sich

- Hohe Stabilität bei hohen Temperaturen,
- Korrosions- und Verschleißbeständigkeit.
- Hohe Biegefestigkeit und Härte.

Es wird in Sorten mit steigendem Al-Oxid-Gehalt von 90...99 % angeboten. Dabei steigen Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Biegefestigkeit und Einsatztemperaturen (Tabelle 8.6).

Mischkeramik enthält Anteile von ZrO_2 oder TiC mit höherer Härte und Biegefestigkeit.

Zirkonoxid, ZrO_2 ist polymorph, bei RT ist es momoklin und wandelt sich bei über 1000 °C zu tetragonalem und bei über 2000 °C in ein kfz. Gitter um. Die erste Gitterumwandlung ist mit einer Schrumpfung von > 5 % verbunden und führt zu inneren Rissen. ZrO_2 wird deswegen durch Legieren stabilisiert(→).

PSZ erfährt durch Anlegen einer Spannung eine Umwandlung der feinkörnigen tetragonalen Phase, (ähnlich der martensitischen Umwandlung) in die monokline unter Volumenvergrößerung.

Sie erzeugt Druckspannungsbereiche, wodurch entstehende Mikrorisse am Ausbreiten behindert werden. Diese sog. **Umwandlungsverfestigung** wirkt sich in hohen Werten für Biegebruchfestigkeit und Bruchzähigkeit aus (Tabelle 8.6).

Das feinkörnige Gefüge entsteht durch besondere Bedingungen beim Sintern und Abkühlen und ist mit höherem Aufwand und Kosten verbunden.

Die Paarung $\text{ZrO}_2/\text{Stahl}$ hat geringe Verschweißneigung zu Stahl, deshalb auch kleine Reibzahlen. Kleiner E-Modul und höhere Wärmedehnung sind für Verbundkonstruktionen Metall/Keramik im Motorenbau erwünscht.

Sie ergeben geringere Beanspruchung der Passung durch thermische Spannungen bei höheren Temperaturen.

Oxidische Werkstoffe sind Al-Oxid, Mg-Oxid, Zr-Oxid und Al-Titanat.

Anwendungen:

Schutzrohre für Thermoelemente bei Hochtemperaturmessungen, Brennerdüsen.

Dichtscheiben für Armaturen, Fadenführer an Textilmaschinen, Futtersteine und Mahlkugeln für Mühlen aller Art, Feinschleifwerkzeuge, metallisierbare Isolierteile (hartlötfähig) für Elektronik und Vakuumtechnik.

Schniedplatten besonders für die Zerspanung von Gusseisen (Sandeinschlüsse) mit höherer Härte als normale Hartmetallsorten (auch bei 1000 °C).

Stabilisierung des Zirkonoxids:

Durch Einbau von genügend Oxiden des Mg, Ca oder Y werden Zr-Atome durch diese ersetzt, das Kristallgitter bleibt dadurch bis auf RT kubisch stabil. Es wird **FSZ**, vollstabilisiertes ZrO_2 (fully stabilized zirconia) genannt.

Besondere Sinterbedingungen ergeben höherfeste Werkstoffe mit Thermoschockbeständigkeit:

PSZ, Teilstabilisiertes ZrO_2 (partly stabilized zirconia) mit geringeren Gehalten ist bei RT überwiegend kubisch mit feinkörnigen, tetragonalen Ausscheidungen ($\leq 0,1 \mu\text{m}$), die monokline Phase ist unterdrückt, das Gefüge ist metastabil.

TZP, (tetragonal zirkonia polycrystal) entsteht durch äußerst feinkörnige Pulver (lange Mahldauer) und Zugeben von Yttrium-Oxid. Bei ihm ergeben Feinkorn- und Umwandlungsverstärkung Festigkeiten bis zu 1800 MPa bei hoher Bruchzähigkeit. Anwendung in der Dentaltechnik.

Beispiele: Plasmagespritzte Wärmedämmenschichten an Ventilkegeln (Pkw), Ventilführungen, Brennkammern. Zylinderlaufbüchsensegmente von thermisch hochbelasteten Dieselmotoren, Zieh- und Biegewerkzeuge

Spannungen, entstehen durch behinderte Längenänderung nach dem Hooke'schen Gesetz:

$$\text{Spannung} = (\text{Wärme-}) \text{Dehnung} \times \cdot \text{E-Modul}$$

Der Ersatz des 4-wertigen Zr durch Oxide 2-wertiger Elemente wie Ca, Mg, Y führt zu unbesetzten O-Plätzen im Ionengitter. Dadurch werden Platzwechsel möglich, und das PSZ wird zu einem ionenleitenden Stoff, einem Elektrolyten (→).

Aluminiumtitanat ATi, Al_2TiO_5 , ist eine Mischphase aus Al-Oxid und Ti-Oxid im stöchiometrischen Verhältnis und offener Porosität von 10...16 %. Mit seinen Eigenschaften hebt es sich von den anderen ab:

- Niedriger E-Modul,
- sehr niedrige Wärmeleitung und lineare Wärmedehnung.

Das führt zu einer sehr hohen Beständigkeit gegen Thermoschockbeanspruchung.

Anwendungen: λ-Sonden zur Abgaskontrolle.

Die Leitfähigkeit für O-Ionen ist beim FSZ am höchsten. Damit ergibt sich die Möglichkeit, diesen Stoff als Feststoffelektrolyt in Brennstoffzellen zu verwenden.

Anwendungen: Al-Titanat für Umgießteile im Motorenbau: Einsätze für Kolbenböden und Auskleidung von Auspuffkrümmern (Portliner), Ofenschieber.

Es wird auch eine geringe Benetzungbarkeit durch Al- und Buntmetallschmelzen beobachtet. Anwendung für z.B. Steig- und Dosierrohre, Düsen, Tiegel.

Tabelle 8.6: Eigenschaftswerte von Oxidkeramiken

(ceramverband)

Sorte Kurzzeichen	Dichte g/cm ³	E-Modul MPa	Biegefestigkeit MPa	Wärmeleitfähigkeit W/mK	Wärmedehnung α ²⁾ 10 ⁻⁶ /K	Maximale Temperatur °C	K_{Ic} ³⁾ MPa / $\sqrt{\text{m}}$
Al-Oxid < 90 %	> 3,2	> 200	> 200	10...16	6...8	1200...1400	3,5...4,5
Al-Oxid > 99 %	3,75...3,98	300...380	300...580	19...30	7...8	1400...1700	4...5,5
PSZ, ZrO_2	5...6	200...210	500...1000	1,5...3	10...12,5	800...1600	5,8...10,5
ATi, Al_2TiO_5	3...3,7	10...50	15...100	1,5...3	0,5...2	600...1600	3...5

^{1...3)} siehe Fußnote bei Tabelle 8.9

8.4.2 Nichtoxidische Werkstoffe

Diese Gruppe der technischen Keramiken unterscheidet sich von der Oxidkeramik durch die vorherrschende Bindungsart:

- Oxidkeramik mit Ionenbindung,
- Nichtoxidkeramik mit kovalenter (Elektronenpaar-) Bindung.

Die Herstellung der Ausgangspulver geschieht synthetisch nach verschiedenen Verfahren, evtl. unter Schutzgas.

Die Elektronenpaarbindung ist Ursache der geringen Sinterfähigkeit (→) dieser Sorten.

Si-Carbide und Si-Nitrid werden jeweils nach verschiedenen Verfahren hergestellt. Dabei entstehen Werkstoffe verschiedener Porosität (Dichte) und innerer Bindung und damit unterschiedlichem Eigenschaftsprofil.

Nichtoxidisch sind Carbide und Nitride von Silicium, Bor und Al.

Carbide sind elektrisch- und wärmeleitend.

Nitride sind elektrisch isolierend, auch bei hohen Temperaturen.

Sinterverhalten: Die feste Bindung der Elektronen lässt keine Stoffübergänge zwischen den Pulverteilchen zu. Sie brauchen Sinterhilfsmittel, die bei Sintertemperatur *verglasen* und damit *binden*, aber leider die Wärmebeständigkeit verschlechtern.

Bei geringem Druck entstehen poröse Werkstoffe mit geringer Festigkeit.

Höchste Dichte und Biegefestigkeit bei erhöhten Kosten erreichen die heißostatisch und gasdruckgesinterten Sorten.

Siliciumcarbid SiC

Silicium, Si steht im PSE unter dem Kohlenstoff in der gleichen Hauptgruppe und hat damit die gleiche Besetzung der Elektronen-Außenhülle. Die Si-Atome ersetzen das C im Diamantgitter (\rightarrow).

Die verschiedenen Herstellverfahren führen zu unterschiedlicher Porosität und Dichte. Für größere Bauteile ist eine geringe Schwindung beim Sintern wichtig.

SiC ist als Carborundum als hartes, abrasiv wirkendes Korn in Scheifscheiben u.a. enthalten. Die Herstellung erfolgt unter hoher Energiezufuhr im elektrischen Lichtbogen bei ca. 2500 °C (\rightarrow):

Übersicht: Siliciumcarbidsorten:

Sorte	Herstellungsart	Dichte g/cm ³
Artfremdbunden		
NSiC	Nitridgebunden, porös 10...5%	2,7...2,82
SiSiC	reaktionsgebunden, Si-infiltriert	3,1
LPSiC	Flüssigphasengesintert (Al-Oxid)	3,20...3,24
Arteigengebunden		
RSiC	rekristallisiert, porös 11...15 %	2,6...2,8
SSiC	gesintert	3,1...3,15
HPSiC	heißgepresst	3,2
HiPSiC	heißisostatisch gepresst (HIP)	3,2

RSiC und SiSiC sintern schwindungsfrei und sind für größere Bauteile geeignet. Beim Si-infiltrierten SiSiC werden die Poren mit flüssigem Si gefüllt (höchste Wärmeleitfähigkeit).

Dichte und Festigkeit steigen auch mit sinkender Korngröße (< 2 µm mit $R_m = 500$ MPa).

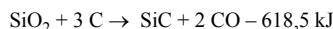
Hinweis: (Diamantgitter \rightarrow Bild 1.7).

SiC besitzt hohe Härte und höhere Wärmeleitfähigkeit als andere keramische Stoffe.
(Diamant leitet die Wärme besser als Kupfer!)

Offene Porosität mit Hohlräumen von 50...200 µm

- verringert die Oxidationsbeständigkeit des Bauteils bei höheren Temperaturen,
- wird genutzt zur Aufnahme von Schmierstoffen (SSiC) oder flüssigem Silicium (SiSiC).

Reaktionsgleichung:



Für die technische Keramik müssen die Ausgangsstoffe eine hohe Reinheit besitzen.

Übersicht: Die Sorten NSiC, SiSiC und LPSiC erhalten ihre Bindung durch *artfremde* Zusätze, dadurch ist ihre max. Einsatztemperatur geringer.

Die anderen Sorten bestehen aus reinem SiC und verfestigen durch den Sintervorgang

- drucklos die Sorten RSiC und SSiC, bzw.
- mit steigendem Druck bei 2000 bis 2500 °C die Sorten HPSiC und HiPSiC.

Anwendungen: Gleitringdichtungen und Lager für Pumpenwellen in aggressiven Medien (SiSiC).

Läufer für Ab gasturbinen (kleineres Massenträgheitsmoment als Stahlrotoren).

Vorrichtungen zum Stapeln von Glühgut in Glühöfen (RSiC).

SiSiC wird wegen der guten Wärmeleitfähigkeit (> Stahl) auch für Wärmeaustauscher in heißen korrodierenden Medien eingesetzt. (\rightarrow Durchdringungsverbundwerkstoffe 10.5).

Tabelle 8.7: Werkstoffkennwerte der SiC-Sorten (Extremwerte fettgedruckt)

(ceramverband)

Sorte Kurzzeichen	E-Modul MPa	Biege- festigkeit MPa	Wärme- ¹⁾ leitung λ W/mK	Wärme- dehnung $\alpha^2)$ $10^{-6}/\text{K}$	Maximale Temperatur °C	$K_{Ic}^{3)}$ MPa / $\sqrt{\text{m}}$
RSiC	230...280	80...120	18...20	4,8	1600	3...4
SSiC	370...450	300...600	40...120	4,0...4,8	1400...1750	3...4,8
SiSiC	270...350	180...450	110... 160	4,3...4,8	1380	3...5
HPSiC	440...450	500...800	80...145	3,9...4,8	1700	3
HiPSiC	440...450	640	80...145	3,5	1700	
LPSiC	420	600	100	4,1	1200...1400	6,0
NSiC	150...240	180...200	14...15	4,5	1450	--

^{1...3)} siehe Fußnote bei Tabelle 8.9

Borcarbid B_4C , Stoff mit höchster Härte (nach Diamant und Bornitrid) und höchstem Widerstand gegen abrasiven Verschleiß. Der Schmelzpunkt liegt bei 2720 K. Borcarbid ist ein guter Neutronenabsorber, der keine langlebigen Sekundärstrahler bildet.

Siliciumnitrid Si_3N_4 (SN)

Stoffe mit höchster Zähigkeit und Biegefestigkeit (bis 1000 °C). Sie werden wegen der Zersetzung bei 1750...1959 °C *unter Druck* (Übersicht) gesintert.

Übersicht: Siliciumnitridsorten

Sorte	Herstellungsart	Dichte g/cm ³
RBSN	reaktionsgebunden, porös	1,9...2,5
SSN	drucklos gesintert, porös	3,2...3,3
HPSN	mech. heißgepresst (100 bar)	3,2...3,
HIPSN	heißisostatisch gepresst (bis 2000 bar)	3,2...3,3
GPSN	gasdruckgesintert (100 bar)	3,2

Statt einer *infiltrierten* Sorte gibt es hier ein reaktionsgebundenes RBSN, dass erst während des Pressens von Si-Pulver durch Einleiten von N₂-Gas erzeugt (nidriert) wird. Es sintert schwindungsfrei mit feiner Porosität, die zu niedrigeren mechanischen Werten führt und bei hohen Temperaturen zu innerer Oxidation führen kann.

Tabelle 8.8: Werkstoffkennwerte der SN-Sorten

Sorte Kurzzeichen	E-Modul MPa	Biege- festigkeit MPa	Wärme- ¹⁾ leitung λ W/mK	Wärme- dehnung $\alpha^2)$ $10^{-6}/\text{K}$	Maximale Temperatur °C	$K_{1c}^{(3)}$ MPa / $\sqrt{\text{m}}$
SSN	290...330	700...1000	15...40	2,5...3,5	1300	5...8,5
RBSN	80...180	200...330	4...15	2,1...3	1400	1,8...4
HPSN	290...320	300...600	15...40	3,0...3,4	1400	6...8,5
HIPSN	290...330	800...1100	15...50	3,1...3,3	1400	8,5
GPSSN	300...320	900...1200	20...25	2,7...2,9	1200	8...9

^{1...3)} siehe Fußnote bei Tabelle 8.9

Aluminiumnitrid AlN hat unter den keramischen Stoffen ein besonderes Eigenschaftsprofil:

- höchste Wärmeleitung (bis zu 220 W/m K),
- hohen elektr. Isolationswiderstand bis 600 °C,
- Wärmedehnung dem Silicium ähnlich,
- ist metallisierbar.

Anwendungen: Düsen für die Strahltechnik, Schleifscheibenabrichter, Läppkorn für Hartmetall

Panzerplatten für ballistische Zwecke, Dichte 2,5 g/cm³, E-Modul = 450 GPa)

Absorberplatten gegen Neutronenstrahlung, $\text{B}_4\text{C}/\text{Graphit}$ -Thermoelemente bis 2200 °C

Si_3N_4 ist ein synthetischer Stoff, der sich bei ca 1700 °C unter Normaldruck in die Elemente zersetzt. Er kommt als Pulver mit Sinterhilfsmitteln aus den Oxiden das Al, Mg und Y mit Korngrößen unter 1 µm in den Handel (hoher Preis).

Anwendungen: Rotor für Abgasturbolader (SSN). Ventile für PkW-Motoren (GPSN).

Schneidkeramik für unterbrochenen Schnitt und Schruppfräsen mit Kühlung.

Schutzrohre für Thermoelemente und Steigrohre in Schmelzöfen für Niederdruckguss.

Wälzlager als Vollkeramiklager bis 500° C einsetzbar. Im Trockenlauf 40 % weniger Reibmoment, aber 5...10-fach teurer als Stahl, für extrem hohe Drehzahlen geeignet (kleinere Dichte), unmagnetisch, korrosionsfest. Höchste Genauigkeit erforderlich, da Innenring durch Wärmedehnung der Welle auf Zug beansprucht wird. Deshalb werden meist Hybridlager mit HPSN-Kugeln in Stahlringen verwendet.

Anwendungen: Durch sein Eigenschaftsprofil ist AlN der ideale Isolierwerkstoff für die Elektronik als Unterlage (Substrat) für gedruckte Schaltungen, mit angelöteten elektronischen Bauelementen, und Si-Halbleitern. Es dient als Ersatz für das verwendete toxische Berylliumoxid BeO.

Bornitrid BN kann ähnlich wie Kohlenstoff als Graphit und Diamant in zwei Kristallgittern (→) auftreten und in das dichtere überführt werden.

- Hexagonales Bornitrid BN,
- Kubisches Bornitrid CBN.

Die Synthese von BN erfolgt bei 900 °C aus Bortrioxid und Ammoniak (→).

Hexagonales BN (weißer Graphit genannt), ist weich und wird massiv in Form von Pulver, Suspension oder PVC-Schicht als Trockengleitwerkstoff und Trennmittel verwendet. Bedeutung hat seine geringe Benetzungsfähigkeit mit Metallschmelzen. Im Vergleich mit Graphit ist es

- oxidationsbeständiger (chem. Verbindung),
- elektrisch isolierend und wärmeleitend,
- hat ab 400 °C bessere Gleiteigenschaften als Graphit und Molybdänsulfid.

Kubisches Bornitrid CBN entsteht aus der hexagonalen Form durch Hochdruck- und Hochtemperaturbehandlung. Es hat ein Diamantgitter und steht in der Härte unter dem Diamanten, aber vor dem Titancarbid TiC.

Kohlenstoff wird als Werkstoff in Form von Kohlenstoffprodukten, Graphit und Diamant eingesetzt.

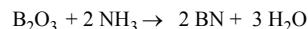
Graphit ist ein mineralischer Rohstoff, der auch aus Koks durch Hochtemperaturbehandlung entsteht (Graphitisierung bei 2800 °C). Seine seltsame Eigenschaftskombination erlaubt zahlreiche Anwendungen:

- Hochtemperatur-Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit,
Gleiteigenschaften durch das hex. Schichten-gitter (→ Bild 1.6),
- Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität,
- Niedrige Zugfestigkeit, die mit der Temperatur (bis 2500 °C) auf das Doppelte zunimmt.

Durch Kunstharztränkung entstehen gas- und flüssigkeitsdichte Werkstoffe mit besseren mechanischen Eigenschaften, die Wärmebeständig-keit ist, abhängig vom Polymer, auf etwa 200 °C begrenzt.

Hinweis: Graphit- und Diamantgitter (→ 1.3.4)

Reaktionsgleichung:



Nach einer Behandlung mit Stickstoff bei 1500 °C entsteht BN in Plättchenform von 0,1...0,5 µm Dicke und ca. 5 µm Ø.

Anwendungen von BN: (→ www.henze-bnp.de)

Matrizen beim Stranggießen von NE-Metallen, Pulver und Spritzmittel für Gieß- und Warmumformwerkzeuge, Schutz gegen Schweißspritzer (HeboCoat®)

Polymerenzusatz: Erhöhte Wärmeleitung bei hohem elektrischem Widerstand. Der Gleiteffekt schont die Werkzeuge.

Nanopulver (ca. 70 nm Teilchengröße)

CBN-Werkzeuge als Wendeschneidplatten oder als polykristalline Beschichtung von Hartmetall zum Spanen gehärteter Stähle eingesetzt (mit hoher Oberflächengüte).

Vorkommen: Graphit kommt als Mineral mit wechselnder Reinheit vor.

Anwendungen: Kohlenstoffprodukte sind Elektroden für die Elektro-Stahlgewinnung und die Schmelzflusselektrolyse des Aluminiums, Magnesiums und anderer Metalle. Sie werden aus Petrolkokos, Pechkokos mit Zugabe von Graphit geformt und bei > 1000 °C gebrannt.

Dazu auch Kohlenstoffsteine und -stampfmas-sen für hochfeuerfeste Auskleidungen in metallurgischen Anlagen.

Rohre und Bauelemente für den chemischen Apparatebau (DIABON® von SIGRI).

Hinweis: C-Fasern → 10.3.1

CFC ist carbonfaserverstärkter Kohlenstoff mit der Kombination aus geringer Dichte (Masse) und hoher Warmbiegefestigkeit bis 1200 °C. Anwendung z.B. für Chargiersysteme in Ofen-anlagen als Ersatz für NiCr-Legierungen. (Sigrabond®).

www.sglcarbon.com; www.schunck-tribo.com

8.5 Neue Verfahren zur Herstellung der Pulver-Ausgangsstoffe

Die Anwendung auf Bauteile in der Serienfertigung von z.B. Verbrennungsmotoren ist schwierig wegen der gegenüber Metallen größeren Abhängigkeiten (→).

Es ist sehr aufwändig, aus Naturstoffen mit wechselnden Verunreinigungen die Ausgangsstoffe für Keramik ständig in reinster, gleichmäßig **feinkörniger** Pulverform herzustellen (→).

Das hat zur Entwicklung anderer Herstellungsverfahren für Pulver kleiner Korngröße geführt. Wegen der Kosten sind diese Pulver zunächst auf kleine Teile und solche mit höchster Beanspruchung begrenzt.

Polymer-Pyrolyse: Synthese von nichtoxidierten, anorganischen Festkörpern aus AlN, BN, SiC und SN in zwei Schritten:

- **Polymerisation** von solchen organischen Verbindungen, die **Silicium** u.a. anorganische Elemente im Molekül enthalten (z.B. Silane →),
- **Keramisierung:** Thermische Zerlegung der hochmolekularen Verbindungen zu nichtmetallischen, anorganischen Feststoffen.

Vorteile: Wesentlich niedrigere Temperaturen beim Sintern, Reinheit und Mikrogefüge im Nanometer-Bereich, und Möglichkeiten für neue Stoffkombinationen, die auf die konventionelle Weise nicht herstellbar sind.

Sol-Gel-Verfahren: Ausfällen von schwer löslichen Hydroxiden aus Lösungen. Die Teilchen haben Größen im Bereich von einigen Nanometern ($1 \text{ nm} = 0,001 \mu\text{m}$) und sind besser vermischt, als es durch mechanisches Mahlen und Vermischen erzeugt werden kann. Hinzu kommt eine hohe Reinheit der Stoffe.

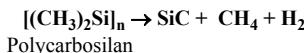
Durch Wasserentzug entsteht aus dem Sol ein Gel, das durch Trocknung zu einem feinkörnigen Pulver verarbeitet wird.

- Streuung der Eigenschaftswerte, da die natürlichen Ausgangsstoffe in Reinheit und Korngröße schwanken,
- Abhängigkeit der Bauteileigenschaften vom Herstellverfahren. Sie führen zu
- Schwierigkeiten in der Qualitätssicherung durch eine höhere Ausfallwahrscheinlichkeit der nichtmetallisch anorganischen Stoffe.

Nanoskalige Pulver aus TiCN erhöhen Oxidations- und Temperaturbeständigkeit von feuergeschützten Massen in Kontakt mit Metallschmelzen, wie Elektroden, Auskleidungen für Konverter und Pfannen, Gießstrahlrohre.(2500 EUR/t).

Begriff: Pyrolyse (pyro- [griech.] mittels Feuer, Hitze): Zersetzung von höhermolekularen Stoffen bei hohen Temperaturen.

Beispiel: Silane entsprechen den Kohlenwasserstoffen und sind polymerisierbar. Sie zerfallen bei ca. 1000°C unter Abspaltung von Methan und Wasserstoff:



Hinweis: Anwendung dieser Technik seit längerem zur Herstellung von C-Fasern aus PAN-Fasern (Polyacrylnitril).

Versuche zur Herstellung kleiner dichter Formkörper aus SiC und SN und Infiltration von porösen Körpern zur Herstellung von Verbundwerkstoffen.

Begriff: Sol und Gel sind jeweils Zweistoffsysteme von kleinsten Teilchen in einer flüssigen Phase. Sie unterscheiden sich in der Teilchengröße und in der Viskosität: Gel = gallertige Masse.

Einteilung von Stoffmischungen nach steigender Teilchengröße:

- Echte Lösung
- → kolloidale Lösung (Sol)
- → Gel
- Stoffgemenge

8.6 Vergleich einiger nichtmetallisch anorganischer Werkstoffe

Tabelle 8.9 und Diagramme zeigen, dass die nichtmetallisch anorganischen Stoffe nicht nur gegenüber Metallen (Stahl), sondern auch unter sich starke Unterschiede aufweisen können.

Tabelle 8.9: Werkstoffkennwerte nichtmetallisch anorganischer Stoffe im Vergleich mit Stahl

Sorte Kurzzeichen	Dichte g/cm ³	E-Modul MPa	Biege- festigkeit MPa	Wärme- leitung λ W/mK	Wärme- dehnung α $10^{-6}/\text{K}$	Maximale Temperatur °C	K_{Ic} ³⁾ MPa / $\sqrt{\text{m}}$
Stahl, unleg.	7,85	210	500...700	62	12	200	> 100
Al-Oxid	3...3,9	200...380	200...300	10...16	5...7	1400...1700	4...5
PSZ, ZrO₂	5...6	140...210	500...1000	1,2...3	9...13	900...1500	8
ATi, Al₂TiO₅	3...3,7	10...30	25...50	1,5...3	5	900...1600	1
AlN	3,2	320	250...300	180...220	4,5...5,6	1000	3,0...3,5
HPSN	2...3,4	290...320	600...850	15...50	3,2	1400	6,8...8
HPSiC	3,2	440...450	500...800	80...145	3,9...4,8	1700	5,3
BN	2,1	74	75	105	2,2...4,4	900...2500	----
B₄C	2,51	450	300...400	30...400	5	700...1000	3,4

1) Wärmeleitung λ bei 20 °C; 2) Längenausdehnung α für Keramik 30..1000 °C; 3) K_{Ic} : Spannungs-Intensitätsfaktor (Maß für die Bruchzähigkeit, aus der Bruchmechanik hergeleitet)

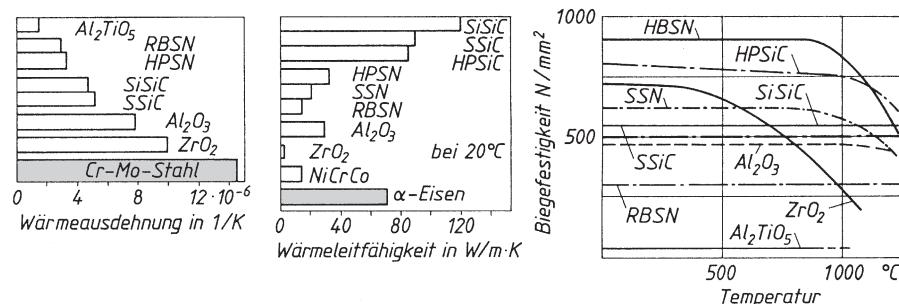


Bild 8.2 Wärmeausdehnung, Wärmeleitfähigkeit und Biegefestigkeit nichtmetallisch anorganischer Werkstoffe bei höheren Temperaturen im Vergleich mit Stahl

Literaturhinweise und Informationsquellen:

- | | | |
|---|---|----------------------|
| Salmang, H. u.
H. Scholze: | Keramik, Teil 1: Allgemeine Grundlagen und wichtige Eigenschaften
Teil 2: Werkstoffe. | Springer-Verlag 2002 |
| Brevier | Hrsg. Verband keramische Industrie, | Fahner Verlag 2003 |
| Degussa | Oxidkeramik, DEGUSSIT®, FRIALIT® | www.friatec.de |
| Informationszentrum
Technische Keramik | Informationsschriften, Daten und Eigenschaften keramischer Werkstoffe: Brevier
Technische Keramik, Pdf-Datei | www.keramverband.de |
| CeramTec AG | Informationsschriften über einzelne Keramik-Werkstoffe | www.ceramtec.de |
| H.C. Starck Ceramics | Informationen über Eigenschaften + Anwendungen | www.hcstarck.de |

9 Kunststoffe (Polymere)

9.1 Allgemeines

9.1.1 Entwicklung und Bedeutung

Kunststoffe sind gegenüber Metallen und Keramiken junge Werkstoffe, die in kaum 100 Jahren seit ihrer Entdeckung (→) viele Anwendungsgebiete erobert haben. Die Zahl der Sorten und Mischungen untereinander oder mit Zusätzen entstand aus den Anforderungen der Anwender.

Aufgrund ihres Eigenschaftsprofils haben sie viele klassische Werkstoffe ersetzt. Ihre Vorteile sind die Kombinationen aus Korrosionsbeständigkeit und geringer Dichte verbunden mit kostengünstiger Herstellung von Bauteilen mit großer Gestaltungsfreiheit.

Neue Polymere und Faserverbunde haben höhere Festigkeit und Steifigkeit, so dass sie als Leichtbauwerkstoffe mit Al- und Mg-Legierungen konkurrieren (→).

9.1.2 Begriffe und Einteilung der Polymere

Polymere sind nichtmetallische, organische Werkstoffe aus Kohlenstoffverbindungen, d.h. Riesen- oder Makromolekülen mit einem Gerüst aus überwiegend C-Atomen mit angehängten H-Atomen (Kohlenwasserstoffe KW und Abkömlinge).

Monomere sind die einmolekuligen Ausgangsstoffe. Durch chemische Reaktionen (→) werden die Einzelmoleküle durch starke Elektronenpaarbindungen zu Makromolekülen.

Makromoleküle sind ketten- oder netzartig gebaut. Die Netze sind räumlich durchdrungen und werden Raumnetzmoleküle genannt (Bild 9.2). Die Bedingungen für das Entstehen dieser beiden Arten liegen in der Anzahl der frei werdenden Bindungsarme der monomeren Moleküle.

Bakelite: Phenol-Formaldehyd-Kunststoff im Jahre 1907 von Bakeland erfunden. Bereits im 19. Jahrhundert gab es Zelloidin.

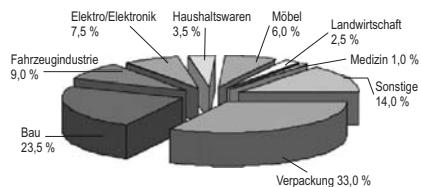


Bild 9.1 Anwendungsbereiche der Polymere in der BRD 2006

Beispiel: Pkw-Kotflügel

Werkstoff	Stahl	Al-Leg.	Polymer
Gewicht in kg	8,3	4,6	4,0
Dicke in mm	0,8	1,25	2,8

Begriffe:

poly = viel;

meros = Teil; bezieht sich auf die vielteiligen Moleküle, aus denen Kunststoffe bestehen.

monos: einzeln, allein, einmalig

Chemische Reaktionen sind: Polymerisation, Polykondensation, Polyaddition. → 9.2.5 f.

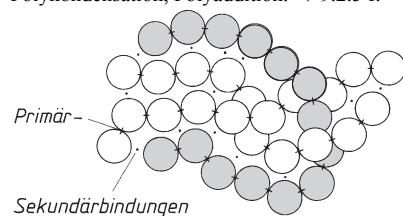
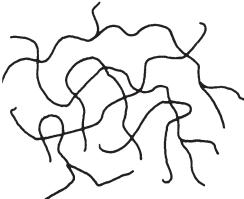
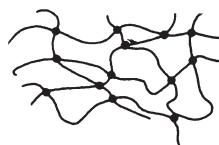


Bild 9.2 Ketten- oder Fadenmoleküle

Kettenmoleküle	Moleküle haben zwei zur Reaktion fähige Stellen (Kupplungen)
Raumnetzmoleküle	Moleküle haben drei zur Reaktion fähige Stellen

Die Molekülstruktur legt die Haupteigenschaften fest, nach denen die Kunststoffe eingeteilt werden (Tabelle 9.1).

Tabelle 9.1: Einteilung der Polymere nach der Molekülstruktur

Ketten- oder Fadenmoleküle	Kettenmoleküle + Vernetzungen	Raumnetzmoleküle
		
Schwache Bindungen zwischen den Ketten werden bei Wärmebewegung gelockert (Abstand steigt): Die Ketten sind dann gegeneinander beweglich. Das Polymer ist plastisch verformbar und schweißbar. Es hat thermoplastische Eigenschaften.	Kettenmoleküle werden durch starke Bindungen weitmaschig vernetzt. Eine Verschiebung der Ketten ist unmöglich, jedoch ein Strecken zwischen den Vernetzungspunkten. Das Polymer ist gummi-elastisch mit hohem Rückstellvermögen. Es hat elastische Eigenschaften.	Engmaschig durch starke Bindungen miteinander vernetzte räumliche Moleküle sind durch Wärmebewegung nicht gegeneinander beweglich. Das Polymer ist unschmelzbar , fast unlöslich und härter. Es hat duroplastische Eigenschaften.
Thermoplaste , (Plastomere)	Elaste (Elastomere)	Duroplaste (Duromere)

Die Haupteigenschaften der Kunststoffe sind aus dem Umgang im Alltag geläufig und können – unter Hinweis auf ihre Struktur – mit den Metallen verglichen werden (Tabelle 9.2).

Tabelle 9.2: Eigenschaftsvergleich Metall – Polymer

Eigenschaften	Polymereigenschaften und -verhalten	Ursachen in der Struktur der Polymere																				
Dichte ρ	Polymere sind leichter als Metalle, sie sind nicht so dicht gepackt und bestehen aus Nichtmetallen (→). Ihre Dichte liegt zwischen 0,9...2,0 kg/dm ³ , sie schwimmen z.T. auf dem Wasser (als massive Stoffe).	Dichtevergleich mit Fe: <table border="1"> <tr> <th>Element</th> <th>Fe</th> <th>C</th> <th>H</th> <th>O</th> </tr> <tr> <td>ρ in kg/m³</td> <td>7850</td> <td>2200</td> <td>0,09</td> <td>1,43</td> </tr> <tr> <th>Element</th> <th>N</th> <th>Cl</th> <th>F</th> <th>S</th> </tr> <tr> <td>ρ in kg/m³</td> <td>1,25</td> <td>3,21</td> <td>1,70</td> <td>2100</td> </tr> </table>	Element	Fe	C	H	O	ρ in kg/m ³	7850	2200	0,09	1,43	Element	N	Cl	F	S	ρ in kg/m ³	1,25	3,21	1,70	2100
Element	Fe	C	H	O																		
ρ in kg/m ³	7850	2200	0,09	1,43																		
Element	N	Cl	F	S																		
ρ in kg/m ³	1,25	3,21	1,70	2100																		
Chemische Beständigkeit	Polymere haben hohe Beständigkeit in Säuren, Basen und Salzlösungen, sind jedoch nicht beständig gegen bestimmte Lösungsmittel, die lösen oder aufquellen lassen.	Polymere sind chemische Verbindungen, molekular gebaut. Ihre Valenzelektronen sind in Elektronenpaaren gebunden. Die Atome haben dadurch die „Edelgashülle“.																				
Steifigkeit, E-Modul	Polymere sind biegeweicher als Metalle, ihr E-Modul liegt um Zehnerpotenzen niedriger und ist stark temperaturabhängig. Beispiel: Gartenschlauch wird im Winter steif.	Polymere haben keine Kristallgitter, ihre Moleküle haben größere Abstände und schwache Anziehungskräfte. Bei Erwärmung vergrößern sich die Abstände, die Kräfte werden noch kleiner.																				

Tabelle 9.2: Fortsetzung

Eigenschaften	Polymereigenschaften und -verhalten	Ursachen in der Struktur der Polymere
Wärmedehnung und Wärmebeständigkeit	Polymere dehnen sich bei Erwärmung ca. 5...15-fach stärker aus als Metalle. Beispiel: Profile, wie Handläufer, Rohrüberzüge heben sich bei Erwärmung ab. Bei höheren Temperaturen erfolgt Zersetzung mit Verfärbung, Blasenbildung und Verbrennung.	Bei Wärmezufuhr vergrößern sich die Abstände der Moleküle (Wärmebewegung). Erweichung der Stoffe, bei hohen Temperaturen zerfallen die Riesenmoleküle in niedermolekulare Stoffe , die flüssig oder gasförmig sein können.
Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität	Polymere haben niedrige Wärmeleitzahlen , sie betragen ca 1/300 der von Stahl. Es sind Isolatoren für die E-Technik, (mit Ausnahme der Sorten, die Feuchtigkeit aufnehmen).	Weitergabe von Wärme- und elektrischer Energie ist an freie Elektronen gebunden. Bei Polymeren liegen Elektronenpaarbindungen vor, die Elektronen sind ortsgebunden (lokalisiert).
Langzeitverhalten	Polymere neigen unter Belastung zum Kriechen , das ist eine langsame bleibende Formänderung, oder sie lassen in der Spannung nach (Ermüdung).	Das Fehlen eines Kristallgitters und die größeren Molekülabstände lassen ein Verschieben der Kettenmoleküle zu.
Farbgebung	Polymere sind glasklar bis milchig und lassen sich durchgehend und mit höherer Beständigkeit einfärben als lackierte Metalle.	

Die Polymereigenschaften lassen sich stark verändern durch die

- **Gestalt** der Makromoleküle, und/oder
- **Ausrichtung** der Makromoleküle, die sog. Kristallisation.

Hinweis: Weitere Veränderungen sind auch möglich durch

Legieren (Copolymerisate, Polymerge mische), **Füll- und Verstärkungsstoffe** (folgende Abschnitte).

9.1.3 Polymereigenschaften und ihre Prüfung

Während Metalle im Bereich der Hookschen Geraden elastisch sind, zeigen Polymere ein visko-elastisches Verhalten (→) mit den Folgererscheinungen:

- **Kriechen**, d.h. eine langsame plastische Formänderung unter konstanter Belastung,
- **Spannungsermüdung** (Relaxation), d.h. das Nachlassen der Spannungen unter konstanter Dehnung.

Hinweis: Eine Zusammenstellung der Eigenschaftsprüfungen gibt die Norm DIN EN ISO 10350/01.

Begriffe:

viskos : zähfließend wie z.B. Harz

elastisch: rückfedernd wie z.B. Gummi

Relaxation tritt z.B. bei verschraubten Dichtungen auf. Sie werden dünner, die Spannung lässt nach und die Verbindung wird undicht.

Durch dieses visko-elastische Verhalten der Polymere sind ihre Eigenschaften von der Versuchsgeschwindigkeit abhängig. Festigkeiten steigen bei den meisten bis zum Bruch an, d.h. bei stoßartiger Belastung kann ein zähes Polymer spröde brechen.

Tabelle 9.3 zeigt die wichtigsten Kenngrößen des Zugversuches nach DIN EN ISO 527/96.

Prüfverfahren ermitteln die mechanischen Kurzzeiteigenschaften wie bei den Metallen an besonderen Proben und mit festgelegten Belastungsgeschwindigkeiten. Eigenschaftswerte haben ähnliche Definitionen, aber z.T. andere Bezeichnungen.

Bild 9.3 zeigt typische Spannungs-Dehnungs-Linien von thermoplastischen Kunststoffen in Verbindung mit den Werkstoffkennwerten in Tabelle 9.3.

Tabelle 9.3: Werkstoffkennwerte des Zugversuches bei Kunststoffen

Größe (Kunststoffe)	Kurve	Einheit
Zugfestigkeit σ_M ist die max. Spannung während des Versuches	1, 2	MPa
Bruchspannung σ_B ist die Spannung beim Bruch (Reißfestigkeit)	1	
Streckspannung σ_Y ist der erste Spannungswert, bei dem eine weitere Dehnung ohne Spannungserhöhung erfolgt	2	
Spannung σ_X bei der Dehnung x	4	
Dehnung ε_M b. d. Zugfestigkeit σ_M	1, 2	% MPa
Bruchdehnung ε_B (Reißdehnung)	1	
Streckdehnung ε_Y	2	
E-Modul aus dem Zugversuch E_t (Quotient aus dem Spannungs- und zugehörigen Dehnungsunterschied bei $\varepsilon_2 = 0,0025$ minus $\varepsilon_1 = 0,0005$)		MPa

E-Module werden auch aus der Druckfestigkeit oder der Biegefestigkeit ermittelt.

Biegefestigkeit wird nach DIN EN ISO 178/06 ermittelt, bei dem ein Normstab als Träger auf zwei Stützen durch eine mittige Kraft gebrochen wird. Berechnung der Biegefestigkeit aus dem Biegemoment beim Bruch (\rightarrow).

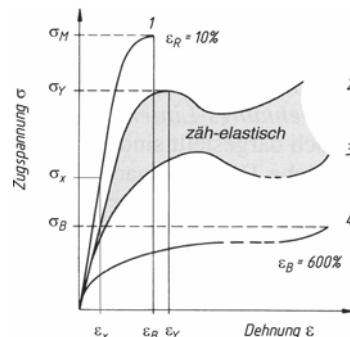


Bild 9.3 σ , ε -Linien von Polymeren, schematisch

Kurve 1: steiler Verlauf bei formsteifen, spröden Polymeren (z.B. Polystyrol PS, Polymethacrylat PMMA).

Kurven 2 und 3: Kurve mit relativem Maximum und anschließender größerer Dehnung bei zäh-elastischen und schlagfesten Polymeren (z.B. Polyamid PA, Polycarbonat PC).

Kurve 4: flacher Verlauf mit sehr großer Dehnung und niedriger Zugfestigkeit, die hier gleich der Bruchfestigkeit ist (Polyurethan PUR).

Normen: Bestimmung der Druckeigenschaften DIN EN ISO 604/03; Bestimmung der Biege-eigenschaften DIN EN ISO 178/06.

Bei zähnen Polymeren ohne Bruch wird eine bestimmte Durchbiegung erzeugt und die dann wirkende *Grenzbiegespannung* berechnet.

Tabelle 9.4: Weitere mechanische Prüfungen

Größe (für Kunststoffe)	Norm, Werkstoffkenngröße	Einheit
Kugeldruckhärte H nn nn: Angabe der Prüfkraft F (49,132, 358,961 N) <i>Beispiel:</i> H49 = 120 MPa	DIN EN ISO 2039-1/03. Berechnet als Quotient aus der Prüfkraft F und der Oberfläche A der Kalotte mit Stahlkugel 5 mm Ø, Einwirkdauer 10...60 s. A wird aus der Eindringtiefe t berechnet, es gilt die Vorschrift $0,15 < t < 0,35$ mm	MPa = N/m ²
Schlagzähigkeit α_{cU} Kerbschlagzähigkeit α_{cN}	Schlagbiegeversuch DIN EN ISO 179/06 nach Charpy (Index c, U = ungekerbt, N = gekerbter ISO-Stab)	kJ/m ²

Für weiche Kunststoffe und Elastomere werden Shore-Härte A und D (DIN 53505/00 und DIN EN ISO 868/03) angewandt. Eindringprüfung, 2,5 mm tief mit Kegelstumpf (A) oder Kegel (D) gegen den Widerstand einer Feder, Skala reicht von 0 bis 100, Shorehärte mit Einheit 1.

9.2 Monomere Stoffe und Entstehung der Polymere

Für das Verständnis der Polymere ist ein kleiner Abschnitt Chemie hilfreich. Er beschränkt sich auf das Notwendige.

Die **Struktur** der Makromoleküle ist wichtiger für das Verständnis der Eigenschaften als die chemischen Vorgänge zu ihrer **Entstehung**.

9.2.1 Kohlenstoffatome

Bild 9.4 zeigt den einfachsten Kohlenwasserstoff, das Methan. Die vier Valenzelektronen des C-Atoms gehen mit den H-Atomen Elektronenpaarbindungen ein. Wegen der größeren EN-Zahl der C-Atome werden die Elektronenpaare von ihm stärker angezogen, so dass die H-Atome eine positive Teilladung erhalten. Sie stoßen sich gegenseitig ab und stellen, auf der „Kugeloberfläche“ des C-Atoms gebunden, einen größten Abstand zu sich her.

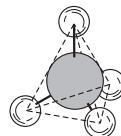


Bild 9.4 Methan, CH_4 Stäbchenmodell

Modellvorstellung: Die vier Elektronenpaarbindungen des C-Atoms wirken in die Ecken eines umschriebenen Tetraeders, wo die H-Atome liegen. Der Winkel zwischen den Bindungsarmen beträgt 109° (Tetraederwinkel).

9.2.2 Kettenförmige Kohlenwasserstoffe (Aliphaten oder aliphatische KW)

C-Atome können sich untereinander binden. Z. B. kann im Methan anstelle eines H-Atoms ein weiteres C-Atom gebunden werden, das seine restlichen Bindungen mit H-Atomen absättigt. Dadurch entsteht das Gas Ethan (Äthan), C_2H_6 , wie Methan ein Brenngas (Bild 9.5).

Auf ähnliche Weise ergeben sich weitere Verbindungen mit steigender Kettenlänge. Sie bilden eine Reihe gleichartig gebauter Stoffe, die gesättigten KW (Alkane, sie haben die allgemeine Formel $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{-CH}_3$ oder $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$).

Gesättigt heißt, alle vier Wertigkeiten sind durch andere Atome besetzt, d.h. es gibt keine Doppel- oder Dreifachbindungen zwischen C-Atomen.

Mit steigender Moleküllänge steigen auch die Berührungsflächen zwischen ihnen, damit die zwischenmolekularen Bindungskräfte. Die Materie wird dichter, so entsteht das (Polyäthylen) (Tabelle 9.5).

Die ersten Stoffe sind Gase, das Pentan C_5H_{12} ist bei RT flüssig, ab Hexadecan sind es bei RT feste Stoffe und bei noch längeren Ketten entstehen wachsartige (Paraffin) Stoffe mit steigender Härte.

Mit wachsender Kettenlänge steigen Dichte, Schmelztemperatur und Festigkeit

Beispiel: Methanreihe, Alkane ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$)

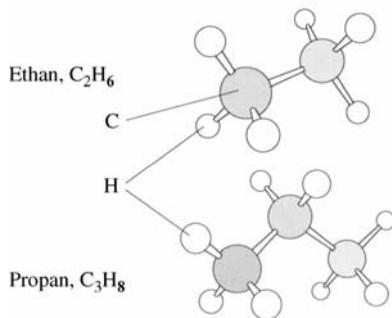


Bild 9.5 Zwei auf das Methan folgende Verbindungen der Methanreihe

Tabelle 9.5: Alkane mit steigender Dichte

Alkane $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$	Formel	Schmelz- pkt. °C	Dichte ρ g/dm^3
Propan	C_3H_8	-190	2
Oktan	C_8H_{18}	-56	702
Hexadekan	$\text{C}_{16}\text{H}_{34}$	+18	775
Eikosan	$\text{C}_{20}\text{H}_{42}$	38	778
Polyethylen	$[\text{C}_2\text{H}_4]_n^{1)}$	200	920

¹⁾ Polymerisationsgrad n : $500 < n < 3000$

Die kettenförmigen KW gaben die Bauanleitung für die Herstellung von Kunststoffen. Zu ihrer Herstellung müssen geeignete Einzelmoleküle von C-Verbindungen veranlasst werden, sich zu Makromolekülen zu binden. Bild 9.6 zeigt ein natürliches Polymer, die Cellulose, das z.B. zu Celluloid (Cellulosenitrat, brennbar) und zahlreichen anderen thermoplastischen Sorten verarbeitet wird.

Isomerie. Mit steigender Kettenlänge wachsen die Möglichkeiten, dass neben linearen Ketten auch verzweigte existieren. Diese Erscheinung wird Isomerie genannt.

Isomere Verbindungen haben bei gleicher Summenformel verschiedene Strukturformeln

Isomere Verbindungen unterscheiden sich geringfügig in den chemischen und physikalischen Eigenschaften, z.B. den Siedepunkten. Verzweigte Moleküle sind sperrig gebaut. Diese Stoffe sind weniger dicht gepackt und ergeben Polymere mit kleinerer Dichte als die linear aufgebauten (Bild 9.7).

9.2.3 Ringförmige Kohlenwasserstoffe (Aromaten)

Sechs C-Atome bilden einen kompakten Ring mit je drei Doppelbindungen, so dass jedes C-Atom nur einen freien Bindungsarm besitzt, an dem je ein H-Atom gebunden ist (Bild 9.8).

H-Atome können durch Halogene, OH- und andere CH-Gruppen ersetzt werden. Das ergibt die zahlreichen Benzolabkömmlinge (Derivate).

Polymere, deren Kettenglieder teilweise oder ganz aus Benzolringen bestehen, sind mechanisch steifer und bei höheren Temperaturen einsetzbar.

Neuere Polymere, die z.B. für den Einsatz im Motorraum geeignet sind, wie

- **Polyphenylenoxid PPO,**
- **Polyphenylensulfid PPS, Polyimide PI**

besitzen solche Benzolringe im Monomermolekül (Strukturformeln → Abschnitt 9.7).

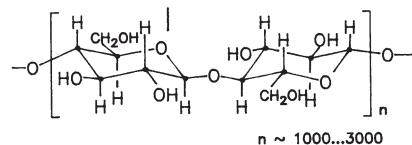


Bild 9.6 Baustein eines Cellulosemoleküls

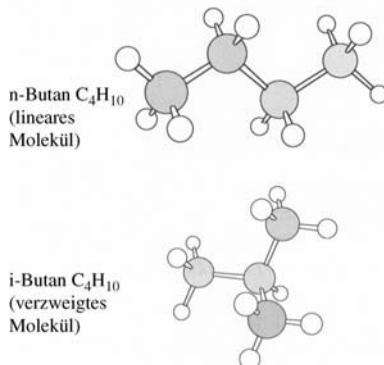


Bild 9.7 Lineare und verzweigte Ketten des Butans

Im Benzolring ist der Abstand der C-Atome kleiner als in den Kettenmolekülen. Sie haben damit eine größere Bindungsenergie. Damit steigt die Beständigkeit in der Wärme (→ Beispiel unten).

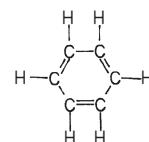
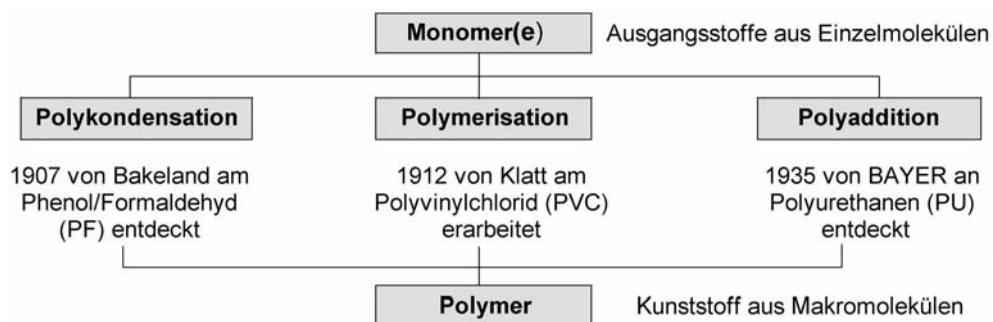


Bild 9.8 Strukturformel Benzol, C₆H₆

Beispiel: Klopffestigkeit des Benzols: Vergaserkraftstoffe dürfen sich im Brennraum unter Druck und Temperatur nicht selbst entzünden (klopfende Verbrennung). Richtwert ist das Iso-Oktan, C₈H₁₈ (2,2,4-Trimethylpentan) mit einer Oktanzahl 100. Benzol hat 115.

9.2.4 Herstellung synthetischer Makromoleküle, Übersicht



9.2.5 Polykondensation

Die beiden nebenstehenden Stoffe reagieren miteinander, wie das Bild 9.9 zeigt. Dabei setzt sich das C-Atom mit seinen beiden H-Atomen unter Abspaltung des O-Atoms als Bindeglied zwischen zwei Benzolringen. Das O-Atom bindet die H-Atome an den beiden Benzolringen zum Kondensat, hier H_2O .

Die Reaktion wird in Stufen durchgeführt. Der Kunststoffhersteller erzeugt ein noch schmelzbares Zwischenprodukt, das mit Zusatzstoffen gemischt als genormte Formmasse in den Handel kommt.

Die Formmassen werden bei den Kunststoffverarbeitern in Formen unter Druck und Temperatur gepresst und vernetzen zum duroplastischen Formteil.

Phenolharze werden meist mit Füll- oder Verstärkungsstoffen verarbeitet.

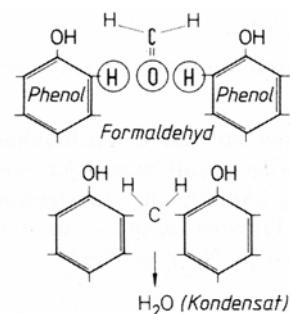
Monomere mit reaktionsfähigen Stellen verknüpfen sich zu Makromolekülen, dabei wird meist ein niedermolekulares **Nebenprodukt** (Kondensat, z.B. Wasser) abgespalten.

Es **muss** abgeführt werden, damit die Gleichgewichtsreaktion weiterläuft.

Monomere mit zwei reaktionsfähigen Stellen bilden Ketten- oder Fadenmoleküle, bei mehreren Stellen verzweigte und räumlich vernetzte Makromoleküle (Raumnetzmoleküle).

Monomere Ausgangsstoffe sind:

Phenol $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	(Karbolsäure) ist eine wasserlösliche Flüssigkeit, als Desinfektionsmittel verwendet
Methanal $\text{H}_2\text{C} = \text{O}$	(Formaldehyd, Formalin), wasserlösliches Gas, Desinfektionsmittel, durch die Doppelbindung reaktionsfähig



a)



b)

Bild 9.9 Polykondensation von Phenol mit Formaldehyd, a) Reaktion, b) Raumnetzmolekül

9.2.6 Polymerisation

Die Monomere müssen eine (oder mehr) Doppelbindungen im Molekül besitzen. Eine Gruppe dieser Stoffe sind die Alkene (→).

Alkene, auch Olefine genannt, bilden wie die Alkane eine Reihe gleichartig gebauter KW mit der allgemeinen Formel C_nH_{2n} und jeweils einer Doppelbindung im Molekül.

Andere Monomere mit Doppelbindung sind:

Formaldehyd wird zu Polyoximethylen (POM), Styrol wird zu Polystyrol (PS) (→)
Zweifach-Doppelbindung haben die „Diene“.

Polymerisation des Ethylen (Bild 9.10).

Von den Doppelbindungen ist die eine weniger energiereich, d.h. schwächer (sog. π -Bindung). Unter bestimmten Reaktionsbedingungen (Druck, Temperatur, Katalysatoren) wird sie „aufgeklappt“, und so entstehen Teilchen mit freien „Bindungsarmen“. Diese aktivierte Moleküle (→) lagern sich zu Makromolekülen aneinander. Dadurch wird aus dem Gas Ethen das feste thermoplastische Polymer Polyethen (Beispiel).

Zusammenfassung

Polymerisationsreaktion:

Monomere mit Doppelbindung verknüpfen sich nach Aufklappen der einen Doppelbindung (Aktivierung) zu Makromolekülen. Die Polymerisation ist eine exotherme Reaktion ohne Nebenprodukt.

Die Wärmeentwicklung bei der Polymerisation stört das Wachstum der Ketten, so dass Moleküle unterschiedlicher Länge entstehen. So kann nur eine mittlere Länge mithilfe des Polymerisationsgrades n angegeben werden (→).

Zur besseren Wärmeableitung wird die Reaktion in Lösungen oder Suspensionen verlegt. Neue Katalysatoren (→) wirken in kleineren Mengen schneller und erzeugen mit weniger Nebenprodukten sehr einheitliche gebaute Polymermoleküle mit enger Längenverteilung.

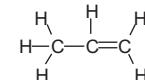
Beispiele:

Alkene (C_nH_{2n})

Ethylen,
(Äthylen), C_2H_4



Propylen, C_3H_6



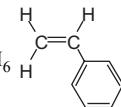
Butylen, C_4H_8



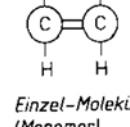
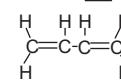
Formaldehyd, $HCHO$



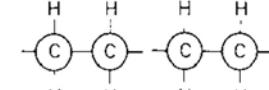
Styrol, $CH_2=CHC_6H_5$



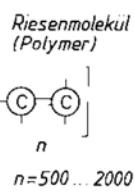
Butadien, C_4H_6



Einzel-Moleköl
(Monomer)



„aktivierte“ Moleküle



$n = 500 \dots 2000$

Bild 9.10 Polymerisation von Ethylen

Copolymerisation erzeugt Makromoleküle, die aus zwei oder drei monomeren Teilen bestehen. Dadurch werden unzureichende Eigenschaften des Homopolymers verbessert.

Beispiel: Styrol ist spröde, schlagzähe Styrol-Co-Polymeren sind u.a.

- SA, Styrol-Acrylnitril, zäh
- ABS, Acrylnitril-Butadien-Styrol, hochzäh.

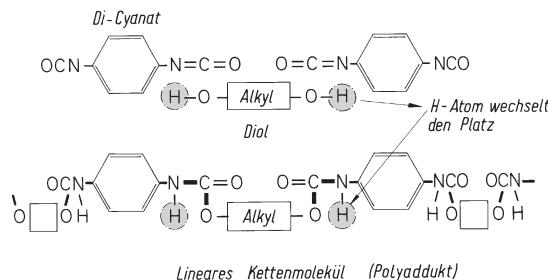
Polymerisationsgrad n : Größe des Polymermoleküls, $1000 < n < 10\ 000$, das entspricht einer Molekülmasse von $28\ 000 \dots 280\ 000$.

Katalysatoren steuern die Anordnung der Teile bei Co-Polymeren (z.B. abwechselnd oder in Blöcken), sie können auch die Gestalt der Makromoleküle beeinflussen, z.B. lineare, verzweigte, isotaktische oder leiterförmige Moleküle (→ Abschnitt 7.3.3).

9.2.7 Polyaddition

Die Verkettung erfolgt wie im Beispiel durch einen Platzwechsel von H-Atomen (Bild 9.11, gerasterte Kreise). Dabei klappt die eine ($C = N$)-Doppelbindung zum O-Atom des Alkohols um.

Damit es zur Kettenbildung kommt, müssen es mindestens Di-Verbindungen sein, also mit je zwei reaktionsfähigen Gruppen an jedem KW-Rest.



Wenn einer der monomeren Stoffe drei reaktionsfähige Gruppen besitzt (Tri-Verbindungen) entstehen vernetzte Makromoleküle. Mithilfe unterschiedlicher Mischungsverhältnisse der Monomere lassen sich Polyaddukte von weich-elastisch (Schaumstoffe) bis hin zu zähhart herstellen. Außerdem Zweikomponentenkleber und Lacke hoher Wärmebeständigkeit.

Zusammenfassung: Polyadditionsreaktion

Die Moleküle von zwei Monomeren mit je zwei reaktionsfähigen Gruppen verknüpfen sich durch Platzwechsel von H-Atomen zu Makromolekülen. Dabei wird kein Nebenprodukt abgespalten.

Beispiel: Polyaddition von Di-Cyanaten mit Di-Alkoholen

Di-Cyanate sind Verbindungen von zwei CNO-Gruppen mit KW-Resten (Alkylen) oder Benzolringen.

Diole sind Alkohole mit zwei OH-Gruppen an einem KW-Rest, z.B. Ethandiol (Glykol), $C_2H_4(OH)_2$

Bild 9.11 Polyaddition

Bei den reagierenden Gruppen sind die Bindungsstriche hervorgehoben

Beispiele:

PUR-W, Weichschaum für Sitze und Schalldämmung,

PUR-H, Hartschaum für Wärmeisolation,

PUR-M massiv, Granulat für Formteile
Reaktionsschaumguss (RIM).

Tabelle 9.6: Polyaddukte, Beispiele mit Handelsnamen (geschützt)

Name, Kurzzeichen DIN EN ISO 1043	Handelsnamen
Thermoplaste	
Polyurethan PUR linear	Durethan U
Duroplaste	
Polyurethan, PUR vernetzt Epoxidharze EP	Vulkollan, Moltopren Polyether-Schaumstoff Araldit, Duroxin, Epikote, Epoxin, Lekutherm

9.2.8 Systematische Benennung der Polymere

Die chemischen Namen der Polymere sind lang und unbequem, deshalb sind Kurzzeichen genormt (Tabelle 9.7).

Eine umfangreichere Aufstellung ist im Anhang unter A.4 zu finden.

Tabelle 9.7: Kurzzeichen für Kunststoffe und Verfahren (Auswahl) DIN EN ISO 1043/02

Der Buchstabe P steht in der Regel vor Homopolymeren, kann aber auch bei Co-Polymeren stehen, um Verwechslungen zu vermeiden. Homopolymere können aus den gleichen Gründen mit Schrägstrich getrennt werden.

Symbol	Polymer	Symbol	Polymer
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol	PP	Polypropylen
EP	Epoxid	-E	– expandierbar, statt EPP
FF	Furan-Formaldehyd Harz	-HI	– hoch schlagzäh, statt HIPP
LCP	Liquid Crystals Polymers	PS	Polystyrol
MF	Melaminformaldehyd	PTFE	Polytetrafluorethylen
MP	Melamin-Phenolformaldehyd	PUR	Polyurethan
PA	Polyamide	PVC	Polyvinylchlorid
PAN	Polyacrylnitril	-C	– chloriert, statt CPVC
PAR	Polyarylat	-U	– weichmacherfrei, statt UPVC
PB	Polybuten	PVF	Polyvinylfluorid
PBT(P)	Polybutylenterephthalat	SAN	Styrol-Acrylnitril
PC	Polycarbonat	SB	Styrol-Butadien
PCTFE	Polychlortrifluorethylen	SI	Silicon
PE	Polyethylen	TPU	thermoplastische Polyurethane
– C	– chloriert, statt CPE	UF	Urea- (Harnstoff)-Formaldehyd Harz
– HD	– hohe Dichte, statt HDPE	UP	Ungesättigtes Polyester Harz
– LD	– niedrige Dichte, statt LDPE	—	
– LLD	– linear, niedrige Dichte, statt (LLDPE)	RIM	Reaction Injection Moulding (RSG)
PET	Polyethylenterephthalat	RSG	Reaktionsharz-Spritzguß (RIM)
PF	Phenol-Formaldehyd	BMC	Bulk Moulding Compound (Formmasse)
PMMA	Polymethylmethacrylat	GMT	Glasmatteverstärkte Thermoplaste
POM	Polyoxymethylen, Polyformaldehyd	SMC	Sheet Moulding Compound (Duroplast)

Kurzzeichen für Polymergemische (blends) werden aus den Komponenten mit Pluszeichen gebildet, das ganze in Klammern. Beispiel: (ABS + PC).

Tabelle 9.8: Zusatzzeichen für besondere Eigenschaften der Polymere (mit Bindestrich angehängt)

Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
– C	chloriert	– H	hoch	– E	verschäumt, verschäubar
– D	Dichte	– M	mittel, molekular	– I	schlagzäh
– F	Flexibel, fluoriert	– R	erhöht, Resol	– N	normal, Novolack
– L	Linear, niedrig	– S	duroplastisch	– U	ultra, weichmacherfrei, ungesättigt
– P	weichmacherhaltig	– W	Gewicht	– X	vernetzt, vernetzbar
– V	very = sehr				

Symbole werden auch kombiniert angewandt, Beispiele: – HI = hoch schlagzäh, – LL = linear, niedrig

9.3 Strukturen der Makromoleküle

Die Eigenschaftsunterschiede zwischen den Polymeren, z.B. ihre Dichte, mechanische Eigenschaften oder das Verhalten bei Erwärmung lassen sich mit der Struktur der Ketten erklären.

9.3.1 Bindungskräfte

Primärbindungen (auch Hauptvalenzbindungen) sind die Elektronenpaarbindungen zwischen den C-Atomen unter sich oder mit den O-, N- oder S-Atomen der verschiedenen Typen.

Wegen der tetraedrischen Anordnung der sog. Bindungsarme beim C-Atom (Bild 9.3) haben die Kettenmoleküle keine gestreckte Gestalt. Ihr wahrscheinlichster Zustand ist der eines Fadenmoleküls (Knäuelmoleküls).

Sekundärbindungen (auch Nebenvalenzkräfte) sind die Kräfte und Energien zwischen den Fadenmolekülen. Sie sind schwächer und stark abhängig vom Abstand:

- kleiner Abstand bei gestreckten Molekülen,
- großer Abstand bei verzweigten Molekülen, oder solchen mit sperrigen Seitenketten.

Die Größe der Kräfte bestimmt die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Polymers.

9.3.2 Einfluss der Molekülmasse (Kettenlänge)

Mit steigender Länge der Ketten erhöhen sich die Verschlaufungen und Berührungsflächen zwischen den Makromolekülen. Die Folgen sind:

Sekundärbindungen nehmen zu	Zugfestigkeit und chemische Beständigkeit steigen
Verschlaufungen nehmen zu	Zähigkeit bei RT steigt, Fließverhalten der Schmelze wird schlechter

Wenn die Sekundärbindungen stärker als die Primärbindungen werden, liegt die Bruchstelle zwischen den Kettengliedern selbst und die Zugfestigkeit nimmt trotz steigender Moleküllänge nicht mehr zu (Bild 9.12).

Struktur umfasst hier die Bindungskräfte, den Aufbau der Ketten aus gleichen oder zwei oder drei verschiedenen Monomer-Gliedern, und die Anordnung der Atome oder Gruppen, welche die H-Atome ersetzt (substituiert) haben und ihre räumliche Anordnung.

Primärbindungen in den Ketten sind als federnde Kugelgelenke vorstellbar, so dass die Glieder, abhängig von ihrer Bauart, etwas gegeneinander schwenk- und drehbar sind, wichtig für die Zähigkeit des Werkstoffes.

Analogie: Knäuelmoleküle ähneln einem Wollfaden, aus einem gestrickten Teil heraus gezogen.

Sekundärbindungen oder zwischenmolekulare Kräfte beruhen hauptsächlich auf der

- Anziehung von polaren Seitengruppen (Dipolwirkung bei unterschiedlichen Elektronegativitäten z.B. C- und N-Atome),
- Anziehung von H- und O-Atomen der Seitengruppen benachbarter Ketten (Wasserstoffbrücken).

Molekülmasse ist ein statistischer Mittelwert.

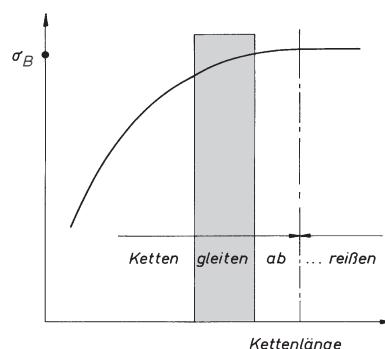


Bild 9.12 Einfluss der Kettenlänge auf die Zugfestigkeit des Polymers

9.3.3 Gestalt der Makromoleküle

Gestreckte Ketten entstehen z.B. beim Urformen durch Spritzgießen. Dabei ändert sich der Tetraederwinkel der Primärbindungen unter Energiezufuhr (Vergleich mit gespannter Feder).

Regelmäßigkeit der Kettenglieder erhöht die Dichte, stärkt damit die Sekundärbindungen und gibt die Fähigkeit zum Kristallisieren.

Sterische (räumliche) Ordnung bezeichnet die Anordnung der an das C-Gerüst angehängten Gruppen (Substituenten R, im Beispiel das Cl →).

Im Kettenmoleküle sind verschiedene Ordnungen möglich, durch Katalysatoren wird die regelmäßige Kopf-Schwanz-Ordnung bevorzugt eingestellt. Sie ermöglicht eine dichtere Packung.

Sterische Behinderung ist die Versteifung durch sperrigen Molekülbau mit Auswirkungen auf die Beweglichkeit der Ketten und damit auf die Steifigkeit (E-Modul) und Kaltzähigkeit des Polymers. Beispiel dafür ist das Polystyrol PS mit einem Benzolring in der Seitengruppe im Vergleich mit dem „schlanken“ Polyethylen PE.

Lineare und verzweigte Ketten.

Lineare Ketten sind dichter gepackt und haben höhere Dichte, damit steigt die Festigkeit, die lineare Längenausdehnung sinkt (↓).

Beispiel: Polyethylen PE (nach Saechting)

	Bedeutung	Verzweigungen auf je 1000 Kettenglieder	Dichte ρ in g/cm ³	Längenausdehnung α in 10 ⁻⁵ /K	Streckspannung σ_s in MPa
PE-LD	Low density	8...40 lange, sich verzweigende Stellen	0,91...0,92	23...25	8...10
PE-HD	High density	5 kurze Verzweigungsstellen	0,94...0,96	14...18	18...30

Die Beweglichkeit der Ketten wirkt sich auf das Fließverhalten bei der Formgebung in der Wärme und die Zähigkeit im Bauteil aus. Sperrige Formen des Monomer-Moleküls behindern das Verschieben der Ketten.

Beispiel: Beim Spritzen von Kunststoffen unter Druck in eine Form werden die Fadenmoleküle gestreckt und frieren beim Erkalten in dieser Stellung ein. Beim Wiedererwärmen streben die Fäden zurück zu ihrer Knäuelform mit evtl. Verzug des Teiles.

Anwendung z.B. bei Schrumpffolien.

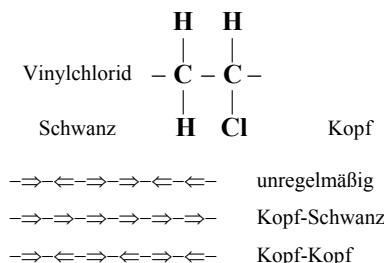


Bild 9.13 Räumliche Ordnung der Ketten

Beispiel: Vergleich PE mit PS

Polymer	Monomer	E in MPa	$\vartheta_{\min}^{(1)}$
Polyethylen PE		200...1400	- 50 °C
Polystyrol PS		3100...3500	- 10 °C

⁽¹⁾ min. Gebrauchstemperatur

Hinweis: Hier kommt noch die Festigkeitssteigerung durch die Teilkristallisation hinzu. Lineare Ketten haben einen höheren Anteil kristalliner Bereiche (→ 9.4.2).

Taktizität beschreibt Anordnung der Seitenketten am Hauptstrang der C-Atome (Bild 9.14).

ataktisch unregelmäßig angeordnet,

isotaktisch einseitig,

syndiotaktisch abwechselnd auf beiden Seiten angeordnet.

Die Regelmäßigkeit im Bau der Ketten begünstigt eine Kristallisation (folgender Abschnitt). So sind die Unterschiede zwischen ataktischen und isotaktischen Polymeren sehr groß.

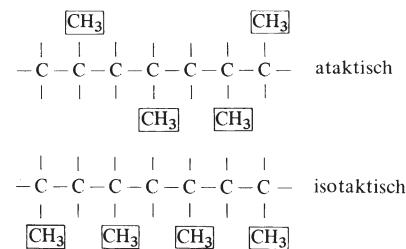


Bild 9.14 Ataktische und isotaktische Moleküle

Vergleich: Polypropylen PP

Sorte	Zustand	Dichte in g/cm ³	Zugfestigkeit σ_M in MPa	E-Modul E in MPa	Bruchdehnung A in %	Anwendungsbeispiel
ataktisches PP -a	amorph	0,855	2	5	2000	Dachabdeckung
isotaktisches PP-i	teilkristallin	0,903	20	1000	300	Pkw-Stoßfänger

Neben dem Polypropylen PP gibt es isotaktische Sorten bei anderen Polymeren (→).

Copolymere sind Ketten aus zwei oder mehr Monomer-Bausteinen (Bild 9.15).

Blockpolymere bestehen aus Polymerabschnitten (Blöcken), die sich abwechseln.

Propfpolymer entstehen durch Anlagerung eines Polymer B an die Seitenketten des Polymer A.

Die gemeinsame Polymerisation hat das Ziel, ungünstige Eigenschaften eines Homopolymers zu kompensieren. Einfluss haben:

- Anteil der einzelnen Monomere (in %),
- Anordnung der Bausteine in der Kette
- Verträglichkeit der Monomere (Mischbarkeit)

Copolymere sind für die meisten Kunststoffe als Blockpolymere entwickelt worden, ihre Zahl ist sehr groß.

Beispiel ist das Polystyrol PS (→), zu dem zahlreiche Copolymere entwickelt wurden, um die geringe Zähigkeit des Homopolymers zu verbessern. Schlagzäh modifiziertes PS enthält Butadien oder/und Acrylnitril. Beide sind auch Basis hochelastischer Gummi-Werkstoffe. Diese Eigenschaft überträgt sich auf das Copolymer.

Beispiele für isotaktische Sorten:

Polybuten PB und Polymethylpenten PMP, Polystyrol PS, Polymethylmethacrylat PMMA

Bi-Copolymere aus zwei, Ter-Copolymere aus drei Monomerarten, usw.

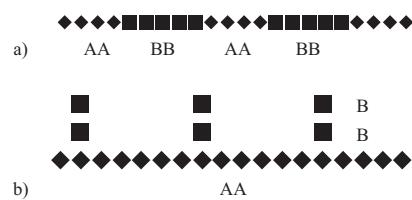


Bild 9.15 Anordnungen in Copolymeren

a) Blockpolymer, b) Propfpolymer

Beispiel: Styrol und Copolymere

Sorte	Kerbschlagzähigkeit kJ/m ²
PS	spröde 2
SB, Styrol-Butadien	zäh, auch in der Kälte 4...14
ABS, Acrylnitril-Butadien-Styrol	zäh, elastisch 8...25

9.3.4 Kristallisation

Kristalline Polymere besitzen Bereiche mit sehr dicht und parallel liegenden Ketten, die von unregelmäßigen (amorphen) verknüelten Molekülen umgeben sind (Bild 9.16). Kristallisation wird durch folgende Bedingungen begünstigt:

- lineare oder ataktische Ketten mit wenig Verzweigungen,
- langsame Abkühlung bei höherer Formtemperatur, damit ausreichende Zeit für das Ausrichten der Moleküle besteht. Es ist auch eine Wärmebehandlung unterhalb der Schmelztemperatur T_m möglich.
- Verformung unter Zug bei der Abkühlung streckt die Ketten, ergibt eine dichtere Lage und erleichtert die Kristallisation.

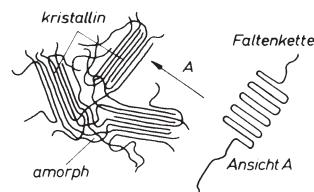


Bild 9.16: Teilkristalliner Kunststoff, schematisch. Die kristallinen Bereiche bestehen aus parallel liegenden Faltenketten (Ansicht A)

Kristallisation bewirkt im Polymer:

Zunahme von:	Abnahme von:
Schmelztemperatur, Zugfestigkeit, Härte und E-Modul Beständigkeit gegen Lösungsmittel	Dämpfung, Schlagzähigkeit, Bruchdehnung, Wärmeausdehnung, Gas- und Wasserdurchlässigkeit. Der Schmelzbereich wird verkleinert (Kristallitschmelzpunkte).

Beispiel: Vergleich von Polyethylen mit verschiedenem Kristallisationsgrad (nach Saechting)

Sorte	Kristallit-Anteil %	Dichte ρ in g/cm ³	E-Modul, Strecksp. σ_y in MPa	Temperaturen in °C für Schmelzen	Temperaturen in °C für Gebrauch	Lin. Längenausdehnung α in 1/K
PE-LD	40	0,925	140	8...10	105...118	70
PE-HD	80	0,96	1000	18...30	126...135	90

Orientierung durch mechanische Streckung

Bei der Herstellung von Fasern, Fäden und Folien werden die Kettenmoleküle in Längs- (oder in Längs- und Querrichtung) gereckt und orientiert. Dieser Zustand entspricht einer Teilkristallisation, wobei die kristallinen Bereiche zusätzlich noch gleichgerichtet sind. Festigkeit und Dehnung sind z.T. stark erhöht (→ Beispiel). Es tritt starke Anisotropie auf (Beispiel, monoaxial gereckt).

Ausnutzung der Festigkeitssteigerung auch beim Streck-Blasformen von schlauchförmigen Rohlingen in Formen mit Druckluft zu Kfz-Tanks und anderen Behältern.

Beispiel: gereckte Folien aus Polypropylen PP (nach Saechting)

Art der Reckung	Bruchfestigkeit längs/quer MPa	Bruchdehnung längs/quer %
ungereckt	50/40	430/540
monoaxial	250/40	10/700
biaxial	250/200	80/80

Damit lässt sich die hohe Festigkeit von Synthesefasern und die Reiß- und Durchstoßfestigkeit von dünnen Verpackungsfolien erklären.

Auch amorphe Polymere wie Polystyrol PS unterliegen ebenfalls dieser Erscheinung.

Eigenverstärkung

Sehr lange, lineare Kettenmoleküle können unter bestimmten Fließbedingungen kristallisieren, so dass sie *shish-kebab* oder Schaschlik-Strukturen ergeben (Bild 9.17). Bei Gleichrichtung solcher Moleküle legen sich Scheiben und Mulden ineinander. Die räumliche Behinderung ergibt hohe Festigkeiten mit starker Anisotropie und erfordert beim Urformen höhere Arbeitsdrücke und -temperaturen.

Anwendung bei PE-HD- und PE-UHMW-Fasern und Profilen sowie LC-Polymeren für Verbundwerkstoffe.

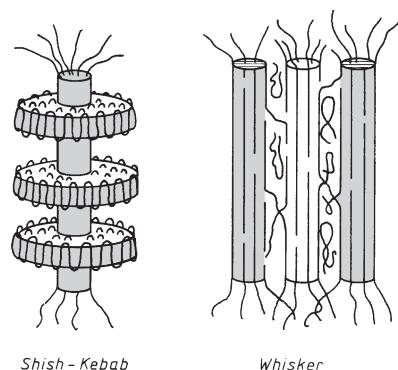


Bild 9.17 Shish-Kebab-Struktur aus Whiskern und Scheiben von Faltenketten (nach Menges)

9.4 Gefügeveränderungen bei Polymeren

9.4.1 Polymergegemische, Polyblends

Während bei der Co-Polymerisation die Ketten gemischt aufgebaut sind, bestehen Blends aus meist unterschiedlichen Kettenmolekülen. Ihre Herstellung ist einfacher und in kleineren Chargen wirtschaftlich.

Es lassen sich Thermoplaste und Elaste untereinander, aber auch gegenseitig mischen.

Das Gefüge ist meist heterogen, wenn sich die unverträglichen Komponenten nicht mischen. Durch Zusatzstoffe (sog. Kompatibilizer) wird an den Grenzflächen die Adhäsion sichergestellt. Die Komponenten behalten ihre spezifischen Eigenschaften und geben sie, vom Mischungsverhältnis abhängig, an das Polyblend weiter.

Beabsichtigte Eigenschaftänderungen sind z.B.:

- Erhöhung der Zähigkeit, auch in der Kälte durch Mischung mit elastischen Polymeren
- Verbesserung der Fließfähigkeit bei der Verarbeitung durch Beimischung niedriger schmelzender Sorten.

Daneben sind auch die Steigerung der Formbeständigkeit in der Wärme (Wärmestandfestigkeit), Galvanisierbarkeit, Lackierbarkeit, Steuerung der Gasdurchlässigkeit u.a. möglich.

Bedeutung der Blend-Technik lag bei den thermoplastischen Elastomeren (TPE) und hat sich auf alle Polymere ausgeweitet. Das werkstoffliche Recycling von Polymeren führt bei nicht sortenreiner Trennung automatisch zu Polymergegemischen, die als Recyclat in kleinen Anteilen dann verwendbar gemacht werden müssen.

Die Basiskomponente enthält die andere in verschiedenen Formen, z.B. netzartig durchdrungen, rundlich, lamellar oder in länglichen Bereichen (sog. Domänen).

Zwischen den Komponenten können auch Reaktionen stattfinden, wie z.B. das Aufpropfen der Komponente auf Seitenketten der Basis (Propf-Copolymerisation).

Beispiele für Polymer Blends:

(PC+ABS) mit erhöhter Kaltzähigkeit, die Wärmestandfestigkeit ist geringer als bei PC.

(PC+LCP) mit höherer Fließfähigkeit, erlaubt kleinere Wanddicken (LCP, liquid-krist. Polym.).

(PC+PET oder PC+PBT) mit erhöhter Kraftstoffbeständigkeit, die Wärmestandfestigkeit des PC bleibt erhalten.

(PMMA+ABS) mit erhöhter Schlagzähigkeit, geeignet für metallisierbare Gehäuse für die Kfz.- und E-Technik.

9.4.2 Zusatzstoffe und Einfluss auf die Eigenschaften

In den Formmassen der Polymere sind Zusatzstoffe eingearbeitet. Sie sollen bestimmte Eigenschaften des Polymers im Formteil erbringen (\rightarrow) oder die Formgebung erleichtern. Die Einteilung der Zusätze geschieht nach ihrer Wirkung:

Eine Behandlung der Füllstoffe mit Silanen (Dynasilan®, Degussa) erzeugt Brücken zwischen Füllstoffpartikeln und Polymer. Dadurch werden:

- die Biegefestigkeit erhöht, die
- Wasseraufnahme verringert und die
- elektrische Isoliereigenschaften verbessert.

Tabelle 9.9: Zusätze in Kunststoffen, Übersicht

Wirkung	Zusatzstoff	Eigenschafts- oder Verhaltensänderung
biologisch	Nano-Silber-Teilchen	Abtöten von Mikroben
chemisch	Stabilisatoren, Katalysatoren	Lichtbeständigkeit (Ruß), Wärmebeständigkeit, nachträgliche Vernetzung von Fadenmolekülen
färbend	Schwermetallverbindungen überwiegend Pigmente	Durchgehende Färbung der Teile; weiß: Ti-Oxid schwarz: Fe_3O_4 ; Metalleffekt: Al-, Cu-Pulver
verarbeitungs-fördernd	Gleitmittel (Wachse), Glas-kugeln, Formtrennmittel	Verminderung der Reibung, Kugeln $< 50 \mu\text{m}$ verbessern das Fließverhalten der Schmelze. Leichteres Entformen der Teile
treibend	Gase abspaltende Stoffe ($\text{N}_2, \text{CO}_2, \text{NH}_3$)	Schaumstoffe, Bauteile mit Strukturschaum (dichte Oberfläche mit zelligem Kern)
streckend	Holz- oder Gesteinsmehl, Kreide, Talcum	Inaktiv, verbilligend, steigern auch Festigkeit und E-Modul
verstärkend	Fasern, Bahnen, Gewebe, Stränge aus Glas Textilien, Papier. Holz	Erhöhung des E-Moduls, der Wärmebeständigkeit, Zahigkeit, führt zu anisotropem Verhalten. Längenausdehnung in der Wärme sinkt

9.4.3 Faserverstärkung

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) waren die ersten Verbundwerkstoffe (\rightarrow Abschnitt 10.) und haben die breiteste Anwendung gefunden.

Naturfasern haben beim Rohstoff-Recycling den Vorteil, in gasförmige Produkte überzugehen, während Glasfasern als fester Rückstand verbleiben.

Für höchste Beanspruchungen werden C-Fasern oder Aramidfasern eingesetzt (Tabelle 9.10).

Hinweis: Faserverbundwerkstoffe 10.3.1

Beispiele für GFK: Bootskörper, Tanks, Campingmobile, Well- und Profilplatten, Deckschichten für Sandwichplatten, Fiberglasstäbe, für Stabhochsprung und Angelsport.

Naturfasern werden in Kleidungselementen im Automobil- und Wagonbau eingesetzt.

Beispiele für CFK: flächige Teile im Raumfahrt- und Flugzeugbau (Seitenleitwerk Airbus). Versteifung von biegebeanspruchten Al-Profilen durch aufgeklebte UD-Laminate (Roboterarme).

Tabelle 9.10: Verstärkungsfasern für Polymere

Faser	Dichte ρ in g/cm^3	E-Modul (Zug) in MPa	Zugfestigkeit R_m in MPa	Bruchdehnung A in %
Hanf, Leinen	1,3	12000...26000	250...400	1,8...3,3
E-Glas	2,54	73 000	3 400	3
C-Faser HT (Festigkeit hoch)	1,7	240 000	3 500	1,4
C-Faser HM (E-Modul hoch)	1,85	400 000	2 600	0,6
ARAMID AR HM	1,44	65000...90000	2800...3700	2,1

Zur besseren Haftung zwischen Faser und Polymer erhält die Faser eine Oberflächenbehandlung (Interface). Fasern machen die Werkstoffeigenschaften der Faserverbunde richtungsabhängig (anisotrop). Nach ihrer Anordnung wird unterschieden in (→):

Bei Thermoplasten sind Kurzglasfasern (0,2...0,5 mm Ø) in der Formmasse eingebettet. Um die Fließfähigkeit bei der Verarbeitung zu erhalten sind die Gehalte auf 20...40 Masse-% begrenzt.

Die erzielten Eigenschaftsänderungen sind beachtlich (→ Übersicht).

Ein Vergleich der spezifischen Werte mit Metallen zeigt die Bedeutung der faserverstärkten Kunststoffe als Leichtbauwerkstoffe, insbesondere der C-faserverstärkten mit der hohen spezifischen Steifigkeit (Tabelle 9.11).

Glasfaserverstärkung wird für Bauteile des Feinmaschinenbaues und der E-Technik bei den Sorten Polycarbonat PC, Polyamid PA6, Polypropylen PP, Polyoxymethylen POM und einigen neuen, weniger bekannten Sorten eingesetzt.

GMT sind mit **Glasmatten** verstärkte flächige Thermoplaste (z.B. PP), die nach Zuschnitt im beheizten Werkzeug umgeformt werden. Sie entsprechen den duroplastischen SMC-Produkten, sind aber unbegrenzt lagerfähig. Festigkeits- und Zähigkeitswerte liegen höher als bei den aus Formmassen hergestellten Teilen.

Faseranordnung in Faserverbunden

- **UD** (uni-direktional) bei Fasern in Strängen,
- **BD** (bi-) mit senkrecht aufeinander stehenden Fasern bei Geweben,
- **MD** (multi-) bei Matten aus Schnittglas in regelloser Lage.

Höchste Festigkeit wird bei Fasersträngen mit UD-Lage (Rovings) erreicht.

Duroplastische GFK bestehen aus UP- und EP-Gieß- und Laminierharzen. Sie härten drucklos oder bei Niederdruck und auch bei RT aus und sind für großflächige Bauteile wirtschaftlich. Höhere Festigkeiten bei niedrigeren Taktzeiten werden durch Warmaushärtung erzielt.

Übersicht: Einfluss der Faserverstärkung

Eigenschaft	Änderung
E-Modul und Zugfestigkeit	2...3 fach
Dehnung und Zähigkeit	sinken
Längenausdehnung	sinkt auf ca. 1/3
Kriechneigung	verringert
Wärmeformbeständigkeit	10...30 °C höher
Fließfähigkeit in der Form	verschlechtert

Hinweise: Weitere Daten zu faserverstärkten Thermoplasten

- Bild 9.19, Kurven PC-GF und PA6-GF,
- Tabellen in Abschnitt 9.6.4

Anwendungsbeispiele: Maßbeständige Teile (Temperaturschwankungen) im Schalt- und Messgerätebau, Isolatoren, Spulenkörper, Lüfterräder und -gehäuse, Magnetventile für Waschmaschinen. Gehäuse für Kleinmaschinen. Laufrollen, Lagerkäfige.

GMT für flächige Kfz.-Teile zur Geräuschausminderung, Sitzschalen, Stoßfänger, Verkleidungen.

Tabelle 9.11: Faserverstärkte Duroplaste, mechanische Eigenschaften im Vergleich

Polymer	Dichte g/cm ³	E-Modul MPa	Zugfestigkeit MPa	Biegefestsigkeit MPa	Spezifische Werte für E-Modul	¹⁾ Zugfestigkeit
UP-GF 45 ²⁾ (Matte)	1,45	9 000	140	180	628	9,84 km
UP-GF 65 (Gewebe)	1,8	19 000	300	350	1075	17 km
EP-GF 50 (Gewebe)	1,6	10 000	220	280	637	14 km
EP-CF 70 (Roving)	1,5	110 000	1300	1100	7475	88 km
AlMgCu1	2,8	72 000	520	520	2621	19 km
TiAl6V4	4,5	105 000	1150	-----	2378	26 km

¹⁾ Reißlänge in km → 10.3.2; ²⁾ angehängte Zahl ist der Fasergehalt in %.

9.5 Duroplaste

9.5.1 Allgemeines

Bei diesen Kunststoffen findet die Reaktion, die zu Makromolekülen führt, erst bei der Formgebung statt. Zur leichteren Verarbeitung werden die Stoffe (Kunstharz und Härter) mit Füllstoffen vermischt (→) als **Formmassen** geliefert. Durch Erwärmung werden sie plastifiziert und unter Druck in die beheizte Form gedrückt, wo sie vernetzen und nach einer Haltezeit das Formteil oder Halbzeug ergeben. Ausgehärtete Duroplaste haben (abhängig vom Gehalt an Zusätzen):

- vielseitige Eigenschaftskombinationen durch die Art der Füllstoffe bis zu 40...60 %,
- bis zu höheren Temperaturen kaum abfallende Festigkeit und Steifigkeit bei Dauergebrauchstemperaturen bis zu > 200 °C.
- Maßhaltigkeit der Teile, glänzende, härtere Oberfläche und geringe Schwindung,
- Eignung für elektrotechnische Teile (→).

Zusatzstoff	Wirkung
Schiefer-Quarzmehl, Glimmer, Kreide, Talkum	steigert Wärmebeständigkeit und Wasseraufnahme, senkt Isoliereigenschaften
Holzmehl	steigert Festigkeit u. Zähigkeit
Papier- Baumwolle	Fasern, Schnitzel, Bahnen senken Wärmebeständigkeit, steigern Zähigkeit
Glas als Kurz- und Langfaser, Kugel, Schuppen	steigert Festigkeit u. E-Modul, geringe Wasseraufnahme und Längenausdehnung, warmfester
Al-Hydroxid	Flammschutzmittel

Anforderungen für elektrotechnische Teile sind z.B. hoher elektrischer Durchgangswiderstand (abhängig von der Art der Füllstoffe, die evtl. Wasser aufnehmen können), Durchschlagfestigkeit in kV/mm für dünnwandige Bauteile (Folien) oder geringe Entflammbarkeit durch Lichtbögen.

9.5.2 Formmassetypen

Formmassen sind vorgefertigte, rieselfähige Pulver oder Granulate aus warmhärtbaren Harzen und Zusätzen in einem noch schmelzbaren Zustand. Sie dienen als Ausgangsstoffe für Formteile und Halbzeuge und besitzen nach Normen konstante Verarbeitungseigenschaften. Von jedem chemischen Typ gibt es verschiedene Anwendungsgruppen und Einstellungen mit Fließfähigkeiten (weich, mittel, hart), je nach dem Fließweg der Masse in der Form (Komplexität der Formteile) Tabelle 9.12.

Tabelle 9.12: Formmassen, auch PMC (Pelletized Moulding Compounds), Übersicht

Harzgrundlage, Norm	Beschreibung	Füllstoff
Phenolharz, PF Kresolharz PF DIN EN ISO 14526/00	23 Typen in 5 Gruppen geordnet, nur in dunklen Farben möglich, überwiegend für technische Teile verwendet	
	I allgemeine Verwendung, II erhöhte Kerbschlagzähigkeit III erhöhte Wärmeformbeständigkeit IV erhöhte elektrische Eigenschaften (geringe Wasseraufnahme) V sonstige zusätzliche Eigenschaften	Holzmehl Gewebe und Gewebeschnitzel, Stränge, Glasfasern anorganisch, Gesteinsmehl Zellstoff, Glimmer Kautschuk
Anwendungen	Wärmebeständige Griffe, Lager, Pumpenteile; Kollektoren, Stecker, Schichtpressstoffe als Platten und Profile, Stuhlsitze, Tischplatten, Brems- und Kupplungsbeläge. Mit Füllstoff: (mineralisch + Kurzglasfaser) kurzzeitig bis 600 °C belastbar.	

Tabelle 9.12: Fortsetzung

Harzgrundlage, Norm		Beschreibung, Anwendungsbeispiele
Harnstoffharz DIN 7708-3 /93	UF	16 Typen in 5 Gruppen geordnet wie PF-FM, hellfarbig, licht- und alterungsbeständig, geruchs- und geschmacksfrei.
Melaminharz DIN 7708-9	MF	UF: Elektroinstallationsmaterial, Sanitärgegenstände MF: Für Kontakt mit Lebensmitteln geeignet, kratz- und spülmittelfest für Haus- und Küchengeräte, Deko-Schichtpressstoffe. Bis zu 60 % Zellulose haltig.
Melamin-Phenol DIN 7708-10 / 93	MPF	MPF: Geringere mechanische und elektrische Eigenschaften, hat beim Pressen geringere Nachschwindung
Phenol-und Harnstoffharze werden als Bindemittel in Bremsbelägen, Schleifkörpern und Gießereiformsandten verwendet, ebenso in Holzfaser- und Spanplatten.		

PF, UF- und MF-Duroplaste entstehen in der Form unter Abgabe des Kondensats und benötigen höhere Arbeitsdrücke und Entlüftung in der Form.

Die folgenden **Reaktionsharzmassen** können ohne Abgabe von Nebenprodukten und bei niedrigeren Drücken vernetzen (Tabelle 9.13).

Dadurch sind diese Massen, mit Langfasern verstärkt, für großflächige Bauteile geeignet, die nach zahlreichen z.T. automatisierten Verfahren schichtweise aufgebaut (laminiert) werden (→).

Verarbeitungsdaten:

Spritztemperatur: 85...120 °C (in der Düse)

Spritzdruck: 600...2500 bar

Nachdruck: 600...1200 bar (Schwundausgleich)

Werkzeugtemperaturen: 150...190 °C

Wickelverfahren für Behälter und Hohlkörper,

Faser-Ablegeverfahren für flächige Teile mit gerichteten Eigenschaften.

Tabelle 9.13: Reaktionsharzmassen

Harzgrundlage, Norm		Beschreibung, Anwendungsbeispiele
Polyesterharze DIN EN ISO 14530 / 00	UP	Polyesterharze (ungesättigt) sind Kondensationsprodukte aus einer Reaktion von Säuren mit Alkoholen: Alkohol + Säure → Ester + Wasser. <i>Ungesättigte</i> Ester bedeutet, sie enthalten <i>reaktionsfähige</i> Doppelbindungen. Die Ester werden in Styrol gelöst, das ebenfalls eine Doppelbindung besitzt, dadurch ist eine Polymerisation möglich. 4 Typen mit Gesteinsmehl und Glasfasern gefüllt, Schwindung 6...8 % rein, gefüllt ca. 2,5 %.

Anwendungsbeispiele: Als Gießharz zum Einbetten von Teilen wie Spulen, mikroskopischen Präparaten, (Metallschliffe) Tränken von Wicklungen, für Modelle. Laminate für Autokarossen, Bootskörper, Container, Tanks, Well- und Profilplatten, Schalungen, Lehren, Kopierwerkzeuge.

Epoxidharze DIN EN ISO 15252 / 00	EP	Epoxidharze entstehen durch Polyaddition, sind teurer als UP-Harze und härten schwindungsfrei aus. Es sind mechanisch und elektrisch hochwertige Stoffe (geringere Wasseraufnahme als UP). Die Haftung auf Glas und Metall ist sehr hoch, dadurch hat EP-GF höhere Dauerfestigkeit als UP-GF. Die Beständigkeit gegen Säuren ist geringer als bei UP-Harzen.
---	-----------	--

Anwendungsbeispiele: Gieß- und Laminierharze, Prepregs. Bauteile wie bei UP mit höherer mechanischer und elektrischer Beanspruchung.

Härtbare Vorprodukte aus Duroplasten zur rationellen Herstellung größerer Stückzahlen mit Presswerkzeugen sind SMC und BMC (→).

Sie enthalten den Härter und sind nur begrenzt lagerfähig (z.B. bei -18°C ca. 12 Monate, bei RT ca. 7 Tage je nach Sorte).

9.5.3 Duroplastverarbeitung

Formteile aus Duroplasten werden durch Pressen oder Spritzgießen unter Druck und Temperatur hergestellt.

Pressen: Genau abgewogene Massen der Formstoffe (evtl. in Tablettenform) schmelzen in der beheizten Form bei Temperaturen von $135\ldots170^{\circ}\text{C}$ und füllen die Form unter Pressdrücken von $50\ldots600$ bar je nach Duroplastsorte und Gestalt des Formteiles.

Zum Aufheizen und Plastifizieren werden Zeiten von etwa 1 min, dazu eine Aushärtezeit von etwa $15\ldots60$ s/mm Wanddicke benötigt. Die Taktzeiten liegen zwischen 1...8 min.

Spritzpressen. Hier erfolgt das Erwärmen und die Plastifizierung der Formmasse in einem vorgeschalteten Spritzkanal und wird dann in die auf Aushärtetemperatur beheizte Form gedrückt. Die Taktzeiten sind kleiner.

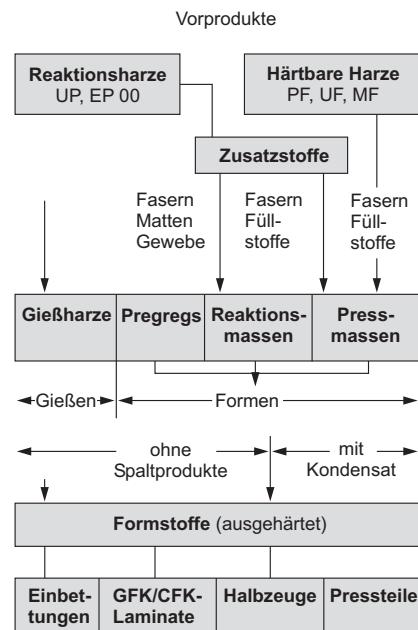
Spritzgießen (Bild 9.24) erfolgt ähnlich wie bei Thermoplasten, jedoch mit veränderten Schnecken und niedrigen Temperaturen zur Plastifizierung ($60\ldots90^{\circ}\text{C}$), damit die Aushärtung nicht im Zylinder einsetzt. Die Masse wird mit Drücken von $200\ldots2500$ bar (je nach Harz und Füllstoff) in die elektrisch beheizten Werkzeuge gespritzt und vernetzt schnell bei $150\ldots200^{\circ}\text{C}$. Die Teile können warm entnommen werden. Die Taktzeiten sind wenig von der Wanddicke abhängig und gleichen denen der Thermoplastverarbeitung.

Duroplastische Formteile erhalten eine glatte, glänzende Oberfläche, die vor Wasseraufnahme schützt. Es können Metallteile (Gewinde-, Lagerbuchsen) eingepresst werden.

SMC (Sheet Moulding Compound) sind flächige, harzgetränkte Laminate als Vorprodukt zum Warmpressen. Sie enthalten bis 50 mm lange Glasfaserstränge (Rovings). In der Fläche unorientiert ist das Produkt allseitig fließfähig. Auch als Gewebeprepregs oder Prepregbänder (Tapes) geliefert. Sorten mit orientierten Fasern sind in Längsrichtung nicht fließfähig. Härte-temperatur und -zeit sind gegenläufig.

BMC (Bulk Moulding Compound) sind teigige, glasfaserhaltige Massen, chemisch verdickt, sie können durch Spritzgießen zu Formteilen oder durch Pultration zu Profilen verarbeitet werden.

Übersicht: Duroplastverarbeitung



Platten mit vorgetränkten Gewebe-, Papier- oder Holzfurnieren werden schichtweise in Etagenpressen mit langen Presszeiten hergestellt.

Profile werden durch Strangpressen in Extrudern erzeugt. Dabei härtet die plastifizierte Formmasse in der Düse aus und wird kontinuierlich ausgestoßen.

9.6 Thermoplaste

9.6.1 Thermisches Verhalten

Die *Sekundärbindungen* sinken bei Erwärmung schnell auf Null, weil sich infolge der *Wärmebewegung* die Abstände der Molekülketten vergrößern. Die Folgen sind:

- Festigkeit und Steifigkeit *sinken* stark,
- die Dehnung steigt an, erreicht ein *Maximum* und fällt steil ab (Bilder 9.19).

Die Einsatzbereiche liegen je nach Molekülstruktur *unter* oder *über* der **Glasübergangstemperatur** T_g .

Amorphe Thermoplaste (Bild 9.18) werden *unterhalb* ihrer Temperatur T_g (links von T_g) verwendet. Es sind harte, spröde Stoffe wie PVC-hart, PS und PMMA.

Oberhalb ihrer Glastemperatur erweichen sie schnell, sind zunächst *thermoelastisch*, später *thermoplastisch* warmumformbar. Die Formänderung bleibt nur bei sofortiger Abkühlung unter T_g erhalten.

Beim Wiedererwärmen erfolgt eine Rückstellung der gestreckten Molekülketten: Verzug der Teile.

Bei noch höheren Temperaturen sinken Dehnung ε und Festigkeit σ_B auf Null, der *schmelzviskose* Zustand ist erreicht und die Formgebung durch Spritzgießen möglich.

Wenn die Temperatur noch weiter gesteigert wird, beginnen sich einzelne *Primärbindungen* zu lösen, die Ketten *zerfallen* in niedermolekulare Stoffe. Der Werkstoff zersetzt sich. Die **Zersetzungstemperatur** T_z ist überschritten (schraffierter Bereich in Bild 9.18).

Teilkristalline Thermoplaste (Bild 9.18u) haben ihren Einsatzbereich *oberhalb* T_g . Dann sind die amorphen Bereiche zwischen der kristallinen Struktur *beweglich*, ohne dass sich die Verschlaufungen lösen können, und ergeben einen *zäh-harten* Zustand.

Forderung für technische Teile:

Kunststoffe dürfen im Temperaturbereich, in dem sie eingesetzt werden, ihre mechanischen Eigenschaften nicht wesentlich verändern. Das begrenzt die Verwendung der Thermoplaste.

Glasübergangstemperatur T_g ist ein Bereich, in dem der abkühlende Stoff *eingefriert* und nur noch geringe *molekulare Wärmebewegung* zeigt.

Festigkeit und E-Modul liegen hoch, die Dehnung ist klein (Bilder 9.18). Der Werkstoff ist hart und spöde.

Die *Verstreckung* von Fäden und Folien zur Festigkeitssteigerung ist in diesem Bereich (hohe Dehnung) möglich (Bild 9.18 oben), ebenso das *Blasformen* von Hohlkörpern (Streckblasen) mit Verbesserung der mechanischen Werte.

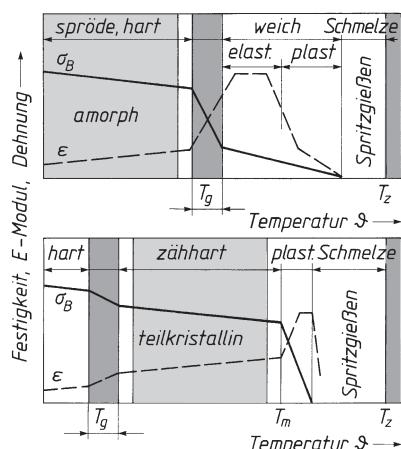


Bild 9.18 Festigkeit und Dehnung von amorphen Thermoplasten (oben) und teilkristallinen (unten) bei steigender Temperatur

Die gerasterten Felder geben die Einsatzbereiche der Polymerarten an.

Die kristallinen Bereiche wirken bis zum **Kristallitschmelzpunkt** T_m versteifend, die Festigkeit sinkt nur wenig ab. Bei T_m lösen sich die Kristallite zu amorphen Knäueln auf, und die Verschlaufungen lockern sich. Der plastische Zustand ist erreicht.

Diese wichtigen Temperaturbereiche werden durch den Torsionsschwingversuch DIN 53 445 bestimmt. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind die *Schubmodul-Temperaturkurven* Bild 9.19a. Bildteil b zeigt die *Zugfestigkeit-Temperatur-Kurven* einiger Thermoplaste.

Kristalline Bereiche sind dichter gepackt und haben stärkere Sekundärbindungen. Zum Auflösen ist mehr Energie erforderlich, sie haben einen *engen Schmelzbereich*, den sog. **Kristallitschmelzpunkt** T_m . Hier sinkt die Festigkeit steil ab, eine plastische Warmumformung von Halbzeugen ist schwierig.

Begriff: Schubmodul G oder Gleitmodul für die Verdreh- und Scherbeanspruchung entspricht dem Elastizitätsmodul E für die Zug- und Biegebeanspruchung, $E \approx 3 \times G$. Sie sind ein Maß für die *Steifigkeit*.

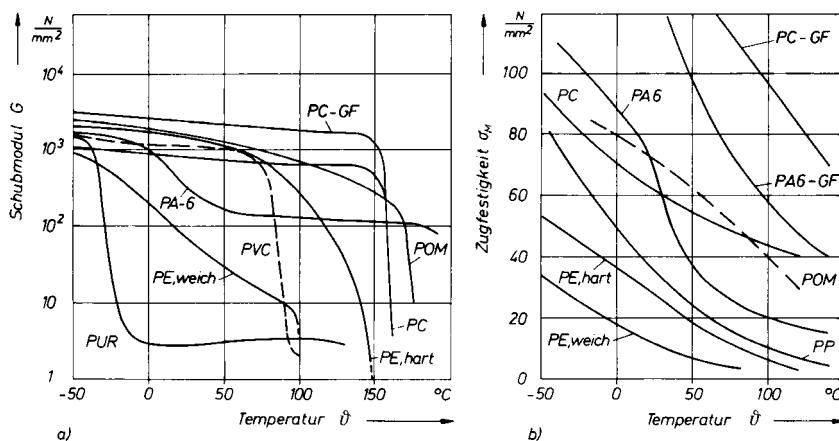


Bild 9.19 Schubmodul G (Drehsteifigkeit) und Zugfestigkeit σ_M als Funktion der Temperatur.

a) Schubmodul G b) Zugfestigkeit σ_M

PE: Polyethylen, PVC: Polyvinylchlorid, PP: Polypropylen, POM: Polyoxymethylen, PC: Polycarbonat, PA 6: Polyamid 6, PC-GF: glasfaserverstärktes PC mit 30 % Glasgehalt, PA 6-GF: glasfaserverstärktes PA 6 mit 30 % Glasgehalt, PUR: Polyurethan.

Den Unterschied zwischen wenig und stark kristallinen Polymeren zeigen die Kurven von PE weich und PE hart.

Beim PVC wirken durch das polare Cl-Atom zunächst starke Sekundärbindungen, die erst bei 70 °C durch die *Mikro-Braun'sche* Bewegung schwächer werden. Hier liegt die Glastemperatur von PVC.

Beispiele für Weich-PVC: Schläuche, Kunstleder, Profile

Beispiele: Formteile für Maschinenteile, die form-steif und formbeständig sein müssen, und deren Steifigkeit bis über 100 °C erhalten bleiben muss, aus Polyamiden PA, Polyoxymethylen POM und Polycarbonat PC.

Steifigkeit und Festigkeit dieser Polymere kann durch Glasfaserverstärkung (30 % Gewichtsanteil) erhöht werden (Kurven PC-GF und PA 6-GF).

Alle Thermoplaste zeigen im Prinzip das in Bild 9.19 skizzierte Verhalten. Dabei schwanken Lage und Breite der Bereiche stark, je nach Art des Monomer-Bausteins und der Sekundärbindungen.

Durch den Einbau von anderen Monomer-Bausteinen mithilfe von Copolymerisation, oder Polymer-Mischung (Blends) lassen sich die Bereiche den Anforderungen von steifen Sorten bis hin zu Elastomeren anpassen.

Prüfung der Formbeständigkeit in der Wärme

Zur Schnellbestimmung der Erweichungstemperatur gibt es zwei Verfahren. Die ermittelten Werte sind stark spannungsabhängig und nur zum Vergleich innerhalb der Polymergruppe geeignet. Die Gebrauchstemperaturen liegen höher.

Die beiden Verfahren ermitteln die Verformung einer Probe in Öl, das mit ca. 2 K/min erwärmt wird bis die Probe eine bestimmte Verformung erreicht (→).

Die Diagramme in Bild 9.19 zeigen das Verhalten der Polymere bei kurzzeitiger Beanspruchung. Bei langzeitiger konstanter Belastung verhalten sie sich viskos, d.h. sie fließen in Richtung der Beanspruchung. Das führt zu einer bleibenden Verformung der Bauteile. Für ihre Auslegung ist deshalb das Verhalten eines Kunststoffes über längere Zeit wichtig.

9.6.2 Langzeiteigenschaften der Kunststoffe

Bei Metallen, die langzeitig oberhalb der Rekristallisationstemperatur beansprucht werden, beobachtet man eine langsame und ständig zunehmende Dehnung, die als **Kriechen** bezeichnet wird. Sie führt nach einer bestimmten Zeit, abhängig von Temperatur und Spannung, zum Bruch (→).

Vicat-Erweichungstemperatur:

DIN ISO 306/97. Eine Nadel mit 1 mm^2 Querschnitt wird mit $F = 50 \text{ N}$ (Prüfung B) senkrecht in die Probe gedrückt. Sie wird in einem Ölbad mit 50 K/h erwärmt. Beim Erreichen einer Eindringtiefe von 1 mm wird die Vicat-Temperatur abgelesen.

Normbezeichnung: VST/B 50 = 70 °C

Formbeständigkeitstemperatur HDT:

DIN EN ISO 75/96. Die genormte Probe auf zwei Stützpunkten, mittig biegebeansprucht, wird in einem Flüssigkeitsbad mit 2 K/min erwärmt. Wird bei genormten Biegespannungen eine bestimmte Durchbiegung erreicht, kann die HDT-Temperatur abgelesen werden.

Messverfahren A: Biegespannung 1,85 MPa, (max. Durchbiegung 0,33 mm)

Normbezeichnung: HDT/A = 90 °C

Kunststoffe zeigen dieses Kriechen bereits bei normalen Temperaturen. Die Prüfungen dafür sind:

Bestimmung des Kriechverhaltens nach DIN EN ISO 899/03:

Teil 1: Zeitstandzugversuch; Teil 2: Zeitstandbiegeversuch bei Dreipunktbelastung.

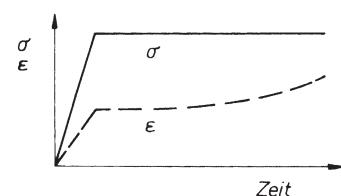


Bild 9.20 Verlauf von Spannung σ und Dehnung ε beim Zeitstandzugversuch

Verhalten bei konstanter Dehnung (Entspannungsversuch, Relaxation)

Bei manchen Maschinenteilen liegt eine konstante Dehnung vor, wenn z.B. Schrauben vorgespannt sind oder Teile eingepresst oder aufgeschrumpft sind. Dieser Dehnung entspricht zunächst eine bestimmte Spannung, die aber durch das Kriechen kleiner wird (Bild 9.21).

Dadurch kann das Teil seine Funktion nicht mehr erfüllen.

Als Ergebnis vieler Zeitstandversuche erhält man die *Zeit-Dehnungs-Linien*, die in Bild 9.22a schematisch dargestellt sind. Daraus lässt sich ableiten, welche Dehnung nach der Zeit t für eine vorgegebene Spannung zu erwarten ist.

Zeitstandfestigkeiten (obere Linie) sind die Spannungen, die nach der Zeit t zum Bruch führen.

Eine weitere Darstellung des Langzeitverhaltens ist in Bild 9.22c aus den Zeit-Dehnungs-Linien konstruiert, die *isochronen* Spannungs-Dehnungs-Linien. Sie entstehen durch Auftragen von Wertepaaren von Spannung und Dehnung für *eine bestimmte Belastungszeit*.

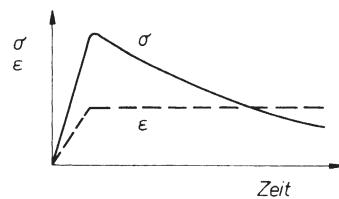


Bild 9.21 σ, ε -Verlauf beim Entspannungsversuch

Beispiel: Sektkorken halten durch Reibkräfte, die mit der Druckspannung im Korken erzeugt werden. Durch Kriechen sinkt letztere, damit auch die Reibkraft. Der Korken löst sich.

Ablesebeispiel: Welche Spannung ist zulässig, wenn nach 1000 h eine Dehnung von 3 % auftreten darf?

Im Bildteil a) auf der Zeitachse bei 10^3 h nach oben, auf der Dehnungsachse bei 3 % nach rechts gehen. Der Schnittpunkt liegt auf der schrägen Spannungslinie 50 N/mm^2 , es ist die gesuchte Spannung.

Ablesekontrolle mit Bildteil b):

Auf der σ -Achse bei $= 50 \text{ N/mm}^2$ nach rechts, auf der Zeitachse bei 103 h nach oben gehen. Der Schnittpunkt liegt auf der schrägen Dehnungslinie 3 %.

Begriff: *isochron* = gleichlang dauernd

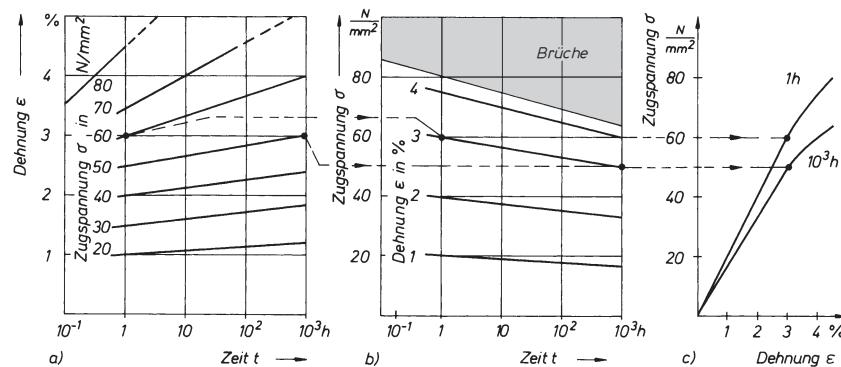


Bild 9.22: Zeitstandversuch, schematische Schaubilder

a) Zeit-Dehnungs-Linien, b) Zeit-Spannungs-Linien, c) isochrone Spannungs-Dehnungs-Linien

Als weitere Einflussgröße kann die Temperatur in das Diagramm eingearbeitet werden. Aus dieser Darstellung kann der Konstrukteur alle wichtigen Daten entnehmen, sie stellt eine Art „Visitenkarte“ des Polymers dar (Bild 9.23).

Die Spannungslinien im Bild 9.23 rechts haben unterschiedliche *Steigungen*, die zudem nach oben hin kleiner werden.

Das bedeutet für das Verhalten des Polymers:

- **steif** bei niedrigen Spannungen oder kurzzeitiger Beanspruchung,
- **weich** bei höherer Spannung oder langzeitiger Beanspruchung.

Das bedeutet auch, dass der E-Modul *keine konstante Größe* mehr ist, wie wir es von den Metallen her kennen.

Dieser zeitabhängige E-Modul wird als **Kriechmodul** $E_c(t)$ bezeichnet.

(*t* bedeutet Funktion der Zeit t).

Elastizitätsmodul E und Auswirkungen

Der gegenüber Metallen um etwa 100-fach kleinere E -Modul führt zu entsprechenden elastischen Verformungen. Die Bauteile haben eine geringere *Formsteifigkeit*. Daraus ergeben sich:

Bei Punkt- und Linienberührungen von Kunststoffteilen unter starken Kräften wird durch die Abplattung die Berührungsfläche größer. Dadurch sinkt die örtliche Flächenpressung gegenüber Stahlteilen auf etwa 1/10, damit auch der Verschleiß.

Beim Ersatz von Metallteilen durch Kunststoffe sind die Wanddicken auf das 2...3-fache zu verstärken oder durch *Verrippungen* zu verstehen. Bei großflächigen Teilen besteht die Möglichkeit, *Strukturschaum-Kunststoffe* anzuwenden. Sie haben glatte Außenflächen, nach innen steigt die Porosität an.

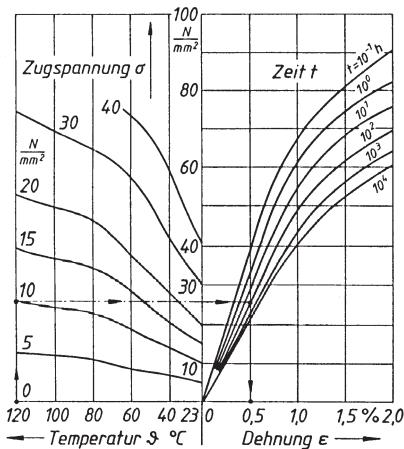


Bild 9.23 Isochrone Spannungs-Dehnungs-Linien von PA6 mit 30 % Glasfasern verstärkt (trocken)
(nach Oberbach)

Ablesebeispiel: Bei einer Zugspannung von 10 N/mm² und einer Temperatur von 120 °C ist nach einer Dauerbeanspruchung von 10² h eine Dehnung von 0,5 % zu erwarten.

Kriechmoduln können in Schaubildern abgelesen und für die Berechnung von Verformungen *anstelle* des E -Moduls eingesetzt werden, wenn Langzeitbeanspruchungen vorliegen. Der im *Kurzzeitversuch* ermittelte E -Modul ist dazu ungeeignet.

Anwendung des kleineren E -Moduls:
Schnappverbindungen lassen sich mit geringeren Kräften schließen, wie bei Spielzeugen, Behältern, Abdeckkappen. Wälzlagerkäfige aus POM können mit Kugeln bestückt werden.

Anwendung: Laufrollen, Lagerbuchsen, Kuppelungsteile, Zahnräder, Wälzlagerringe für geräuscharme Lager aus zähharten Polymeren PA, POM und PUR.

Strukturschaum-Anwendung: Gehäuse für Tonmöbel, Sportgeräte, Möbelteile, Kfz-Innenteile (weiche Armaturenbretter).

PUR- und ABS-Strukturschaum mit Dichten von etwa 0,6 g/cm³.

9.6.3 Thermoplastverarbeitung

Die polymeren Rohstoffe werden vom Hersteller mit den Zusätzen gemischt und als Formmasse (Pulver- oder Granulat) in trockenem Zustand den Kunststoffverarbeitern geliefert.

Von jedem Polymer werden unterschiedlich eingestellte Formmassen angeboten, die sich durch das Fließverhalten (→) beim Urformen unterscheiden.

Hohe Fließfähigkeit = hoher Schmelzindex bzw. Fließrate (→)

Die Größen hängen stark von der Form und Länge der Makromoleküle und von Art und Anteil der Zusätze ab.

Das Urformen der Thermoplaste erfolgt nach drei Hauptverfahren.

Spritzgießen (Bild 9.24) ist ein diskontinuierliches Verfahren für Formteile. Das vorgewärmte Granulat wird in Schneckenspritzgießmaschinen (Prinzip Fleischwolf) eingezogen, im beheizten Zylinder geschmolzen und zu einer homogenen Schmelze plastifiziert, die sich vor der Schnecke sammelt.

Zum Spritzen fährt die Spritzeinheit an die geschlossene Form heran. Die stillstehende Schnecke wird axial verschoben und wirkt als Kolben, der die Masse in die Form drückt.

Durch *Nachdrücken* bis zum Einfrieren der Masse im Werkzeug wird die Schrumpfung kompensiert. Dann fährt die Spritzeinheit zurück, die Form wird geöffnet und das Teil ausgestoßen. Nach Reinigung beginnt der nächste Zyklus.

Extrudieren ist ein kontinuierliches Verfahren für Halbzeuge. Die mit Schnecken plastifizierte Masse wird durch eine Düse abgezogen und kühlt an der Luft ab. Das Profil ergibt sich unter Berücksichtigung der *Strangaufweitung* aus der Form der Düse.

Blasformen von Hohlprofilen wird z.B. für Flaschen, Kanister und Tanks angewendet.

Fließverhalten: Wichtig für die vollständige Füllung der Form durch die thermoplastische Schmelze bei langen Fließwegen (komplizierte Teile).

Es wurde durch die Verarbeitungskenngröße Schmelzindex MFI (DIN 53735 Z) angegeben.

$MFI_{250/2,16} = 30 \text{ g}/10 \text{ min}$ bedeutet, aus einem genormten Prüfgerät fließt bei 250°C Masse-temperatur unter Belastung mit einem Ge-wichtsstück von 2,16 g eine Masse von 30 g in 10 min aus der Düse.

Neue Kenngrößen sind (DIN EN ISO 1133/00)

- Volumenschmelzfließrate MVR mit der Einheit $\text{cm}^3/10 \text{ min}$,
- Masseschmelzfließrate MFR mit der Einheit $\text{g}/10 \text{ min}$.

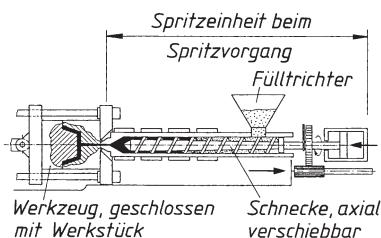


Bild 9.24 Schneckenspritzgießmaschine, schematisch

Die Verfahrensbedingungen haben Einfluss auf das Aussehen und die Eigenschaften des Formteiles und die inneren Spannungen.

Bedingungen	Auswirkungen
Spritzdruck	Geschwindigkeit der Füllung
Massetemperatur	Viskosität der Masse
Formtemperatur	Kristallisation und Zeit bis zum Entformen, Oberfläche,
Nachhaltezeit	Schwindung des Teiles, Verzug

- Breitschlitzdüse für Platten
- Ringschlitzdüse für Schlauchfolien, Rohre
- Düsen für Stangen und Profile
- Schrägspritzköpfe zur Ummantelung von Rohren und Kabeln

Es werden Hohlkörper von 10 ml bis 10 000 l Inhalt von fast beliebiger Gestalt geformt.

9.6.4 Übersicht über die wichtigsten Thermoplaste

Der Abschnitt stellt die am meisten eingesetzten thermoplastischen Kunststoffe vor. In der rechten Spalte sind jeweils die Strukturformeln der monomeren Stoffe abgebildet. Sie lassen erkennen, ob der Baustein kompakt oder sperrig gebaut ist.

Unpolare Stoffe entstehen, wenn die Substitutions-Atome oder -gruppen symmetrisch um die Achse liegen.

Polare Stoffe entstehen bei Unsymmetrie oder wenn einseitig stark elektronegative Atome (z.B. Cl bei PVC) oder solche Gruppen angebaut sind.

Polarität wirkt sich auf das Verhalten in elektrischen Wechselfeldern aus: Polare Moleküle schwingen im Takt der Frequenz, das führt zu Verlusten. Verlustenergie setzt sich in Wärme um (Mikrowellenprinzip). Diese Stoffe sind mit Hochfrequenz schweißgeeignet.

Unpolare Stoffe, wie z.B. das symmetrisch gebaute Polyethylen PE, sind deshalb z.B. für Hochfrequenzbauteile geeignet oder für den Mikrowellenherd.

Polyethylen PE

(Tabelle 9.14) PE-Formmassen DIN EN ISO 1872/99

Unpolarer, durchscheinender, milchig bis weiß aussehender Kunststoff mit wachsartiger Oberfläche, sehr zäh, mit unterschiedlicher Steifigkeit, die mit der Dichte steigt. Hohe Beständigkeit gegen Chemikalien, geringe Wasseraufnahme, schweißbar, schlecht klebbar, preisgünstiger Kunststoff mit hohem Marktanteil.

Die Eigenschaften von PE verbessern sich allgemein mit steigender Dichte
(Polymerisationsgrad n, Molmasse MM)

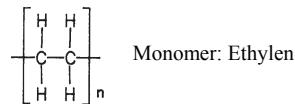
PE-LD (Weich PE) entsteht bei 200 °C und ca. 1500 bar und hat eine mittlere MM von $6 \cdot 10^5$ g/mol.

PE-HD (Hart-PE) entsteht durch besondere Katalysatoren bei geringen Drücken und hat eine MM von $2 \dots 4 \cdot 10^5$ g/mol.

PE-UHMW (ultra high molecular weight) entsteht ebenfalls durch besondere Katalysatoren und hat Molekulmassen von $3 \dots 6 \cdot 10^6$ g/mol.

Durch Copolymerisation lässt sich der E-Modul der PE-Kunststoffe variieren von Elastomeren bis hin zu hochsteifen Sorten.

Vernetztes PE-X entsteht nach verschiedenen Verfahren, z.B. durch energiereiche Strahlen. Dabei werden die Fadenmoleküle durch primäre Bindungen lose verknüpft (ca. 5 Bindungen auf 1000 C-Atome).



Handelsnamen: Baylon, Hostalon, Lupolen, Vestolen

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Leicht entflammbar, brennt außerhalb mit heller Flamme weiter, tropft, Paraffingeruch.

PE-LD besteht aus verzweigten Molekülen und kristallisiert dadurch zu 40...50 %. Die Dichte liegt zwischen 0,915 und 0,935 g/cm³.

PE-HD besteht aus linearen, größeren Molekülen und kristallisiert zu 60...80 %. Es ist steifer, härter und beständig in kochendem Wasser. Die Dichte liegt zwischen 0,942 bis 0,965 g/cm³.

PE-UHMW hat durch die langen Moleküle eine geringere Fließfähigkeit beim Verarbeiten und erfordert höhere Drücke. Es ist beständiger gegen abrasive Beanspruchung als PE-LD und PE-HD.

Anwendung: Isolierung von Hochspannungskabeln, Rohre für Fußbodenheizungen, Formteile für höhere Beanspruchungen. Es steigen Kriechwiderstand und Schlagzähigkeit. Die Einsatztemperatur liegt bei 120 °C (kurzzeitig 200 °C).

Polypropylen PP

(Tabelle 9.14), PP-Formmassen DIN EN ISO 1873/95

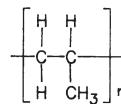
Polypropylen besitzt ähnliche Eigenschaften wie PE, ist jedoch härter und warmfester und neigt weniger zu SpannungsrisSEN wie PE. Die Kriechneigung ist geringer, so dass PP für formstabile Bauteile besser geeignet ist als PE. Es ist leider kaltspröde.

Für flächige Bauteile gibt es PP-GMT (glasmattenverstärkte Thermoplaste), sie sind im Gegensatz zu duroplastischen Prepregs unbegrenzt lagerfähig.

PP-Sorten haben (auch durch Füllstoffe) ein breites Eigenschaftsspektrum, so dass sie auch wegen des leichteren Recyclings große Marktanteile auf Kosten aromatischer Polymere gewonnen haben.

Tabelle 9.14: Eigenschaften von PE und PP

Eigenschaft	Einheit →	PE-LD	PE-HD	PP	PP-Talkum	PP-GF30
Streckspannung σ_y	MPa	8 - 10	18 - 30	25 - 40	30 - 35	-----
Streckdehnung ε_y	%	ca. 20	8 - 12	8 - 18	3	-----
E-Modul E (Zug)	MPa	200 - 400	600 - 1400	1300 - 1800	3500 - 4500	5200 - 6000
Wärmeformbeständigkeit HDT/A 1,8 MPa	°C	-----	38 - 50	55 - 65	70 - 90	90 - 115



Monome: Propylen

Handelsnamen: Hostalen PP, Hostacom, Hostacen, Novolen, Polystone

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Wie Polyethylen, Geruch ist brenzlicher.

Anwendungen: Verpackungsindustrie, Kfz-Bauteile (Benzintanks, großflächige Teile im Fahrgastraum), Rohre für Warmwasser- und Fußbodenheizung, Bauteile für Sonnenkollektoren, Batteriekästen.

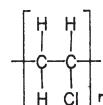
Polyvinylchlorid PVC (Tabelle 9.15), (PVC-U)-Formmassen DIN EN ISO 1060/00

PVC ist ein polarer, hornartiger, glasklar bis trüber, harter, zäher Werkstoff und hochbeständig gegen die meisten Chemikalien, im Heißluftstrom schweißbar, klebbar, aber nur bis ca. 60 °C einsatzfähig. PVC versprödet unterhalb +20 °C, die Temperatur lässt sich durch Zusätze nach unten erweitern.

Durch verschiedene Herstellungsverfahren, Copolymerisation und Weichmacher lassen sich Typen mit vielseitigen Eigenschaften herstellen.

PVC-U (Hart-PVC) mit höherer Festigkeit und E-Modul für Folien und Tafeln, die zum Warmumformen geeignet sind. Widerstand gegen Abrieb, Kaltfestigkeit und Dauerfestigkeit sind gering.

PVC-C ist nachchloriertes PVC mit > 60 % Cl-Anteil und beständig bis 100 °C.



Monomer: Vinylchlorid

Handelsnamen: Hostalit, Vestolit, Vinoflex

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Brennt in der Flamme gelb leuchtend, erlischt außerhalb, erwacht, riecht nach Salzsäure HCl.

Anwendungen: PVC-U für Fenster-, Möbel- und Bauprofile, Rohrleitungen, Auskleidungen von Apparaten der chemischen Industrie.

Profile und Tafeln werden dazu warmgeformt und durch Schweißen und Kleben verbunden.

PVC-P (Weich PVC) enthält neben sog. Weichmachern hohe Anteile an Füllstoffen wie Kreide, CaCO_3 , Schiefermehl u.a.

Anwendungen: PVC-P für Folien, Blech- und Textilbeschichtungen (Kunstleder), Profile für Möbelbau und Kraftfahrzeuge, Schläuche und Fußbödenbeläge.

Weichmacher: Zahlreiche niedermolekulare Stoffe (Ester, Öle), welche die Sekundärbindungen lockern, so dass der Glasübergang zu tieferen Temperaturen verschoben wird. Wichtig ist Licht- und thermische Stabilität, damit keine Versprödung oder Belastung der Umgebung eintritt (äußere Weichmachung).

Innere Weichmachung ist die Veränderung der Makromoleküle durch Copolymerisation oder Polymermischung (Polyblends).

Tabelle 9.15: Eigenschaften von PVC-Sorten

Eigenschaft	Einheit →	PVC-U	PVC-C	PVC-U + 20 % Kreide	PVC-U + 30 % CaCO_3
Streckspannung σ_Y	MPa	50 - 60	70 - 80.	34	46
Streckdehnung ε_Y	%	4 - 6	3 - 5	6	8
E-Modul E (Zug)	MPa	2700 - 3000	3400 - 3600	3500	3200
Wärmeformbeständigkeit HDT / A 1,8 MPa	°C	65 - 75	100	---	80

Polystyrol PS

(Tabelle 9.16), PS-Formmassen DIN EN ISO 1622/99

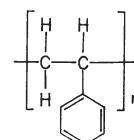
Glasklarer, einfärbbarer Kunststoff mit glänzender Oberfläche, steif und spröde, geruch- und geschmacklos, mit sehr guten elektrischen Eigenschaften, schweiß- und klebbar, preisgünstig. Die geringe Schlagzähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit wird durch **Copolymerisation** oder Mischung mit gummiartigen Stoffen verbessert (z.B. mit Butadien = Kautschuk).

Copolymerivate sind z.B.

Styrol-Butadien	SB	Polystyrol schlagfest
Styrol-Acrylnitril	SAN	Luran, Vestoran
Acrylnitril-Butadien-Styrol	ABS	Novodur, Terluran, Vestodur

Schlag- und hochfeste Polystyrole sind bis 85 °C einsetzbar (SAN) galvanisierbar (ABS) und mit Treibmitteln aufgeschäumt für Teile mit größeren Wanddicken verwendbar (ABS).

Anwendung der Copolymerivate: Abdeckungen aller Art, Armaturenbretter, Gehäuse von Radio-, Phono-, Fernsehgeräten und Büromaschinen, Reise- und Gartengeschirr.



Monomer: Styrol

Handelsnamen: Hostyren, Trolitul, Vestyron, Styroflex

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Leicht entflammbar, brennt außerhalb der Flamme leuchtend weiter, stark rufend, süßlicher Geruch

Anwendungen: Isolierfolien für elektrotechnische Bauelemente, Lichtraster, Leuchtenabdeckungen, Zeichengeräte, Verpackung kosmetischer und pharmazeutischer Präparate.

Geschäumtes PS (Styropor) für Wärme- und Schalldämmung (Platten und Verbundwerkstoffe); formgeschäumtes PS für Verpackungen, Gießen mit verlorenem Modell, Formen für Stahlbetondecken.

Tabelle 9.16: Eigenschaften von Polystyrolen

Eigenschaft	Einheit →	PS	SB	SAN	ABS	ABS-GF20
Bruchspannung σ_B	MPa	30 - 55	25 - 45 ¹⁾	65 - 85	30 - 45 ¹⁾	65 - 80
Bruchdehnung ε_B	%	1,5 - 3	1 - 2,5 ¹⁾	2,5 - 5	2,5 - 3,5 ¹⁾	-- 2
E-Modul E (Zug)	MPa	3100 - 3300	2000-2800	3500-3900	2200-3000	6000
Wärmeformbeständigkeit HDT/A 1,8 MPa	°C	65 - 85	72 - 87	95 - 100	95 - 105	100 - 110

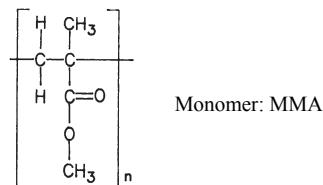
¹⁾ hier Streckspannung σ_Y und Streckdehnung ε_Y

Polyethylmethacrylat PMMA (Tabelle 9.17), PMMA-Formmassen DIN EN ISO 8257/06

Durchsichtiger, glasklarer Kunsststoff mit besten optischen Eigenschaften, witterungsbeständig, bis 90 °C einsetzbar, schweiß- und klebbar, geringe Wasseraufnahme, hoher Oberflächenwiderstand, teilweise Löslichkeit in organischen Lösungsmitteln.

Es existieren zahlreiche Copolymeren und Blends.

Anwendung: Verglasungen aller Art, wenn Leichtigkeit und gute Formbarkeit und Splittersicherheit verlangt werden; durchsichtige Lehrmodelle, Leuchten, Schaugläser, Zeichengeräte, zahnmedizinische Artikel und kunstgewerbliche Gegenstände.



Handelsnamen: Plexiglas, Resarit, Degulan

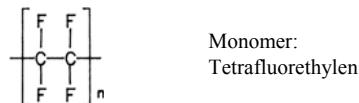
Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Leicht entflammbar, brennt außerhalb der Flamme mit leuchtender Flamme weiter, es erwacht, tropft aber nicht, Geruch fruchtig.

Polytetrafluorethylen PTFE (Tabelle 9.17), PTFE-Formmassen DIN EN ISO 12086/06

Wachsartiger, nicht sehr harter, auch kaltzäher Kunststoff mit hohem Schmelzpunkt (>320 °C), der von -270...300 °C langzeitig beansprucht werden kann und höchste Beständigkeit gegen Chemikalien hat, keine Wasseraufnahme, sehr guter elektrischer Isolator, niedrige Reibzahl, bedingt schweißgeeignet, klebwidriges Verhalten. Die Herstellung ist aufwendig und teuer.

Das Verschleißverhalten wird durch Füllstoffe wie Graphit, Molybdändisulfid, Bronze, Stahl oder Glasfasern verbessert.

Die Verarbeitung durch Spritzgießen ist wegen des hohen Schmelzpunktes nicht möglich. Einfache Formteile entstehen durch Pressen und Sintern bei 350...380 °C.



Handelsnamen: Teflon, Hostafalon Fluon

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Nicht brennbar, nicht verkohrend, ohne Geruch, riecht bei Rotglut stechend nach Fluorwasserstoff.

Anwendungen: Dichtungen (auch glasfaser-verstärkt), Verbundlager für Trockenlauf (auch mit MoS₂-Zusatz), Dehnungselemente, Brücklager, Schläuche, Isolierfolien, Beschichtungen mit abweisender Oberfläche für Walzen und Rührgeräte der Lebensmittelindustrie (Bratpfannen).

Durch Copolymerisation entstehen Fluorpolymere mit etwas niedrigerer Wärmebeständigkeit, die sich aber wie andere Thermoplaste verarbeiten lassen.

Fluorkautschuke sind hoch chemikalienbeständig und für Dichtungen von -20...200 °C eingesetzt.

Copolymere sind z.B:

Polyvinylfluorid **PVF**, glasklare Folien
Polychlortrifluorethylen **PCTFE**,
geringste Wasserdampfdurchlässigkeit,
Polyfluormethylenpropylen **FEP** für Kabelisolierungen, Träger für gedruckte Schaltungen.

Tabelle 9.17: Eigenschaften von Polymethylmethacrylat PMMA und Polytetrafluorethylen PTFE

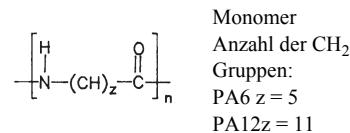
Eigenschaft	Einheit →		PMMA	AMMA ²⁾ Halbzeug	PTFE	PCFTE
Streckspannung σ_Y	MPa	60 - 75 ¹⁾	90 - 100	20 - 40	30 - 40 ¹⁾	
Streckdehnung ε_Y	%	2 - 6 ¹⁾	10	> 50	> 50 ¹⁾	
E-Modul E (Zug)	MPa	3100 - 3300	4500 - 4800	400 - 750	1300 - 1500	
Wärmeformbeständigkeit	°C	75 - 105	75	50 - 60	65 - 75	
HDT/A 1,8 MPa						

¹⁾ hier Bruchspannung σ_B und Bruchdehnung ε_B ²⁾ Copolymer Acrylnitril/PMMA

Polyamide PA

(Tabelle 9.18), Formmassen DIN EN ISO 1874/01

Milchig aussehende, sehr zäh und abriebfeste Kunststoffe, schwingungsdämpfend, bis zu 80...100 °C einsetzbar, geeignet zum Schweißen und Kleben.



Polyamide PA werden zusätzlich mit Zahlen gekennzeichnet (Tafel 9.19).

Die Zahlen geben die Anzahl der CH₂-Gruppen im Monomer an. Durch sie wird die Wasseraufnahmefähigkeit beeinflusst. Je höher die Zahl, desto geringer die Wasseraufnahme und um so besser die Maßbeständigkeit (Tabelle 9.18).

Die Wasseraufnahme erhöht die Schlagzähigkeit, während Festigkeit und E-Modul auf 60...70 % der Werte im trockenen Zustand sinken.

Hochkristallines PA hat eine geringere Wasseraufnahme, ebenso die glasfaserverstärkten Sorten. Neben C-Fasern werden als Füllstoffe noch Glaskugeln, Kreide, Talkum, Si-Oxid (bis 30 %) eingesetzt.

PA ist nicht spannungsrisssgefährdet, aber unbeständig gegen starke Säuren und Laugen.

Handelsnamen: Ultramid, Durethan, Trogamid, Vestamid, Nylon, Rilsan.

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Entflammbar, brennt außerhalb der Flamme (bläulich mit gelbem Rand) weiter, tropft und zieht Fäden, Geruch nach verbranntem Horn.

Tabelle 9.18: Wasseraufnahme von Polyamiden

Sorte	Wasseraufnahme in %	
	bei 20 °C bis zur Sättigung	bei 23 °C u. 50 % Luftfeuchte
PA6	9...11	2,9
PA66	7,5...9	2,5
PA610	3,5	1,8
PA12	2,5	0,8

Anwendungen: Werkstoff für Maschinenteile wie Zahn- und Schneckenräder, Gleitelemente, Rollen, Kupplungen, Transportkettenglieder, Wälzlagerkäfige, Spanabstreifer an Führungen von Werkzeugmaschinen.

Tabelle 9.19: Eigenschaften von Polyamiden PA und Polyoxymethylen POM

Eigenschaft →	Einheit		PA6 trocken kondit.		PA6-GF30 trocken kondit.		POM-H Homop.	POM-R-GF30 R: Copolymer.
Streckspannung σ_Y	MPa	70 - 90	30 - 60	170 - 200 ¹⁾	100 - 135 ¹⁾	60 - 75	125 - 130 ¹⁾	
Streckdehnung ε_Y	%	4 - 5	20 - 30	3 - 3,5 ¹⁾	4,5 - 6 ¹⁾	8 - 25	3 ¹⁾	
E-Modul E (Zug)	MPa	2600 - 3200	750 - 1500	9000 - 10 800	5600 - 8200	3000 - 3200	9000 - 10 000	
Wärmeformbeständigkeit HDT/A 1,8 MPa	°C	55 - 80		190 - 215		105 - 115	155 - 160	

¹⁾ hier Bruchspannung σ_B und Bruchdehnung ε_B

Polyoxymethylen POM

(Tabelle 9.19), Formmassen DIN EN ISO 9988/06

POM (Polyformaldehyd, Acetalharz) ähnelt in den Eigenschaften den PA, hat unverstärkt höhere Festigkeit und Steifigkeit. Hohe Härte und niedrige Reibzahl ergeben gute Gleiteigenschaften. POM ist kaltzäh und bis 110 °C langzeitig einsetzbar.

Geringere Dampfdurchlässigkeit und Feuchtigkeitsaufnahme ergeben hohe Maßstabilität. POM ist beständig gegen Öle, Treibstoffe und Lösungsmittel. Es wird nur von starken Säuren und Oxidationsmitteln angegriffen.

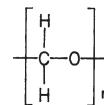
Veränderung der Monomerketten zur Eigenschaftsverbesserung

Beim Versuch, Metallteile gegen solche aus Kunststoffen auszutauschen, sind Letztere besonders in der Wärmestabilität unterlegen.

Zur Steigerung muss neben der Faserverstärkung der Grundwerkstoff (Matrix) steifer gemacht werden, z.B. durch Einbau von Benzolringen (→) in die Hauptkette.

Sie behindern die Drehung und Biegung der Kettenglieder stärker, so dass mehr Energie (höhere Temperaturen) aufgebracht werden muss, um sie zum Abgleiten zu bringen.

Diese *aromatischen* Polymere sind damit wärmebeständiger als die bisher behandelten mit kettenförmigen (aliphatischen) Monomer-Bausteinen.



Monomer:
Formaldehyd

Handelsnamen: Delrin, Hostaform, Kematal, Ultraform

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Entflammbar, brennt außerhalb der Flamme weiter, Flamme bläulich, POM schmilzt und tropft, Geruch nach Formaldehyd.

Anwendungen von POM: Ähnlich den Polyamiden, jedoch bei höheren Anforderungen an die Maßbeständigkeit. Armaturenteile für Wasserleitungen (Wasch- und Spülmaschinen) Farbspritzpistolen, Kraftstoffpumpensysteme.

Benzolringe sind gemeinsamer Bestandteil der Verbindungen, die zu den *aromatischen* KW. gehören. Die C-Atome haben im Ring kleinere Abstände als in den Ketten (Aliphaten) und damit stärkere Primärbindungen.

Mit der Anzahl der Ringe in der Kette steigen Warmfestigkeit und Steifigkeit des Polymers, die Fließfähigkeit in der Form wird aber geringer. Abhilfe durch folgende Maßnahmen:

- Die Verarbeitung geschieht durch Pressen und Sintern,
- Modifizierung durch Legieren mit einem geringen Anteil von thermisch „weicherem“ Sorten (sog. Polymer Blends).

Polycarbonat PC

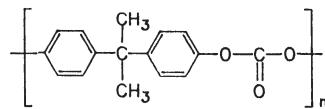
(Tabelle 9.20) Formmassen DIN EN ISO 7391/99

Glasklarer, gut einfärbbarer Kunststoff mit hoher Witterungsbeständigkeit, bis 120 °C einsetzbar, zäh-hart mit geringer Kriechneigung. Die Steifigkeit ändert sich im Bereich von -70...120 °C nur gering, es ist schlagzäh von -150...+135 °C.

Die Durchlässigkeit für CO₂ ist hoch, geringe Wasseraufnahme, dadurch sehr gute elektrische Isoliereigenschaften.

PC ist nicht beständig gegen Benzol, organische Löungsmittel und starke Säuren.

PC ist gefährdet durch Spannungsrisse, Abhilfe durch Faserverstärkung. Es existieren zahlreiche Copolymeren und Blends. Partner sind z.B. ABS, PMMA+PS, PET, PBT.



Handelsnamen: Makrolon, Makrofol

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Schwer entflammbar, brennt mit leuchtend rußiger Flamme, erlischt außerhalb. Geruch nach Phenol und Blasenbildung.

Anwendungen: Bauelemente der Feinwerk- und Elektrotechnik: Gehäuse und Steckerleisten, CD-Scheiben. Abdeckungen für Verkehrsampeln und Kfz-Leuchten, Linsen und Brillengläser, extrudierte Platten als Scheiben für Gewächshäuser.

Tabelle 9.20: Eigenschaften von Polycarbonat PC und Polyalkylenterephthalate PET und PBT

Eigenschaft →	Einheit	PC amorph	PC- -GF30	PET teilkrist.	PET- -GF30	PBT Homo-P:	PBT- -GF30
Streckspannung σ_Y	MPa	55 - 65	70 ¹⁾	50 - 80	160 - 175 ¹⁾	50 - 60	130 - 150 ¹⁾
Streckdehnung ε_Y	%	6 - 7	3,5 ¹⁾	5 - 7	2 - 3 ¹⁾	3,5 - 7	2,5 - 3 ¹⁾
E-Modul E (Zug)	MPa	2300 - 2400	5500 - 5800	2800 - 3100	9000 - 11 000	2500 - 2800	9500 - 11 000
Wärmeformbeständigkeit HDT/A 1,8 MPa	°C	125 - 135	135 - 140	65 - 75	220 - 230	50 - 60	200 - 210

¹⁾ hier Bruchspannung σ_B und Bruchdehnung ε_B

Polyalkylenterephthalate

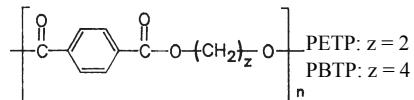
(Tabelle 9.20), Formmassen DIN EN ISO 7792/04

Polyethylenterephthalat PET, Polybutylenterephthalat PBT

PET ist ein teilkristalliner, polarer, zähharter Kunststoff mit geringer Kriechneigung und hoher Abriebfestigkeit. Unlöslich in organischen Lösungsmitteln, in einigen wird ein Aufquellen beobachtet. Geringe Durchlässigkeit für CO₂.

Formteile aus PET haben hohe Maßhaltigkeit und Zeitstandfestigkeit mit guten Gleit- und Verschleißeigenschaften. Beide Sorten sind geeignet zum Schweißen und Kleben.

PBT hat etwas geringere Festigkeit und Steifigkeit, ist aber kaltzäher, besonders mit Butadien modifiziert.



Handelsnamen: Armite, Celanex, Dynalit, Impet, Pocan, Rynite, Ultradur, Vestodur.

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Rußt in der Flamme und tropft, leuchtende Flamme, süßlich, kratzender Geruch.

Als Füllstoffe werden Glasfasern und -kugeln oder Mineralpulver eingesetzt. Es existieren zahlreiche Blockpolymere und Blends z.B. PET+PBT, PET+PMMA und Elastomere TPE-E.

Anwendungen: Wärmebeanspruchte, elektrische Haushaltsgeräte, Rollen aller Art, Ketten, Federn, Schrauben, Nockenscheiben, Gleitlager, Getränkeflaschen. PET auch für Antihhaftfolien, Farbbänder, Schrumpfschläuche und Fasern.

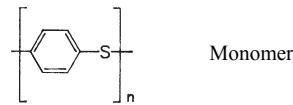
Polyphenylensulfid PPS

(Tabelle 9.21)

Teilkristalliner, dunkelbrauner Kunststoff, wenig zäh, unpolar mit geringer Wasseraufnahme. Elektrische Isoliereigenschaften und chemische Beständigkeit liegen hoch, PPS ist unlöslich in organischen Lösungsmitteln, Säuren und Laugen. Eigenschaften (Tabelle 9.21) sind nur gering temperaturabhängig, maßbeständig bis ca. 230 °C.

Meist mit Füllstoffen bis zu 70 % sowie mit Fasern (40 % Glas, Kohlenstoff und Aramid) verstärkt.

Anwendung: Bauteile mit höherer Wärme- und Maßbeständigkeit, z.B. für Heiz- und Kühlsysteme im Kfz. Folien für Brennstoffzellen.



Handelsnamen: Fortron, Larton, Ryton PPS, Tedur.

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Schwer entflammbar, leuchtende rußende Flamme, leichter Geruch nach Styrol und Schwefelwasserstoff.

Tabelle 9.21: Eigenschaften von Polyphenylensulfid PPS, Polyethersulfon PES und Polyimiden PI

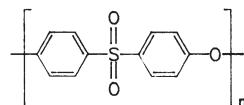
Eigenschaft	Einheit →		PPS-GF40	PES unverst.	PES-GF30	PI	PAI unverst.	PAI-GF30
Bruchspannung σ_B	MPa	165 - 200	80 - 90 ¹⁾	205 - 220	210 ¹⁾	150 - 160	205 - 220	
Bruchdehnung ε_B	%	0,9 - 1,8	6 ¹⁾	2 - 3	--8	2 - 3	2 - 3	
E-Modul E (Zug)	MPa	13000 - 19000	2600 - 2800	9000 - 11000	2300	4500 - 4700	12500 - 14000	
Wärmeformbeständigkeit HDT/A 1,8 MPa	°C	260	200 - 205	210 - 225	> 400	275	280	

¹⁾ hier Streckspannung σ_Y bzw. Streckdehnung ε_Y

Polyethersulfon PES

(Tabelle 9.21)

Amorpher, polarer Thermoplast, kaltzäh, aber kerbempfindlich, warmfest bis 180 °C, in Luft bis 200 °C beständig, geringe Kriechneigung, gute elektrische Isoliereigenschaften.



Handelsnamen: Ultrason E, Victorex PES

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Schwer entzündbar, teilweise erlöschende, rußende Flamme, Geruch nach Schwefelwasserstoff.

Anwendungen: Für durchsichtige Bauteile mit hoher mechanischer, thermischer und elektrischer Beanspruchung. Elektrowärmegeräte, Teile im Motorraum von Kraftfahrzeugen.

Polyimide PI, PAI, PEI u.a.

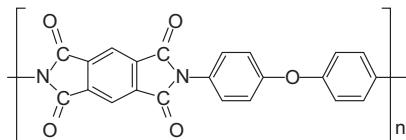
(Tabelle 9.21)

Polyimide sind als Kunststoffe mit der höchsten Wärmestandfestigkeit und auch wegen des Preises besonders im Flugzeugbau eingesetzt. Um eine thermoplastische Verarbeitung zu ermöglichen sind zahlreiche Copolymeren entwickelt worden.

Polyimide enthalten im Monomer neben Benzolringen, die durch O-Atome verknüpft sind, weitere ringförmige Strukturen mit einem N-Atom, die sog. Imidgruppe.

PI ist ein amorpher dunkler Kondensationskunststoff, nur durch Sintern zu verarbeiten und für kaltzähe und warmfeste Folien (bis 260 °C an Luft).

PAI (Polyamidimid) und PEI (Polyetherimid) sind thermoplastische Sorten, die auch zu komplizierten, thermisch hoch beanspruchten Formteilen verarbeitet werden. Sie sind beständig gegen Kohlenwasserstoffe und viele Abkömmlinge.



Handelsnamen: Polymer SP, Vespel, Sintimid

Erkennungsmerkmale, Brennprobe: Schwer entflammbar, glüht in der Flamme auf, schmilzt nicht, riecht nach Phenol.

Anwendungen: Mit den Füllstoffen PTFE oder Graphit sind es Werkstoffe mit niedriger Reibzahl für ungeschmierte Lager bis zu 250 °C. Faserverstärkt für Pumpen- und Ventilatorlaufräder, Zahnräder.

9.7 Elastomere

Elastomere sind gummi-elastische Kunststoffe, sie haben aufgrund ihrer Struktur (→) eine hohe elastische Dehnung mit Rückstellkräften.

In den Elastomeren sind die verknüpfelten Fadenmoleküle weitmaschig vernetzt, so dass sie bei Dehnung gestreckt werden (Zustand höherer Ordnung), aber nicht abgleiten können. Nach Entlastung versuchen sie den ursprünglichen Zustand mit geringerer Ordnung herzustellen.

Am Anfang dieser Stoffe steht der Naturkautschuk (Latex), ein Polymer aus ca. 5000 Molekülen Isopren (→) mit einer Doppelbindung. In diesem Zustand ist er weich und plastisch verformbar.

Nach Mischung mit Schwefel werden bei der Vulkanisation (Temperaturen 143...180 °C) die Doppelbindungen durch S-Atome weitmaschig miteinander vernetzt (Bild 9.26). Der Stoff wird zu unschmelzbarem und elastischem Gummi (Goodyear 1839).

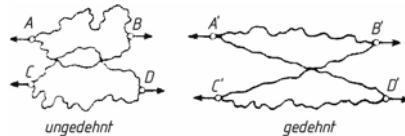


Bild 9.25 Schwach vernetzte Fadenmoleküle unbelastet und gedehnt

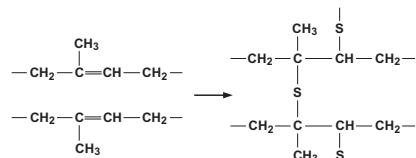


Bild 9.26 Isopren, Methyl-Butadien, Strukturformel und Vernetzung

Die ersten Anwendungen waren Schläuche und Reifen für die wachsende Auto-Industrie.

Mit der Anzahl der Vernetzungen kann die Elastizität beeinflusst werden. Bei Gummi war das durch den S-Gehalt der Mischung möglich (→).

Mit der Technikentwicklung entstanden neben den Automobilreifen viele neue Anwendungsgebiete für elastische Stoffe mit neuen Anforderungen (→).

Naturkautschuk kann diese Anforderungen nicht erfüllen, deshalb sind für die unterschiedlichen Anforderungen zahlreiche Kautschuksorten entwickelt worden. Sie entstanden durch Veränderung der chemischen Struktur mithilfe anderer Polymere, CH-Gruppen oder Einbau von Elementen wie Chlor oder Fluor.

Abrieb- und Zugfestigkeit werden durch feinkörnige mineralische Zusätze erreicht, z.B. bis zu 50 % Ruß in der Gummimischung für die Laufflächen der Reifen.

Weitere Zusätze sind Alterungsschutzmittel (→), die gegen Einwirkung von Sauerstoff, Ozon (Oxidation) und Licht stabilisieren oder Ermüdung bei dynamischer Beanspruchung verhindern sollen.

Beispiel:

Sorte	S-Gehalt	Eigenschaft
Weichgummi	3...5 %	weich-elastisch
Hartgummi	35...50 %	hart-spröde

Beispiele Förderbänder, Gummifedern, Bauelemente zur Schwingungsdämpfung oder zum Schutz oder Abdichtung bewegter Maschinenteile, wie Kolbenstangen und Wellen.

Anforderungen

sind z.B.: **Beständigkeit** gegen die unterschiedlichsten organischen und anorganischen Stoffe, die mit bewegten Metallteilen in Berührung kommen, z.B. bei Wellendichtungen und Faltenbälgen.

Konstanz der mechanischen Eigenschaften in der Kälte (Kältemaschinen, flüssige Gase) oder bei höheren Temperaturen.

Gasundurchlässigkeit z.B. für Schläuche.

Abriebfestigkeit, Wärme- und Alterungsbeständigkeit bei Reifen und Förderbändern.

Alterung: Die ungenutzten Doppelbindungen in den Molekülen können durch Sauerstoff oder UV-Strahlen aktiviert werden, was zu weiterer Vernetzung und damit zu Versprödung führt.

Tabelle 9.22: Auswahl von Elastomeren

Kautschuk (K.)	Durch chemische Reaktion (Vulkanisation) vernetzte Ketten mit Knäuelstruktur, danach nicht mehr plastisch verformbar.			
	Symbol	Anwendungen	Beständigkeit gegen	Temperatur-Bereich °C (kurz)
Styrol-Butadien-K.	SBR	Reifenmischungen, Kabelmäntel, Schläuche	nicht gegen Öle	-40...100 (120)
Chloropren-K.	CR	Faltenbälge, Kühlwasserschläuche	bedingt geg. Öle	-45...100 (130)
Nitril-Butadien-K.	NBR	Dichtungswerkstoff im Kfz.- und Maschinen-Bau	Öle, Treibstoffe	-30...100 (130)
Butyl-K.	HR, CHR	Geringe Gasdurchlässigkeit, für Reifenschläuche, gasdichte Membranen	Chemikalien, Wasser, Alterung	-40...130
Methyl-Silikon-K.	MQ	Weitere Sorten m. Phenyl-, Vinyl-Gruppen	Ozon, Wasser, Wärme, Öl	-60...175 (300)
Fluor-Silikon-K.	MVQ	Dichtungen in Kfz., Luft- und Raumfahrt		-60...200
Ethylen-Propylen-Dien-K.	EPM EPDM	Massive und Moosgummi-Dichtprofile, Kfz.-Stoßfänger, O-Ringe, Kabelmäntel	Witterung, Ozon, Alterung	-40...130 (150)

Thermoplastische Elastomere TPE haben gummiähnliche Eigenschaften, sind aber thermoplastisch zu verarbeiten weil sie keine unauflösbarer chemischen Vernetzungen bilden, sondern mechanisch durch Verschlaufungen von härteren (unbeweglichen) Molekülteilen, z.B. Styrol, die sich erst bei höheren Temperaturen auflösen. Dadurch sind TPE wieder einschmelzbar mit Vorteilen (→):

Vorteile der TPE:

- Schnellere Taktfolgen bei der Produktion, weil sie keine Verweilzeit für die Vernetzungsreaktion im Werkzeug benötigen.
- Produktionsrückstände sind wieder verwertbar, das stoffliche Recycling der Bauenteile am Ende ihrer Lebensdauer wird möglich.

Tabelle 9.23: Thermoplastische Elastomere, Auswahl

Thermoplastische Elastomere TPE	Bei der Propf- oder Blockpolymerisation entstehen verknäelte Moleküle mit mechanisch harten und weichen Abschnitten, wobei die harten wie Vernetzungen wirken. Sie sind thermoplastisch formbar.		
	Anwendungen	Beständigkeit gegen	Temperatur-Bereich °C (kurz)
PUR-Elastomer TPE-U	Kabelmäntel, Faltenbälge, Zahnriemen, Schleifteller, Skistiefel	Benzin, Ozon, nicht Heißwasser	-40...80 (110)
Styrol/ Butadien TPE-(SB)	Schlüche, Profile, Kabelisolier- und Mantelwerkstoff, verträglich im Verbund mit PE, PP, ABS und PA	Säuren, Basen, Alterung gut, Öle gering	-40...80 (90)
Ethylen/ Propylen TPE-O	Ersatz für PVC-P, Kfz.-Teile wie Stoßfänger, Spoiler, Armaturenbretter. Sport-, Schuh-, und Spielzeugindustrie	Basen hoch, Säuren, Alterung, nicht gegen Öl und Abrieb	-40...115

TPE (3 weitere Grundsoranten) sind Austauschstoffe für vulkanisierten Kautschuk und weichgestellte Polymere

9.8 Statistische Daten und Eigenschaftsvergleiche

Tabelle 9.24: Kunststoffverbrauch in der Automobilindustrie, Westeuropa 1998, nach Sorten

Polymer	PP	PUR	ABS	PA	PVC	PE	UP	PET, PBT	POM	PMMA	PC	Blends	Sonst.
Anteil %	34	16	9	9	7	6	4	2	2	2	1	4	3

Anwendungsbereich	Innenteile	Außenteile	unter der Motorhaube	Elektrik, ohne Kabel
Anteil %	47	22	20	11

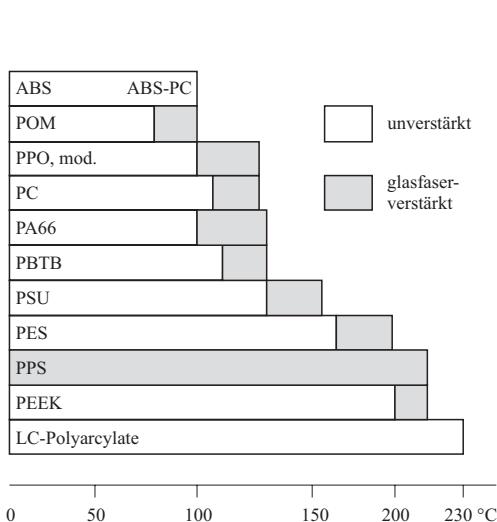


Bild 9.27 Dauergebrauchstemperaturen von Thermoplasten
(nach Saechting)

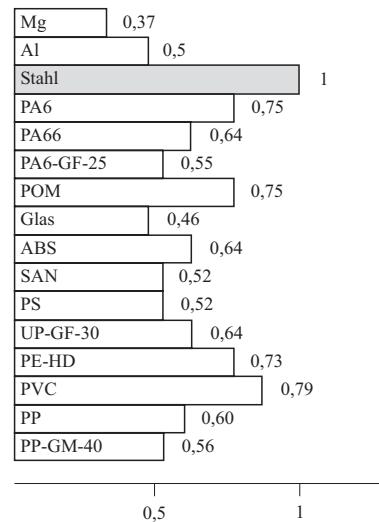


Bild 9.28 Relativer Gewichtsaufwand für Bau-
teile gleicher Biegesteifigkeit aus verschiedenen
Werkstoffen im Vergleich mit Stahl (= 1)
(nach Schäfer)

Literaturhinweise

- Ehrenstein, G.: Mit Kunststoffen konstruieren. Hanser Verlag 2001
- Duroplaste, Hanser Verlag 1997
- Hellerich/Harsch/Haenle: Werkstoffführer Kunststoffe. Hanser Verlag 2004
- Menges, G.: Werkstoffkunde Kunststoffe. Hanser Verlag 2002
- Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. Hanser Verlag 2002
- Saechting, H.J.: Kunststoff-Taschenbuch, 29. Auflage Hanser Verlag 2005

Informationen

- Deutsches Kunststoff-Institut www.dki-online.de
- Informationen über BAYER-Kunststoffe mit Datenblättern www.bayer.plastics.com

10 Verbundstrukturen und Verbundwerkstoffe

10.1 Begriffsklärung

Verbundlösungen hat es in der Technik schon länger gegeben. Sie sind nicht nur auf Werkstoffe beschränkt (→).

Dabei werden stets verschiedene Elemente zu einem Ganzen verknüpft. Grundgedanke dabei ist, durch Arbeitsteilung im Verbund:

- Höhere Leistungen, bessere Funktion,
- Material- und Energieeinsparung und evtl.
- Kosteneinsparung zu erreichen.

Dazu werden die Komponenten so ausgesucht und konstruktiv verbunden, dass jeder Stoff in seinen speziellen und für den vorliegenden Fall benötigten Eigenschaften beansprucht wird (→).

10.1.1 Verbundkonstruktionen

Verbundkonstruktionen bestehen aus zwei oder mehr Werkstücken, die aus verschiedenen Fertigungsgängen stammen und durch *Fügen* zu einem Bauteil kombiniert werden. Solche Lösungen können *konstruktiv* oder aus Gründen einer *wirtschaftlicheren Fertigung* gewählt werden.

Die Eigenschaftsunterschiede der Partner in z.B. E-Modul, Härte oder Wärmedehnung sollten nicht zu groß sein, um elastische Verformungen durch Eigenspannungen gering zu halten. Bei Keramik-Metallverbunden sollte Keramik auf Druck beansprucht werden (→).

10.1.2 Werkstoffverbunde

Kennzeichen ist das Fügen der Werkstoffe durch *unlösbar* Verbindungen. Einen großen Anteil haben die *Schichtverbunde*, sie werden als Halbzeug oder durch Beschichtung von Bauteilen hergestellt.

Hier sind fast beliebige Kombinationen von Grund- und Schichtwerkstoffen möglich, wenn es die Verträglichkeit der Werkstoffe gestattet. Schichtwerkstoffe und Beschichtungsverfahren sind im Abschnitt 11.2 behandelt.

Beispiele: Kraftwerksverbund, Verbunddampfmaschine (mit Hoch- und Niederdruckzylinder).

Einer der ältesten **Verbundwerkstoffe** ist im Lehmhausbau eingesetzt worden: Lehm, mit Häcksel oder auch Langstroh vermengt, mindert sowohl die *Schrumpfung* als auch *Rissneigung*. Die modernen Faserverbundwerkstoffe sind die Weiterentwicklung dieses Prinzips.

Beispiel Stahlbeton: Beton ist druckfest, hat aber keine Zugfestigkeit. Bei Biegeträgern (Fenstersturz) aus Stahlbeton werden in der unteren auf Zug beanspruchten Zone die Kräfte von der Stahlarmierung aufgenommen.

Beispiele: Verbundkonstruktionen

Al-Kolben mit keramischen Einsätzen aus Aluminiumtitannat (AlTi) im Kolbenboden für höhere thermische Belastung, eingegossen oder eingeschrumpft,

Auspuffkrümmer-Auskleidung (Portliner) aus Keramik (Aluminiumtitannat, AlTi) in eine Al-Legierung oder GJL eingegossen.

Fräsdorne und -spindeln mit vorgespannter keramischer Hülse (höherer E-Modul = kleinere Durchbiegung).

Beispiele: Werkstoffschichtverbunde

Schichtpressstoffe: Hartpapier, Hartgewebe, Kunstharzpressholz.

Sandwichstrukturen Metall-Kunststoff-Metall.

Beschichtungen von Halbzeugen und Fertigteilen nach vielen Verfahren mit metallischen, keramischen oder polymeren Stoffen in Schichtdicken von 1 Atomlage bis in den mm-Bereich.

Verbundschweißen (konstruktiv). Wirtschaftliche Fertigung durch Fügen von z.B. Rohren und anderen Walzprofilen mit Gussstücken. Für letztere wird häufig weißer, schweißbarer Temperguss verwendet (Tabelle 6.6).

Diffusionsschweißen von Stoffen, die nicht durch Schmelzschweißen verbunden werden können, weil sich spröde intermetallische Phasen in der Naht bilden. Verbindung durch Platzwechsel von Atomen unter hohem Druck + Temperatur unter Schutzgas oder Vakuum.

Verbundguss verschiedener Werkstoffe. Dabei entsteht eine intermetallische Zwischenschicht als Verkleinerung.

Aufkleben von hochsteifen C-Faser-Epoxid-Laminaten auf Al-Strangpressprofile zur Erhöhung der Steifigkeit, auch als Innenverstärkung von Al-Rohren (→ Beispiel 4 in 1.2.4).

10.1.3 Verbundwerkstoffe

Bei Verbundwerkstoffen werden in der Regel Stoffe kombiniert, die der Bindungsart nach zu verschiedenen Gruppen gehören (→ Tabelle).

Es gibt auch Verbunde aus artgleichen Komponenten, die dann aber unterschiedliche Form besitzen (→).

Verträglichkeit: Für den Verbund der z.T. chemisch gegensätzlichen Stoffe sind *Benetzung*, *Hafung* und *Verträglichkeit* sehr wichtig. Das begrenzt die Kombinationsmöglichkeiten. Vielfach wird die Verstärkungsphase (Fasern) vorher beschichtet, um Reaktionen mit der Matrix zu verhindern.

Verbundwerkstoffe bestehen aus mindestens zwei Phasen. Kennzeichen ist eine gewisse **Homogenität** bei makroskopischer Betrachtung. Ausnahmen sind Schichtverbunde und **graduierte** Werkstoffe (→ Beispiel). Bei letzteren ändert sich das Verhältnis der Phasen, z.B. zur Oberfläche hin, in Stufen (fertigungsbedingt).

Beispiel: Auslassventile von Hochleistungsmotoren, stumpfgeschweißter Verbund:

- Schaft aus Ventilstahl X45CrSi9-3, hartverchromt, Kopf induktionsgehärtet.
- Teller aus NiCr20TiAl (Nimonic 80A, hochwarmfeste, ausgehärtete Legierung)

Beispiel: Stahlwalzen mit einer dicken Oberflächenschicht aus PM-Hartstoff zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit durch heißisostatisches Pressen, HIP, sog. „Aufhipen“.

Verbindungen von Keramik mit Metallen.

Verbundguss: Mehrschichtlager, Al-Verbundguß mit Gusseisen für Bremstrommeln und Motoren-Rippenzylinder (Al-Fin-Verfahren). Einbetten von harten Carbiden in verschleißbeanspruchte Oberflächen von Gussteilen in Hartzerkleinerungsmaschinen.

Beispiel: Versteifung von Portalkonstruktionen für Laserschneidgeräte aus Al-Legierungen.

Metalle	Metallbindung vorherrschend
Polymere	Zwischenmolekulare Bindung der Makromoleküle
Keramik	Ionen- oder Elektronenpaarbindung und Mischformen

Beispiele artgleicher Verbunde: Keramische Stoffe werden mit Fasern gleicher Art zur Verbesserung der Zähigkeit verstärkt, SiC-Faser in SiC-Matrix, C-Faser in einer Graphitmatrix.

Unverträglichkeit: Die Fasern gehen bei höheren Temperaturen in der Matrix in Lösung oder bilden oberflächlich neue Phasen. Wenn diese ein größeres Volumen besitzen, wird die Matrix unter Druckspannungen gesetzt, die zu Rissen führen können.

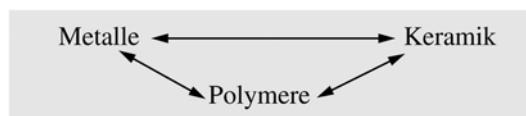
Beispiel: Gradierte Bauteile: Innenzahnkranz, 60 mm Durchmesser durch VPS (Vakuum-Plasma-Spritzen) in Schichten hergestellt. Innen aus CrV-Stahl, außen CrNi rostfrei. Auf diese Weise lassen sich teure Werkstoffe einsparen und gleichzeitig der schroffe Übergang vom Kern zum Rand vermeiden (Haftungsprobleme).

Verbundwerkstoffe entstehen in den meisten Fällen erst *während* der formgebenden Arbeitsgänge aus den Komponenten. Die Folgen sind:

- Werkstoffeigenschaften sind sehr stark von den Verfahrensbedingungen abhängig (\rightarrow),
- die Qualitätssicherung ist aufwändig und oft nur durch ständige Überwachung der Verfahrensbedingungen möglich.

10.1.4 Struktur und Einteilung der Verbundwerkstoffe

Als Phasen können in Verbundwerkstoffen miteinander kombiniert werden:



Die nach Masse, Volumen oder Dicke überwiegende Komponente ist die **Matrix** (\rightarrow), auch Grundmasse, Substrat oder Kernwerkstoff. Darin ist die **verstärkende Phase** eingebettet. Sie soll bestimmte Eigenschaften des Matrixwerkstoffes verbessern oder auch erst hervorrufen.

Bezeichnung der Verbundwerkstoffe

Im Sprachgebrauch üblich ist:

- Werkstoff und Form der verstärkenden Phase, der Matrixname wird nachgestellt (\rightarrow).

Wichtige Eigenschaften, z.B. thermische und Verformungs-Eigenschaften, werden von der Matrix bestimmt. Deshalb gibt es eine übergeordnete Gliederung nach der Matrix in

- **MMC**, Metall-Matrix-Composite und
- **CMC**, Ceramic-Matrix-Composite.

Die Vielfalt der Verbundwerkstoffe ergibt sich durch die möglichen Kombinationen von einer

- **Matrix** aus Metallen, Polymeren, Keramiken mit einer Auswahl der Werkstoffe für die
- **Verstärkungsphase** aus Metallen, Polymeren oder Keramiken, die in
- **vier Strukturen** (Schicht, Faser, Teilchen, Durchdringung) möglich sind.

Reinheit und Zustand der Ausgangsstoffe (z.B. Korngröße und ihre Verteilung) und die Bindung zwischen den Phasen wirken sich stark auf die Eigenschaften aus.

Verfahrensbedingungen (Prozessparameter) sind z.B. Temperaturen, Drücke, Einströmgeschwindigkeit und Zähigkeit der Matrix, Gehalt an Verarbeitungshilfsmitteln. Die zerstörungsfreie Prüfung muss evtl. 100 %ig durchgeführt werden.

Alle drei Arten können sowohl als Matrix als auch in der Verstärkungsphase auftreten. Dadurch sind die Kombinationsmöglichkeiten sehr groß. Sie werden auf den Gebieten erprobt, wo herkömmliche Werkstoffe nicht mehr in ihren Eigenschaften gesteigert werden können.

Die **Matrix** (Mutterphase) übernimmt in der Regel die Erhaltung der Form des Bauteiles, die **Stützung** der anderen Phase, hält sie bei Beanspruchung in ihrer Lage und **schützt** sie vor Feuchtigkeit und Chemikalien.

Die **Verbundphase** übernimmt die Funktionen, zu denen die Matrix auf Grund ihres Eigenschaftsprofils nicht in der Lage ist.

Beispiele für die Benennung:

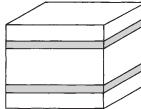
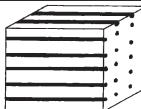
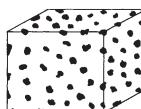
Glasfaser-Kunststoff GFK,
glasmatteverstärkte Thermoplaste GMT,
oxidteilchenverstärkte Al-Legierungen ODS,
metallfaserverstärkte Ofenbaustoffe,
kunstharzgetränkter Graphit.

composite: (engl.) zusammengesetzt

Wichtig ist die Verträglichkeit der beiden Komponenten, damit kein Abfall der Verbund-eigenschaften eintritt:

Die Haftung zwischen den Partnern besteht aus mechanischer Verklammerung und Adhäsion und wird interlaminare Scherfestigkeit genannt. Sie wird bei steigenden Temperaturen durch chemische Reaktionen oder Diffusionsvorgänge zwischen den Partnern gefährdet

Tabelle 10.1: Übersicht über Verbundstrukturen mit Beispielen

Verbundart	Struktur	Metallmatrix	Polymermatrix	Keramikmatrix
Schicht-Verbund: Verstärkungs- oder Funktionsphase als Deckschicht oder abwechselnd		Blech/Dämmsschicht-Verbunde, Sandwich-Platten	Hartpapier, Hartgewebe und Kunstharzpressholz	
Faser-Verbund: Dünne Fasern (wenige µm dick), gerichtet oder regellos		Al-Oxidfaser verstärkte Al-Kolben für Verbrennungsmotoren	Glas- oder Kohlenstofffaserverstärkte EP- oder UP-Harze	Metallfaserverstärkte Hochtemperaturziegel für Ofenauskleidung
Teilchen-Verbund: Feinste, gleichmäßig verteilte Kristalle (bzw. amorphe Körper) in der Matrix		Carbidteilchen in Cobalt (Hartmetall) Al-Oxidverstärktes Al (PM-Werkstoffe)	Duroplaste mit Talcum, Holzmehl oder Glaskugeln gefüllt	TiC-Teilchen verstärktes ZrO2
Durchdringungs-Verbund Raumnetzartige Durchdringung eines porösen Körpers mit der anderen Phase	 	Fett-infiltrierte Sinterbronze als Lagerwerkstoff, Cu-infiltriertes Wolfram für Schaltkontakte.	mit Kunststoff gebundene Schleif scheiben	Si-infiltriertes SiC, harzimprägnierter Elektrographit für Wärmetauscher

10.2 Schichtverbundwerkstoffe

An dieser Stelle werden flächige Halbfabrikate beschrieben, die aus Schichten verschiedener Stoffe bestehen. Platten aus Duroplasten mit flächigen Verstärkungen aus Papier, Geweben oder Holzfurnieren (→ Abschnitt 9.5).

Sandwich-Platten sind Verbunde aus zugfesten dünnen Deckschichten mit einer leichten schubfesten Zwischenschicht. Der Abstand bewirkt eine hohe Steifigkeit des Verbundes bei geringem Gewicht.

Verbunde aus Metall und Dämmstoffen zeigen anschaulich die Arbeitsteilung:

- Metallblech, formsteif, aber gut schall- und wärmeleitend, übernimmt den Schutz vor Korrosion und Verletzung,
- Mineralfaser oder Polymerschaum in einer Zwischenschicht übernimmt die Schall- oder Wärmedämmung (→ Beispiele).

Beispiele für Sandwichplatten: Al-Bleche, mit Schaum- oder Wabenkern verklebt, haben eine 10...100-mal größere Steifigkeit als Platten aus dem metallischen Vollmaterial. Verwendung für Dach- und Wandverkleidungen im Hochbau, Zwischenböden im Fahrzeugbau.

ALUCOBOND: Verbund aus 2 x 0,15...0,5 mm Al-Blech mit Kunststoff oder Mineral-Wärmedämmstoff, kaltformbar. Biegen, Bördeln, Durchsetzfügen, Schneiden und Stanzen sind möglich. Ähnlich ist DIBOND (ALCAN).

BONDAL: Verbund aus Stahl/Kunststoff/Stahl (verzinkt), 0,3...3 mm dicke Bleche mit viskoelastischem Kunststoff von 0,1...0,4 mm Dicke, tiefziehfähig, für Luft- und Körperschalldämmung im Schiffsinnenausbau, für Dach und Wandprofile, Gehäuse für Baumaschinen, Kfz-Radhäuser, -Bodenbleche, -ölwanne und -zylinderkopfdeckel (Hoesch).

Als Zwischenschicht wird auch Streckmetall eingesetzt (→). Der Verbund deckt die Beanspruchung (thermisch und korrosiv) von z. B. Rohrleitungen für die Rauchgasentschwefelung ab.

Plattierungen, meist Metall auf Metall ergeben Funktionsschichten:

- Lötfähige Schichten aus Cu und -Legierungen oder Ni auf schlecht lötbares Basiswerkstoffen,
- Korrosionsschutzschichten auf Blechen und Bändern.

Walzplattieren, warm oder kalt, wird mit einer Dickenreduzierung von min. 50 % nach Oberflächenvorbehandlung durchgeführt. Dabei verschweißen die Lagen miteinander. Rohre werden auch innen durch heißisostatisches Pressen mit hochlegierten Pulvern beschichtet und nachträglich warmwalzt oder stranggepresst.

Weitere Möglichkeiten sind Sprengplattieren auch großflächiger Teile oder thermisches Spritzen.

MeliCon. Leichtbaublech aus 3 Schichten z.B.

1 mm Deckblech (2.4602) NiCrMo

Streckmetall als Zwischenlage 1.4301

1 mm Deckblech aus 1.4301 (aust. Stahl). widerstandsverschweißt, reduzierte akustische und thermische Leitfähigkeit, dadurch kann die Außenisolierung verringert werden.

Beispiele: Cu-plattiertes (2 x 0,05 mm) Edelstahlblech (0,41 mm) zum Verlöten für die Herstellung von Wärmetauschern.

Edlere (Ni, Cr-Ni-Stahl) oder unedlere (Al) Schichten auf Baustahl plattierte. Al-99 auf AlCu-Legierungen.

Verwendung: Leitungsrohre, Behälter in der Offshoretechnik, wenn Sauergas mit Anteilen von H₂S und Chloriden verarbeitet wird. Diese Verbundlösung ist günstiger als eine massive aus z.B. austenitischen Stählen mit niedriger Streckgrenze (größere Wanddicken) oder Ni-Basis-Legierungen (teuer).

Durch Sprengplattieren werden z.B. Kesselböden auf der Innenseite beschichtet.

10.3 Faserverbundwerkstoffe (FVW)

10.3.1 Faserwerkstoffe und Eigenschaften

FVW bilden die Gruppe mit der größten Anwendung. Der Grund liegt in der hohen Festigkeit von *dünnen* Fasern (Tabelle 10.2). Der Abstand der atomaren Fehlstellen ist bei ihnen kleiner als in dickerem Material. Neben den mechanischen Werten sind z.B. noch Dichte, Wärmeleitfähigkeit und die max. Einsatztemperatur für die Wahl maßgebend. Die niedrige Dichte der meisten Fasern macht sie für Leichtbaustoffe interessant.

Fasern sind oft selbst „Verbunde“ aus einer Metall- oder C-Seele und aufgedampften Schichten aus SiC, Bor u.a. Die Herstellung ist aufwändig (z.T. höchste Temperaturen zur Keramisierung) und damit teuer.

Für die Auswahl entscheidet der Preis von ca. 2 bis 5 EUR/kg für Glasfasern. Glasfaserverstärkte Kunststoffe haben deshalb eine breite Anwendung gefunden.

Beispiele: In Klaviersaitendrähten kann durch verschiedene Maßnahmen die Zugfestigkeit bis auf 3000 Mpa gesteigert werden. Solche Werte sind für dickere Querschnitte nicht erreichbar.

Tabelle 10.2: Faserwerkstoffe und ihre Festigkeiten (Maximalwerte für Ø von 3...15 µm)

Werkstoff	R _m in GPA	E %	A g/cm ³	Temp. max. °C
Glas	4,6	85	5	2,5
Aramid	3,4	500	2	1,45
Kohlenstoff	5,0	700	1,5	1,8
Al-Oxid	2,0	470	0,8	3,9
Si-Carbid	3,0	400	1,5	3,0
Bor ¹⁾	3,5	400	1	3,3

¹⁾ Borfasern mit W-Seele und 140 µm Ø.

Informationen (Verstärkungsfasern): Eigenschaftsvergleiche: www.lzr-muenchen.de/

Höhere Steifigkeit und Festigkeit erbringen C-Fasern, die bis 16...60 EUR/kg kosten. Eine Mittelstellung nehmen Aramidfasern ein (z.B. KEVLAR®).

Für warmfeste Verbundwerkstoffe sind SiC-, C-Fasern und Al-Oxid-Fasern geeignet. Hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt SiC, geringe Al-Oxid.

Oberflächenbehandlung der Fasern (Interface, Schlichte, coating) hat den Zweck:

- die *Benetzung* durch den Matrixwerkstoff zu sichern, damit die kraftschlüssige Verbindung zwischen Faser und Matrix gewährleistet ist,
- *Reaktionen* zwischen Faser und Matrix zu verhindern, welche die Haftung vermindern und bei höheren Temperaturen schneller ablaufen, z.B. bei Kontakt von Fasern mit flüssigen Metallen,
- Schutz bei der Weiterverarbeitung bieten.

Je nach Ausrichtung der Fasern tritt Anisotropie auf und wird bei hochbeanspruchten Teilen durch Bündelung der Fasern in Zugspannungsrichtung ausgenutzt. Nach der Lage der Fasern unterscheidet man folgende Fasergelege:

Unidirektional (UD): Fasern liegen möglichst exakt parallel, das liegt bei Rovings (Strängen) und Tapes (Bändern) vor.

Bei UD-verstärkten Werkstoffen ist die Zugfestigkeit in Faserrichtung sehr hoch, jede Lageabweichung davon vermindert die Festigkeit in dieser Richtung stark (Bild 10.1).

Bidirektional (BD) sind Gewebe, deren Fasern unter 90° zueinander liegen.

Multidirektional (MD) sind Fasermatten aus Schnittfasern (Wirrfasern) oder wenn dickere Laminate aus verschiedenen gerichteten Geweblegaten verarbeitet werden.

10.3.2 Faserverstärkte Polymere (\rightarrow 9.4.3)

Faserverstärkte Kunststoffe bilden die größte Gruppe der Verbundwerkstoffe, mit denen auch langzeitige Erfahrungen vorliegen.

C-Fasern werden als **HM-Typ** mit hohem E-Modul/kleinere Bruchdehnung, als

HST-Typ mit hoher Zugfestigkeit/mehrfahe Bruchdehnung und

IM-Typ mit mittlere Festigkeit/hohe Bruchdehnung hergestellt.

Aramide sind **aromatische Polyamide**. Ihre Monomere besitzen in den Ketten neben der Amidgruppe noch Benzolring(e).

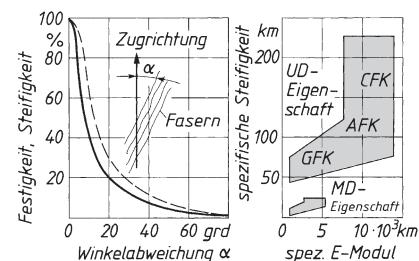


Bild 10.1 Richtungsabhängigkeit von Faserverbundwerkstoffen

- a) Einfluss einer Winkelabweichung zwischen Faserlage und Richtung der Zugbeanspruchung bei UD-Laminaten mit 60 % Faser.
- b) Unterschied zwischen anisotropen UD- und quasiiotropen MD-Verbunden.

Natürliche, nachwachsende **Fasern** sind z.B. Ramie, Sisal, Flachs und Hanf für gering beanspruchte Massenteile wie Kfz.-Innenverkleidungen mit biologisch abbaubaren Polymeren auf Stärkebasis (Biopolymere).

Hybridgewebe bestehen z.B. aus steifen C-Fasern mit Schussfäden aus dehnbarem Aramid. Sie lassen sich besser an die Konturen der Form anpassen.

Ihr Vorteil besteht in der niedrigen Dichte der Polymere. Hinzu kommt die leichte Verarbeitbarkeit der plastischen Massen bei niedrigen Temperaturen.

Dadurch haben sie mit Abstand höhere spezifische Festigkeiten (Reißlängen →) und Steifigkeiten (E-Modul) als die Metalle (→ Bild 10.2).

Spezifische Festigkeit R_1 (Reißlänge)

$$R_1 = R_m / g \rho$$

R_1	R_m	g	ρ
km	MPa	m/s^2	kg/dm^3

Reißlänge: Anschaulicher Vergleichswert: Es ist die Länge eines frei hängenden Stabes (Gedankenexperiment), bei dem im Einspannquerschnitt die vorhandene Spannung den Wert der Zugfestigkeit erreicht, so dass nach Einschnürung der Bruch eintreten würde.

Neben *duroplastischen* UP- und EP-Harzen als Matrixwerkstoff für flächige Konstruktionsteile werden zunehmend glasmattenverstärkte *Thermoplaste (GMT)* verwendet. Sie bieten Vorteile (→) gegenüber Prepregs aus Duroplasten (**SMC**).

Formpress-GMT haben regellose Endlosfasern, sind wenig fließfähig und nur für einfache, flächige Teile konstanter Wanddicke geeignet.

Fließpress-GMT haben Fasern unterschiedlicher Längen, die mit dem Thermoplast in die Hohlräume der Form fließen können. Dadurch sind Teile mit stärkeren Konturen, Rippen und auch Hinterschneidungen möglich, die dann überall einen gleichen Glasanteil besitzen.

Unidirektionale GMT haben neben wenigen Wirrfasern überwiegend parallel gerichtete Fasern und in dieser Richtung höhere Festigkeit und Steifigkeit.

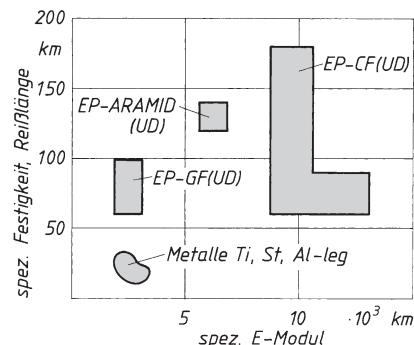


Bild 10.2 Spezifische Festigkeit und E-Modul verschiedener Werkstoffe

GMT-Vorteile gegenüber SMC:

- Taktzeiten kleiner, da kein Aushärten,
- Produktionsabfälle sind leichter wieder zu verwerten (Recycling),
- Höhere Zähigkeit des Thermoplasts.

Beispiele: Flächige Bauteile an Fahrzeugen zur Geräuschminderung: Motorkapseln, Unterböden und Innenverkleidungen, Batteriehalter, Pedalböcke, Sitzschalen aus PP-GMT, Kfz.-Stoßfänger und Anschlussteile aus PA66-GMT.

10.4 Teilchenverbundwerkstoffe

Kennzeichen sind Teilchen mit rundlicher oder unbestimmter geometrischer Form in einer Matrix. Das ergibt meist einen *isotropen* Werkstoff.

Zu den Teilchenverbunden gehören viele bekannte Werkstoffe (→). Teilchenwerkstoff und -größe richten sich nach der geforderten Eigenschaftsverbesserung.

Beispiele für eingeführte Teilchenverbunde sind **Duroplaste** mit Füllstoffen (→ 9.5).

Sinterwerkstoffe mit Graphit oder MoS₂ als Festschmierstoff, mit Diamant als Werkzeug zur Steinbearbeitung,

Sinterhartmetalle mit Carbiden und Carbonitriden in einer Cobalt-Matrix.

Übersicht: Eigenschaftsverbesserung durch Teilchenverbunde

Eigenschaft	Teilchen	Beispiele
Festigkeit E-Modul	kleine harte Teilchen in geringen Abständen	Kunststoffe mit Füllstoffen (9.4.2+ 9.5) Oxidverfestigte AL-Legierungen (10.7.2)
Widerstand gegen Abrasion	größere harte Teilchen in homogener Verteilung	Schleifwerkzeuge mit Diamant, CBN, SiC in metallischer, keramischer oder Polymer-Matrix
Gleiteigenschaften	Graphit, Mo-Disulfid, PTFE-Teilchen in der Matrix	Trockengleitlager (11.3)

Polymerbeton (Reaktionsharzbeton RHB), auch Mineralguss genannt, steht für Maschinen- und Gerätegestelle in Konkurrenz zu Gusseisen. Er besteht aus 90...95 % Quarzkies verschiedener Körnung nach Sieblinie in einem duroplastischen Gießharz gebunden. Der geringen Schrumpfung wegen wird meist EP-Harz verwendet, daneben auch UP- und MMA-Harze. Vorteile ergeben sich aus der Kombination niedriger Dichte mit hoher Schwingungsdämpfung, verbunden mit Trägheit gegen Temperaturschwankungen durch niedrige Wärmeleitfähigkeit (→ Tabelle 10.3).

Anwendungsbereich sind Werkzeugmaschinen für hohe Oberflächenqualität mit Wärmeeintrag durch hohe Leistungen und Spindeldrehzahlen. **HSC**-Maschinen (→) erfordern wegen der hohen Beschleunigungen Leichtbaukonstruktionen, die auch günstig für z.B. Messtischplatten sind.

Teilchenverbunde liegen vielfach auch in Schichten vor, z.B. durch kombinierte galvanische Abscheidung von Metallen mit eingelagerten Hartstoffen (Diamant, SiC), oder mit PTFE als Festschmierstoff (→).

Tabelle 10.3: Vergleich GJL mit RHB

Eigenschaft	GJL	RHB ¹⁾
E-Modul GPa	105	40
R_m MPa	150...350	10...18
Druckfestigkeit MPa	200...900	140...500
Dichte ρ kg/dm ³	7,25	2,4
Dämpfung ---	0,0045	0,02
Wärmeleitfähigkeit λ W/mK	75	0,5
linearer Ausdehnungs-Koeffizient α $\mu\text{m}/\text{mK}$	10	10-20

¹⁾ je nach Harzanteil

Begriff: HSC (high speed cutting) Spanen mit höchsten Schnittgeschwindigkeiten und sehr kleinen Schnittzeiten. Zum Senken der Prozesszeit müssen Werkzeugträger schneller bewegt (beschleunigt bzw. verzögert) werden.

Teilchenverstärkte Metalle sind die wichtigste Gruppe dieser Verbundart und im Abschnitt 10.5.3 behandelt.

Herstellung auch durch Plasmaspritzen u.a. Verfahren (→ Schichtherstellung 11.2).

10.5 Durchdringungsverbundwerkstoffe

Kennzeichen sind zwei sich gegenseitig durchdringende Phasen. Meist liegt eine hochschmelzende Matrix mit offenen Poren vor, die von einer flüssigen Phase getränkt wird.

- Die Matrix übernimmt dabei den Erhalt der Form, z. T auch Verschleißbeanspruchung,
- die Durchdringungsphase Aufgaben wie z.B. Wärme- und Stromleitung oder Schmierung.

Beispiele: Kontaktwerkstoff aus gesintertem Wolfram-Gerüst und einer Cu-Phase als Durchdringung für hochbelastete Schaltkontakte (Abreißfunken) und Stumpfschweißbacken.

Selbstschmierende Gleitlager aus Sintereisen oder -bronzegerüst mit Fettfüllung.

Schaumstoffe mit offenen Poren können ebenfalls zu dieser Art Verbund gezählt werden. Die zweite Phase besteht aus Luft oder den zum Schäumen verwendeten Prozessgasen.

Harte Schaumstoffe (Polymer, Metall) dienen als Kerne für leichte und steife Sandwichkonstruktionen. Metallschaumteile werden auch als verlorener Kern beim Gießen von Hohlkörpern benutzt.

Bei geschäumten Stoffen dient die Zellstruktur (offen oder geschlossen) der Dämmung gegen Schall und Wärmeleitung oder der Verminderung der Dichte.

Bei offenen (durchgehenden) Porenräumen können die Schäume als Filter für Flüssigkeiten und Gase genutzt werden

Hinweis: Metallische Schäume 10.6.5

10.6 Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe MMC

10.6.1 Allgemeines

Für den Leichtbau von Fahrzeugen aller Art sind die Leichtmetalle Al, Mg und Ti von großer Bedeutung. Ihr Potenzial wird durch Verbunde stark vergrößert. Die Entwicklung der verstärkten Metalle wird vom Flugzeug- und Flugkörperbau vorangetrieben. Probleme der Kosten und Qualitätssicherung bremsen eine breitere Anwendung.

Matrix-Werkstoffe sind in der Regel *die* Metalle, die im Eigenschaftsprofil einen Mangel besitzen, der durch die Verstärkung kompensiert werden soll. Damit lässt sich der Anwendungsbereich des Metalles bzw. der Legierung erweitern.

Hinweis: In der Raumfahrt können für 1 kg Massseinsparung bis zu 5000 EUR. Mehrkosten anfallen, die durch die Treibstoffersparnis kompensiert werden.

In der Luftfahrttechnik sind es zwischen 250 und 500 EUR. und beim Automobil sind es nur noch 0,5 EUR.

Beispiele für nicht ausreichende Eigenschaften

Ungenügende Eigenschaft	Metalle	Verstärkung
E-Modul und Zugfestigkeit	Al, Mg, Ti	Oxidteilchen, Fasern, Schichtverbunde
Warmfestigkeit	Al, Mg, Stahl	Oxidteilchen
Verschleißwiderstand	Cu, Al , Mg	Oxidteilchen
Korrosionsbeständigkeit	Stahl, Al-Leg.	Schichtverbunde, Plattierungen
Lineare Längenausdehnung zu hoch	Mg, Al	Fasern, Teilchen
Gleit-Eigenschaften	alle	Graphitteilchen
Dichte zu hoch	alle	Luft, Gase (metallische Schäume)

Bei den Metall-Legierungen bildet sich das Gefüge (Kristallarten und der Anteil der Phasen) bei der Erstarrung nach den Gesetzmäßigkeiten der Zustands-Diagramme.

Die Eignung für bestimmte Fertigungsverfahren (Gießen, Umformen) lässt bei jedem Legierungssystem nur bestimmte Zusammensetzungen zu (→ Beispiel).

Beispiel: Der Carbidgehalt von Werkzeugstählen liegt wegen der Forderung nach Schmiedbarkeit bei max. 25 %.

Bei den MMCs werden die gewünschten Verstärkungsphasen meist in **fester Form** in die metallische Matrix eingebaut. Das ergibt breitere Möglichkeiten in der Wahl der Verstärkungsstoffe und ihrem Anteil am Gefüge.

10.6.2 Metallmatrix-Faserverbunde

Schwierigkeiten bereitet die gleichmäßige Verteilung der Fasern oder Teilchen im Metall. Es haben sich verschiedene Verfahren entwickelt:

- Einröhren in Schmelzen (max. 20 % Teilchen). Kurzfasern werden dabei meist ungleichmäßig über den Querschnitt verteilt, deswegen werden andere Fertigungswege erprobt (→).
- Schmelzinfiltration von Formlingen (Preform), die vorher zu einem Fasergelege montiert und in der Form fixiert werden müssen, damit sie nicht durch Auftrieb und Strömung in falsche Lagen verdrängt werden. Zum porenfreien Ausgießen sind kleine Drücke und Strömungsgeschwindigkeiten üblich, Pressguss (squeeze casting) oder Vakuumgießen.
- Thermisches Spritzen (Plasma-) zur Fixierung von Fasern auf Unterlagen,
- Pulvermetallurgisch (bis zu 40 % Teilchen oder Kurzfasern und meist für Formteile angewandt:

- Lotwalzplattieren. Schichten von C-Faserlagen und Al-Folien, mit AlSi12 als Lot beschichtet, werden bei 600 °C gewalzt. Zur besseren Benetzung sind die C-Fasern mit Ni bedampft.

Weitere Faserwerkstoffe sind SiC, Al₂O₃ Borfasern bestehen aus einer Seele von Wolframdraht, CVD beschichtet (→).

10.6.3 Metallmatrix-Teilchenverbunde

Schwerpunkt sind die dispersionsgehärteten Legierungen. Sie enthalten harte Teilchen, die sich in der Matrix auch bei hohen Temperaturen weder lösen noch mit ihr reagieren dürfen.

Ihre Festigkeitssteigernde Wirkung beruht auf der Behinderung von Gleitvorgängen (Wandern von Versetzungen), besonders der Kriechvorgänge bei hohen Temperaturen durch feinstverteilte Partikel (→).

RIMLOC-Verfahren (rapid induktions-melting): Ein pulvermetallurgisch hergestellter Zylinder wird in einem keramischen Tiegel induktiv sehr schnell geschmolzen und mit einem Stempel von unten in die darüber liegende Form gepresst. Dabei geht der Tiegelboden verloren. Durch die kurze Schmelzzeit kommt es nicht zur Entmischung.

Anwendungen: Partiell faserverstärkte Pressgusskolben für Dieselmotoren durch Eingießen mit getrennt gefertigten Faserformkörpern aus Al₂O₃-Kurzfasern zur Verstärkung des Randes der Brennraummulde (20 %-Faseranteil im Kolbenwerkstoff Al Si12CuMgNi (MAHLE).

Al-Legierung. C-faserverstärkt, 50 % Faseranteil, UD, Pressguss, Wärmedehnung Null, Zugfestigkeit $R_m = 1800 \text{ MPa}$, E-Modul bei 200 °C = 220 GPa > E_{Stahl}, zäh.

Anwendung für flächige Bauteile auch durch Sprühkomprimieren mit anschließender Warmverformung, bis zu 15 % Teilchen (→ 11.1.4). Metallische Faserverbunde sind auch durch Kleben möglich:

ARALL: Langfasern aus ARAMID werden zwischen Al-Bleche geklebt und ergeben einen faserverstärkten Al-Schichtwerkstoff, mit dem sich bis 20 % Masseinsparung erreichen lassen.

CVD-Beschichtung von Endlos-C-Fasern mit Pyro-C, TiN oder SiC in Dicken von 15...45 nm ist als Schutz vor Oxidation Diffusion und Reaktionen mit der Matrix erforderlich.

Feinstverteilte Partikel (Dispersoide) sind neben **Oxiden** auch **Carbide**, **Nitride**, **Boride** und **Graphit**.

Dazu dürfen bestimmte Teilchengrößen und Teilchenabstände nicht überschritten werden. Als Größe wird 0,01 ... 0,1 µm und ein mittlerer Abstand von 0,1...0,5 µm angegeben.

Die Industrie stellt zahlreiche dispersionsverfestigte Legierungen her (→). Sie haben höhere E-Moduln und Festigkeiten als die schmelzmetallurgisch hergestellten vor allem bei höheren Temperaturen (Bild 10.3), wo abgeschreckte oder warm ausgehärtete Sorten durch Nachanlassen bzw. Überalterung versagen, ihre Wärmedehnung ist kleiner.

Herstellungsverfahren sind:

Mechanisch legieren: Ständiges Zerkleinern, Verfestigen und Mischen in Kugelmühlen, sog. Attritoren zum Einstellen einer kleinen Korngroße und homogenen Verteilung der Dispersoide erzeugt die Presspulver zur weiteren PM-Verarbeitung. Wesentlich rationeller arbeitet das Sprühkompaktieren.

Sprühkompaktieren (→ 11.1.8), erzeugt Pressbolzen (bis zu 500 mm Ø und 2,5 m Länge) zum Strangpressen von Halbzeugen. Die nachfolgende Warmumformung ist wichtig, um die Oxidhäute der Pulverteilchen zu zerstören, wichtig für die Diffusion und Bindung zwischen den Pulverteilchen.

DISPAL-Sorten, Eigenschaften und Verwendung im Abschnitt 11.1.8. (PEAK Werkstoff GmbH), (www.erbsloe.de)

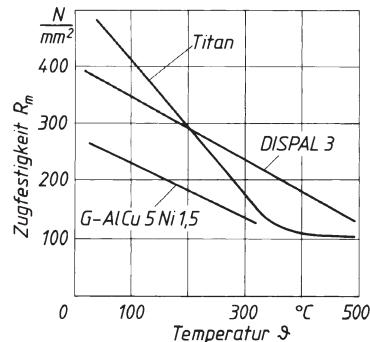


Bild 10.3: Warmfestigkeit von Al-Legierungen, ausgehärtet und dispersionsverfestigt (Erbslöh)

ODS-Legierungen (Oxid-Dispersion-strengthened Alloys), Sintermetalle, Schneidstoffe, TIZIT®, (www.Plansee.com)

Tabelle 10.4: Beispiele für Metallmatrix-Teilchenverbundwerkstoffe

Werkstoff	Beschreibung	Eigenschaftsverbesserung, Beispiel
PM 2000 (ODS-Legierung) 1.4768	FeCr20Al15,5Ti0,5+0,5Y ₂ O ₃ , hitzebeständiger, ferritischer Stahl	Hochwarmfest (bis 1200 °C/Luft), im Schwellbereich einsetzbar, Oxidation und Aufkohlung gering. Für z.B. Glasformen und Glasrührer eingesetzt
AlSi7Mg + SiC	10...15 % SiC (5...10 µm) in Feingusslegierung, warmausgehärtet	E-Modul steigt von 75 auf 92 x 10 ³ MPa, Festigkeit bei 260° C verdoppelt, für verschleißbeanspruchte Feingussteile
AlMgSiCu partiell mit 25% SiC-Teilchen verstärkt	Strangpressprofile mit SiC in der Randschicht, hergestellt mit mehrteiligen Pressbolzen aus zwei Werkstoffen (Koextrusion)	Verbesserung des Verschleißwiderstandes der Randschicht. Für Pistenraupenprofile, Zylinderlaufbüchsen, erhöhte Steifigkeit (E-Modul)
Glid Cop®	Cu-Teilchenverbundwerkstoff, mit Al mechanisch legiert, das sich dabei durch innere Oxidation zu feinstverteiltem Al ₂ O ₃ (0,3...1,1 %) umwandelt.	Härte und Streckgrenze des Cu steigen, ohne dass die elektr. Leitfähigkeit sinkt. Kaltverfestigung bleibt bis 600 °C erhalten. Für z.B. Punktschweißelektroden
Mg-Mg₂Si (übereutektisches MgSi)	30 % Mg ₂ Si (intermetallische Phase) im Mg. Schmelzmetallurgisch mit Kornfeinung durch seltene Erden hergestellt.	Entwicklung als Kolbenwerkstoff mit besseren thermischen Eigenschaften als Kolbenlegierung AlSi12CuMgNi bei kleinerer Dichte (< 1,9 g/cm ³)
Lokasil® (Mahle)	Poröse Si-Preform (Hohlzylinder) wird beim Gießen (squeezing-casting) mit AlMg9Cu3 infiltriert	In Motorblock eingegossene Zylinderbüchsen mit verschleißfesten Laufflächen, gleiche Wärmedehnungen

10.6.4 Metallmatrix-Durchdringungsverbunde

Diese Verbunde – auch Tränklegierungen genannt – entstehen durch Infiltrieren eines offenenporigen Sinterwerkstoffes (z.B. W oder Mo) mit einer flüssigen Schmelze (Cu), oder durch Sinterung bei Temperaturen oberhalb der niedrig schmelzenden Phase.

Die Durchdringung zweier Stoffe ergibt einen Verbund, in dem gegensätzliche Eigenschaften kombiniert werden können (→ Beispiel).

Die guten elektrischen Strom- und Wärmeleiter (Ag, Cu, Al) haben eine zu große Wärmeausdehnung ($\alpha = 17 \dots 23 \cdot 10^{-6}/\text{K}$). Die Lösung besteht in Verbunden. Durch sie lässt sich ein Kompromiss zwischen beiden Forderungen erreichen (Tabelle 10.5).

10.6.5 Metallschäume

Im Prinzip lassen sich aus allen Metallen nach zahlreichen Verfahren (→) Schäume herstellen. Sie können geschlossen oder offenporig sein, die Dicke der Zellwände ist einstellbar. Wegen ihrer besonderen Eigenschaften haben sie zahlreiche Einsatzbereiche (Tabelle 10.6).

- Offenporig:** Alle Hohlräume stehen miteinander in Verbindung. Verwendung als Filterelement, Katalysatorträger, Wärmetauscher oder -kühler.
- Geschlossenporig:** Werkstoff besitzt eine dichte Außenhaut und kann damit direkt für Bauteile eingesetzt werden.

Es entstehen leichte Werkstoffe mit hoher relativer Steifigkeit (die Masse ist in den Wänden von Hohlkörpern konzentriert).

Leichtmetallschäume bieten weitere Möglichkeiten für Masse einsparungen bei Verwendung als Kernmaterial in Sandwichstrukturen. Dazu werden Deckbleche oder Schalen aus Al-Legierungen, Edelstahl oder Titan durch Kleben, Schweißen oder Einschäumen mit dem Schaumkern verbunden.

Beispiel: Elektronische Bauelemente werden immer kleiner und dichter auf Leiterplatten gepackt. Zur Wärmeableitung werden ihre keramischen Grundkörper auf Metallplatten (sog. Wärmesenken) gelötet. Sie benötigen

- hohe Wärmeleitfähigkeit gegen Überhitzung
- kleiner Wärmedehnung, damit keine thermische Ermüdung der Lötarbeit und damit ein Versagen auftritt.

Tabelle 10.5: Eigenschaften von Werkstoffen für Wärmesenken

Werkstoff	Dichte ρ g/cm ³	α ¹⁾ $10^{-6}/\text{K}$	λ ²⁾ W/mK
MoCu50	9,5	9,9	250
WCu10	17,1	6,4	195
Cu-SiC (40%)	6,6	11,0	320

¹⁾ Lineare Ausdehnung; ²⁾ Wärmeleitfähigkeit

Herstellungsverfahren, Beispiele, z.T. unter Patentschutz, sind:

Pulvermetallurgisch mit TiH_2 als Treibmittel, dass sich in der Wärme in Ti und H_2 -Gas zersetzt und geschlossene Poren erzeugt. Die Dichte liegt bei $0,5 \dots 0,9 \text{ g/cm}^3$ (ALULIGHT- und FOAMINAL-Schaum mit hoher Druckfestigkeit).

Schmelzmetallurgisch durch Zugabe von ca. 1,5 % Ca, das oxidiert und die Schmelze dickflüssig macht. Durch Einröhren von TiH_2 in die Gießform kommt es zur Schaumbildung. Nach Abkühlung der Form liegt ein geschlossen poriges Material mit einer Dichte von $0,2 \dots 0,25 \text{ g/cm}^3$ vor (ALPORAS) Platten (auch offen porig) 600 mm x 2000 mm in Dicken von 7...20 mm.

SchlickerReaktionsSchaumSinter (SRSS)-Verfahren (Stahl-Innovationspreis 2003). Ein Schlicker aus Wasser und Stahlpulver wird mit Phosphorsäure versetzt, die als Binde- und Treibmittel dient. Es entstehen Wasserstoff als Treibmittel und Phosphate, die verklebend die Schaumstruktur verfestigen. Beim Trocknen entsteht durch Verdunstung des Wassers eine offenporige Struktur, die unter O_2 -freier Atmosphäre gesintert wird. Die Dichte beträgt für Stahl $1,0 \dots 2,5 \text{ g/cm}^3$ mit Poren-Ø von $0,01 \dots 5 \text{ mm}$.

Möglich sind korrosions- und hitzebeständige Stahlschäume aus den entsprechenden Sorten für Filterelemente im weitesten Sinne.

Bei plastischer Druckverformung (Bild 10.4) stellt sich die Druckspannung über einen weiten Bereich der Stauchung (bis zu 60 %) konstant ein (sog. Plateauspannung). Das ergibt eine hohe Verformungsarbeit. Die aufnehmbare Arbeit steigt mit der Schaumdichte.

Metallschäume sind deshalb als Energieaufnehmer interessant und werden bei Fahrzeugen als Kernmaterial von Hohlstrukturen im Aufprallbereich eingesetzt.

Bild 10.4 Spannungs-Stauchungskurven von Festkörpern und Metallschaum

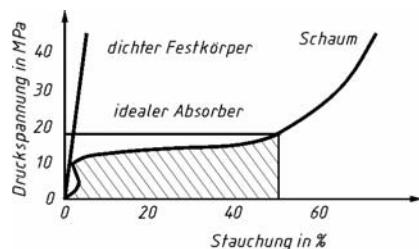


Tabelle 10.6: Anwendung von Metallschäumen aufgrund ihrer Eigenschaften

Eigenschaft der Metallschäume	Anwendungsbeispiel
Geringe Dichte + hohe Steifigkeit	Biegebeanspruchte Leichtbaustrukturen
Druckfestigkeit der Zellstrukturen	Energieaufnahmer (Crashabsorber)
Offene Zellen, gute Wärmeleitung der Wände	Wärmetauscher, Flammenhemmer
Offene Zellen, große Oberflächen	Filterelemente, Katalysatoren
Dämpfung von mechanischen Schwingungen	Schallisolation, Schutzkapseln f. Maschinen
Verringerte elektrische und Wärme-Leitfähigkeit gegenüber massivem Material	Abschirmung gegen elektromagnetische Wellen, Wärmestrahlung

10.7 Keramik-Matrix-Verbunde CMC

10.7.1 Allgemeines

Die hohe Steifigkeit (E-Modul) und Temperaturbeständigkeit technischer Keramik in Verbindung mit hoher Korrosionsbeständigkeit macht sie zum idealen Werkstoff für Bauteile im Einsatz bei hohen Temperaturen. Hinderlich ist die niedrige Zähigkeit als Folge ihrer Struktur mit komplizierteren Kristallgitter und Ionen- oder Atombindung.

Hinweis: Alle keramischen Stoffe verhalten sich noch *spröder* als z.B. Gusseisen mit Lamellengraphit.

Neben den Maßnahmen zur Duktibilisierung der technischen Keramik (→ 8.2) sind Verbundlösungen eine wichtige Möglichkeit, Zähigkeit und Dauerfestigkeit zu erhöhen.

10.7.2 Faserverbundkeramik

Durch Faserverstärkung steigen *Biegefestigkeit*, die Beständigkeit gegen *Temperaturwechsel* und die Schadenstoleranz.

Das Einbetten von Fasern in eine keramische Matrix ist schwierig, Keramik lässt sich nicht schmelzflüssig verarbeiten, die Schmelzpunkte liegen zu hoch. Kurzfasern können mit der Matrix pulvermetallurgisch verarbeitet werden.

Schadenstoleranz. Fasern bremsen auch die Rissfortpflanzung, sodass ein katastrophales Versagen durch Sprödbrüche unterbleibt.

Fasern für Keramik müssen wegen der hohen Sintertemperaturen hohe Warmfestigkeit und Oxidationsbeständigkeit besitzen, z.B. SiC oder Al_2O_3 bis < 1200 °C. Bei C-Fasern ist innere Oxidation möglich, sie wird durch Beschichtung (Interface) gebremst.

Bei Endlosfasern geht man den Umweg über hoch C-haltige Polymere. Sie werden nach Tränkung der Fasergelege durch *Pyrolyse* vergast und unter Schrumpfung in eine poröse keramische Matrix umgewandelt. Die Porosität kann durch Tränken und weitere Pyrolyse vermindert werden (Beispiel).

Je nach Art des Polymers entsteht nach der Pyrolyse eine C-Matrix (→) oder bei Verwendung von Si-Polymeren eine SiC-Matrix.

Spezielle Si-Polymeren sind löslich (in z.B. Toluol), damit lassen sich Fasern imprägnieren, die zu Prepregs verarbeitet werden. Das Wickeln ist bei Bauteilen wie z.B. Rohren möglich. Danach folgen:

- Austreiben des Lösungsmittels,
- Aufschmelzen des Polymers und Verdichtung im Autoklaven bei ca. 400 °C,
- Pyrolyse in Schutzgas, drucklos bei > 1100 °C.

Durch Infiltration eines C-faserverstärkten Kohlenstoffgerüstes CFC mit flüssigem Si reagiert der Kohlenstoff zu Siliciumcarbid SiC. Die C-Faser muss durch Beschichtung vor einer Reaktion mit dem Si geschützt werden.

- C-Faser führt zu geringer Wärmedehnung und hoher Bruchzähigkeit des Verbundes,
- Si + C ergeben zusammen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität und die
- SiC-Matrix besitzt hohen Verschleißwiderstand.

10.7.3 Durchdringungsverbundkeramik

Die hohen Schmelztemperaturen keramischer Stoffe erlauben das Tränken poröser Strukturen mit flüssigen Metallen. Hierzu gehört das **Si-SiC**, bei dem ein Pressling aus SiC-C-Gemisch gesintert und mit flüssigem Si getränkt wird. Dabei reagiert das Si mit dem Kohlenstoff zu SiC und ergibt einen dichten reaktionsgetränkten Körper.

Beispiele: C-Faser-Kohlenstoff, Sigrabond (CFC oder C/C). Herstellung aus phenolharzgetränkten Fasergelegen durch

Härtung ⇒ Pyrolyse ⇒ Nachtränen ⇒ ⇒ Pyrolyse

Pyrolyse ist die thermische Zersetzung unter Luftabschluss, um eine Oxidation zu vermeiden.

Schwindung: Bei der Pyrolyse entstehen Gase, die übrig bleibende SiC-Keramik (Ausbeute) liegt bei ca. 65 %. Der Materialverlust äußert sich in einer *Schwindung*. Sie wird durch keramische Füllstoffe im Polymer und weitere Imprägnierungszyklen gesenkt.

Anwendungen in nichtoxidierender Atmosphäre bis über 2000 °C, z.B. Drucksinterformen, Heizelemente, Ablenker für Düsentriebwerke, Panzerplatten.

SIGRASIC/TAVCOR (SGL-Carbon) PAN-Faser (Polyacrylnitril) wird zu C-Fasern keramisiert und das Fasergelege mit Si getränkt. Es besteht aus etwa 50...60 % SiC, 30...40 % Si und 10...20 % C.

Anwendung: Bremsscheiben für Hochgeschwindigkeitszüge lassen gegenüber Stahl scheiben durch weniger und leichtere Bauelemente Masseeinsparungen von ca. 65 % für das gesamte Bremssystem zu.

SiSiC (siliziumfiltriertes Si-Carbid) hat etwa 10...20 % metallisches Si und dadurch hohe Wärmeleitfähigkeit, bis 1350 °C einsetzbar.

Anwendung als Wärmeaustauscher für aggressive Medien, Laufräder für Abgasturbolader und Pumpen, Gleitringdichtungen (bei abrasivem Fördermittel). Ein hoher E-Modul macht es geeignet für Tragerollen und -balken in Brennöfen für Keramik.

Verbund Metall-Keramik

Die Zähigkeitsprobleme keramischer Bauteile lassen sich auch konstruktiv durch Metall-Keramik-Verbunde umgehen:

- Metallteil für Beanspruchung auf Biegung und Stoß,
- Keramikteil, druckbeansprucht, schützt vor thermischer Überlastung (kleine Wärmeleitung) Verschleiß und/ oder Korrosion.

Zum Fügen von Keramik und Metall eignen sich auch das Einlegen, Aktivlöten und Kleben (dabei müssen die unterschiedlichen Wärmedehnungen beachtet werden).

Beispiele: Verbund Metall/Keramik: Hüft-Endoprothesen aus einer Keramikkugel mit Passsitz auf einem metallischen Schaft in einer Pfanne aus Polyethylen PE gelagert.

Kugelhahn für abrasive und/oder korrosive Medien mit eingelegter Al-Oxidkeramik in einem metallischen Gehäuse.

Literaturhinweise:

Bunk, W.:	Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix. In: VDI-Berichte 743, VDI-Verlag 1989
Kainer, K.U. (Hrsg.):	Metallische Verbundwerkstoffe. DGM Informationsgesellschaft Verlag 1994
Michaeli/Wegener:	Denken in Anisotropien – Faserverbundwerkstoffe, eine Herausforderung für den Konstrukteur. In: VDI-Berichte 852, S.127...163, VDI-Verlag1991
Steffen, H.-D. u.a.:	Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe, Hanser 1989
Ondracek, G.:	Werkstoffkundliche Grundlagen des Verbundgießens von Gusseisen mit Stählen Konstruieren und Gießen 1999/2
Leonhardt,G. (Hrsg.):	Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. DGM, 1993
Heym/Lang:	Aluminium und seine Verbundwerkstoffe. In Neue Werkstoffe [Hrsg. A. Weber]
VDI-Berichte 563	Faserverstärkte Polymerwerkstoffe. VDI-Verlag 1989
VDI-Berichte 734	Verbund- und Hybridwerkstoffe. VDI-Verlag 1985
VDI-Berichte 965.1 und 965.2	Neue Werkstoffe – Verbundstrukturen im Maschinenbau. VDI-Verlag 1989
VDI-Berichte 1080	Verbundwerkstoffe Teil 1 Konstruktion, und Werkstoffverbunde. Teil 2 Fertigung. VDI-Verlag 1992
VDI-Berichte 1151	Werkstofftag '94 Leichtbaustrukturen und leichte Bauteile. VDI-Verlag 1994
	Effizienzsteigerung durch innovative Werkstofftechnik. VDI-Verlag 1995

11 Werkstoffe besonderer Herstellung oder Eigenschaften

11.1 Pulvermetallurgie, Sintermetalle

11.1.1 Überblick und Einordnung

Pulvermetallurgie (PM) ist nach DIN EN ISO 3252 ein Teilgebiet der Metallurgie, das sich mit der Herstellung von Metallpulvern und Bauteilen daraus befasst. Grundsätzlich müssen mindestens drei Fertigungsstufen durchlaufen werden:

- Pulvergewinnung,
- Formgebung und Verdichtung,
- Verfestigung durch Sintern.

PM gehört damit zu den Verfahren der Fertigungs-Hauptgruppe Urformen (→ Tabelle 11.1).

Teile größerer Masse sind durch PM technisch und aus Kostengründen nicht herstellbar. Deswegen erzeugt die PM nur weniger als 1% der Gießereiproduktion (Masse-%).

Pulvermetallurgische Werkstoffe können mit Eigenschaften ausgerüstet werden, die bei Guss- und Knetwerkstoffen nicht realisierbar sind (→). Das entstehende PM-Werkstoffgefüge kann gesteuert werden.

- Pulverteilchen werden bei der Herstellung stark abgeschreckt (bis zu 106 K/s). Die Folgen sind: metastabile und hoch übersättigte Mischkristalle, aus denen beim Sintern feindisperse intermetallische Phasen ausscheiden.
- Bei PM-Werkstoffen bleibt die jeweilige Pulververmischung erhalten, die Atome diffundieren beim Sintern nur kleine Weglängen über mehrere Pulverteilchen hinweg. Auf diese Weise können z.B. harte Phasen in beliebigem Anteil im Grundgefüge homogen verteilt werden (→).
- Beim Verdichten der Pulverteilchen bleiben Poren zurück, die eine Funktion übernehmen können. Die Porosität kann nachträglich so weit verringert werden, dass die theoretische Dichte erreicht wird.

Hinweis: Das Verfahren wird auch für keramische Stoffe und Verbundwerkstoffe angewandt.

Tabelle 11.1: Urformverfahren, DIN 8580
(→ Abschnitt 1.6.1)

Verfahren	Materie	Vorgang, Produkt
Gießen	flüssig, atomar	Erstarren zu Formteil, Halbzeug, massiv
Pulvermetallurgie	feste Pulverteilchen	Pressen zu Formteil, Halbzeug, porös
Sprühkomplektieren	Tropfen	Thermisch Spritzen zu Halbzeug, Formschale
Galvanoformen	Ionen in Lösung	Elektrolyt. Abscheiden Formteil, Formschale

Schmelzmetallurgisch hergestellte Legierungen erstarren nach den Gesetzen des jeweiligen Zustands-Diagrammes. Die dabei entstehenden Gefüge sind gekennzeichnet durch:

Merkmale	Auswirkung
Primärkristalle	grobkörnige Gefüge
Löslichkeiten	nicht beliebig mischbar
Seigerungen	Entmischungen
Intermetallische Phasen	harte, spröde, d.h. unverformbare Stoffe

Brauchbare Werkstoffe entstehen nur bei bestimmten Analysen eines Stoffsystems.

Beispiel: PM-Schneidstoffe können bis 95 % Carbide enthalten, schmelzmetallurgisch hergestellte nur bis ca. 25 %.

Beispiele: Porenräume werden genutzt

- als Reservoir für Schmierstoffe in selbstschmierenden Lagerbuchsen,
- als Filter für Gase und Flüssigkeiten,
- zur Verringerung der Dichte (Masse).

- Werkstoff- und Energieaufwand sind gegenüber Gießen und Schmieden geringer (Erzeugung von Fertigteilen).
- Verbundwerkstoffe mit Verstärkung der Grundmasse (Matrix) durch Kurzfasern oder Teilchen anderer chemischer Struktur.

PM-Werkstoffe sind erst im Fertigteil wirklich vorhanden. Ihr Eigenschaftsprofil wird entscheidend durch die Verfahrensbedingungen geprägt, die auf Dichte und Porosität des fertigen Bauteils Einfluss haben (→).

Für die Beurteilung der Eigenschaften von PM-Werkstoffen ist deshalb die Kenntnis der Verfahrensschritte notwendig.

Seit langem werden einbaufertige Formteile durch PM hergestellt. Die Wirtschaftlichkeit beruht auf der hohen Werkstoffausnutzung (95 %) bei geringerem Energiebedarf gegenüber anderen Fertigungswegen (Bild 1.3).

Beim Gusswerkstoff sind Grundeigenschaften meist durch die Analyse vorgegeben, evtl. im Einschmelzmaterial schon verhanden.

Beispiel: Dichte von Sinterteilen: Höhere Dichte ergibt höhere Festigkeit und Zähigkeit im Sinterteil (Bild 11.5). Die Sinterdichte wird von Pulverform, Verdichtungsart und Sinterbedingungen beeinflusst und lässt sich evtl. nachträglich noch weiter erhöhen (→ 11.2.2).

Das pulvermetallurgische Fertigungsfahren

Die Hauptarbeitsgänge mit zahlreichen Varianten und möglichen Nachbearbeitungen sind in Tabelle 11.2 angeführt.

Pulver werden meist pressfertig angeliefert, z.T. aber auch beim Verarbeiter legiert.

Pressen erfolgt in komplexen Werkzeugen, die mehrere Aufgaben erfüllen müssen:

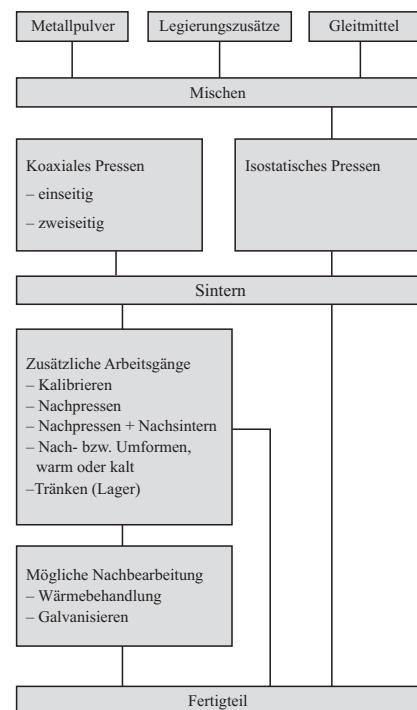
- **Füllraum** zur Aufnahme der Pulvermenge bieten, die für das Teil benötigt wird,
- Pulver **Formen** und **Verdichten**, wozu ein oder mehrere koaxiale Stempel mit hoher Kraft bewegt werden müssen. Im Pressling sind die Teilchen mechanisch verklammert.
- **Freilegen** bzw. **Ausstoßen** des Presslings zum automatischen Weitertransport.

Sintern: Wärmebehandlung mit dem Ziel, durch Diffusionsvorgänge zwischen den Pulverteilchen eine feste Bindung zu schaffen und den Porenraum zu verkleinern.

Nachgeschaltete Arbeitsgänge können zur Eigenschaftsänderung gewählt werden:

- Erhöhung der Dichte durch Nachpressen oder Sinterschmieden,
- Verbesserung der Maßhaltigkeit und Oberflächengüte durch Kalibrieren, Veränderung der Oberfläche.

Tabelle 11.2: Verfahrensschritte der PM



11.1.2 Herstellung der Pulver

Pulver werden nach verschiedenen Verfahren hergestellt. Dadurch haben sie unterschiedliche Gestalt und Größe, was sich auf Press- und Sinterverhalten auswirkt. Die Norm unterscheidet zwölf Formen, Bild 11.1 zeigt zwei Formen.

Neben der Sintertechnik benötigen auch andere Industriezweige Metallpulver, sodass größere Mengen erzeugt und abgesetzt werden können (Tabellen 11.3 und 11.10).

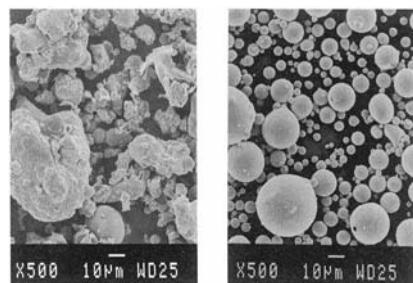


Bild 11.1 Pulverteilchen (HCST)
links wasser verdüst, rechts luft verdüst

Tabelle 11.3: Pulverherstellung

Verfahren	Beschreibung	Werkstoffe
Direkt-Reduktion	Reduktion von Erzen im aufsteigenden CO-H ₂ -Gasstrom zu Eisen schwamm mit mechanischer Zerkleinerung und Magnetscheidung. Pulverförmige Oxide hochschmelzender Metalle werden im H ₂ -Strom reduziert.	Fe-Pulver Mo-, Ta-, W-Pulver
Verdüsung	Schmelzen werden mit Luft, Dampf oder Wasser zerstäubt, reaktionsfähige Metalle in Argon oder Vakuum. Teilchenform und -größe sind regelbar (10...50 μm)	Alle Metalle und Legierungen
Carbonyl-Verfahren	Carbonyle sind Metall-(CO)-Verbindungen, bei höheren Temperaturen in reines Metall (Kugeln von 0,1...5 μm) zerfallend.	Fe- und Ni-Pulver für Magnetwerkstoffe
Elektrolyse	Kathodische Reduktion aus Lösungen	Cu-Pulver

Pulvereigenschaften: Zur Verarbeitung zu Sinterformteilen müssen Pulver ein bestimmtes Eigenschaftsprofil besitzen, um eine Fertigung unter gleich bleibenden Bedingungen zu gewährleisten und die Qualität zu sichern. Kontrollgrößen sind (Tabelle 11.4):

Tabelle 11.4: Kontrollgrößen für Pulver

Siebanalyse	gibt den Anteil der verschiedenen Korngrößen am Ganzen an. Kleine Teilchen sintern schneller, sind aber schlechter pressbar
Fließvermögen	ist für die Füllzeit des Werkzeuges von Bedeutung. Gut rieselfähig sind kompakte Teilchen regelmäßiger Gestalt, kleine schlechter als große. Durch Granulieren wird das Verhalten schlecht fließfähiger Pulver verbessert
Fülldichte	Quotient aus Masse/Volumen des abgefüllten Pulvers. Ihre Konstanz ist wichtig für die Toleranzen in Pressrichtung
Pressbarkeit	Die Pulver sollen bei niedrigem Pressdruck (Standmenge) eine hohe Pressdichte im Pressteil ergeben (Bild 8.2). Die Reibung wird durch Zugabe von 1 % Zinkstearat als Festschmierstoff vermindert (vergast beim Sintern)
Presskörperfestigkeit	(Grünfestigkeit) bezieht sich auf den Zustand vor dem Sintern. Sie ist hoch bei zerklüfteten Pulverteilchen, die zu Teilen mit niedriger Dichte verarbeitet werden (z.B. Sinterlagern). Kompakte Teilchen verklammern sich gering (Gefahr des Kantenausbrechens)

11.1.3 Formgebung und Verdichten

Am häufigsten wird das Pressen in Werkzeugen mit einem oder zwei koaxialen Stempeln angewandt, z.B. für alle auf Festigkeit beanspruchte Sinterteile.

Hochporöse Teile, wie z.B. Filter, werden durch Schüttintern gefertigt. Das Pulver wird in Mehrfachformen eingerüttelt und darin gesintert.

Formgebung durch Pressen

Die Pulver werden in die Füllräume von Werkzeugen gefüllt und verdichtet. Dabei steigt die *Fülldichte* von ca. 3 g/cm³ auf die Pressdichte von 5,8...7 g/cm³ (für Sintereisen und -stahl). Die Dichte des massiven Metalles kann durch Pressen allein nicht erreicht werden.

Pressdichte ist die Dichte des ungesinterten Teiles. Sie ist vom Pressdruck abhängig. Daneben wirken sich Gleitmittel, Teilchenform und -größe, ihre Größenverteilung und das plastische Verhalten des Metalles aus (Bild 11.2).

Pressdruck. Bei Massenteilen beträgt der höchste Pressdruck mit Rücksicht auf die Standmenge der Form ca. 6000 N/mm² = 60 kN/cm².

Isostatisches Pressen (kalt CIP, heiß HIP) vermeidet die ungleiche Dichteverteilung beim Pressen (→): Die Pulver werden in elastische Kapseln gerüttelt, verschlossen und in einer Flüssigkeit hohem Druck ausgesetzt. Nur für einfache Formen und Halbzeug geeignet.

PM-Spritzgießen (→)

Diese Verfahren kombinieren die Freiheit des Spritzgießverfahrens in der Formgestaltung, mit den Eigenschaften hochwertiger Metalle und höchster Materialausnutzung.

Metallpulver mit Teilchengrößen < 20 µm werden mit ca. 30 % eines organischen Binders granuliert und auf Kunststoffpressen bei ca. 150...250 °C zu Formteilen verpresst. Die Teilchen werden dabei nicht plastisch verformt, die Grünfestigkeit wird durch den thermoplastischen Binder hergestellt. Die Bauteilgrößen liegen zwischen 1...100 (200) g.

Hinweis: Um eine möglichst *gleichmäßige* Dichteverteilung über Querschnitt und Länge des Pressteiles zu erhalten, gibt es je nach Form des Teiles verschiedene Werkzeugtypen und Mechanismen.

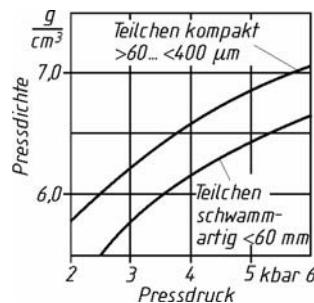


Bild 11.2 Pressbarkeitsschaubild von Eisenpulver verschiedener Teilchengröße

Nach der Pressbarkeit werden unterschieden

- superkompressible, z.B.(Cr-Mn-Mo)
- hochkompressible und z.B.(Ni-Mo)
- normalkompressible Eisenpulver (fertiglegiert).

Für Teile mit höchsten Beanspruchungen (z.B. Werkzeuge aus HS-Legierungen) sind Drücke bis zu 80 kN/cm² in Anwendung.

Hinweis, isostatisches Pressen:

In einer Flüssigkeit breitet sich der Druck gleichmäßig (isostatisch) aus und steht auf allen Flächen senkrecht. Beim mechanischen Pressen ist die Verdichtung in Stempelrichtung am größten, quer dazu geringer.

PM-Spritzgießen, Verfahrensbezeichnungen:

MIM: Metal Injektions-Moulding (Krupp-KPM, Schunk).

PM-Spritzgießen (Sintermetallwerk Krebsöge).

Anwendung: Die Pulverteilchen werden beim Spritzgießen nicht kaltverfestigt, ihr Pressverhalten ist ohne Einfluss. Es können auch harte Legierungen verarbeitet werden. Die endkonturnahe Fertigung ist günstig für komplexe Teile aus teuren und harten Werkstoffen, z.B. HS-Wendeschneidplatten in Mehrfachform, Rotor für Flügelzellenpumpen aus HS6-5-4 (KPM), Sicherheits- und Autozündschlösser, Kleingetrieberäder.

Es folgen die weiteren Arbeitsgänge, zunächst muss der Binder entfernt werden::

- Austreiben des Binders in der Wärme (entwachsen, entbindern), das Teil wird porös.
- Sintern unter Schutzgas oder Vakuum mit anschließender Druckerhöhung auf ca. 100 bar und Dichtsinterung.

Die Diffusionswege sind lang (max. Wanddicken bis zu 5 mm), die Zeiten ebenfalls. Durch den Binderverlust schrumpft das Teil linear zwischen 10...17 %. Durch Pulver mit bestimmter Korngrößenverteilung lässt sich die große Schwindung beherrschen (ISO-Toleranz 9-10).

11.1.4 Sintern

Beim Glühen unter Schutzgas sollen die zunächst nur mechanisch verklammerten Teilchen durch Diffusion und Rekristallisation ein Gerüst von Kristallen bilden, das von den Poren durchsetzt ist.

Sintern ist ein Glühen von feinkörnigen, pulvigen Stoffen. Die Teilchen vergrößern durch Platzwechsel der Atome ihre Berührungsflächen und kristallisieren darüber hinweg unter Veränderung der Poren.

Bild 11.3 zeigt schematisiert Pulverteilchen, die durch den Pressvorgang kaltverformt wurden. Beim Sintern setzt an den Berührungsstellen der Stofftransport und die Rekristallisation ein.

Anfangs entsteht ein zusammenhängender Porenraum (für Filter und Lager genutzt). Später werden die Poren unter Schwindung (\rightarrow) verkleinert und nehmen runde Gestalt an. Nach dem Sintern sind die Teilchengrenzen nicht mehr erkennbar.

Vakuumsintern von Pressteilen aus kugeligen Pulvern (legierte Stähle) beseitigt die Porosität völlig und liefert endkonturnahe Teile mit 85...95 % Materialausnutzung, z.B. Wendeschneidplatten, Matrizen für die Schraubenfertigung, Fräserrohlinge aus HS-Stählen.

Es ist als alternatives Verfahren zum Heißisostatischen Pressen (HIP-Prozess \downarrow) entstanden und weniger aufwändig.

Entbinderung: Die Entwicklung geht auf neue Binder, die in kürzerer Zeit auch aus dickeren Querschnitten entfernt werden können: Katalytische Entbinderung durch Säurezerersetzung eines speziellen POM-Binders bei 1100...1400 °C in 20-fach kürzerer Zeit (BASF, Innovationspreis 1996). Auch für CIM (Keramik-Spritzguss) geeignet.

Sintertemperaturen hängen vom Metall ab:

Metall	Temp. °C	Metall	Temp. °C
Al-Leg.	590-620	Cu-Sn	740-780
Fe, Fe-Cu	1120-1280	Fe-C	1120
Hartmetall	1200-1400	Fe-Cu-Ni	1120
W-Leg.	1400-1500	Fe + Carbide	> 1280

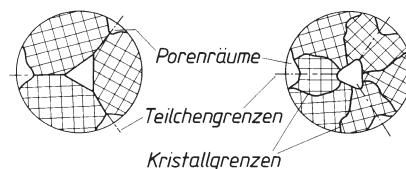


Bild 11.3 Innere Vorgänge beim Sintern, schematisiert

Schwindung: Die Verkleinerung des Porenraumes führt zu einer Schwindung. Sie hängt von Pressdruck, Pulverart und Sintertemperatur ab und wird bei der Bemessung der Werkzeuge berücksichtigt.

Sintern mit flüssiger Phase. Phasen können bei Sintertemperatur flüssig werden und die Porenräume füllen. Dabei ergibt sich, evtl. auch durch Legierungsbildung, eine festere Bindung zwischen den Teilchen. Auf diese Weise wird auch eine Art Verbundwerkstoff, ein *Durchdringungsverbund*, hergestellt.

Heißisostatisches Pressen (HIP): Aufwändiges Verfahren, meist in Verbindung mit kaltisostatischem Pressen (KIP) zum Erreichen höchster Dichte mit folgenden Arbeitsgängen:

- Einkapseln des vorgepressten Rohlings in eine druckdichte Kapsel und evakuieren,
- Sintern unter hohem Gasdruck,
- Entkapseln, d.h. Zerstören der Kapsel aus weichem Stahl, Cr-Ni-Stahl oder Glas.

Anwendung für Halbzeuge aus HS-Stählen, hochwarmfesten Legierungen und Warmarbeitsstählen. Homogene Verteilung und Feinheit der Carbide machen die daraus hergestellten Werkzeuge besser bearbeitbar und ergeben höhere Standmengen bzw. Standzeiten (Bild 11.4).

Hinweis: HIP-Verfahren werden auch für Verbunde von massiven Werkstücken mit Sinterwerkstoff durch Diffusionsschweißen angewandt (sog. aufhipen →).

Nachverdichten, Kalibrieren

Mit dem Sintern ist meist eine Volumenänderung verbunden. Ihr Betrag hängt von der Pulverart und der Sintertemperatur ab. Reine Metalle haben stets eine Schwindung, bestimmte Legierungen nicht.

Schwundausgleich: Pulvermischungen aus Fe-Cu verhalten sich bei größeren Cu-Gehalten gegenläufig, sie wachsen. Cu schmilzt und löst Fe-Atome. Die Cu-reichen MK haben ein größeres Volumen. Durch Zugabe von 2 % Cu wird ein Schwundausgleich erreicht. Deshalb ist Cu in vielen Pulvern enthalten.

Bei hohen Ansprüchen an Maßhaltigkeit muss das gesinterte Teil in einem zweiten Werkzeug kalibriert werden. Daneben erhöhen sich Dichte und Oberflächengüte.

Beispiel: Flüssige Phasen treten beim Sintern folgender PM-Legierungen auf:

Hartmetalle WC-Co, Sinterbronze Cu-Sn, HS-Stähle und Kontaktwerkstoffe, z.B. Metall-Graphit für Stromabnehmerbürsten

Die Kapsel wird in einem druckfesten Behälter unter Argondruck elektrisch beheizt. Dadurch steigen Druck (1400 bar) und Temperatur (max. 2000 °C). Haltezeit 1...3 h.

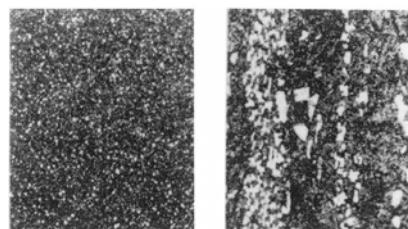


Bild 11.4 HS-Stahl HS12-1-5-5 gehärtet und angelassen, links PM-HIP-Verfahren, rechts gegossen und warmverformt (FPM)

Beispiel: Hartmetall in 2 mm dicker Schicht als Verschleißschutz auf die Oberfläche eines Walzenkörpers aus Baustahl.

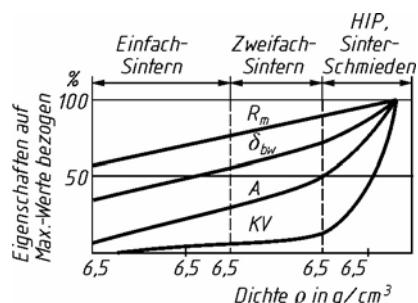


Bild 11.5 Steigende Festigkeit bei steigender Sinterdichte (FPM)

Toleranzen: Für Maße, die durch die Matrize geformt werden, ist eine Qualität von IT7...IT6 zu erreichen. Die Maße in Pressrichtung tolerieren unabhängig vom Sollmaß um etwa 0,1...0,2 %.

Zweifachsintertechnik (Doppelpressen). Für höhere Festigkeit und Dehnung muss die Dichte erhöht werden (Bild 11.5). Das kann durch nochmaliges Pressen erfolgen. Durch ein zweites Sintern wird die Kaltverfestigung aufgehoben und die Dauerfestigkeit erhöht.

11.1.5 Nachbehandlung der Sinterteile

Die Porosität von Sinterteilen mit < 92% Raumfüllung ist dann störend, wenn die Teile mit Flüssigkeiten Kontakt haben (Korrosionsgefahr) oder Gas- bzw. Flüssigkeitsdruck ausgesetzt sind (Durchlässigkeit). Das gilt auch für Fertigungsgänge wie Galvanisieren, Salzbadbehandlung u.a.

Infiltrieren ist bei zusammenhängenden Porenräumen (>12 % Porosität) möglich. Hierzu werden Metalle mit niedrigerem Schmelzpunkt als der Sinterkörper (z.B. Cu- und Cu-Legierungen) unter Vakuum eingesaugt.

Tränken mit Ölen, Wachsen oder Silikonen wird für Sinterlager und zum Korrosionsschutz angewandt, mit Kunststoffen vor einer galvanischen Behandlung.

Dampfbehandlung erzeugt eine blauschwarze Fe-Oxidschicht von 5...10 µm Dicke als einfachen Korrosions- und Verschleißschutz.

11.1.6 Werkstoffe

Für PM-Erzeugnisse stehen zahlreiche Werkstoffe zur Verfügung. Es lassen sich folgende Werkstoffgruppen erkennen (Keramische Stoffe sind im Abschnitt 8 behandelt):

1 Werkstoffe, die schmelzmetallurgisch nicht herstellbar sind (sog. Pseudolegierungen)

Höchstschmelzende Metalle (→) können mangels brauchbarer Feuerfeststoffe für Tiegel und Formen nicht als Schmelze gewonnen werden. Letztere würden sich mit den Metallen legieren und zu unbrauchbaren Legierungen führen.

Hierzu sind auch Werkstoffe zu rechnen, die aus Metallen und hochschmelzenden Hartstoffen (Carbiden, Oxiden, Nitriden oder Diamant) bestehen (Beispiel Ferro-Titanit→).

Sinterschmieden (Pulverschmieden) dient der Erhöhung der Dauerfestigkeit und wird in Gesenken bei Warmumformtemperaturen durchgeführt (bei schmiedegeeigneter Form).

Anwendung für höchstbeanspruchte Bauteile, wie z.B. Pleuelstangen.

Wärmebehandlungen aller Art sind technisch möglich (Bild 11.6). Bei thermochemischen Verfahren mit Gasen wird durch die Porosität die Behandlungszeit verkürzt. Salzbadreste müssen sorgfältig entfernt werden.



Bild 11.6 Winkelhebel für Fliehkraftregler
Werkstoff Sint D 30, einsatzgehärtet (FPM)

Beispiele: Höchstschmelzende Metalle

Metall	Schmelzpkt.	Verwendung
Wolfram	3410 °C	Glühlampenwendel
Tantal	2996 °C	Elektronenröhren
Molybdän	2620 °C	Heizleiter

Die Metalle werden aus ihren pulverförmigen Oxiden mit H₂-Gas reduziert, gepresst, gesintert und bei 1300 °C verformt.

Ferro-Titanit, härtbarer Sinterwerkstoff aus 50...70 % TiC in einer Grundmasse aus legierten, härtbaren Stählen. Im Anlieferungszustand ist er zerspanbar und kann durch Abschreckhärten auf 70...72 HRC gebracht werden. Nach einem Weichglühen ist er erneut zerspanbar (Korrektur von Werkzeugteilen).

Infos: (PDF-Datei) www.ferro-titanit.de

Die wichtigsten Werkstoffe aus dieser Gruppe sind

Sinterhartmetalle, aus den Carbiden des W, Ti und Ta in einer flüssigen Phase aus Co gesintert. Sie haben höchste Carbidgehalte und dadurch höheren Verschleißwiderstand als HS-Stähle (Tabelle 11.5).

Tabelle 11.5: Anwendungsgruppen der Sinterhartmetalle (DIN 4990 Z):

Eigenschaftstrend der Sorten	Kennzeichen	Anwendung
Härte und Schnittgeschwindigkeit PO2 (groß \Leftarrow Carbidanteil \Rightarrow kleiner) P50	6 Sorten, blau PO2...P50	für langspanende Werkstoffe: Stahl, Stahlguss, Temperguss
	4 Sorten, gelb M10...M40	für Mehrzweckverwendung, austenitische Stähle, Automatenstahl, Mn-Hartstahl
Biegefestigkeit und Vorschubgeschwindigkeit KO1 (klein \Leftarrow (Co-Anteil \Rightarrow größer) K40)	6 Sorten, rot KO3...K40	für kurzspanende Werkstoffe: Gusseisen, Hartguss, Stahl gehärtet; Kunststoffe, Hölzer, Werkzeuge der spanlosen Formung

Die Härte steigt mit dem Anteil an TiC/TaC-Anteil, während die Zähigkeit mit dem Co-Anteil verbessert wird, ebenso durch feinkörnigere Gefüge (\rightarrow).

Einige Legierungssysteme können nur pulvermetallisch ausgenutzt werden, wie z.B. bei

Unlöslichkeit im flüssigen Zustand (\rightarrow). Sie tritt bei einigen Systemen auf, deren Komponenten sich stark in der Dichte unterscheiden. Der unschmelzbare Graphit schwimmt auf der Cu-Schmelze, oder es entstehen zwei Schmelzen übereinander geschichtet.

Seigerung beim Erstarren führt zu einer ungleichmäßigen Verteilung bestimmter LE im Kristall (Kristallseigerung) oder von Kristallen im Gefüge (grobe Primärkristalle, Bild 11.4 rechts). PM-Werkstoffe besitzen feinkörnigere Gefüge.

Deshalb werden zahlreiche Stähle für hochbeanspruchte Werkzeuge als PM-Stähle angeboten.

2 Pulvermischungen für Formteile

Die Teile könnten meist durch die Fertigungsreihe Giessen – Umformen gefertigt werden. Das PM-Verfahren wird dann gewählt, wenn sich dadurch geringere Kosten ergeben oder die Teile besondere Eigenschaften besitzen (z.B. durch Nutzung der Porenräume \rightarrow).

Cermets (ceramic + metal) sind Mischungen aus hochschmelzenden Metallen (Co, Ni) mit nichtmetallischen Phasen für thermisch hochbelastete Teile von Triebwerken. Sie werden auch wie Sinterhartmetalle verwendet.

Beispiel: Feinstkorn-HM mit Korngrößen von 0,3...0,8 μm hat eine Biegefestigkeit von 4300 MPa (normales HM hat nur 2400 MPa).

Beispiel: Unlöslichkeit der Schmelzen

System	Verwendung
Cu-Graphit	Stromabnehmerkohlen
Cu-W	Schaltkontakte, hoch belastet

Beispiel: Gesinterte HS-Stähle. Schnellarbeitsstähle enthalten nach der Erstarrung grobe Carbide der LE in einem weicheren Grundgefüge. Durch Schmieden und Wärmebehandlung werden die Carbide verfeinert. Durch Verdünnen einer HS-Stahl-Schmelze mit Sintern (+ HIP) erhält man eine wesentlich feinere Verteilung und höhere Standzeiten.

Porenräume in Formteilen werden ausgenutzt bei:

- Leichtbaukonstruktionen mit Schaumkernen,
- Filterteile mit offenen Porenräumen,
- mit Graphit oder Fett gefüllte Poren für tribologische beanspruchte Teile.

Eine hohe Festigkeit im Bauteil kann auf zwei Wegen erreicht werden:

- Steigerung der Dichte mithilfe der Zweifachsintertechnik oder durch Warmpressen (auch Sinterschmieden oder heißisostatisches Pressen, HIP), Bild 11.5.
- Legierungstechniken, mit denen sich die höhere Festigkeit durch Einfachsintern, d.h. bei niedrigerer Sinterdichte, erzielen lässt (Bild 11.7).

Wie bei massiven Metallen ist eine höhere Festigkeit stets mit geringerer Bruchdehnung verknüpft (Vergleich der Kurven für Fe und Fe mit 4,5 % Cu in Bild 11.7).

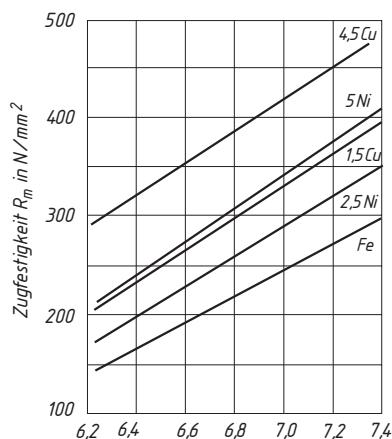


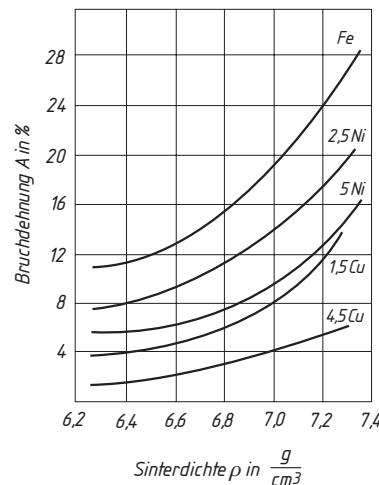
Bild 11.7 Zugfestigkeit (oben) und Bruchdehnung (unten) als Funktion der Sinterdichte für Cu- und Ni-legierte Sinterstähle

Legierungstechniken. Zur Herstellung der Pulver für Bauteile aus legierten Sinterstählen werden verschiedene Verfahren angewendet.

Gemischlegierungstechnik. Mischung von reinen Metallpulvern oder mit Vorlegierungen (Ferrochrom, Ferromangan usw.). Dabei werden die Presseigenschaften nur gering beeinträchtigt. Die Legierungsbildung findet während des Sinterns statt. Eine volle Homogenisierung erfordert lange Sinterzeit und hohe Temperaturen. Dabei werden die LE durch den Restsauerstoffgehalt der Pulver teilweise oxidiert.

Anlegierungstechnik. Herstellung eines Basislegierungspulvers, das die LE in Form von Carbiden enthält, die bis zur Sintertemperatur beständig sind. Diese konzentrierte Basislegierung wird in Anteilen bis zu 4 % dem Fe-Pulver zugegeben. Die Pressbarkeit ist gut, ebenso die Diffusion der LE in die Grundmasse. Der C-Gehalt macht die Legierungen härzt- und vergütbar.

PM-Werkstoffe sind in Werkstoff-Leistungsblättern genormt (WLB, Tabelle 11.5). Die Einteilung erfolgt nach der Dichteklasse und der chemischen Zusammensetzung.



Für die PM-Herstellung von Bauteilen hat die Industrie Pulver auf Fe-, Cu- und Al-Basis entwickelt, die nach dem Pressen eine Festigkeit von etwa 5 MPa, nach dem Sintern jedoch bis zu 1500 MPa besitzen, je nach Pulverart und angewandter Press- und Sintertechnik.

Beispiel: Bezeichnung Sinterstahl Sint B 21

B 2 1

↓

1: Zählziffer, hier C-haltig Tabelle 11.7

↓
2: Grundwerkstoff Stahl, > 5 % Cu

↓
B: Dichteklasse (Porenraum) Tabelle 11.6

Fertiglegierte Pulver werden durch Verdüsen von schmelzmetallurgisch erzeugten Legierungen hergestellt. Jedes Pulverteilchen hat bereits die Zusammensetzung des fertigen Sinterwerkstoffes. Die Presseigenschaften sind durch den LE-Gehalt schlechter (hoher Pressdruck).

Anwendung der fertig legierten Pulver für Filter- und Lagerwerkstoffe, Cu-Legierungen (Bronze, Messing, Neusilber), austenitische, warmfeste und Werkzeug-Stähle.

Auch für granulierte Ausgangsstoffe (feedstock) zum PM-Spritzgießen.

Zusammenfassung: Einfluss von Verfahrensbedingungen auf die Eigenschaften der Sinterwerkstoffe

Kriterium	Auswirkung
Dichte (Raumerfüllung)	Steigende Dichte verursacht steigende Kosten. Härte und Zugfestigkeit steigen linear mit der Dichte, die elektrische Leitfähigkeit ebenso. Die Bruchdehnung steigt exponentiell an
Pulverzusammensetzung und Legierungstechnik	beeinflussen das Pressverhalten, damit die Pressdichte sowie die Homogenität der Pulvermischung und Ausnutzung der LE
Nachverdichten mit Kaltverfestigung	Die Festigkeitssteigerung führt zu einem starken Abfall der Zähigkeit, damit sinkt die Dauerfestigkeit von dynamisch beanspruchten Bauteilen
Warmpressen , evtl. Warmumformen	Die Dichte steigt auf die des massiven Werkstoffes, damit Festigkeit und Bruchdehnung. Ein Auftreten von Anisotropie ist möglich

11.1.7 Klassifizierung, Normung

PM-Werkstoffe sind nach ihren Anwendungsgebieten gegliedert und in Werkstoff-Leistungsblättern genormt (WLB, Tabelle 11.6 und 11.7). Die Einteilung erfolgt nach der Dichteklasse und der chemischen Zusammensetzung.

Norm	Titel							
DIN 90910/90	Werkstoff-Leistungsblätter (WLB), Teile 1...6 für Anwendungsgebiete							
DIN 30911/90	Sinterprüfnormen (SPN), Teile 1...7 für Eigenschaftsprüfungen							
DIN 30912/90	Sinter-Richtlinien (SR), Teile 1...6 für Gestaltung, Bearbeitung, Fügen							

Tabelle 11.6: Einteilung der Sinterwerkstoffe nach Dichteklassen (WLB)

Werkstoff-klasse	Anwendungsgebiete									
	Porosität in %					Filter	Gleit-lager	Form-teile	Infil-triert	Sinterschmieden
SINT-	50	40	30	20	10					Form-teile
A										
B										
C										
D										
E										
F										
G										
S										

Tabelle 11.7: Einteilung der Sinterwerkstoffe nach der chemischen Zusammensetzung (WLB)

Ziffer	Sinterwerkstoff	LE -Anteile	Ziffer	Sinterwerkstoff	LE -Anteile
0	Sinterreisen u. -stahl	< 1% Cu (auch C)	5	Sinterlegierungen	60 % Cu
1	Sinterstahl	1...5 % C (auch C)		CuSn, CuSn	
2	Sinterstahl	> 5 % Cu (auch C)	6	Andere, nicht in 5 enth.	
3	Sinterstahl	(C+ Cu), < 6 % LE (Ni)	7	Sintermetalle	
4	Sinterstahl	(C+ Cu), > 6 % LE (Ni)	8+9	Reserve	z.B. Al

Hinweis: Die WLB enthalten Werkstoffe für Lager, Filter und Formteile, aber keine Hartmetalle, Kontakt- und Dauermagnetwerkstoffe oder hochwarme Legierungen.

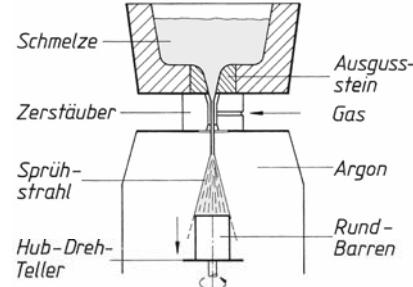
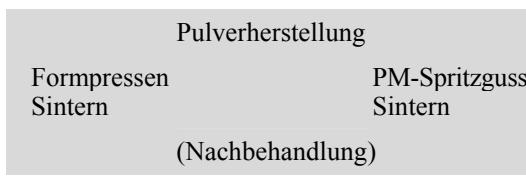
Die folgende Tabelle vergleicht einen Sinterstahl steigender Dichte bei gleicher chemischer Zusammensetzung:

Tabelle 11.8: Mechanische Eigenschaften von Sinterstahl mit steigender Dichte

Sorte	SINT-A 10	SINT-B 10	SINT-C 10	SINT-D 10	SINT-E 10
Dichte ρ , g/cm ³	5,6...6,0	6,0...6,4	6,4...6,8	6,8...7,2	7,2...
Zugfestigkeit R_m , MPa	140	170	200	300	350
Bruchdehnung A , %	2	2	3	7	10
Härte HB	35	40	55	80	100
Anwendungen	Selbstschmierende Gleitlager	Gleitlager	Stoßdämpfer- teile	Ölpumpenzahnrad	Büromaschinen- teile

11.1.8 Sprühkompaktieren (Spray Forming)

Für die Herstellung von Sinterformteilen oder Halbzeug sind mindestens drei Verfahrensstufen erforderlich:

**Bild 11.8** Sprühkompaktier-Verfahren, schematisch

Das Sprühkompaktieren bewältigt diese Stufen in *einer* Anlage zur Herstellung von Vormaterial für die Weiterverarbeitung durch Strangpressen oder Schmieden.

Das Verfahren verknüpft das Gasverdüsen (in Argon oder Stickstoff) mit dem thermischen Spritzen. Die verdüsten Schmelztröpfchen (ca. 40 µm) treffen im Zustand zwischen Liquidus- und Solidustemperatur auf einen beweglichen Auffangteller und verschweißen (Bild 11.8). Die schnelle Abkühlung (mit 10⁴...10⁵ K/s) verhindert Diffusion und ergibt eine Zwangslösung zusätzlicher LE in den Schmelztröpfchen.

Anlagen erzeugen Rundbarren bis zu 500 mm Ø und 2,5 m Länge aus Al-Legierungen. Es lassen sich auch Flacherzeugnisse und schalenartige Formen nach diesem Verfahren erzeugen.

Anwendung Das Verfahren wird z.B. für Al- und Mg-Legierungen mit Dispersionsverfestigung (→ 2.3.4) angewandt. Zur Herstellung von Verbundwerkstoffen lassen sich in den Verdüsnungsprozess feste Teilchen einschleusen und in das Gefüge einbetten.

Es ermöglicht auch die Herstellung von höher legierten Sorten, die auf schmelzmetallurgische Weise nicht hergestellt werden können, weil sie wegen Seigerungen oder einem hohen Gehalt an intermetallischen Phasen keine gieß- oder warmformbaren Werkstoffe ergeben. Als Beispiel dafür sind hier Al-Legierungen angeführt (→ Beispiel und Tabelle 11.9).

Die PM-Al-Werkstoffe variieren in Festigkeit und Bruchdehnung sowie in der thermischen Ausdehnung, sodass sich Anwendungen im Motorbereich ergeben: Kolben, Laufbüchsen, Ölpumpenzahnräder (mit gleicher Wärmedehnung wie das Gehäuse), Pleuel, Ventilsteueringsteile.

Gleiche Wärmedehnungen von Kolben und Laufbüchse ergeben geringeres Spiel und senken Emissionen und Ölverbrauch.

Beispiel: Kfz.-Kurbelgehäuse aus Al müssen in der Zylinderwand verschleißfest sein. Normale Druckgusslegierungen sind deshalb nicht geeignet. Verschleißfestigkeit ergeben höhere Si-Gehalte, die Sorten mit <12,5 % Si sind jedoch übereutaktisch, erstarren mit groben Si-Primärkristallen und sind schwierig dünnwandig vergießbar,

Lösung: Sprühkomprimierte Sorten mit stark erhöhten Si-Gehalten sind nach Warmumformung feinkörnig und haben zugleich

- niedrige thermische Ausdehnung ,
- hohe Warmfestigkeit durch Dispersionsverfestigung, ebenso höheren E-Modul.

Sie werden als Zylinderlaufbuchse mit einer normalen Druckgusslegierung (z.B. Al Si9Cu3) vergossen (Daimler-Benz V8-Motor).

Tabelle 11.9: Sprühkomprimierte Al-Legierungen

(PEAK-Werkstoff GmbH, Velbert, www.erslo.de)

Werkstoff/ PEAK-Nr.	$R_m / R_{p0,2}$ in MPa	A %	E in GPa	Dichte ρ in g/cm ³	$\alpha^1)$ $10^{-6}/K$	Merkmale
Al Si35	220 / 120	3	88	2,6	13	geringe Wärmedehnung, für Verbund mit Stahl
Al Si20Fe5Ni2	360 / 240	2	98	2,8	16	Kolbenwerkstoff, schmiedbar
Al Si25Cu4Mg	250 / 180	1	90	2,7	16	Zylinderbüchsen, verschleißfest
Al Zn11Mg2Cu	750 / 730	10	73	2,8	23	Hohe Festigkeit bei hoher Bruchdehnung, zäh

¹⁾ Lineare Längenausdehnung

Tabelle 11.10: Verbrauch einzelner Branchen an Sinterteilen und Eisenpulver 2002

(FPM)

Branche	Fertigteile %	Branche	Pulver-Anteil %
Fahrzeugbau	85,5	Pulvermetallurgie	85,0
Haushalt- und Elektrogeräte	4,5	Schweißelektroden	3,0
Maschinenbau	5,0	Pulverbrennschneiden	2,0
Sonstige	5,0	Chemische Industrie u.a.	10,0

Literaturhinweise Pulvermetallurgie:

- | | | |
|---------------------|--|--|
| FPM, Fachverband: | Vorlesungsreihe von H. Silbereisen, G. Zapf und K. Dalal (mit Dias). | |
| Pulvermetallurgie | Goldene Pforte 1, 58093 Hagen-Ernst | www.fpm.wsm-net.de |
| Kolaska, H. (Hrsg.) | Hagener Symposium, Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis. FPM, 2003 | |
| Krebsöge Infos: | Sintermetallwerk Krebsöge, PF 5100, 42477 Radevormwald | |
| PEAK-Werkstoff GmbH | Informationsschriften | www.erslo.de |
| Plansee | Information über Werkstoffe und Anwendungen | www.plansee.com |

11.2 Schichtwerkstoffe und Schichtherstellung

11.2.1 Begriffe, Abgrenzung

In diesem Abschnitt werden Werkstoffe für die Beschichtung von Bauteilen behandelt und die zugehörigen Verfahren unter werkstofftechnischen Gesichtspunkten angeführt.

Die Bedeutung der Oberfläche für die Haltbarkeit und dekorativen Wirkung der Bauteile ist bekannt und wird durch eigene Fachzeitschriften, Fachorganisation und -tagungen unterstrichen (→).

Belastungen eines Bauteiles greifen an der Oberfläche an und wirken sich dort am stärksten aus:

Art der Beanspruchung	Wirkung der Beanspruchung	
	In der Randschicht	Auf die Oberfläche
Festigkeit	Max. Biege- und Torsionsspannungen in der Randfaser und im Grund von Kerben	Dauerfestigkeit ist von der Oberflächengüte abhängig
thermisch	Platzwechsel (Diffusion) von Atomen nach innen oder außen. Veränderung der Randschicht	heisse, strömende Gase, z.T. oxidierend oder aufkohlend
Korrosion	interkristalline und selektive Korrosion wirken in die Tiefe von der Oberfläche	Werkstoffverlust durch die Korrosionsprodukte
tribologisch	Oberflächenzerstörung, Risse entstehen unterhalb der Oberfläche	Werkstoffverlust durch Adhäsion und Abrasion

Es war nahe liegend, den Werkstoff der Oberflächenschicht den Beanspruchungen anzupassen, d.h. geeignete Werkstoffe in dünner Schicht aufzubringen. Das ist wirtschaftlicher, als Bauteile massiv aus hochwertigen Legierungen zu fertigen. Dabei liegt eine Aufteilung der Funktionen vor (Bild 11.9):

- **Basiswerkstoffe** (auch Substrat) übernehmen die Festigkeitsbeanspruchung, d.h. den Kraftfluss durch das Bauteil unter Erhaltung seiner Gestalt, auch bei höheren Temperaturen.
- **Schichtwerkstoffe** übernehmen meist die Verschleiß- und Korrosionsbeanspruchung und die dekorative Wirkung. Daneben gibt es sog. Funktionsschichten, die Aufgaben wie Reibungsminderung, Diffusionssperre, Wärmeisolation u.a. übernehmen.

Hinweis: Die eigentliche Fertigungsprozesse, die zum „Beschichten“ gehören, können hier nur angedeutet werden.

Fachorganisation:

IUSF, Internationale Union for Surface

Fachzeitschrift:

Mo, Metallocerfläche. Hanser-Verlag

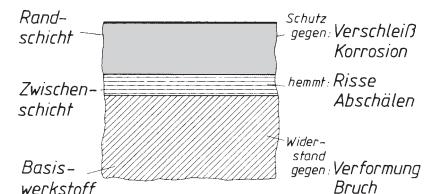


Bild 11.9 Arbeitsteilung bei Schichtverbunden

Hinweis:

Hartstoffsichten müssen sehr dünn aufgebracht werden, um noch ausreichend elastisch zu sein.

Vergleich: sprödes Glas ist als dünne Faser (einige µm) biegsam und kann zu Geweben verarbeitet werden (GFK).

- Zwischenschichten** entstehen durch Wechselwirkungen zwischen Substrat und Schicht, z.B. durch Diffusion oder werden zusätzlich aufgebaut. Sie können Schubspannungen aufnehmen, die bei unterschiedlichen Wärmeausdehnungen entstehen (→).

Wärmedehnung: Bei großen Unterschieden kann es zum Ablösen der Schicht durch sog. Schalenrisse kommen.

Tabelle 11.11: Übersicht über Eigenschaftsverbesserungen durch Veränderung der Oberflächen (enthält auch die Wärmebehandlungen für die Randschicht → Abschnitt 5.6)

Eigenschaft, bzw. Widerstand gegen	Beispiele für Bauteile	Verfahren
klimatische Korrosion bei höherer Temperatur	Stahlkonstruktionen, Blechteile, Glaspressformen	Schmelztauchen (Zn, ZnAl, AlSi), galvan. Beschichten (alle Metalle), therm. Spritzen (AlSi), thermisch Spritzen (NiCrBSi)
Zerrüttung Adhäsion	Zahnflanken, (Wälzlager) Gleitende Bauteile	Einsatzhärten, Nitrieren, (Härten) Hartverchromen, Dispersionsschichten, Umschmelzhärten, therm. Spritzen (Mo), Nitrieren PVD- und CVD-Schichten aus TiN, TiC, AlON
Abrasion	Werkzeuge, Teile in Berührung mit Fördergut, z.B. Fadenführer,	Thermisches Spritzen, Auftragschweißen, Auflöten von Hartstoffpartikeln, Borieren
Tribooxidation	Mischerschaufeln, Ketten Sitz von Nabe auf Welle	Gleitlacke mit Mo-Disulfid
Dauerfestigkeit erhöhen	Wellenabsätze, Federn Wasser- u. Ölumpen	Verfestigungswalzen und -strahlen, Randschichthärten, Salzbadnitrieren
Thermischer Schutz (+ Gleitmittel)	Turbinenschaufeln, Wälzlager in Öfenanlagen	Plasma-Spritzen (ZrO_2) mit Haftschicht, Phosphatisieren

11.2.2 Verfahrensübersicht

Die Einteilung der Verfahrenshauptgruppe Beschichten (DIN 8580) erfolgt nach dem Aggregatzustand des Beschichtungsstoffes.

Beschichten

durch / aus dem...Zustand	Werkstoffe	Verfahren, Anwendungen	Dicke
flüssigen	AlSi, AlZn, Pb, Sn, ZnAl, ZnFe,	Schmelztauchen zum Korrosionsschutz für Halbzeuge und Bauteile aus Stahl, Temperguss (z.B. Feuerverzinken).	bis 140 µm
	SiO ₂ + Oxide Farben, Lacke	Emaillieren z. Korrosionsschutz, hitzebeständig < 450°C Anstreichen, Färben / Glasieren, Drucken,	
körnig-pulvrig	Legierungen, Oxide, Carbide, Nitride Thermoplaste	Thermisch Spritzen mit verschiedenen Wärmequellen, Elektrostatisch Beschichten, Wirbelsintern	0,5 bis 20 mm
Schweißen	Stahl mit Cr Mn, Ni, Mo, Cu-, Ni-, Co-Legierungen, Ni-Hartlote + Hartstoffpartikel	Auftragschweißen nach verschiedenen Schweißverfahren, Auftraglöten	2 bis 6 mm
Löten	Metalle, Legierungen (mit Hartstoffpartikeln). NiP, Ni/SiC, Ni/P/Diamant PTFE-Teilchen in Ni-Matrix	Galvanisch Beschichten zum Korrosionsschutz, zur Dekoration, (Verschleißschutz) Chemisch Beschichten (fremdstromlos) zum Verschleißschutz, Zylinderlaufbüchsen	1 bis 100 µm
ionisierten...			

Beschichten

durch/aus dem...Zustand	Werkstoffe	Verfahren, Anwendungen	Dicke
gas/dampf-förmigen (Vakuum)	Metalle Ni, Ta, Ti, Mo, Nb, W, Boride und Carbide, Nitride, Oxide, Silicide	CVD-Verfahren: Konturenreue Abscheidung von Hartstoffen als Reaktionsprodukt der zugeführten Gase bei 1200...850 °C, plasmaunterstützt bei nur 600...300 °C.	1 bis 15 µm
gas/dampf-förmigen (Vakuum)	CrN, TiC, TiN, Ti(C,N) Mehrfachschichten, diamantartige C:H-Schichten gesteuerte Abscheidung ermöglicht gradierte Schichten	PVD-Verfahren: Ungleichmäßige Abscheidung der Reaktionsprodukte aus Katodenverdampfung oder Abstäuben (Sputtern) mit den zugeführten Gasen. Durch angelegte Spannung entstehen gerichtete Teilchenströme. Schattenwirkung erfordert Rotation der Bauteile. Prozesstemperatur bis 200...500 °C	1 bis 10 µm

Schicht durch Fügen aufgebracht

Plattieren	Schichtwerkstoff	Grundwerkstoff (Substrat)	1 bis 10 mm
	Cu, CuMn, CuNi10Fe, CuNi30Fe, CuAl8Fe, Ni99, NiCr21Mo (Incoloy)	Walzplattieren zum Korrosionsschutz für Stahlbleche und Feinkornbaustähle	
	Al, AlZn1	Cu-haltige, hochfeste Al-Legierungen	
	Ag, Al 99,5, CuAl10Ni, CuZn39Sn, CuZn20Al; Ta, Ti	Sprengplattieren für Bleche, auch für Kessel und Kesselböden	

11.2.3 Thermisches Spritzen

Ausgehend vom Flammenspritzen (1912, Shoop) haben sich viele Varianten entwickelt, die mit höheren Partikeltemperaturen und/oder größeren kinetischen Energien arbeiten, sodass fast beliebige Kombinationen von Schicht- und Grundwerkstoff möglich sind.

Prinzip: Schichtwerkstoffe werden als Spritzzusätze mithilfe von Spritzgeräten im an-, auf- oder abgeschmolzenem Zustand mit hoher Geschwindigkeit auf vorbereitete Oberflächen des Grundwerkstoffes geschleudert. Die Oberfläche wird dabei *nicht* aufgeschmolzen. Die Teilchen haften durch punktförmige Verschweißungen, Adhäsion und mechanische Verklammerung. Wichtig für die Haftung ist eine saubere Oberfläche.

Vorbehandlung der Oberfläche für das thermische Spritzen (→).

Es entstehen Gitterfehler, welche die Oberfläche für eine metallische Bindung mit dem Spritzzusatz aktivieren.

Der Schichtwerkstoff wird als Draht (1,6...3,2 mm) Stab (> 6 mm) oder Pulver (auch in gefüllten Röhrchen) zugeführt und mit einem Zerstäuber gas (Druckluft) beschleunigt.

Normung: DIN EN 657/05 Thermisches Spritzen, Begriffe, Einteilung der Verfahren

Energie-träger	Verfahren	Variante
Gase Äthen, Propan, Wasser- stoff	Flamm- Spritzen	Drahtflammenspritzen Pulverflammenspritzen
		Detonations-(Schock) Spritzen
		Hochgeschwindigkeits- Flammenspritzen HVOF
Elektrische Gasent- ladungen	Lichtbogen- Spritzen	Atmosphärisch in Vakuum
	Plasma- Spritzen	Atmosphärisch APS in Kammern VPS (Vakuum)
Strahlen	Laserspritzen	

Normung: DIN EN 13507/01. Vorbehandlung von Oberflächen metallischer Bauteile für das Thermische Spritzen.

Die Vorbehandlung besteht aus

- entfetten und entzündern,
- Aufrauen durch Strahlen mit Hartgusskies SiC oder Korund.

Für keramische Schichten ist ein Haftgrund erforderlich (Ni, Mo, NiAl, oder NiCr).

Tabelle 11.12: Spritzzusätze, DIN EN ISO 14919 / 01 Drähte, Stäbe und Schnüre zum Flamm- und Lichtbogen-spritzen, DIN EN 1274/96 Pulver zum thermischen Spritzen.

Gruppe	Beispiele	Gruppe	Beispiele
Reinmetalle	Al, Cu, Cr, Co Ni, Mo, Ti, Zn	Oxide	AL ₂ O, Cr ₃ O ₂ , TiO ₂ , ZrO ₂
Legierungen – selbstfließend	NiAl, NiCr, NiCr-Al, Stähle, Cu- und Sn-Lagermetalle	Hartstoffe	Boride, Carbide, Nitride
	NiBSi, NiCrBSi, CoNiCrBSi mit B und Si als Flussmittel	Pulvergemische	Cr ₃ O ₂ /NiCr, WC/Co
		Kunststoffe	Polyethen, PE; Polypropen PP

Die flüssig-festen Teilchen oxidieren beim Flug und werden beim Aufprall plattgedrückt. Es entsteht ein lamellares Gefüge mit Poren und Oxideinschlüssen, deren Anteil und Form von den Spritzbedingungen abhängt (Luft, Schutzgas oder Vakuum, Temperatur und Geschwindigkeit).

Oxidteilchen erhöhen die Härte (Verschleißwiderstand) aber senken die Zähigkeit.

Poren können Schmierstoffe aufnehmen, günstig wenn Gleiteigenschaften gefordert sind.

Eigenschaftsverbesserungen (z.B. die Haftung) der Schicht werden erreicht durch:

- Erhöhung der Aufprallgeschwindigkeit durch neue Verfahren, z.B. Hochgeschwindigkeits- oder Schock- (Detonations-) Flamspritzen.
- Spritzen im Vakuum oder Schutzgas.
- Nachträgliches Einschmelzen (nur bei selbstfließenden Legierungen (→ Tabelle 11.15).
- Mechanisches Verdichten durch z.B. Walzen.
- Füllen der Poren durch Imprägnieren mit Lack oder Kunststoffen.

Normung: Thermisches Spritzen

DIN EN ISO 2063/05 Zink, Aluminium und Legierungen.

DIN EN ISO 14924/05 Nachbehandlung von Schichten.

DIN EN ISO 14922/99 Qualitätsanforderungen an thermisch gespritzte Bauteile (4 Teile) und zahlreiche DVS-Merkblätter.

Infos: Gemeinschaft für thermisches Spritzen e.V. www.gts-ev.de

Tabelle 11.13: Thermisches Spritzen, Verfahrensvarianten

Verfahren	Temp.	Besondere Merkmale	Geschwindigkeit m/s	Spritzleistung
Flamm-Spritzen	FS	3000 °C	Kontinuierlich abschmelzender Draht mit Druckluftunterstützung aufgeschleudert	8 kg/h Stahl
	HOVF	3500 °C	Brennkammer mit Expansionsdüse (Wasserkühlung) und Pulverzufuhr	800...2000 18 kg WC/Co
Lichtbogen-Spritzen	LS	4000 °C	Der Lichtbogen wird zwischen zwei zugeführten Spritzdrähten gezogen, die aufschmelzen und durch Druckluft zerstäubt werden.	15...100 kg/h Stahl
Atmosph. Plasma-spritzen	APS	15000 K	Durch eine gekühlte anodische Düse und Wolframkatode wird ein Gasgemisch (Ar, N ₂ , H ₂) zu einem Plasmastrahl ionisiert, in dem das zugeführte Pulver schmilzt.	100...500
Vakuum	VPS			

Tabelle 11.14: Anwendungsbeispiele für thermisches Spritzen:

Funktion	Beispiel
Wärmedämmung	ZrO-MgO plasmagespritzt auf Brennkammern, Turbinenschaufeln
Reibung mindern	Mo flammgespritzt für Kolben, Synchronringe in Getrieben
Verschleißschutz	Ni-Cr-B-Si flammgespritzt, schmelzverbunden für Glas-Pressformen
Korrosionsschutz	Al-Oxid auf fadenführende Teile von Textilmaschinen
Regeneration	Al-Si flammgespritzt auf Bootskörper Cr-Stahl, 5 mm lichtbogengespritzt auf Wanne von Bodenverdichter

11.2.4 Auftragschweißen und -löten

Hartlegierungen werden mit Flammen oder Lichtbogen nach zahlreichen Verfahren abgeschmolzen, bei größeren Schichtdicken auch mehrlagig. Dabei bestehen die unteren sog. *Aufbaulagen* aus zäheren Werkstoffen. Je nach vorhandener Schlagbeanspruchung kann gewählt werden zwischen:

- harten carbidischen,
- zähen austenitischen und
- warmfesten (Ni-Cr-B)-Sorten (Tab. 11.15).

Auftragschweißen dient der Instandsetzung verschlissener Bauteile und Werkzeuge und kann mehrfach wiederholt werden.

Es wird auch bei der Neuanfertigung von Bauteilen eingesetzt, z.B. für Dichtflächen an Auslassventilkegeln (Kfz.) oder Panzerung von verschleißanfälligen Kanten von Tiefziehwerkzeugen.

Auftraglöten: Beschichten mit Ni-Hartloten, in die Hartstoffpartikel eingebettet sind. Kunststoff gebundene, flexible Vliese aus Hartstoffen und Loten werden maßgeschnitten fixiert und im Ofen auf die Teile gelötet (BraceCoat M-Verfahren für Schichten im mm-Bereich).

Werkstoffe für Partikel sind: Wolframcarbid WC, Chromcarbid Cr₃C₂, und ihre Mischungen.

Laserbehandlung: Als Wärmequelle zum Einschmelzen pulverförmiger Zusätze werden Laser eingesetzt. **Laserbeschichten** ermöglicht eine exaktere örtliche Begrenzung mit geringem Wärmeeintrag und verbesserter Haftung.

Tabelle 11.15: Schweißzusätze DIN EN 14700/05

Werkstoffgruppe	Typische Anwendungen
Schwach legierte Aufbauwerkstoffe	Aufbaulagen, Räder
Mangan-Chromlegierte Austenite	Pufferlagen, Brechbacken
mittellegierte, umwandlungs-härtende Werkstoffe	Kegelbrecher, Stachelwalzen
Chromcarbidhaltige Werkstoffe	Baggerzähne, Förderschnecken
Wolframcarbidhaltige Werkstoffe	Aufreibscheiben, Bohrkronen
Nickel-Chrom-Bor-Werkstoffe	selbstfließend, für Glasformen
Cobalt-Chrom-Wolfram-Werkstoffe	Sägen, Schieber

Anwendung: Partikelles Beschichten von z.B. Mischerschaufeln, Gehäusen, Rotoren und Rohrteilen zur Förderung abrasiv wirkender Flüssigkeiten. Dünne Schichten (0,05...0,3 mm) aus feinkörnigen Suspensionen aus Hartstoff, Lot und Binder durch Tauchen u.a. aufgetragen und ofengelötet (BraceCoat S).

Laserlegieren ist das Einschmelzen von LE in die Oberfläche.

Laserdispergierenbettet Hartstoffe (z.B. Diamantsplitter in die aufgeschmolzene Oberfläche ein).

11.2.5 Abscheiden aus der Gasphase

Verfahrensprinzip: Aufbringen von dünnen Schichten von < 15 µm, die bei **Unterdruck** und **höheren Temperaturen** aus dem Gaszustand auf dem Werkstück (als Substrat = Unterlage bezeichnet) aufwachsen. Es läuft in einem gasdichten, beschickbaren Gefäß ab.

Die beiden Hauptverfahren (→) unterscheiden sich im Mechanismus der Schichtbildung und den Verfahrensbedingungen (weiter unten).

Weiterentwicklungen der Verfahren ermöglichen das Abscheiden beinahe beliebiger Stoffe auf allen Substraten.

Substrate: Der Werkstoff muss Temperatur und Unterdruck des Verfahrens ohne Schaden überstehen. Nicht beschichtbar sind offenporige Stoffe. Die Oberfläche (→) des Substrats wird konturengetreu nachgebildet.

Schichtstrukturen: Wichtig ist eine dünne Schicht mit hoher Haftung zum Substrat (→). Darauf wächst die eigentliche Schicht z.B. säulenförmig (kolumnar), oder geschichtet (lamellar) auf, Bild 11.13. Strukturen sind wie auch die Korngröße von den Verfahrensbedingungen abhängig und damit steuerbar.

Schichtwerkstoffe: Hier kommen meist bekannte Hartstoffe (Carbide, Nitride, Carbonitride und Boride) zum Einsatz, wie sie als

- **Gefügebestandteile** in verschleißbeanspruchten Stählen und Hartmetallen enthalten sind oder durch
- **Wärmebehandlung** in der Randschicht entstehen (z.B. Nitrieren, Borieren), oder durch
- **Thermisches Spritzen** aufgebracht werden können, dann allerdings in größeren Schichtdicken.

Schwerpunkt sind Schichtwerkstoffe, welche die Bauteile oder Werkzeuge für höhere tribologische Anforderungen aufrüsten (→):

Im Vakuum haben *weniger* Teilchen (Ionen, Atome, Elektronen) *größere* Abstände (freie Weglänge) und damit höhere kinetische Energie beim Aufprall auf das Substrat. Das erhöht die Haftfestigkeit.

CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition)

PVD-Verfahren: (Physical Vapour Deposition)

Durch neue Verfahrensvarianten konnte die hohe Temperatur von ursprünglich ca. 1000 °C auf 200 °C abgesenkt werden. Dadurch ließen sich auch gehärtete Stähle beschichten.

Oberfläche: Freiheit von Verarbeitungshilfsstoffen (Kühlschmierstoffe, Fette) und Oxiden ist wichtig für die Haftung der Schicht und muss durch aufwändiges Reinigen sichergestellt werden z.B. durch Strahlen mit Hartstoffen und Ätzen.

Beispiel für eine Haftschiicht: Titanlegierungen für Gelenkprothesen werden mit fast reibungsfreien amorphen (diamantähnlichen) Kohlenstoffschichten ausgerüstet. Die C-haltigen Prozessgase erzeugen an der Oberfläche zunächst eine sehr dünne Schicht hartes Titancarbid TiC als Basis für die wachsende C-Schicht und zugleich Stützschicht für das weichere Titan.

Oxide des Al und Zr, die als harte massive Schneidstoffe eingesetzt werden, stehen ebenfalls als Schichtwerkstoffe zur Verfügung.

Stahlgefüge enthalten meist Carbide des Cr, V und Mo, auch Mischcarbide, Hartmetalle Wolframcarbid WC, Titancarbid TiC.

Nitrierstähle enthalten Aluminiumnitrid AlN, durch Borieren bildet sich in der Randhaut Eisenborid Fe₂B.

Plasmaspritzen kann auch hochschmelzende Stoffe, wie z.B. Oxide des Al oder Zirkon Zr verarbeiten.

Tribo-Anforderungen, Beispiele:

- Höhere Schnittgeschwindigkeiten, Standzeiten, Standmengen,
- Trockenlauf, Trockenspannen,
- niedrigste Reibwerte.

Tabelle 11.16: Schichtwerkstoffe für Werkzeuge, Beispiele

Schicht werkstoff(e)	Härte HV 0,05	Reibzahl tr./Stahl	T_{\max} in °C	Widerstandseigenschaft			Verwendung
				adhäsiv	abrasiv	korrosiv	
TiN	2200	0,4	600	++	++	+	goldgelbe Beschichtung, für universelle Verwendung, bioverträglich, Implantate
TiAlO	3700	0,5	900	+++	++	++	Hart- und Trockenbearbeitung GGV, Al-Si-Leg.
TiAlN TiCN/TiN	3300	0,3...0,35	900	++	+++	++	Mehrachsschichten auf HM- und HS-Werkzeugen

Neue Schichtstoffe sind Schichten auf Kohlenstoff-Basis, nach Lösung der Haftungsprobleme auch industriell erzeugt (Symbole nach VDI (→)):

- Amorphe C-Schichten (a-C:H), auch als DLC-Schichten (diamond like carbon) bezeichnet.

Die Möglichkeiten, durch Zusatz weiterer Elemente die Schichten zu modifizieren, sind groß. (Beispiele Tabelle 11.17).

- **Metallhaltige** C-Schichten (a-C:H:Me), haben elektrische Leitfähigkeit, hohe Haftung und reduzierte Reibung, sie ermöglichen niedrigere Prozesstemperaturen. z.B: WC/C.
- **Nichtmetallhaltige** Schichten (a-C:H:X) mit Si, O, N, F, B) haben z.B. besondere Benetzungsbarekeit und Klebverhalten (Antihafbeschichtung).
- **Kristalline** (→) Diamantschichten haben die einzigartige Kombination von höchstem Widerstand gegen Abrasion und Adhäsion mit geringster Reibzahl (Trocken), hoher Wärmeleitfähigkeit (> Cu), aber elektrisch *nicht leitend*.

Tabelle 11.17: Kohlenstoffschichten mit Reibzahlen von 0,1...0,2

Schicht- werkstoff(e)	Härte HV 0,05	T_{\max} in °C	Eigenschaften, Anwendung, Handelsnamen
Polykristall.	8000...		Für Wendeschneidplatten, Reibahlen, Bohr- und Fräswerkzeuge.
Diamant	10000	600	z.B. Balinit® Diamond, DIP, Bauteile für Trockenlauf
a-C:H	> 2500	350	Spindellager, Stirnreibringe, Wälzlager, Einspritzpumpenteile z.B. Balinit® Triton
a-C:H:W (WC/C)	1200	350	niedrige Härte, zäher, lamellar gradierte Schichten, werden nach außen C-reicher (Reibzahl ↓) Bauteilbeschichtung z.B. für Zahnräder, Teile mit Minimalmengenschmierung

Hinweis: VDI-Richtlinien, C-Schichten; E/04 Nr. 2840: Grundlagen, Schichttypen, Eigenschaften.

Amorphe C-Schichten enthalten C- und H-Atome ohne Kristallgitter. Zwischen den C-Atomen bestehen verschiedene Bindungen.

- Graphitbindung (sp^2) mit drei Bindungen zum Nachbaratom,
- Diamantbindung (sp^3) mit 4 Bindungen zum Nachbaratom

in wechselnden Verhältnissen. Mit dem Anteil an Diamantbindung steigt die Härte.

Zusätzliche Metallatome (Me) bilden Carbide. Bei hohem H-Anteil in der Schicht entstehen Plasma-Polymerne mit Kunststoffeigenschaften. Bei Fluor-Anteilen z.B. PTFE (Teflon).

Mit Si- und O-Anteilen ergeben sich Transparenz, Kratz- und UV-Schutz.

Kristallgrößen in Diamantschichten:

Nanokristallin (1...500 nm)

Mikrokristallin (0,5...10 µm)

Tabelle 11.18: Beispiele für Schichten mit speziellen Funktionen

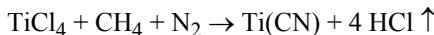
Funktion	Schichtstoff	Substrate	Beispiele
Wärmedämmung	Al-O-N oder	Ni-Legierung	Turbinenschaufeln, Brennkammern
Bioverträglichkeit	Ti-TiN	CoCrMo-Legierg.	Zahnprothesen
	a-C:H	Ti-Legierung	Gelenkprothesen, verschleißfrei
Antihaftend	a-C:H:Si:O TiBN	Stähle	Bauteile in Kontakt mit Lebensmitteln Druckgussformen

CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition)

Reaktion zwischen zugeführten Gasen und der Werkstückoberfläche. Das Reaktionsprodukt haftet fest auf dem Werkstück (Substrat). Nebenprodukte müssen abgesaugt werden.

Höhere Temperaturen (800...1000 °C)

Beispiel für eine Reaktion: Abscheidung von Titan-Carbonitrid aus Titan-Tetrachlorid und Ammoniak:



Die Reaktion läuft bei Temperaturen über 1000 °C ab. Folglich lassen sich nur Werkzeuge aus Hartmetall beschichten. Das Nebenprodukt HCl (Chlorwasserstoff = Salzsäure) muss abgesaugt werden.

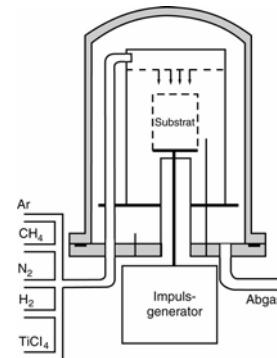
Neue Verfahren arbeiten z.B. mit anderen Reaktionspartnern oder **Plasmen** (→), die durch eingekoppelte, elektrische Felder erzeugt werden. Ziel ist die Absenkung der Substrattemperaturen. Zu diesen Verfahren gehören z.B. PECVD (→). Es sind Mischformen zwischen CVD und PVD.

PECVD-Verfahren: (Physical Vapour Deposition)

Sie arbeiten prinzipiell bei niedrigeren Temperaturen, die sich aus der Anwendung physikalischer Wirkungen (→) ergeben.

Beschichtungsstoffe werden aus einer Schmelze durch Verdampfen oder aus Feststoffen atomar in den Gaszustand versetzt und scheiden sich am kälteren Werkstück (Substrat) ab.

Niedrigere Temperaturen (50...500 °C)

**Bild 11.10** Prinzip des PECVD-Verfahrens

PECVD: (Plasma Enhanced CVD, auch als PACVD, (plasma assisted bzw. activated) bezeichnet (680...750 °C).

MT-CVD Mitteltemperatur-CVD, (700...900 °C)

Begriff: Plasma ist der 4. Aggregatzustand der Materie, die Moleküle sind teilweise in positive Ionen und negative Elektronen gespalten.

Anwendung: Die Beschichtung von Werkzeugen aus Sinter-Hartmetall mit TiN (goldfarben), TiC und Ti(CN) auch in Mehrlagen zur Erhöhung der Standzeit und -menge von Werkzeugen ist Stand der Technik.

Physikalische Wirkungen sind z.B.

- Unter Vakuum (10 – 3 Pa) verdampfen die Stoffe bei niedrigeren Temperaturen,
- in einem elektrischen Feld (+ Vakuum) werden die Teilchen beschleunigt und haften besser,
- geringe Wärmeleitung im Vakuum und größerer Abstand zwischen Metalldampfquelle und Werkstück halten dessen Temperatur niedrig.

Zur Steigerung der Abscheiderate werden die Gasteilchen durch elektrische Felder beschleunigt und als Teilchenstrom auf das Substrat geschossen. Die Temperaturen liegen bei 160...500 °C.

Die Teilchenströme entstehen z.B. durch:

Kathodenzerstäubung (Sputtern) beim Aufprall von geladenen Teilchen (Ionen) beim sog. *Sputter-Ion-Plating*.

Elektronenstrahlverdampfung (E-Beam) beim sog. *E-Beam-Ion-Plating*.

Lichtbogenverdampfung (Arc) beim sog. *Arc-Ion-Plating* oder *Ion-Bond-Plating* (→ Bild 11.11). Bei letzterem ist die Abscheiderate hoch, z.B. 18 µm/h für TiN-Schichten.

Der gerichtete Teilchenstrom führt zu einer Schattenwirkung (→) beim Beschichten, die Bauteilrückseite wird geringer getroffen. Teile mit komplizierter Geometrie (Hinterschneidungen, enge Bohrungen) lassen sich deshalb schwierig mit gleichmäßiger Dicke beschichten.

Durch Einleiten reaktionsfähiger Gase können Metallverbindungen erzeugt werden. Durch Einbau mehrerer Verdampfungsquellen lassen sich verschiedene Metalle gemischt oder nacheinander in einem Arbeitsgang verdampfen und durch die Reaktionsgase in die gewünschte Verbindung umwandeln.

Durch unterschiedliche Wärmedehnungen von Substrat- und Schichtwerkstoff entstehen Schubspannungen, die zum Ablösen der Schicht führen können.

Mehrachsschichten (multilayer) können Schichthaftung und Verschleiß optimieren. Eigenspannungen infolge der unterschiedlichen Wärmedehnungen von Substrat- und Schichtwerkstoff werden minimiert (Bild 11.12).

Neue Verfahren (→) arbeiten mit pulsierenden Plasmen oder Strahlen. Während des Impulses erhalten die Teilchen höhere Ionisation und Energie (damit auch bessere Haftung) als bei konstantem Energieeintrag, während die Substrate auf niedrigeren Temperaturen verbleiben. Das führt zu kleineren Korngrößen (Bild 11.13).

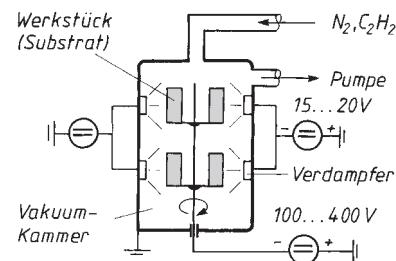


Bild 11.11 PVD-Verfahren (Ion-Bond-Plating), schematisch.

Schattenwirkung: Zum Ausgleich werden die Werkstücke in Halterungen planetenartig rotierend vor den Strahlenquellen angeordnet.

Prozessgase sind: N₂, CH₄, C₂H₄. So entstehen z.B. die Schichtwerkstoffe TiAlN, (Cr, Al)N, Ti+Al₂O₃, TiN+SiC-

(Ti, Al)N	Deckschicht, hochverschleißfest
TiN	zur Duktilisierung und Anpassung
Al ₂ O ₃	an die thermische Ausdehnung
AlN	zur Haftvermittlung
	Substrat

Bild 11.12 Beispiel eines Schichtsystems zur Beschichtung von Werkzeugen

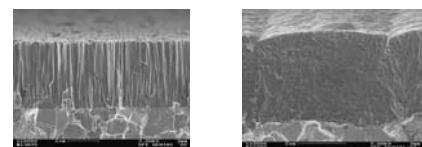


Bild 11.13 Bruchbilder von Ti, Al)N-Schichten, links konventionell, rechts mit H.I.P. hergestellt
(CemeCon)

H.I.P.-Technik (High Ionisation Pulsing)

Supernitride, Bezeichnung für nach gepulsten Verfahren hergestellte Schichten z.B. (Ti, Al)N aus TiN und AlN-Mischkristallen mit höherem Al-Anteil, dadurch hoch oxidationsbeständig (→).

Al bildet eine Al-Oxidschicht, die eine weitere Oxidation unterbindet. Supernitride zeigen 30...50 % weniger Werkzeugverschleiß als konventionell hergestellte Schichten (Bild 11.13).

11.2.6 Beschichten aus dem ionisierten Zustand

Mit den Verfahren der Elektrolyse (Galvanik) können Metalle und auch Legierungen zum Korrosionsschutz und zu dekorativen Zwecken auf Bauteile und Halbzeuge aufgebracht werden.

Hartverchromen arbeitet mit höheren Stromdichten, dabei werden H-Atome auf Zwischen-gitterplätze in das entstehende Cr-Gitter eingebaut. Die Gitterverzerrung ist Ursache einer Härte von ca. 1000 HV mit sehr geringer Zähigkeit. Die Folge sind Mikrorisse (→) in den Schichten, die bis 1 mm Dicke haben können.

Außenstromlos abgeschiedene Schichten entstehen durch Tauchen in Metallsalzlösungen, die ein Reduktionsmittel als Elektronenlieferant enthalten. In Ni-Salzbädern werden Schichten abgeschieden, die Ni mit den Elementen P oder B enthalten. Da elektrische Felder fehlen, ist die Abscheidung an Kanten und in Bohrungen gleich groß bei Dicken bis zu 1 mm.

Dispersionschichten auf Metallbasis entstehen durch Ausscheidung aus Lösungen, in die feinste Teilchen (0,01...10 nm) harter Stoffe (WC, SiC, Diamant), oder Festschmierstoffe (PTFE, Mo₂S) bis zu 30 % eingelagert sind. Matrixwerkstoffe sind Ni, Cu, Co und Ag.

Bei der Elektrolyse liegt der Schichtwerkstoff im Elektrolyten als Ion vor. Das Werkstück ist als Katode (Minus-Pol) einer Gleichstromquelle geschaltet. Die positiv geladenen Metall-Ionen lagern sich auf der Oberfläche an.

Mikrorisse mindern die Korrosionsbeständigkeit und Dauerfestigkeit von Bauteilen, dienen aber als Schmierstoffreservoir. Komplizierte Teile werden ungleichmäßig beschichtet (Nacharbeit).

Anwendung: Hydraulikzylinder und Kolbenstangen, Werkzeuge.

Nach einer Wärmebehandlung wird durch feindisperse Auscheidungen von Nickelphosphid Ni₃P die Härte auf ca. 1000 HV erhöht. Die Schichten sind zäher als Hartchrom, die Dauerfestigkeit bleibt erhalten. Günstig bei adhäsigem und Zerüttungs-Verschleiß, auch gegen Tribooxidation.

Die Kombination vieler Werkstoffe ermöglicht Funktionsschichten zur Verbesserung der Gleit- und Verschleißeigenschaften, Warmfestigkeit oder Oxidationschutz.

Anwendungen: Ni/P-Schicht mit SiC für Zylinderlaufbuchsen von Kleinmotoren, Gleitlagerschalen, Ventilkugeln mit PTFE in Ni-Matrix.

Tabelle 11.19: Übersicht, Beschichtungsverfahren und Dickenbereich

Dicke in mm	0,01	0,1	1,0	10	100 µm	1	10	100 mm
Plattieren (Fügen)								
Auftragschweißen								
Thermisch Spritzen								
Umschmelzverfahren								
Galvanisch Abscheiden								
Thermochemische V.								
Randschichthärtungen								
CVD-, PVD-Verfahren								
Ionenimplantieren								
Dicke in µm	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	100	1000	µm	

Literaturhinweise Schichten:

Zeitschrift:	mo, Metalloberfläche. Hanser-Verlag	
Benninghoff, H.:	Moderne Oberflächen in der industriellen Praxis. Ingenieur-Werkstoffe 7+8/1989	
Bode, E.:	Funktionelle Schichten. Hoppenstedt 1989	
Grünling, H.W. u.a.	Beschichtungstechnologie- heutige und künftige Anwendung von Schichten. VDI-Bericht 670, S.57...94	
N.N.	Oberflächenanalyse: Die wichtigsten Verfahren. Ingenieur-Werkstoffe, 7+8/1989	
Maier, K.:	NiSiC – Dispersionsschichten im Motorenbau. In Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, DGM 1993	
Pursche, G. (Hrsg.):	Oberflächenschutz vor Verschleiß. Verlag Technik Berlin 1990	
Schmeling, E. u. G. Schmitt	Verschleißschutz durch elektrochemisch und chemisch abgeschiedene Schichten. AHC-Oberflächentechnik,	
Steffens, H.-D. u. J. Wilden:	Moderne Beschichtungsverfahren. Dt. Gesellschaft für Materialkunde, DGM Informationsgesellschaft. Verlag Frankfurt 1996 Beschichten v. Werkzeugen d. Kaltmassivumformung (CVD/PVD)	
VDI-Richtlinie 3198/1992	Beschichten von Werkzeugen der Kaltmassivumformung (CVD,PVD)	
DVS, Deutscher Verband für Schweißtechnik; DVS- Verlag Düsseldorf	DVS-Merkblatt 2301 Thermisches Spritzen; DVS 2302 Korosionsschutz von Stählen und Gusseisenwerkstoffen durch thermisch gespritzte Schichten aus Zn und Al	
Informationen		
INO Info-System, FhG	CVD/PVD-Schichten	www.schichttechnik.net
AHC-Oberflächentechnik	Beschichtungen für Eisen- und NE-Metalle mit verschiedenen Funktionen	www.ahc-Oberflächentechnik.de
Balzers	PVD-Schichten. Balinit®Sorten	www.balzers-d.de
CemeCon >AG	CVD / PVD-Anlagen, Schichten	www.cemecon.de
VDI	Wissenstransfer Oberflächentechnik	www.surface-net.de

11.3 Lager- und Gleitwerkstoffe

11.3.1 Allgemeines

Bei der Kraft- und Bewegungsübertragung berühren sich Maschinenteile und gleiten aufeinander. Sie bilden ein Tribosystem (→ Tabelle 13.2). Grundkörper sind meist Bauteile aus Stahl oder Gusseisen im weichen, gehärteten oder beschichteten Zustand. Die Gegenkörper (Lagerwerkstoff) sollen geringen Verschleiß und Schmiermittelverbrauch verursachen, die Paarung eine niedrige Reibzahl ausweisen. Beim System Welle / Lager muss die entstehende Reibungswärme abgeführt werden, damit die Lagertemperatur nicht unzulässig ansteigt, wobei durch Wärmedehnung ein Klemmen auftreten kann.

Weitere Tribosysteme sind z. B. Zahnradpaarungen, Schnecke / Rad, Schraube / Mutter mit anderen Beanspruchungskollektiven. Für diese Beanspruchungen stehen zahlreiche Lagerwerkstoffe aus unterschiedlichen Legierungen, Polymeren und Keramik zur Verfügung.

In Tabelle 11.20 sind die Anforderungen an Lager- und Gleitwerkstoffe mit den erforderlichen Werkstoffeigenschaften gegenübergestellt.

Tabelle 11.20: Anforderungen an Lagerwerkstoffe und Eigenschaftsprofil

Anforderungen an Lagerwerkstoffe	Werkstoffeigenschaften
Belastbarkeit (Flächenpressung) und Fähigkeit, Fremdkörper einzubetten und Schmiertaschen zu bilden	Heterogene Gefüge mit härteren Tragkristallen und weicheren Gefügeteilen
Geringe Wärmeentwicklung, aber gute Ableitung von Reibungswärme, kein Klemmen durch Wärmeausdehnung	Niedrige Reibzahl und hohe Wärmeleitfähigkeit, Wärmedehnungen beachten
Niedriger Verschleiß = hohe Lebensdauer	Geringe Neigung zum Kaltschweißen (geringe Adhäsionsneigung, Abrasionswiderstand hoch)
Bei Mangelschmierung oder Ausfall soll ein kurzzeitiges Gleiten aufrecht erhalten werden (Notlaufegenschaften)	Oberflächlich schmelzende Bestandteile oder Festschmierstoffe im Gefüge
Bei nicht exakt fluchtenden Achsen kein Bruch durch Kantenpressung, Stoßbelastung oder durch Ermüdung,	Angepasste Zähigkeit, hohe Dauerfestigkeit

Tabelle 11.21: Gefüge der Lagerwerkstoffe

Gefüge	Werkstoffe
Harte Kristalle in weicher Matrix	Pb-Sn-Legierungen mit Antimon, PbSb-Kristalle sind härter (Hartblei) als das Grundgefüge, ebenso SnSb als intermetallische Phase
Weiche Gefügebestandteile in härterer Matrix	CuZn, CuSn, CuAl mit Zusätzen: Härtere intermetallische Phasen in weicheren Cu-Mischkristallen (kfz.); CuSnPb mit härteren CuSn-Phasen mit weichem Pb (Cu-unlöslich, erstarrt als letzte Phase) in feiner Verteilung.
Homogene Gefüge (Mischkristalle)	CuSn bei geringen Sn-Anteilen, P zur weiteren Mischkristallverfestigung und Minderung der Verschweißneigung, P hat Affinität zum Schmierstoff.
Heterogene Gefüge aus Metall- und Nichtmetallphasen	Trockengleitlager: Stahlstützschale mit aufgesinterter CuSn-Schicht (Bronze) und aufgewalzter PTFE-, oder POM -Schicht mit Festschmierstoffanteil (Graphit), Selbstschmierende Lager: Sintereisen oder -bronze. Porenräume mit Öl, Fett oder Graphit gefüllt.

Bauweise von Gleitlagern

- **Massivgleitlager** Die gesamte Lagerschale besteht aus dem Lagerwerkstoff. (Cu-Knet- und Gusslegierungen) als Sand-, Kokillen-, Strang-, oder Schleuderguss, je nach Größe und Stückzahl.
- **Verbundgleitlager** (alle Lagerwerkstoffe) in dünneren Schichten auf korrosionsgeschützten, verzinnten, oder verkupferten Stahlstützschalen (1...3 mm) zur Kraftübernahme und Ausgleich der Wärmedehnung. Tragschicht besteht aus Lagermetallen und evtl. Zwischenschichten als Diffusionssperre. Teilweise ist eine äußere Gleitschicht aufgebracht (Dreischichtlager).
- **Gleitschichten** (overlay) aus PbSn(Cu), werden galvanisch in dünner Schicht aufgebracht (< 20 µm), wichtig zum Einlaufen, für Grenzreibungszustände und als Korrosionsschutz.

11.3.2 Lagermetalle

Kennzeichen der Lagermetalle sind im Basismetall unlösliche Komponenten. Diese erstarren – abhängig vom Schmelzpunkt – als erste (Cu) oder letzte Phase (Pb). Auf diese Weise erhält man harte oder weiche Phasen im evtl. durch weitere LE verfestigten Grundgefüge. Es besteht die Gefahr von Seigerungen, deshalb wird Schleuderguss angewandt mit schneller Abkühlung, z.B. beim Ausgießen von Stützschalen.

Tabelle 11.22: Lagermetalle, Übersicht Legierungssysteme

Legierungs-system	Beispiele	Beschreibung	
DIN ISO 4381 Blei-Antimon-Zinn für Verbundlager mit kleinen Anteilen von Cu, As, Cd	Gusslegierungen PbSb15SnAs PbSb15Sn10 PbSb10Sn6 PbSb14Sn9CuAs SnSb12Cu6Pb SnSb8Cu4 SnSb8Cu4Cd	Dreifachsystem aus zwei eutektischen Systemen (PbSn und PbSb) kombiniert mit einem peritektischen (SbSn) mit kompliziertem Erstarrungsverlauf. Primäre Ausscheidung der harten Sb-reichen intermetallischen β -Phase, die als Tragkristalle in der Grundmasse (Pb+ β) vorliegen. As und Cd wirken weiter verfestigend. Bei Cu-haltigen Sorten scheidet sich primär eine harte, intermetallische CuSn-Phase dendritisch aus. Sie hält die später kristallisierten würfelförmigen SbSn-Kristalle in der bleireichen Schmelze in Schweben.	
Fettdruck: Sorten auch in DIN ISO 4383 für dünnwandige Gleitlager enthalten			
DIN ISO 4382-2 Kupfer-Zinn Kupfer-Zink (Massivlager)	Knetlegierungen CuSn8P CuZn31Si1 CuZn37Mn2Al2Si CuAl9Fe4Ni4	Homogene Gefüge aus kfz.-MK bis etwa 8%Sn, darüber heterogene mit der härteren intermetallischen δ -Phase. (Sondermessing), kfz.-Mischkristallgefuge, zähhart, geringe Notlaufeignung. Sehr hart, seewasserbest., für Konstruktionsteile mit Gleitbeanspruchung.	
DIN ISO 4382-1 Kupfer-Blei-Zinn-(Zink) Für dickwandige Massivgleitlager	Gusslegierungen CuPb8Pb2 CuSn10Pb CuSn12Pb2 CuPb5Sn5Zn5 CuSn7Pb7Zn3	Blei ist in Cu unlöslich, es bleibt zwischen den CuSn-Mischkristallen und härteren CuSn-Phasen flüssig und erstarrt zuletzt. Zn ersetzt teilweise das teure Sn (Rotguss). Pb wirkt bei Überhitzung als Notschmierstoff. Mit steigendem Pb-Gehalt sinkt die Härte, mit dem Sn-Gehalt steigt die Streckgrenze.	
Für dickwandige Massiv- und Verbundlager	CuPb9Sn5 CuPb10Sn10 CuPb15Sn8 CuPb20Sn5 CuAl10Fe5Ni5	Al erhöht Korrosionsbeständigkeit und Gleiteigenschaften, Fe verhindert das Entstehen spröder Phasen. Verschleißfeste, homogene Gefüge mit geringen Notlaufeigenschaften. Harte Werkstoffe geeignet für gehärtete Gegenkörper (Wellen), mit hoher Zähigkeit und Dauerfestigkeit.	
DIN ISO 4383 Für dünnwandige Verbundlager	CuPb10nSn10 CuPb17Sn5 CuPb24Sn4 CuPb30	Gesintert auf Stahlstützschale. Mit Pb-Gehalt steigt der Verschleißwiderstand im Bereich der Mischreibung und Korrosionsbeständigkeit gegen Schwefelverbindungen, deshalb Einsatz in Kfz-Verbrennungsmotoren mit Stillständen und Kaltstarts.	
Aluminium dünnwandige Verbundlager	AlSn20Cu AlSn6Cu Al-Si11Cu AlZn5Si1,5Cu1 Pb1Mg	weich härter hart hart	Al ist leicht und gut wärmeleitend, gleiche Wärmausdehnung wie bei Al-Gehäusen, die Al-Oxidschicht verhindert Adhäsion und Korrosion. Dünnwandig auf Stahlblech gewalzt und mit galvanischer Gleitschicht versehen.
Gleitschichten Overlays	PbSn10Cu2 PbSn10, PbIn7	weich	Galvanisch aufgebrachte Gleitschichten zum Einlaufen (ca. 0,02 mm) PbIn7 für Cu-Pb- und hochfeste Al-Legierungen

11.3.3 Weitere Lagerwerkstoffe

Selbstschmierende Lager

Sintermetalle Porenraum mit Schmierstoff gefüllt, selbstschmierend

Sinterisen, < 0,3 % C, 1-5 % Cu Sinterbronze, Cu + 9...11 % Sn	SKF	Lager mit kleinen Gleitgeschwindigkeiten (< 3 m/s), Haushalt- und Büromaschinen, Ventilatoren, Pumpen, Tonbandgeräte
Gleitlagerfolie Glacier DM®	Al-Streckmetall mit PTFE und Fest-schmierstoff eingewalzt und gesintert	Extrem dünnwandige Bauweise für z.B. spielfreie Scharniere

Trockengleitlager: DIN ISO 4383: Stahlrücken mit CuSn10- oder CuPb10Sn10-Schicht (0,2...0,4 mm), Poren mit PTFE oder POM und Festschmierstoffen gefüllt, als Einlaufschicht 5...30 µm oder dicker mit Schmiertaschen

Glycodur, Permaglide, DU-Trockenlager	statisch zul = 250 MPa, dynamisch 80...120 $v_{max} < 2 \text{ m/S}$	niedrige Reibzahl, nicht zu schmierende Lager von Textil-, Druckerei- und Haushaltmaschinen, Lichtmaschinen, Spur-stangenlager
---------------------------------------	---	--

Thermoplastische Polymere für Gleitlager DIN ISO 6691 6 Sorten

Polyamid PA PA6; PA66; Pa11;PA12	Ultramid, Sustamid, Durethan	zähhart, stoß- und verschleißfest, für schwingbeanspruchte Lager Kupplungen, Zahnräder. Für Mischreibung geeignet	Wellen gehärtet, ge-schliffen
Polyoxymethylen POM	Delrin, Hostaform		Öl, Fett, Festschmier-stoffe, Wasser
Polytetrafluorethylen PFTE	Teflon	weich, niedrige Reibzahl, kaltzäh	
Polyimid PI	Kinel, Kerimid	hart, wärmebeständig bis 350 °C	

Normen:

- DIN ISO 4378/99 – 1 Gleitlager – Lagerwerkstoffe u. Eigenschaften; – 2 Reibung und Verschleiß; – 3 Schmierung, – 4 Berechnungskennwerte und Kurzzeichen
- DIN ISO 4381/01 Blei- und Blei-Zinn-Verbundlager
- DIN ISO 4382/92 – 1 Cu-Gusslegierungen für dickwandige Verbund- und Massivgleitlager; – 2 Cu-Knetlegierungen für Massivgleitlager
- DIN ISO 8483/01 Verbundwerkstoffe für dünnwandige Gleitlager
- DIN 1495-3/96 Gleitlager aus Sinterwerkstoff, Teil – 1 und – 2 sind Maßnormen
- DIN ISO 6691/01 Thermoplastische Polymere für Gleitlager

11.4 Werkstoffe für Lötungen

11.4.1 Allgemeines

Löten ist eine stoffschlüssige Verbindung von Metallen untereinander und auch mit artfremden Stoffen (z.B. Keramik). Die Partner werden nicht aufgeschmolzen, ein Erweichen und Verformen dünner Strukturen muss vermieden werden. Dazu ist das Lot nach seinem Schmelzbereich auszuwählen (→). Die Oxidation der Fügeflächen wird durch Flussmittel (Tabellen 11.24 + 11.26) verhindert. Sie lösen die Oxide. Flussmittelreste können korrosiv wirken und müssen dann entfernt werden.

Fugenlöten: Der Lötpunkt wird durch Kapillarwirkung auch gegen die Schwerkraft gefüllt. Voraussetzung: Spaltbreite von < 0,2 mm und oxidsfreie Oberflächen.

Spaltlöten für größere Spaltbreiten erfordert höheren Lötmittelleinsatz (nicht für Ag-haltige Lote).

Lotart	Arbeitstemperatur
Weichlote	< 450 °C
Hartlote	> 450 °C
Hochtemperaturlote	> 900 °C

Festigkeit der Lötstelle: Eine festhaftende Verbindung der Metalle kommt nur zu Stande, wenn das geschmolzene Lot die Oberfläche der Bauteile benetzt, wenn es „fließt“ (→).

Benetzung erfolgt, wenn Lot und Bauteilmittel sich lösen, d.h. in der Grenzfläche Mischkristalle oder intermetallische Phasen bilden. Metall-Lot-Kombinationen mit vollkommener Unlöslichkeit sind nicht lötbar.

11.4.2 Weichlote

Weichlote sind eutektische Legierungen. Der niedrige Schmelzpunkt wird durch Zulegieren dritter und vierter Elemente mit abweichenden Kristallgittern oder Atom-Ø erreicht. Das toxisch wirkende LE Cadmium ist bei den neuen Sorten vermieden worden. Die Norm DIN EN 29453 enthält 25 Sorten der früheren Norm (DIN 1707 Z). Die restlichen 25 Sorten sind in DIN 1707-100/01 angeführt. Tabelle 11.23 gibt eine Übersicht.

Tabelle 11.23: Übersicht, Legierungssysteme für Weichlote

Systeme nach DIN EN 29453			Systeme nach DIN 1707-100/01					
Legierungs-System	Stck.	Schmelz-Bereich °C	Legierungs-System	Stck.	Schmelz-Bereich °C	Legierungs-System	Stck.	Schmelz-Bereich °C
Sn-Pb	10	183...325	Sn-Pb	4	183...242	Pb-Sn-Ag	1	304...365
Sn-Pb-Sb	7	183...270	Sn-Pb (Sb)	3	186...295	Cd-Zn-Ag	3	270...380
Sn-Pb-Bi	3	180...205	Sn Pb (Cu)	1	183...190	Cd-Ag	1	340...398
Sn-Pb-Cd	1	145	Sn-Pb (P)	4	182...215	CdZn	1	265...280
Sn-Pb-(Cu)	4	183...215	Sn-Cd	1	180...195	Sn-Zn	3	195...385
Sn-Pb-Ag	7	178...190	Sn-Pb-Ag	2	178...210	Zn-Al	1	380...390

Tabelle 11.24: Flussmittel zum Weichlöten, Bezeichnungen nach DIN EN 29454-1/94

Typ	Basis	Aktivator	
1 Harz	1 Kolofonium, 2 ohne	1 ohne Aktivator, 2 Halogene	Angehängt wird ein Buchstabe:
2 organisch	1 wasserlöslich, 2 nicht	3 ohne Halogene	
3 anorganisch	1 Salze	1 mit NH_4Cl , 2 ohne	A für flüssig, B für fest,
	2 Säuren	1 mit H_3PO_4 , 2 ohne	C für Paste
	3 alkalische Stoffe	1 Amine und/oder Ammoniak	Beispiel: Flussmittel DIN EN 29454-1-2.2.A

Korrosive Wirkung der Flussmittelreste und Vergleich der Kurznamen DIN 8511-2/Z (F-SW...) mit denen nach DIN EN 29454-1/94 (untere Zeile).

	stark korrosiv					bedingt korrosiv					nicht korrosiv					
	F-SW...	11	12	13	21	22	23	24	25	26	27	28	31	32	33	34
EN		3.2.2	3.1.1	3.2.1	3.1.1	3.1.2	2.1.3	2.1.1	2.1.2	1.1.2	1.1.3	1.2.2	1.1.1	1.1.3	1.2.3	2.2.3

11.4.3 Hartlote DIN EN 1044/99 (Entwurf 2006)

Die Kurzzeichen nach DIN EN 1044/99 nennen das Basiselement, evtl. ein weiteres, danach die Zählfürze. Kurzzeichen nach DIN ISO 3677/95 bestehen aus einem **B**, dem Basiselement, dem Hauptelement mit Prozentangabe, dann die weiteren LE nach fallenden Anteilen geordnet (ohne %-Angabe. LE unter 1 % werden nicht genannt). Nach einem Bindestrich folgen Solidus- und Liquidustemperaturen in °C.

Tabelle 11.25: Übersicht Hartlote, Auswahl

Kurz.-Zeichen DIN EN 1044 Anzahl Sorten	Kurzeichen nach DIN8513/Z	Kurzzeichen nach DIN EN ISO 3677	Arbeits- temp. °C	Anwendungen	
Aluminium-Hartlote , Gruppe AL mit 4,5...10,5 % Si und z. T. Cu, Mg oder Bi					
AI 104	7	L-A1Si12	B-Al88Si-575/585	595	Al- und Al-Legierungen < 2 % Mg
Silber-Hartlote Gruppe AG, alle Ag-haltigen Sorten, auch wenn Ag nicht das Basis-LE ist, 10 Cd-haltige					
AG 102	32	L-Ag55Sn	B-Ag55ZnCuSn-620/655	650	Cd-frei, für Trinkwasserleitungen, bis 150 °C Betriebstemperatur
AG 206		L-Ag20	B-Cu44ZnAg(Si)-690/810	810	Für Löstellen mit max. 200 °C Betriebstemperatur
AG 304		L-Ag40Cd	B-Ag40ZnCdCu-595/630	610	Stahl, Cu-, Ni-Legierungen mit Flussmittel, bis 200 °C Betr.-Temp.
AG 402		-	B-Ag60CuSn-600/730	720	CrNi-Stähle, Titan
Kupfer-Hartlote , Gruppe CU 8 hoch Cu-haltige und 6 CuZn mit Sn oder Ni					
CU104	14	L-SFCu	B-Cu00(P)-1085	1100	Stähle
Kupfer-Phosphor-Hartlote , Gruppe CP, davon 5 Sn-haltige. Für Cu ohne Flussmittel verwendbar, nicht geeignet für ferritische Werkstoffe, Cu- und Ni-Legierungen					
CP102	10	L-Ag15P	B-Cu80AgP-645/800	700	Cu/Cu ohne, Cu-Legierungen mit Flussmittel, bis 200 °C Betr.-Temp.
CP203	-	L-CuP	B-Cu94P-710/890	760	
Nickel-, Cobalt-, Palladium und Gold-Hartlote , Gruppen Ni, Co, Pd, Au					
Ni 101	12	L-NiI	B-Ni73CrFeSiB-980/1060	1020	Ni, Co und ihre Legierungen, Stähle
Co 101	1	-	B-Co51CrNiSiW(B)-1020/1150	1140	
Pd 201	10	neu	B-Pd60Ni-1235	n.b.	Vakuumlöten reaktiver Metalle
Au 101	6	neu	B-Au80Cu(Fe)-905/910	n.b.	Elektronik, Schmuck

Lieferformen: blanke und umhüllte Stäbe, Drähte, Folien und Bänder, Granulate, verdüste Pulver, Lotringe und Formteile, Lötpasten mit Flussmittel

Tabelle 11.26: Flussmittel zum Hartlöten (DIN EN 1045/97)

Fügewerkstoffe	Fluss- mittel	Wirkbereich °C	Löt- Temp. °C	Rückstand korrosiv?	Bemerkungen
Universell, Schwermetalle	FH10	550...800	> 600	ja	hygrokopische Bor-Fluor-Verbindungen müssen durch Beizen und Waschen entfernt werden
CuAl-Liegberg. (< 10 % Al)	FH11				
Hartmetall, rostfreie Stähle	FH12		> 750		
Universell, Schwermetalle	FH20				
Universell, Schwermetalle	FH21	750...1100	> 800	nein	mechanisch zu entfernen
Cu- und Ni-Legierungen	FH30	> 1000	> 1000	nein	
Stähle	FH40	600...1000	> 700	ja	ohne Borverbindungen
Aluminium	FL10	> 400...700	600	ja	waschen, beizen
Aluminium/Edelstahl	FL20	> 400...700	600	nein	nicht hygrokopisch

Aktivolute zum Verbinden von keramischen Stoffen wie z.B. Siliciumnitrid, Al/Zr-Oxid oder Si-AlN unter sich oder mit Metallen ohne eine vorherige Metallisierung. Sie basieren auf dem System Cu-Ag (CuPt) mit Anteilen von Ti, Zr oder Hf (z.B. AgCu27Ti3). Ti reagiert auf Grund seiner hohen Sauerstoffaffinität mit der Keramikoberfläche. Wichtig für die Festigkeit der Verbindung ist Löten unter Vakuum und Einhaltung von Temperatur und kurzen Lötzeiten.

11.5 Werkstoffe mit steuerbaren Eigenschaftsänderungen

11.5.1 Begriffe

Diese neueren Werkstoffe werden auch als intelligente Werkstoffe (smart materials) bezeichnet. Sie reagieren – ähnlich den Lebewesen – auf äußere Reize mit bestimmten Änderungen ihres Zustandes.

Als Reize wirken auf diese Werkstoffe von außen physikalische Effekte, wie z.B. mechanische Verformung, elektrische Spannungen oder magnetische Felder. Sie reagieren darauf mit Zustandsänderungen, z.B. Auftreten einer elektrischen Spannung (Piezoeffekt), der Lichtdurchlässigkeit (bei Gläsern) oder der Viskosität (bei Flüssigkeiten). Diese Änderungen sind reversibel, d.h. gehen bei Verschwinden der Anregung in den Ausgangszustand zurück.

Die Werkstoffe werden als Sensoren oder Aktoren bezeichnet und sind für den neuen Technikzweig der Adaptronik von Bedeutung.

Sensor: Bauteil, das Änderungen physikalischer Größen erfassen und meist in Form elektrischer Signale weitergeben kann.

Aktor (auch Aktuator): Gerät, das aufgenommene Signale durch Umwandlung zugeführter Energie in Aktionen umsetzt. Auch ein Werkstoff, der bei Anlegen einer Spannung sich verlängert, d.h. eine mechanische Bewegung erzeugt.

Adaptronik befasst sich mit technischen Systemen, die mithilfe von Sensoren und Aktoren sich automatisch geänderten, äußeren Bedingungen anpassen.

Adaptiv: selbsteinstellend, -anpassend

Tabelle 11.27: Übersicht, Werkstoffe der Adaptronik (Wirkungsweise → Einzelabschnitte)

Werkstoffe	Wirkungsweise	Anwendung, Möglichkeiten
Piezokeramik monolithisch, Fasern, Folien	Kräfte bewirken Formänderung, die in proportionale, elektrische Spannung umgesetzt wird Elektrostraktion ist die Umkehrung (inverser Effekt)	Sensoren zur Bauteilüberwachung, Schallempfänger, Piezofeuzeuge, Schwingungsdämpfung flächiger Bauteile, z.B. Lärmreduktion an Rotorblättern Aktoren für Einspritzpumpen und -ventile, Piezotasten, Ultraschallsender
Formgedächtnis-Legierungen (Memory-Leg.)	Ausgangsform wird durch Umformen verändert, nach Erwärmen (Strom) geht die Verformung zur Ausgangsform zurück	Brillengestelle, Rohrverbinder in hydraulischen Hochdruckanlagen, Regelventile, Stell-Antriebe im Modellbau
Flüssigkeiten mit veränderbarer Viskosität	Verkettung von Mikroteilchen mit Dipolen durch Spannungen, bei magnetischen Eigenschaften durch Magnetfelder	Adaptive Stoßdämpfer, Ersatz von Ventilen in hydraulischen Anlagen

11.5.2 Piezokeramik

Piezoelektrizität. An Kristallen von Quarz, Bariumtitanat, BaTiO_3 u.a. wird durch eine Formänderung in Richtung bestimmter Kristallachsen das Gleichgewicht zwischen positiven und negativen Ladungsträgern verschoben. Durch diese sog. Polarisation tritt eine elektrische Spannung auf. Sie ist ein Maß für die Verformung. Diese Eigenschaft wird bei den **Sensoren** ausgenutzt.

Bild 11.14 a zeigt schematisch die Ionen eines Quarzkristalls im Ruhezustand. Durch Kräfte in x-Richtung wird er gestaucht (Bildteil b) und der positive Ladungsschwerpunkt (Dreieck, große Kreise) liegt tiefer als der negative Es entsteht eine Polarisation mit dem +Pol unten.

Durch Kräfte in y-Richtung wird der Kristall gestreckt (Bildteil c), der positive Ladungsschwerpunkt verlagert sich nach oben und der +Pol kommt nach oben zu liegen.

Elektrostriktion ist die umgekehrte (inverse) Erscheinung, die Formänderung bei Anlegen einer Spannung und wird bei den **Aktoren** ausgenutzt. Sie verläuft sehr schnell und geht nach Abschalten mit einer gewissen Hysterese zurück.

Werkstoff für Anwendungen im Maschinenbau (\rightarrow ist als Weiterentwicklung von Bariumtitanat, das Blei-Zirkon-Titanat, $\text{Pb}(\text{ZrTiO}_3)$, kurz PTZ.

11.5.3 Formgedächtnis-Legierungen (FGL)

Die Stoffe werden auch Memory-Legierungen (\rightarrow) genannt. Dazu gehören die Systeme NiTi , CuAlZn und AuCd . Technische Bedeutung hat $\text{Ni}50\text{Ti}50$ (Nitinol) gewonnen.

Innere Vorgänge: Bei der Abkühlung erfolgt eine Gitterumwandlung von kubisch (Austenit) zu martensitisch (Zwillingsstruktur) ohne Formänderung. Bei Erwärmung verläuft der Vorgang entgegengesetzt mit einer Hysterese (Bild 11.15). Die zugehörigen Temperaturen sind für

- Martensitbildung: Beginn M_s und Ende M_f ,
- Austenitbildung: Beginn A_s und Ende A_f .

Temperaturbereich, Breite und Steigung der Hystereseschleife hängen vom Legierungstyp ab und lassen sich durch dritte LE verändern.

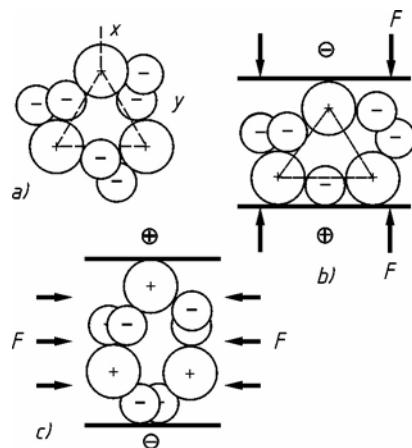


Bild 11.14 Piezoelektrisches Prinzip beim Quarz SiO_2 . Si + große, O- kleine Kreise

Anwendung in Aktoren, z.B. zur Feinpositionierung von Geräten für die Herstellung von Mikro- oder Nanostrukturen (Computer-Chips), Ventilantriebe für Motoren. Werkstoff wird auch als Folie und Faser mit Polymerschutz und Kontakten zur Stromleitung hergestellt. Folien werden übereinander gelegt (Multilayer), um im Paket größere Längenänderungen zu erzielen.

Memory-Effekt: Werkstoffe nehmen nach einer plastischen Verformung bis zu 10 % bei niedriger Temperatur ihre ursprüngliche Gestalt an, wenn sie erwärmt werden.

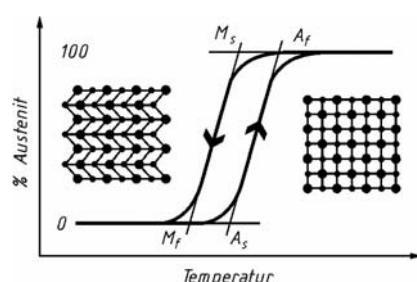


Bild 11.15 Umwandlungen und Hysterese bei der FGL NiTi (nach Stöckel)

Bei einer Verformung des Martensits unterhalb $T_{\text{ü}}$ wird die Zick-Zack-Form ohne Platzänderung der Atome in Schritten längs der Zwillingsebenen ausgerichtet (Bild 11.16) (diffusionslose Umwandlung). Das geschieht bei niedrigen Kräften bis zu einer Dehnung von ca. 8 %.

Nach Erwärmung oberhalb der Umwandlungstemperaturen versucht das Teil seine ursprüngliche Form wiederherzustellen. Dabei kann das Bauteil eine Kraft ausüben, die bei zwei Anwendungen genutzt wird.

Anwendung 1: Kraft-Weg-Nutzung (Aktor) wiedeholbarer Effekt (Bild 11.16, Pfeil 2-Weg).

Erfolgt die Verformung des Martensits z.B. eines Drahtes durch eine konstante Kraft (Gewicht), so wird nach Erwärmung über die Umwandlungstemperaturen (Austenit) die Last wieder angehoben. Nach Abkühlung (zu Zwillingsmartensit) kann die Last die Verformung neu beginnen.

Anwendung 2: Unterdrücktes Formgedächtnis. einmaliger Effekt, (Bild 11.16, Pfeil 1-Weg).

Bei Erwärmung bis oberhalb der Temperatur $T_{\text{ü}}$ wandelt sich der verformte Martensit wieder zurück in Austenit. Das Bauteil wird an der Rückumformung gehindert und es entsteht eine Spannung. Sie ist der unterdrückten Dehnung proportional.

Weitere Anwendungen:

Freies Formgedächtnis. Das verformte Teil kehrt beim Erwärmen ohne Kraftanwendung in die Ausgangsform zurück.

Superelastizität ist ein elastisches Verhalten bis zu 10 % Dehnung (10 mal größer als bei normalen Legierungen). Die Austenit-Martensit-Umwandlung erfolgt bei diesen Sorten nicht durch Abkühlung, sondern durch Verformung **oberhalb** der Umwandlungstemperaturen.

Dabei entsteht bei niedrigen Spannungen Martensit (sog. spannungsinduzierter M.) ohne Zwillingsstruktur. Nach Entlastung nimmt das Gitter (ohne Erwärmung!) wieder die stabilere, austenitische Struktur und damit die Ausgangsform an.

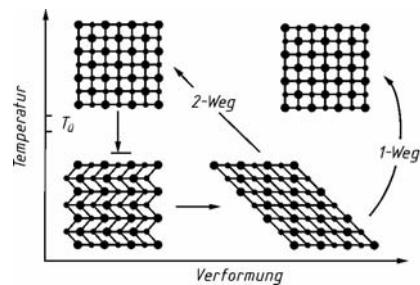


Bild 11.16 Mechanismus des Formgedächtnis-Effektes
(nach Stöckel)

Beispiele: temperaturabhängige Regelventile, Thermoschutzschalter, Stellantriebe für Modellbahnsignale.

Beispiele: Rohrverbinder für Hochdruckhydraulikleitungen im Flugzeugbau, Schrumpfringe zur Fixierung von Elementen auf Wellen.

Beispiele: formbare Instrumente oder Werkzeuge in der Medizintechnik. Nach Gebrauch und Sterilisation nehmen sie die Ausgangsform an und können sie neu gebogen werden.

Voraussetzung ist eine tiefe Lage der Umwandlungstemperaturen, der Werkstoff ist bei der Anwendung stabil austenitisch.

Beispiele: Für den medizinischen Bereich gibt es NiTi-Basislegierungen mit Umwandlungstemperaturen unterhalb der Körpertemperatur. Anwendung z.B. für Gefäßstützen (Stents), Zangen und Drähte für die minimal-invasive Chirurgie, superelastische Brillengestelle und Antennen für Mobiltelefone.

11.5.4 Flüssigkeiten mit steuerbarer Viskosität

Rheologische Flüssigkeiten enthalten feindispersierte Teilchen mit Dipolen oder solche mit magnetischen Eigenschaften.

Dipole richten sich beim Anlegen einer elektrischen Spannung zu Ketten aus. Dadurch verstieft die Flüssigkeit im Bruchteilen einer Sekunde zu einem zähen Gel.

Diese **elektro-rheologischen** Flüssigkeiten (ERF) sind z.B. isolierende Siliconöle mit Stabilisatoren, die das Absinken der Teilchen verhindern.

Magnetorheologische Flüssigkeiten (MRF) zeigen die gleiche Wirkung beim Anlegen eines Magnetfeldes.

Begriffe:

Viskosität, Zähigkeit von flüssigen Körpern, Rheologie, Lehre vom Fließen.

Dipole: siehe S.13

Anwendungen: Stoßdämpfer, die elektronisch der Beladung und dem Straßenzustand angepasst werden (adaptive Systeme).

Hochdruckhydrauliköle mit solchen Teilchen könnten ohne Ventile (Leckgefahr) mit elektrischen oder magnetischen Feldern gesteuert werden (Entwicklungs möglichkeit).

Literatur:

- | | |
|--|--|
| Czichos, H.: | Mechatronik. Vieweg 2006 |
| Stöckel, D.: | NiTi-Formgedächtnislegierungen – Intelligente Werkstoffe für moderne Problemlösungen,
VDI-Bericht 797, S. 203 |
| Wick/Nußkern/Stöckel: | Nickel-Titan – ein außergewöhnlicher Werkstoff. VDI-Bericht 1595, S. 269 |
| GST Gesellschaft für Systemtechnik (Krupp) | Firmenschrift |

12 Korrosionsbeanspruchung und Korrosionsschutz

12.1 Einführung

Korrosion ist die chemisch-physikalische Reaktion eines metallischen Stoffes mit seiner Umgebung, die zu einer Eigenschaftsänderung führt. Sie kann die Funktion eines metallischen Bauteiles oder des zugehörigen Systems beeinträchtigen.

Reaktionen des Metalles mit dem Umgebungsmedium, in dem das eigentliche **Angriffsmittel** enthalten ist, wandeln den Werkstoff in das **Korrosionsprodukt** (z.B. Rost) um. Es kann löslich, locker oder auch fest haftend sein.

Die Folgen sind aus dem Alltag bekannt und führen meist zu einem Werkstoffverlust mit folgenden Auswirkungen:

- Schwächung der Querschnitte, dadurch höhere Spannung mit größerer Dehnung unter Last, zunächst elastisch, dann plastisch, evtl. Brüche oder Durchrosten von Rohren mit Leckagen.
- Verletzung der Oberfläche, dadurch evtl. eine Minderung der dekorativen Wirkung, weiterhin Kerbwirkung mit Abfall der Dauerfestigkeit dynamisch belasteter Bauteile (→).
- Volumenvergrößerung durch das Korrosionsprodukt, dadurch Blockierung beweglicher Teile und Sprengwirkung in engen Spalten.

Korrosionsschäden liegen erst dann vor, wenn die Funktion des Bauteils oder Systems beeinträchtigt ist (Definition oben).

Korrosion erfolgt durch chemisch-physikalische Reaktionen. Diese können in drei Gruppen eingeteilt werden. Die letzte – die elektrochemische Reaktion – tritt am häufigsten und in zahlreichen Varianten auf und ist Schwerpunkt des Abschnittes Korrosion (→ 12.2).

Begriff: Korrosion „corrodere“ (lat.) = zernagen.

Korrosion – z.B. das Rosten des Stahles – verursacht Schäden, die jährlich auf ca. 4 % des Bruttosozialproduktes geschätzt werden. Sie steht damit als Schadensursache gleichrangig neben dem Verschleiß. Korrosion- und Korrosionsschutz haben deshalb große Bedeutung. Es wird durch eine große Anzahl von Normen und anderen technischen Regeln deutlich.

Normen: Korrosion der Metalle und Legierungen

DIN EN ISO 8044/99 – Grundbegriffe und Definitionen.

DIN 50900-2/05 – Elektrochemische Begriffe

DIN EN 12502/05 Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und -speichersystemen (→ Tab. 12.6 und 12.9).

Der Werkstoffabtrag betrifft die Randschichten, das vermindert die Flächenmomente der Bauteile besonders stark, dort herrschen die maximalen Spannungen.

Bei Dauerversuchen in Salzlösung wird keine Dauerfestigkeit erreicht, die Wöhlerkurve geht nicht in eine Waagerechte über (Bild 14.4).

Beispiel: „Festrost“ von Schrauben oder Nabe/Welle-Verbindungen, Aufwölben von Lackschichten oder Punktschweißnähten durch Rost.

Beispiele: Bei dekorativen Flächen kann dies bereits eine Verfärbung sein, während z.B. beim Kanaldeckel eine Rostschicht noch keinen Schaden darstellt.

Hinweis: Korrosionsschäden können bei einer Produkthaftung zu Auseinandersetzungen führen. Dabei wird der Stand der Technik an den geltenden Normen gemessen werden.

12.1.1 Chemische Reaktion

Diese Art der Reaktion findet zwischen Metall und Gasen statt (Hochtemperatur- und Heißgas-korrosion). Das Korrosionsprodukt wächst auf dem Grundmetall in Schichten auf, die meist durchlässig sind und dann durch Diffusion weiter wachsen können.

12.1.2 Metallphysikalische Reaktion

Oberflächliche Auflösung bei Kontakt mit Metallschmelzen, Erhöhung der Rauheit, Gitterumwandlungen bei tiefen Temperaturen, Eindiffundieren von H-Atomen in Zwischen-gitterplätze auch bei niedriger Temperatur, die Entstehung des Wasserstoffs kann dabei durch andere Reaktionen erfolgen.

12.1.3 Elektrochemische Reaktion

Bei dieser Reaktion sind elektrische Ströme beteiligt. Sie entstehen, wenn Metalle in Kontakt mit sog. **ionenleitenden Medien** (→) zusammenkommen, in den meisten Fällen Wasser, das Ionen enthält und zum Elektrolyten wird. Es kann dadurch elektrischen Strom transportieren. Zusammen mit den metallischen Bauteilen ergeben sich galvanische Elemente (→).

Wegen der Häufigkeit von Kontakten der Bau-teile mit Wasser (Regenwasser, Brauchwasser usw.) ist das die wichtigste Reaktionsart.

Beispiele: Anlassfarben bei Stahl und Anlaufen von Metallen in Gasen durch Bildung von Oxid- oder Sulfidschichten, Silber wird schwarz.

(Ver)Zunderung von Stahl in heißen Gasen. Es entstehen die Oxide FeO , Fe_3O_4 und Fe_2O_3 , letzteres unter Volumenvergrößerung und Locke- rung der Schicht.

Beispiele: Druckgussformen für Al-Legierun-gen haben kleinere Standmengen, da bei den hohen Gießtemperaturen Fe aus der Oberfläche des Werkstückes gelöst wird.

Zinnpest: Umwandlung des tetr. Gitters in ein rhomb. mit größerem Volumen bei unter 13 °C.

Beizsprödigkeit: Abfall der Zähigkeit nach dem Beizen in Säuren bei abgeschreckten oder kaltverfestigten Stählen.

Ionenleitfähige Medien sind:

- Elektrolytlösungen (wichtigste),
- Salzschmelzen (Schmelzflußelektrolyse),
- Durch elektrische Felder ionisierte Luft (z.B. Blitze, Lichtbögen, oder auch Gase mit hohem Unterdruck und hohen Tem-pe-raturen (PVD-Verfahren, Ionitrieren),
- Spezielle Polymere und Oxidkeramik in Brennstoffzellen (Feststoffelektrolyte).

In galvanischen Elementen wird elektrische Energie aus der Oxidation eines unedlen Metalles gewonnen, das dabei in Ionenform (positives Kation) in Lösung geht (→ 12.2.3).

12.2 Grundlagen der elektrochemischen Korrosion

12.2.1 Die Entstehung von Ionen

Ion, (grch.) das Wandernde. Ionen entstehen aus Atomen oder Atomgruppen durch Abgabe oder Aufnahme der Valenzelektronen. Sie erhalten dadurch eine elektrische Ladung (Übersicht).

Übersicht: Bildung von Ionen

Elemente oder Gruppe	Elektronen	Ionen und Ladung
Metalle, Wasserstoff	Abgabe	positive Kationen
Nichtmetalle, OH-Gruppe, Säurereste,	Aufnahme:	negative Anionen

Hinweis: Metallatome → 2.1.2

Metalle sind wegen ihrer unvollständigen Elektronenhülle bis auf die Edelmetalle (Gold, Platin u.a.) unbeständig und gehen deshalb chemische Verbindungen z.B. mit Nichtmetallen ein. Dabei gehen Valenzelektronen auf das Nichtmetall über, und es wird **Energie frei**.

Beide Partner erhalten dadurch (im Idealfall) die stabile Edelgashülle und sind in diesem energieärmeren Zustand (z.B. als Oxide) beständig. Bei der Metallgewinnung muss die Energie wieder zugeführt werden (Reduktions-energie).

Die ungleich geladenen Ionen ziehen sich an, es entsteht dadurch eine **chemische Verbindung**. Die Partner werden durch die **Ionenbindung** (auch heteropolare B.) zusammengehalten.

Dazu gehören folgende Stoffe:

Anziehungskraft ist die elektrostatische Anziehung nach Coulomb. Sie errechnet sich aus:

Kraft F_C = Produkt der Ladungen/Abstand². Der Abstand ergibt sich aus der Summe der Ionenradien. Die Kraft gilt für das Vakuum und wird durch **Lösungsmittel** erniedrigt.

Beispiel: Ionenbindungen

	Zusammensetzung	Beispiel
Basen	Metall-Ion(en) und OH-Gruppe(n)	Natriumhydroxid $\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{OH}^-$
Säuren	H-Ion(en) und Säurerest-Ion(en)	Schwefelsäure $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2 \text{H}^+ + (\text{SO}_4)^{--}$
Salze	Metall-Ion(en) und Säurerest-Ion(en)	Kupfersulfat $\text{CuSO}_4 \rightarrow \text{Cu}^{++} + (\text{SO}_4)^{--}$

12.2.2 Ursache der Ionenleitfähigkeit von H_2O

Reines Wasser hat eine sehr geringe elektrische Leitfähigkeit, es besteht überwiegend aus H_2O -Molekülen. Die beiden H-Atome liegen jedoch nicht in einer Achse mit dem O-Atom (Perlenkette) sondern einseitig (Bild 12.1).

Das O-Atom zieht die bindenden Elektronen stärker zu sich als die H-Atome. Dadurch ist die H-Seite des Moleküls positiv, die O-Seite negativ geladen, das Molekül wird zum **Dipol**.

Im gelösten Zustand sind die Ionen von Wasser-Dipolen umgeben, sie bilden die **Hydrathülle**. Sie hat nach außen die gleiche elektrische Polarität wie das umhüllte Ion (Bild 12.1). Durch den größeren Abstand verringert sich die Coulombsche Kraft (\rightarrow) und die Ionen werden im Wasser beweglich, d.h. können zu einer Elektrode mit entgegengesetzter Ladung *wandern*.

Der beschriebene Vorgang – die Aufspaltung einer Ionenverbindung im Wasser – wird **elektrolytische Dissoziation** genannt, Wasser wird dadurch zu einem **Elektrolyten**, einem ionenleitenden Medium.

12.2.3 Lösungsdruck:

Das Bestreben eines Metalls, durch Elektronenabgabe in den Ionenzustand und unter Abgabe von Elektronen in Lösung zu gehen wird als Lösungsdruck bezeichnet (\rightarrow Versuch). Es erreicht dadurch einen Zustand niedrigerer Energie und höhere Stabilität.

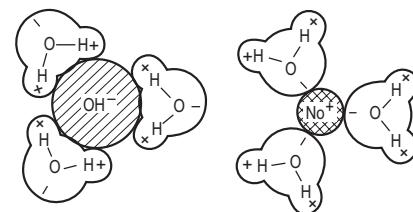


Bild 12.1 Dipol des Wassers und Hydrathülle

Beispiel: NaOH-Kristall im Wasser (Bild 12.1). H_2O -Dipole lagern sich mit der negativen O-Seite an die positiven Na-Ionen an und andere mit der positiven an die negativen OH-Ionen des NaOH-Kristalls und demontieren das Gitter, d.h. die Ionenverbindung *lässt sich im Wasser*.

Die Abschwächung der Coulombschen Bindungskräfte in Lösungsmitteln wird durch die sog. Permittivität (veraltet Dielektrizitätskonstante) erfasst: Sie beträgt für Wasser ca. 80 und erniedrigt damit die Anziehung der Ionen auf den 80-sten Teil.

Versuch: Zn-Blech in einer CuSO_4 -Lösung, die aus Cu^{++} und SO_4^{--} -Ionen besteht. Das Zn-Blech überzieht sich langsam mit einer rötlichen Schicht aus Kupfer.

Ursache: Zn ist unedler, es hat gegenüber Cu den *höheren* Lösungsdruck (\rightarrow galvanische Spannungsreihe).

Übersicht: Beschreibung des Versuches

Vorgänge	Reaktionen	Reaktionsgleichungen
• Zn-Atome gehen als Zn^{++} -Ionen in Lösung:	Oxidation von Zn:	$Zn \rightarrow Zn^{++} + 2 e^-$
Die abgegebenen Elektronen können nicht abfließen und geben dem Blech ein negatives Potential :		
• Cu ⁺⁺ -Ionen werden angezogen, nehmen die Elektronen auf, werden reduziert und bilden die Cu-Schicht:	Reduktion von Cu :	$Cu^{++} + 2 e^- \rightarrow Cu$

12.2.4 Galvanische Spannungsreihe

Der Lösungsdruck kann als elektrische Spannung in Volt gegen eine Bezugselektrode gemessen werden. Sie wird als Standardpotential (Normal-Potential) bezeichnet.

Als Bezugselektrode dient ein Platinblech, das von H₂-Gas umspült wird. Der Wasserstoff H ist damit der Nullpunkt der Skala.

Die Zusammenstellung der Messwerte ergibt die galvanische Spannungsreihe (Tabelle 12.1).

Übersicht: Beschreibung der Spannungsreihe

Oberer Teil: Hier liegen die relativ beständigen Edelmetalle, gegenüber dem Wasserstoff sind sie *positiv*. Sie wirken gegenüber unedlen Metallen als **Oxidationsmittel** (→ Cu im Versuch).

Unterer Teil: Unterhalb des Wasserstoffs liegen die unedlen Metalle. In Kontakt mit einem Elektrolyten haben sie ein stärkeres Bestreben, unter Abgabe von Elektronen als Ion in „Lösung zu gehen“. Das zeigt sich durch eine höhere *negative* Spannung, ein negatives Potential. Sie wirken gegenüber den edleren als **Reduktionsmittel** (→ Zn im Versuch).

12.2.5 Galvanisches Element

Im galvanischen Element als Stromquelle sind jeweils zwei Metalle mit einem Elektrolyten kombiniert (→), die in der Spannungsreihe weit auseinander liegen. Die Differenz der Normalpotentiale ergibt dann die Quellenspannung U_q .

In einer Trockenbatterie (→ Beispiel) „fließen“ beim Schließen des Stromkreises Elektronen. Sie werden von der Oxidation der Anode (Zn-Becher) geliefert, dafür gehen Zn-Ionen in den Elektrolyten. Die Kathode (Graphitstab) bleibt unverändert, hier werden H-Ionen entladen und zu H-Atomen reduziert.

Tabelle 12.1: Galvanische Spannungsreihe

Metall	Standart-potential V	Charakter
Gold, Au	1,42	
Silber, Ag	0,80	
Kupfer, Cu	0,34	
Wasserstoff, H	0	
Blei, Pb	-0,13	
Zinn, Sn	-0,14	
Eisen, Fe (2 ⁺)	-0,44	
Chrom, Cr (3 ⁺)	-0,74	
Zink, Zn	-0,76	
Aluminium, Al	-1,66	
Magnesium, Mg	-2,38	

Oxidationsmittel: Stoff, der Elektronen aufnimmt und die Oxidation herbeiführt. Er selbst wird dabei reduziert.

Reduktionsmittel: Stoff, der Elektronen abgibt und die Reduktion herbeiführt. Er selbst wird dabei oxidiert.

Beispiel: Trockenbatterie (Kohle-Zink-Element)

Elektrolyt	Anode	Kathode	U_q
NH ₄ Cl+H ₂ O (Salmiak)	Zink -0,76 V	Graphit 0,73 V	1,5 V

Der auf der Kathodenoberfläche abgelagerte Wasserstoff senkt die Potentialdifferenz C-Zn auf den Betrag H-Zn (die sog. Polarisation). Deshalb muss der entstehende Wasserstoff mithilfe von MnO₂ (Braunstein) entfernt werden. Das geschieht nach der Reaktionsgleichung



Dabei wird Wasserstoff zu Wasser oxidiert und MnO₂ zu MnO reduziert.

Tabelle 12.2: Bestandteile und Reaktionen eines galvanischen Elementes:

Bauteil	Reaktionen
Anode, ist unedel, wird verbraucht	Anodische Reaktion: Anodenmetall wird zum Kation oxidiert und löst sich im Elektrolyten, Elektronen fließen über den metallenen Leiter ¹⁾ zur Kathode.
Elektrolyt	Enthält Ionen in wässriger Lösung, ermöglicht ihre Wanderung durch H ₂ O-Dipole
Kathode, ist edel, ist geschützt	Kathodische Reaktion: Elektronen ziehen die positiven H-Ionen an und reduzieren sie zu H-Atomen

¹⁾ Leiter mit Elektronenleitung (Metalle, Graphit)

12.2.6 Korrosionselemente

Bild 12.2 zeigt ein Bimetall-Element als einfaches Beispiel eines Korrosionselemente (Tabelle 12.2).

Bei den verschiedenen Korrosionselementen werden Anode und Kathode nicht von definierten Metallkörpern gebildet, sondern von Oberflächenbereichen, auch Gefügebestandteilen. Sie werden von der ionenleitenden Phase (evtl. nur in dünner Schicht) bedeckt und ergeben sog. **Lokalelemente**. Die Elektronen können durch das Innere der metallischen Teile fließen. Deshalb gilt grundsätzlich:

Korrosionselemente sind kurzgeschlossen.

Der Verlauf der Korrosion wird stark vom Unterschied der Anoden- und Kathodenfläche beeinflusst (→ Beispiele).

Nach den Abständen von Anoden- und Kathodenbereich der Lokalelement unterscheidet man:

	Abstände
Mikroelemente	Mikroskopischer Bereich
Makroelemente	mm bis km (z.B. bei erdverlegten Kabeln und Röhren)

Weiteren Einfluss auf den Ablauf der Korrosion hat die Art des Elektrolyten, sein pH-Wert (→). Es ist in den meisten Fällen Wasser mit gelösten Stoffen, kann aber auch feuchtes Erdreich sein.

Elektrolyt	pH-Wert	Beispiele
sauer	$1 \leq 7$	Lösungen von Säuren, sauren Salzen oder Gasen wie CO ₂ , H ₂ S
neutral	7	Reines Wasser, Salzlösungen
basisch	$\geq 7 \leq 14$	Laugen, basische Salzlösungen (Soda)

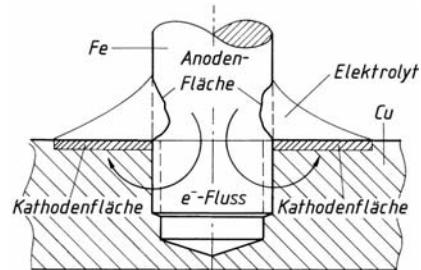


Bild 12.2 Bimetall-(Kontakt)-element aus Stahlschraube (mit Muldenkorrosion) in Kupfer

Beispiel: Stahlblech verzinkt

- Zn-Oberfläche bildet **großflächige** Anode.

Der Flächenabtrag ist dadurch gering

- Kleine Kathodenflächen entstehen durch kleine Risse in der Schicht und die Schnittkanten des Fe-Kerns, sie sind geschützt.

Beispiel: Stahlblech verzinnt (Weißblech)

- Edleres Sn bildet großflächige Kathode, der
- Fe-Kern bildet bei Kratzern in der Sn-Schicht eine **kleine** Anodenfläche.

Der Abtrag geht in die Tiefe.

Begriff: pH-Wert (potentia hydrogenii), die Wasserstoff-Ionen-Konzentration [H⁺].

Reines Wasser ist nur schwach dissoziert, d.h. in H⁺- und OH⁻-Ionen gespalten.

$$[\text{H}^+] = 0,86 \cdot 10^{-7} \text{ mol/Liter (bei } 18^\circ\text{C)}$$

Darin ist 1 mol H \approx 1 g

Als pH-Wert des Wassers ist der negative Wert des Exponenten – 7 festgelegt: **pH (H₂O) = +7**.

Elektrolyten mit $\text{pH} < 7$ (sauer). Unedle Metalle werden darin angegriffen, sie bilden anodische Bereiche, hier findet die anodische Reaktion statt:

- Metalle gehen als positive Ionen in Lösung,
- Elektronen fließen über den metallenen Kurzschluss zur Kathode und reduzieren dort H^+ -Ionen, H-Atome reagieren zu H_2 -Molekülen

Elektrolyten mit $\text{pH} \geq 7$ (neutral bis basisch). Sie entstehen häufig durch den Einfluss des Luftsauerstoffs, mit dem der Elektrolyt in Berührung kommt. Das O_2 löst sich und wird an der Kathode durch die Elektronen abgebaut (\rightarrow).

Das führt zu weiteren Reaktionen, besonders bei Stahlbauteilen im Freien (\rightarrow Beispiel).

- Die an der Anode entstehenden Fe^{2+} -Ionen reagieren mit OH^- -Ionen zu Eisen(II)hydroxid:
- Durch O-Zutritt wird es zu Fe(III)hydroxid oxidiert, das zu unlöslichem Fe-Oxihydrat zerfällt:

Belüftungselemente mit ähnlichen Reaktionen entstehen bei unterschiedlichem O_2 -Gehalt des Elektrolyten. Sauerstoffarme Bereiche können keine schützende Oxidschicht aufbauen und sind anodisch, während die sauerstoffreichen als Kathode die Oxidschicht (Rost) aufbauen.

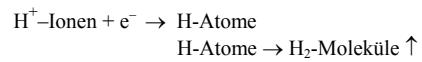
Tabelle 12.3: Übersicht Korrosionselemente

Name, Beispiel	Anode (wird angegriffen)	Kathode (ist geschützt)
Bimetall- (Kontakt-) Element aus verschiedenen Metallen, die sich berühren		
Al-Blech mit Cu-Niet	Al-Blech	Cu-Niet
Stahlblech verzinkt	Zn-Schicht	Stahlblech
Messing-Armatur in Stahlrohr	Stahlrohr	CuZn-Armatur (Messing)
Mikro- (Lokal-) element aus kleinen anodischen und kathodischen Bereichen der Oberfläche (des Gefüges)		
heterogene Gefüge, Stahl	Ferrit	Zementit
Gefüge mit Ausscheidungen, Metalle, kaltverformt	Al-Mischkristall verformte Bereiche mit Spannungen (höherer Energiezustand)	AlCuMg-Auscheidungen unverformte Bereiche, spannungsarm (Energie niedriger)
Konzentrationselemente: Gleicher Elektrodenwerkstoff, Elektrolyt hat unterschiedliche Konzentrationen oder Temperaturen an Anode und Kathode		
Belüftungselement, Wassertropfen auf Stahl	unbelüfteter, O-armen Bereich im Zentrum, Narben	belüfteter O-reicher Bereich, Außenbereich mit Rostring

Anodische Reaktion:



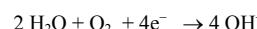
Kathodische Reaktion:



(Ältere Bezeichnung Säure- oder Wasserstoffkorrosion).

Hinweis: Belüftetes Wasser liegt in Fluss- und Meereseoberflächenwasser vor, ebenso im Regenwasser als dünne Schicht auf Bauteilen.

Kathodische Reaktion bei Sauerstoffzutritt:



Es entstehen OH^- -Ionen, die den Elektrolyten basisch machen.

Beispiel: Eisenrost. Eisen kann 2- und 3-wertig auftreten. Kathodenreaktion verläuft in Stufen

- 1 $\text{Fe}^{2+} + 2 \text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$
- 2 $\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$
- 3 $\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{FeOOH}$ (Rost) + H_2O

(Ältere Bezeichnung Sauerstoff-Korrosion).

Beispiel: Spundbohlen im Wasser korrodieren an der Wasser-Luft-Grenze. Dicht unterhalb ist der Sauerstoffgehalt des Wassers niedriger, hier wird Fe anodisch gelöst und oberhalb als Rost abgelagert. Diese Erscheinung wird als Belüftungskorrosion bezeichnet und tritt auch in engen Spalten auf (Spaltkorrosion).

12.3 Korrosionsarten

Die Norm DIN EN ISO 8044 nennt 37 Arten der Korrosion, von denen hier nur die wichtigsten behandelt werden können.

Korrosionserscheinung ist die Veränderung des Korrosionssystems (→) durch die Korrosion. Dabei können sog. Korrosionsprodukte entstehen.

12.3.1 Korrosionsprodukte

entstehen als Ergebnis einer Korrosion. Sie können fest, flüssig (selten) oder gasförmig sein (z.B. H₂-Entwicklung).

- **Zunder**, örtlich verstärkt als *Zunderausblühung* auftretend, oder mit höherem S-Gehalt auch als *Schwefelpocken* bezeichnet.
- **Rost**, als *Flugrost* bei beginnender Rostbildung auf Eisen. *Fremdrost* sind Ablagerungen von Rost auf fremden Metalloberflächen.

Deckschichten: Wenn das Korrosionsprodukt dichte und feste Schichten bildet, welche die Oberfläche gleichmäßig bedecken, können sie die Korrosion verlangsamen oder stoppen.

Passivschichten sind sehr dünne (ca. 10 nm) vom Werkstoff und Korrosionsmedium gebildete Schichten. Sie haben eine geringe Ionenleitfähigkeit und geben dem Werkstoff ein edleres Potenzial (Stellung in der Spannungsreihe).

12.3.2 Korrosionsarten und -erscheinungen

Gleichmäßige Flächenkorrosion wirkt mit etwa gleicher Korrosionsgeschwindigkeit auf der gesamten Oberfläche. Sie entsteht durch Witterungseinflüsse in Verbindung mit Staub und Gasen (saurer Regen). Die Abtragung ist kalkulierbar (Tabelle 12.4) und kann durch Wahl dickerer Querschnitte aufgefangen werden.

Örtliche Korrosion beschränkt sich auf bestimmte Stellen des Bauteils und ist darum gefährlicher. Zu ihr gehören Loch- und Spaltkorrosion.

Spaltkorrosion entsteht durch Belüftungselemente, die sich in engen Spalten bilden.

Unter Korrosionsarten sind auch die als Korrosionserscheinung (wie z.B. Loch- oder Muldenfraß) bekannten Begriffe zu finden.

Korrosionssystem ist der Oberbegriff für die Gesamtheit, bestehend aus einem oder mehreren Metallen in einer Umgebung, die das Angriffsmedium enthält (Temperatur und Strömungsgeschwindigkeiten), auch Oberflächenschichten und entstandene Korrosionsprodukte (→ Bild 12.5).

Zunder besteht vorwiegend aus Oxiden, die bei höheren Temperaturen an der Oberfläche entstehen, z.B. bei Ofenbauteilen oder Wärmekraftanlagen. Bei der Wärmebehandlung wird Zunder durch Schutzgas verhindert.

Rost entsteht bei der Korrosion von Stahl und Fe und ist schichtartig aus den Oxiden und Hydroxiden des Fe zusammengesetzt.

Beispiele: Als Deckschichten sind es z.B. Schutzschichten, wie Bleisulfatschicht auf Pb in Schwefelsäure oder Patina auf Cu-Dächern.

Beispiel Passivschichten: Oxidschichten auf Cr- und CrNi-Stählen, Al-Oxid auf Al, evtl. durch anodische Oxidation verstärkt (z.B. Hart-Anodisation, Elokal-Verfahren).

Tabelle 12.4: Klimaeinfluss auf die Abtragungsgeschwindigkeit in µm/Jahr

Klima	Blei	Zink	Stahl
Landluft	0,7...1,4	1,0...3,4	4.. .60
Stadtluft	1,3...2	1,0...6	30... 70
Industrie- luft	1,8...3,7	3,8...19	40...160
	1,8	2,4...15	64...230
Meeresluft			

Beispiel: Punktgeschweißte Bleche, Dichtungen und Anlageflächen, anliegende Verpackungsfolien mit Rissen (eindringende Feuchtigkeit), Unterseite von nicht durchgeschweißten Nähten.

Lochkorrosion (Lochfraß) ist eine örtliche, tiefer gehende Abtragung mit steilen Rändern, die z.T. unterhöhlt sind (Bild 12.3). Sie wird eingeleitet:

- an Störstellen in der Bauteilloberfläche durch inhomogenen Werkstoff, oder durch
- örtliche Verletzung einer schützenden Schicht.

An dieser Stelle entsteht eine *winzige* Anodenfläche, die einer großen Kathodenfläche zugeordnet ist. Der Abtrag geht dann in die Tiefe und führt in kurzer Zeit zu Durchbrüchen in Rohrleitungen und Behältern mit u.U. schweren Folgeschäden.

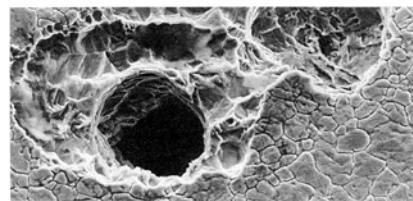


Bild 12.3 Lochkorrosion an X5CrNi18-9 500:1

Lochkorrosion wird bei korrosionsbeständigen CrNi-Stählen in Kontakt mit Halogen-Ionen (F, Cl, Br) beobachtet, ebenso an Cu-Wasserrohren durch Glührückstände von Ziehfetten.

Interkristalline Korrosion (auch Kornzerfall genannt). Dabei verläuft der Angriff längs der Korngrenzen und zerstört den Zusammenhang.

Austenitische CrNi-Stähle sind im Anlieferungszustand abgeschreckt. Beim Wiedererwärmen (Schweißen) scheiden sich Cr-Carbide an den Korngrenzen aus. Der an Cr verarmte Kornrand wird anodisch und geht in Lösung. Die Risse entstehen zwischen (inter) den Körnern.

Interkristalline Korrosion wird bei Cr-Ni-Stählen verhindert durch

- Absenkung des C-Gehaltes auf < 0,03 %, es können keine Carbide mehr ausscheiden, z.B. Stahl **X2CrNi18-9**,
- Zusatz von starken Carbidbildnern (Ti, Ta, Nb, sog. stabilisierte Sorten), sodass keine Cr-Verarmung auftritt, z.B. Stahl **X10CrNiTi18-9**.



Bild 12.4 Interkristalliner Riss

Begriff: Selektiv bedeutet, dass die Bestandteile einer Legierung nicht gleichmäßig korrodieren, es verändern sich nur bestimmte Phasen.

Selektive Korrosion bedeutet Angriff des Korrosionsmittels auf Gefügebestandteile oder Legierungselemente, die unedler als die Umgebung sind.

Beispiele für Selektive Korrosion

Entzinkung von 2-phasigen Cu-Zn-Legierungen:	Die zinkreichere β -Phase ist Anode, der Cu-Anteil scheidet sich als lockere Schicht ab.
Al Cu mit Ausscheidungen von Al_2Cu	Cu Al_2 ist Kathode, während das Al anodisch angegriffen wird
Spongiose bei perlitischem Gusseisen in Wasser oder Dampf	Umwandlung von Ferrit in Fe-Oxihydrat. Es verbleibt ein Gerüst aus Graphit und Phosphid-Eutektikum, sodass die Bauteilform erhalten bleibt.

Bimetall- (Kontakt-) Korrosion kann entstehen, wenn Metalle mit unterschiedlichem Potenzial (Stellung in der galvanischen Spannungsreihe) elektrisch leitend verbunden und einem Korrosionsmittel ausgesetzt sind. Es bilden sich Bimetall- (Kontakt-) Elemente (→ Bild 12.2).

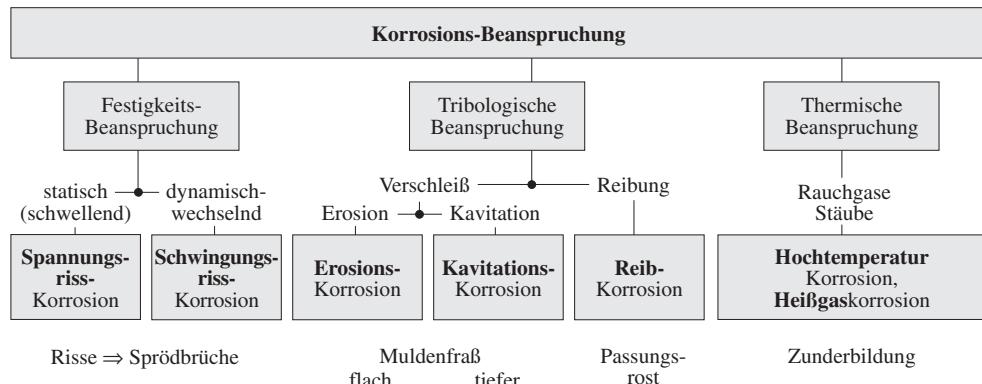
Beispiel: Fügen von Bauteilen aus verschiedenen Metallen durch Nieten, Clinchen, Schweißen, Löten.

Hartlötnähte (Cu-Legierungen) von Stahl bei Gegenwart von Lötmittelresten.

Abhilfe ist durch Isolierung der Partner möglich.

12.4 Korrosionsarten mit zusätzlichen Beanspruchungen

Schema: Gliederung der zusammengesetzten Beanspruchungen



12.4.1 Korrosion und Festigkeitsbeanspruchung

Diese Kombination trifft vor allem Bauteile in chemischen Industrieanlagen bei der Behandlung von korrodierenden Stoffen, auch solche in ständigem Kontakt mit Meerwasser.

Wie bei der Lochkorrosion kann es zu plötzlichem Versagen der Bauteile kommen, ohne dass größere Korrosionserscheinungen an der Oberfläche eine Vorwarnung geben.

Vorhandene **Mikrokerben** haben erhöhte Spannungen im Kerbgrund, werden dort plastisch verformt und sind *unedler* als die Umgebung. Sie werden anodisch abgetragen, wobei die Spannungen im Kerbgrund weiter steigen, bis der Bruch erfolgt.

Spannungsrisskorrosion (SpRK) entsteht bei *statischer Belastung* (evtl. schwellend überlagert) z.B. bei Druckleitungen und -behältern. Entstehungsbedingungen sind:

- Zugspannungen (auch Eigenspannungen), die unter der Streckgrenze liegen.

Hinweis: In der chemischen Industrie wird etwa ein Drittel der Korrosionschäden durch diese beiden Korrosionsarten verursacht.

Spannungsrisskorrosion erfolgt nach drei Mechanismen.

Anodische SpRK wird durch Anionen (z.B. Cl^- , O^{2-}) ausgelöst, welche die passivierende Oberflächenschicht angreifen. In Verbindung mit Zugspannungen vertiefen sich die Risse bis zum Bruch.

Kathodische SpRK wird durch H-Atome ausgelöst, die an kathodischen Stellen reduziert werden und aufgrund ihrer Kleinheit in das Gitter auf Zwischengitterplätze eindiffundieren. Sie führen zur Wasserstoffversprödung, auch Wasserstoff induzierte SpRK genannt.

Flüssigmetall induzierte SpRK wird seit dem Jahre 2000 bei geschweißten Stahlkonstruktionen mit Schmelztauchüberzügen aus neueren Zn-Legierungen beobachtet. Ursache sind Schweißeigenspannungen in Verbindung mit den hohen Tauchtemperaturen und bestimmten Gehalten der Zn-Legierung an Sn, Pb und Bi.

- bestimmte Paarungen von Metall/Medium, die als **kritische Systeme** bezeichnet werden,
- in kritischen Systemen gibt es keine Neubildung der Passivschicht an den Störstellen.

Gefährdet sind besonders höherfeste Stahlsorten mit geringen Dehnungswerten (\rightarrow). Die Risse können transkristallin oder intrakristallin verlaufen.

Schwingungskorrosion (SwRK) bei dynamischer Belastung, z.B. bei Wellen von Rührwerken, Pumpen und Schiffswellen kann in *allen* Elektrolyten stattfinden. Durch die Korrosion werden die rissbildenden Vorgänge beim Dauerbruch noch verstärkt. So wird bei Stahl bereits in Leitungswasser die ertragbare Ausschlagsspannung von Biegewechselproben durch diese Vorgänge verringert.

Deshalb gibt es für korrosions- und dynamisch belastete Bauteile keine Dauer-, sondern nur **Zeitfestigkeiten**. Die Wöhlerkurve verläuft auch für hohe Lastspielzahlen *fällend* (Bild 12.4).

12.4.2 Korrosion unter Tribo-Beanspruchung

Erosions- und Kavitationskorrosion werden durch strömende Medien verursacht. Wesentliche Einflussgröße ist die *Strömungsgeschwindigkeit* u des korrosiven Mediums, die je nach Metall bestimmte Werte nicht überschreiten soll (Tabelle 12.5).

Bei ruhenden Flüssigkeiten kann Stillstandskorrosion mit Loch- und Spaltkorrosion auftreten. Steigende Geschwindigkeiten fördern die **Erosion** (\rightarrow). Sie trifft die Deckschicht, die besonders bei Wirbelbildung durch Scherkräfte verletzt wird. Dadurch steigt die Abtragungsgeschwindigkeit.

Bei sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten entsteht **Kavitation** (\rightarrow).

Die Schläge der zusammen brechenden Gasblasen

- zerstören örtlich die Deckschicht,
- verformen und versprühen den Werkstoff und
- erhöhen die chemische Reaktionsfähigkeit.

Dadurch steigt die Geschwindigkeit der Abtragung, die lochfraßartig in die Tiefe geht.

Anfällig für SpRK sind z.B.:

- Austenitische Stähle** durch Cl- und OH-Ionen,
- unlegierte und niedriglegierte Stähle** in basischen Medien,
- hochfeste Al-Legierungen** in feuchter Umgebung

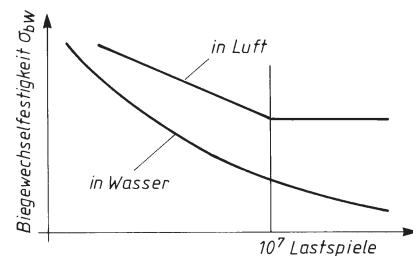


Bild 12.4 Wöhlerkurve bei Angriff durch Schwingungsrisskorrosion (SwRK)

Hinweis: Schweißverbindungen höherfester Stähle in Meerwasser erhalten durch WIG-Aufschmelzen oder Verfestigungsstrahlen der Einbrandkerben eine höhere Dauerfestigkeit. Die Kombination beider Verfahren erhöht die Lebensdauer beträchtlich. Anwendungen bei Stahlkonstruktionen im Offshorebereich.

Tabelle 12.5: Strömungsgeschwindigkeit u_{\max} in reinem Wasser

Werkstoff	Cu	Cu-Fe	Cu-Al	Ni-Leg.
u_{\max} in m/s	1,8	4,0	3,0	...30

Erosion ist die mechanische Abtragung der Oberfläche durch strömende Flüssigkeiten oder Gase. Mitgeführte Feststoffteilchen verstärken die Verschleißrate durch *Abrasion* (Furchung). Hinter Feststoffablagerungen in Leitungen bilden sich Wirbel. Dort kann Muldenkorrosion auftreten.

Kavitation ist der Verschleiß durch zusammen fallende Dampfblasen an der Oberfläche. Sie entstehen dort, wo der statische Druck in einer Flüssigkeit infolge hoher Geschwindigkeit sinkt (z.B. bei Querschnittsverengungen nach dem bernoullischen Gesetz). Wenn die Strömung sich verlangsamt, steigt der statische Druck wieder und die Dampfblasen fallen zusammen. Dabei wirken hohe Kräfte auf die Oberfläche!

Strömungskavitation z.B. bei Wasserturbinen, **Schwingungskavitation** z.B. im Kühlkreislauf von Dieselmotoren.

Reibkorrosion findet zwischen Bauteilen statt, die fest aufeinander gepresst sind (Welle/Nabe), aber durch Schwingungen eine Relativbewegung ausführen können. Die Reibung zerstört die Deckschicht und das Korrosionsmittel kann ständig den reaktionsfähigen Werkstoff angreifen.

12.4.3 Korrosion und thermische Beanspruchung

Hochtemperaturkorrosion: Werkstoff reagiert mit den Bestandteilen der Brennstoffe (Schweröl). Es bilden sich Oxid-, oder Sulfidschichten, auch mehrschichtig (→). Schützende Deckschichten wachsen anfangs schneller, mit der Zeit immer geringer (parabolisches Dickenwachstum, liegende Parabel).

Größere Volumenunterschiede zwischen Werkstoff und entstandener Schicht ergeben Risse (bei Zugspannungen) oder Aufwölbungen (bei Druckspannungen).

Neben der äußeren Schichtbildung gibt es nach innen gehende Oxidation, Nitrid-, Sulfid- und Carbidbildung mit weiteren Schädigungen. Hochtemperaturwerkstoffe enthalten deshalb bis zu 10 LE zur Unterdrückung dieser Vorgänge.

Heißgaskorrosion: Reaktion von warmfesten Legierungen mit Anteilen der Verbrennungsgase (O, C, S, N, V) und Stoffen der Ansaug- oder Umgebungsluft (Stäube, Salze). Es entstehen zusammen mit den Oxidschichten niedrigschmelzende (eutektische), korrosive Mischungen.

12.5 Korrosionsschutz

Hierzu gehören alle Maßnahmen, die Funktionsstörungen durch Korrosion vermeiden helfen, bzw. die Lebensdauer bis zum Eintritt des Korrosionsschadens erhöhen.

Die vielfältigen Korrosionsmittel, mit denen Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen zusammen kommen können, verlangen ebenso vielfältige Maßnahmen zum Schutz. Dabei darf nicht nur der Werkstoff oder das Korrosionsmittel *allein* betrachtet werden.

Rattermarken bei Wälzlagern sind auf Reibkorrosion durch Schwingungen im Stillstand unter Last zurückzuführen.

Bei Stahl wird das Korrosionsprodukt auch Passungsrost genannt und kann der Ausgangspunkt von Rissen sein, die zu Dauerbrüchen führen.

(Ver) Zunderung: Bildung von dickeren porösen oder sich ablösenden Schichten. Durch beide schreitet der Korrosionsangriff weiter. Auf unlegiertem Stahl bilden sich nacheinander FeO , Fe_3O_4 und Fe_2O_3 , nicht fest haftend. Die Volumenänderung bei der γ - α -Umwandlung trägt ebenfalls zur Ablösung der Zunderschichten bei.

Hitzebeständige Stähle sind deshalb meist umwandlungsfrei, d.h. ferritisch oder austenitisch (→ 4.4.3 und 4.4.4).

Beispiele: Durch Hochtemperaturkorrosion gefährdet sind Bauteile von Dampfkessel- und Ofenanlagen, Wärmetauscher, Apparate der Erdölverarbeitung, Gasturbinen.

Wirkung der Heißgaskorrosion: Herauslösen von LE durch die Schmelzen, Bildung dicker, poröser Schichten mit Ablösungen an Bauteilen von Rauchgasreinigungsanlagen, bei Gasturbinenschaufeln (Veränderung der Schaufelform senkt den Wirkungsgrad).

Normung: (→ Tabelle 12.6)

DIN 50929/85: Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung, T1: Allgemeines, T2: – in Gebäuden, T3: – Rohre und Behälter in Böden und Wässern, jeweils mit Abschnitt Korrosionsschutz.

DIN 50927/85: Planung und Anwendung des elektrochemischen Korrosionsschutzes für die Innenflächen von Behältern und Rohren.

Hilfreich ist die Betrachtung des Ganzen als *Korrosionssystem* (Bild 12.6). Es veranschaulicht die Partner der Korrosion mit ihren Wechselwirkungen und Einflussgrößen. Danach lassen sich die Maßnahmen gliedern:

- Trennen von Werkstoff und Korrosionsmittel durch Schutzschichten oder Überzüge (→ 12.5.1), auch als **passiver** Korrosionsschutz bezeichnet.

Der **aktive** greift in die Reaktionen ein durch

- Änderung der Reaktionspartner (12.5.2)
- Änderung der Reaktionsbedingungen. Hierzu gehört die Änderung der elektrochemischen Verhältnisse (12.5.3).

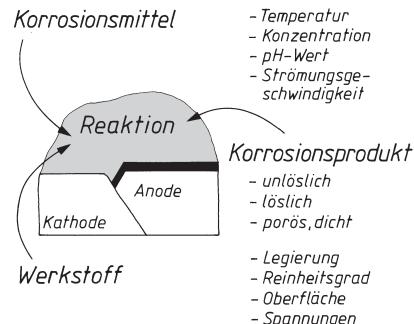


Bild 12.6 Korrosionssystem, Werkstoff und Korrosionsmittel reagieren zum Korrosionsprodukt, das rückwirkend die Reaktion beeinflusst

12.5.1 Trennung von Metall und Korrosionsmittel durch Schutzschichten

Schutzschichten trennen das korrosionsgefährdete Metall vom Elektrolyten. Damit ist die Voraussetzung für die Korrosion beseitigt.

Tabelle 12.6 gibt eine Zusammenfassung mit Hinweisen auf die umfangreiche Normung.

Schutzschichten aus unterschiedlichen Stoffen machen einfache, kostengünstige Grundwerkstoffe einsetzbar. Die Anzahl der Schichtwerkstoffe und Verfahren ist groß und gehört zur Fertigungshauptgruppe Beschichten (Übersicht in 11.2.2).

Tabelle 12.6: Übersicht Korrosionsschutzschichten, Werkstoffe und Verfahren

Verfahren	Normen	Schichtwerkstoffe und Eigenschaften
Elektrolytische Metallabscheidung (Galvanisieren)	DIN 50962/98 DIN 50965/00 DIN EN 12540/00 DIN EN ISO 4527/03	Schichten aus Ag, Cr, Cu, CuNi, CuNiCr, CuZn, Ni, NiCr, Pb, Sn, Zn, nicht vollkommen dicht, z.T. mit dekorativer Wirkung für Halbzeuge und Bauteile. Dicke 2,5...10 µm. Außenstromlos abgeschiedene Ni-P-Legierungen
Hartanodisieren	DIN EN 2536/95	Al-Oxidschichten auf Al und Al-Legierungen, hart, Nichtleiter, Oxidationsschutz.
Aufbringen aus Schmelzen Feuerverzinken u.a.	DIN EN ISO 1461/99	Al-, Pb-, Sn-, Zn-Überzüge durch Tauchen in Schmelzen, dichte Schichten für Bauteile und Halbzeuge ZnAl in Dicken 5...42 µm (70...600 g/m ²)
Thermisch Spritzen	DIN EN 657/05	Poröse Schichten aus fast allen Werkstoffen, Verdichtung bei Metallen durch nachträgliches Einschmelzen (bei Hochtemperatur-Schutzschichten angewandt)
Plattieren Guss-, Walz-, Explosiv- und Schweißplattieren		Fügen von Grundwerkstoff (Al, Cu, Stahl) und ein- oder zweiseitiger Deckschicht mit 5...10 % der Gesamtdicke mit Ni, Cu-Ni oder Cu-Zn-Legierungen, auch mit Cu und Al 99,9
Umwandlungsschichten Brünieren Chromatisieren Phosphatisieren	DIN 50938/00 DIN EN 12487/07 DIN EN 12476/01	Dünne, z.T. dekorative Schichten aus Reaktionsprodukten des Grundwerkstoffes mit Bädern. Brünieren durch Oxidschichten auf Al und Fe, Chromatschichten auf Mg und Zn, Phosphatschichten auf Al, Fe und Zn als Lackgrundierung oder Ölträger für Kaltumformen und kurzzeitigen Schutz.

Tabelle 12.6: Übersicht Korrosionsschutzschichten, Fortsetzung

Verfahren	Normen	Schichtwerkstoffe und Eigenschaften
Diffusionsschichten		Glühen in stoffabgebenden Pulvern oder Gasen erzeugt durch Diffusion korrosionsbeständige Randschichten in (meist unlegiertem) Stahl. Durch Inchromieren erhält die Randschicht bis 30 % Cr (zunderbeständig bis 850 °C), bei Al bis zu 1000 °C).
Alitieren Al Inchromieren Cr Sherardisieren Zn	DIN EN 13811/03	
Wirbelsintern	Eintauchen heißer Metallteile (200 °C) in pulvige Thermoplaste, durch eingeblasene Luft aufgelockert	
Emaillieren	Dichte, dickere Schichten aus feinstgemahlenen Silikaten und Metallverbindungen, durch Tauchen, Spritzen aufgebracht und durch Trocknen und Brennen eingeschmolzen. Emailleschichten haben eine Beständigkeit wie Glas	
Auskleidung	Anwendung bei größeren Behältern im chemischen Apparatebau mit Blechen aus Cu-Ni, Ni-Cu oder korrosionsbeständigen Stählen durch Verschweißen, auch für Thermoplaste und Gummiplatten. Gießharze und Gummischichten werden auch durch Tauchen oder Streichen mit folgendem Aushärten oder Vulkanisation aufgebracht	
Fett-, Öl- und Wachsschichten	Erwärmt oder mit Lösungsmitteln aufgetragen schützen sie kurzzeitig für Transport und Lagerung	

12.5.2 Korrosionsschutz durch Werkstoffwahl oder Eigenschaftsänderung

Mit der Kenntnis der Korrosionserscheinungen lassen sich Lokalelemente vorbeugend schon bei der Konstruktion und Montage vermeiden (→).

- Wassersäcke und unbelüftete Hohlräume, in denen sich Belüftungselemente bilden können.
- Verschiedene Metalle beim Zusammenbau durch Zwischenlagen elektrisch isolieren.

Die Korrosionsbeständigkeit der Metalle wird durch alle Maßnahmen (→) verbessert, welche die Oberfläche homogener, reiner und glatter machen. Dadurch wird das Wachstum von *dünnen, dichten und gleichmäßigen* Schutzschichten ermöglicht, die z.T. vom Korrosionsmittel selbst erzeugt werden und bei Verletzung der Oberfläche „ausheilen“. Dadurch wird der Grundwerkstoff selbst passiv, d.h. er nimmt nicht mehr aktiv an der Korrosion teil.

Diese **Passivierung** durch sehr dünne Schichten (ca. 10 nm) wird bei zahlreichen unedlen Metallen und Legierungen beobachtet (→).

Eisen ist unedler als seine Oxide und bereits an feuchter Luft unbeständig, es kann durchrostet. Die LE Cr, Si und Al übertragen ihre passivierende Eigenschaft auf den Stahl.

Je stärker der Korrosionsangriff, um so höher muss der Legierungsanteil sein.

Beispiel: Wasserleitungen aus Cu-Rohr mit Armaturen aus verzinkten Eisenwerkstoffen: Letztere nie in Fließrichtung nach den Cu-Leitungen anbringen. Bei Ablagerung von Cu-Teilchen auf Fe entstehen Kontakt elemente, die zu Lochkorrosion führen.

Beispiele: Rautiefe niedrig halten, Kratzer vermeiden, es entstehen Belüftungselemente. Der Kerbgrund ist unbelüftet und Anode.

Innere Spannungen vermeiden (z.B. durch Spannungarmglühen). Die verformten Bereiche im Grunde von Kerben sind mögliche Anodenflächen mit Gefahr von Spannungsrißkorrosion.

Beispiele für Passivierung:

Al ist in oxidierenden Mitteln durch seine Oxidschicht geschützt und dadurch z.B. in Salpetersäure beständig,

Pb in Schwefelsäure durch Bildung einer unlöslichen Bleisulfatschicht.

Cu ist witterungsbeständig durch seine „Patina“ (basisches oder schwefelsaures Cu-Carbonat).

Zn ist hinreichend witterungsbeständig, die Schutzschicht wird jedoch durch sauren Regen abgewaschen.

Für *normale* Witterungsbedingungen gibt es die **wetterfesten Baustähle**. In normaler Industrieatmosphäre bilden sich fest haftende Schutzschichten. Die Stähle haben ohne Anstrich eine höhere Beständigkeit als die Baustähle nach DIN EN 10025 bei etwa gleichen mechanischen Eigenschaften.

Korrosionsbeständige Stähle verhalten sich in Elektrolyten passiv, d.h. sie nehmen wie die Edelmetalle nicht an Reaktionen teil. Es wird durch Cr-Gehalte von $\geq 13\%$ erreicht. Die Stähle stehen dann in der Spannungsreihe der Elemente vor dem Platin. Das gilt nur, wenn alles Cr gelöst ist (\rightarrow C-Gehalt).

Ihre Beständigkeit wird durch ein homogenes Gefüge, entweder **ferratisch** durch Cr oder **austenitisch** durch CrNi (\rightarrow 4.4.3 und 4.4.4) und weitere wie Ti, Mo, V, Cu erreicht. Härtbare Stähle sind **martensitisch**.

Durch Druckaufstckung nach dem ESU-Verfahren (DESU-) wird bei austenitischen Stählen die typisch niedrige Streckgrenze angehoben (z.B. X10CrMnN18-18 in Tabelle 12.7).

Beispiel: Wetterfeste Baustähle DIN EN 10155 mit ca. 0,5 % Cu, 0,4 % Ni und 0,3...0,8 % Cr. (\rightarrow 4.4.1). Handelsnamen sind z.B. COR-TEN, PATINAX® u.a.

Anwendung für Stahlhochbauten, Brücken und Kranbau, Behälter und Fahrzeuge.

Hinweis: Synonymer Begriff ist Edelstahl rostfrei.

C-Gehalt: Da Cr auch Carbidbildner ist, muss mit steigenden C-Gehalten der Cr-Anteil größer werden. Cr-Stähle mit über 0,1 % C sind nur im abgeschreckten Zustand beständig. Beim Erwärmen (Schweißwärme) scheiden sich Cr-Carbide auf den Korngrenzen aus, der an Cr ärmere Rand wird unedler (anodisch) und geht in Lösung. Risse längs der Korngrenzen führen zum Kornzerfall, auch interkristalline Korrosion genannt.

Abhilfe durch extrem niedrigen C-Gehalt (low carbon-Stähle) oder Zulegieren von Ti, Nb, Ta. Sie haben größere Affinität zum Kohlenstoff als Chrom, das dann im Mischkristall verbleibt (sog. stabilisierte Sorten).

Tabelle 12.7: Korrosionsbeständige Stähle (Auswahl DIN EN 10088/05)

Stahlsorte	Stoff-Nr.	R _{p0,2}	A	Beständigkeit, Anwendungen
Ferritische Stähle, Werte für Zustand A (geglüht), martensitisch, Zustand QO (ölgehärtet)				
X7Cr14	1.4001	230	20	Geschliffen beständig gegen Dampf und Wasser, Essbestecke, Spindeln für Armaturen
X2CrTi12	1.4512	220	18	Tiefziehbar bis 3 m Dicke, erhöhte Säurebeständigkeit, Schranktische, Waschmaschinen
X6CrMo17-1	1.4113	280	18	Beständiger gegen Chloride durch Mo-Zusatz, für Kfz-Teile Zierleisten, Fensterrahmen
(X36CrMo17)	1.2316	600	14	Härt- und vergütbar, für Wellen, Spindeln, Ventile, Federn
(X90CrMoV18)	1.4112	HRC60	---	Härtbarer Werkzeugstahl für Messer in Nahrungsmittelmaschinen, rostfreie Wälzläger

Austenitische Stähle, Werte für Zustand AT (lösungsgeglüht)

X5CrNi18-10	1.4301	190	45	Grundtyp, schweißgeeignet, beständig gegen interkristalline Korrosion bis 6 mm Blechdicke, Tiefeziehteile aller Art,
X6CrNiTi18-10	1.4541	250	40	Ti-stabilisiert, keine Carbidausscheidungen beim Schweißen,
X10CrMnN18-18	1.3816	800	n.b.	hochfest, stabil unmagnetisch, Kappenringe für Generatorläufer
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	270	40	kaltstauchbar, hochkorrosionsbeständig, Pharma-Industrie

Austenitisch-ferritische Stähle

X2CrNiMo22-5-3	1.4462	--	--	Beständig gegen Rauchgase, Meerwasser, Chloridlösungen, Rauchgasentschwefelung, Rohre für Entsalzungsanlagen
----------------	--------	----	----	--

Normen: Korrosionsbeständige Stähle DIN EN 10088, Korrosionsbeständiger Stahlguß DIN EN 10283/98; Stahlguß für Druckbehälter DIN EN 10213-4/96 (T-4: Austenitische und ferritisch-austenitische Sorten). Schmiedestücke für Druckbehälter DIN EN 10222-5/00

DECHEMA-Tabellen enthalten Beständigkeitsangaben der Werkstoffe in zahlreichen Medien der chemischen Industrie bei verschiedenen Konzentrationen und Temperaturen.

12.5.3 Änderung der Reaktionsbedingungen

Änderung des Korrosionsmittels

Diese Maßnahme ist nur begrenzt möglich, weil das korrosive Mittel in der Zusammensetzung meist wenig konstant ist und oft nur Spuren von Verunreinigungen enthält. Diese können die Korrosionsgeschwindigkeit erhöhen oder Lochkorrosion einleiten. Ihre Entdeckung und Analyse ist schwierig.

Zusätze (→ Inhibitoren), speziell dem Korrosionsmittel angepasst, verlangsamen die Reaktion.

In manchen Fällen lässt sich der Ablauf der Reaktion durch Ändern von Temperatur, pH-Wert oder Strömungsgeschwindigkeit beeinflussen.

Ein gewisser Einfluss ist durch Entzug schädlicher Begleitstoffe möglich, z.B. gelöster O₂- oder CO₂-Anteile durch Erwärmen oder Vakuumbehandlung (z.B. bei Kesselspeisewasser). Trocknen von feuchtem H₂S-haltigem Erdgas (bildet schweflige Säure).

Inhibitoren: (Hemmstoffe) wirken chemisch oder physikalisch passivierend und sind in Schmierölen, Lösungsmitteln und Treibstoffen enthalten, auch in Sparbeizen zum Ablösen von Zunderschichten.

Beispiele: Bei Auftreten von Lochkorrosion können helfen:

- Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit in den Rohrleitungen, oder
- pH-Wert erhöhen, oder
- Cl-Ionen entfernen.

Kathodischer Schutz

besteht aus Maßnahmen, welche dem zu schützenden Bauteil einen **edleren** Charakter als die Umgebung geben. Damit wird es zur Kathode und ist geschützt. Es gibt zwei Verfahren.

Galvanischer Schutz durch Schaffung eines künstlichen Bimetallelementes. In der Umgebung des Schutzobjektes wird ein unedles Metall elektrisch leitend angebracht. Es dient als *Opferanode* (Aktiv-Anode) für den zur Kathode gewordenen Schutzbereich (Tabelle 12.8).

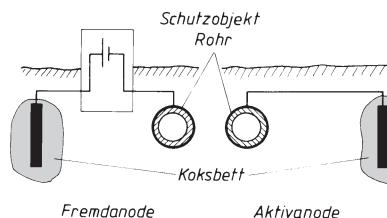


Bild 12.7 Kathodischer Schutz

Tabelle 12.8: Anodenwerkstoffe und Anwendungen

Werkstoff	Medien	Anwendungsbeispiele
Mg, Zn	Süßwasser	Opferanode zum Innenschutz von Warmwasserbereitern
Al, Zn	Meerwasser	Opferanode zum Außenschutz im Schiffbau und Offshorebereich
Al	Süßwasser (weich)	Fremdstromgespeiste Opferanoden für Behälter aus Stahl, auch verzinkt, für Wasser mit niedriger Carbonathärte

Fremdstromschutz durch Einbau von Fremdstromelektroden. Mithilfe einer äußeren Gleichstromquelle wird das Schutzobjekt als Kathode (Minuspol) geschaltet. Als Anode (Pluspol) dienen im Erdreich vergrabene Fe-Si-Platten, die mit Koks und Fe-Schrott leitend eingebettet werden. Dabei muss je nach Werkstoff des Schutzobjektes die elektrische Spannung (das Schutzzpotenzial) genau eingehalten und überwacht werden (Bild 12.7).

Fremdstromanode:

Werkstoff	Medium	Anwendung
GX70Si15	Erdreich	Anoden für erdverlegte Kabel, Tanks, Rohrleitungen

Die Fe-Si-Gusswerkstoffe werden auch für Armaturen und Pumpenteile in Kontakt mit heißen Säuren eingesetzt. Die Härte von 350 bis 450 HBW macht Spanungsarbeiten schwierig.

Tabelle 12.9: Normen zum Korrosionsschutz

Bezeichnung	Norm
Kathodischer Korrosionsschutz für Innenflächen von metallischer Schutzobjekte	DIN EN 12499/03
Kathodischer Korrosionsschutz mit Fremdstrom im Sohlebereich von Heizölbehältern aus unlegiertem Stahl	DIN 50926/92
Kathodischer Korrosionsschutz von metallischen Anlagen in Böden und Wässern	DIN EN 12954/01
Kathodischer Korrosionsschutz für unterseeische Rohrleitungen	DIN EN 12474/01
Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton	DIN EN 12696/00

Literatur- und Informationshinweise

- | | | |
|--|--|--|
| Kaesche, H.: | Die Korrosion der Metalle. Springer 1999 | |
| AHC-Oberflächentechnik | Werkstoffguide | www.ahc-oberflachentechnik.de |
| Internetportal,
Korrosion- und Korrosionsschutz | Informations- und Lernangabot | www.korrosion-online.de |
| Werkstoffe Korrosion | Anwendungorientierte Beiträge | www.werkstoffe-korrosion.de |
| Korrosionsschäden | Glossar, Bilddatenbank | www.corrosion-failures.com |
| DIN-Taschenbücher | Korrosion und Korrosionsschutz Nr. 219/03;
Korrosionsschutz von Stahl durch Beschichtungen und Überzüge“:
Nr.143/02 ; Nr. 168/00 ; Nr. 266/97 ; Nr. 286/98 | |

13 Tribologische Beanspruchung und werkstofftechnische Maßnahmen

13.1 Allgemeines

13.1.1 Begriffsklärung

Überall, wo Körper aufeinander gleiten, versucht man durch Schmierstoffe die Reibung und den Verschleiß zu erniedrigen. Früher stand nur die Werkstoffpaarung oder nur der Schmierstoff im Mittelpunkt. Heute wird das Gesamtproblem betrachtet. Es tritt dort auf, wo

- Oberflächen unter Kräften und in Relativbewegung aufeinander wirken,
- die Verschleißpartner mit dem Umgebungsmedium in Wechselwirkung treten.

Diese Beanspruchung (Tabelle 13.1), die mit den Begriffen

- Reibung
- Verschleiß
- Schmierung

umrissen wird, ist Gegenstand des Wissenschaftszweiges Tribologie (→).

Tribologie zielt auf die Optimierung der Funktion, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit von Bewegungssystemen.

Zielsetzung der Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT). Die GfT, Ernststr. 12, 47443 Moers liefert einige Arbeitsblätter dazu. (www.gft-ev.de)

Tabelle 13.1: Tribologische Beanspruchung

Beanspruchung erfolgt durch	Auswirkung	Zeiteinfluss	Schadensfälle, Beispiele
Kräfte auf dünne Oberflächenschicht unter Relativbewegungen und chemisch-physikalischen Reaktionen mit dem Umgebungsmedium	Änderung des Reibverhaltens, Verschleiß, Funktionsstörungen, Leistungsabfall	Verschleiß steigt mit der Belastungsdauer	Erwärmung bis zur Blockierung von Lagerstellen, Wälzlagerräuschen, Werkzeugverschleiß

Wichtigstes Ergebnis dieser umfassenden Betrachtung ist die Erkenntnis, dass Reibung und Verschleiß keine Werkstoffeigenschaften sind, sondern sich aus der Gesamtheit der folgenden Einflüsse ergeben:

- Werkstoffpaarung,
- Schmierstoff,
- Kräfte und Geschwindigkeiten,
- Umgebungseinflüsse

und den Wechselwirkungen zwischen ihnen. Für diese Gesamtheit wurde der Begriff tribologisches System, **Tribosystem** eingeführt. Es ist in allen Bereichen der Technik zu finden (Tabelle 13.2 + 3).

Reibung und Verschleiß sind Eigenschaften des jeweiligen Tribosystems (→ Beispiel).

Beispiel: Verschleiß als Systemeigenschaft

Der 1883 von Hadfield entdeckte Manganhartstahl vom Typ X120Mn12 besitzt durch Abschrecken aus ca. 1000 °C ein metastabiles, austenitisches Gefüge mit niedriger Streckgrenze.

Härte und Verschleißfestigkeit erhält er nur durch *stoßende* oder *prallende* Belastungen. Dabei entsteht durch oberflächliche Kaltverfestigung teilweise Martensit; die Härte beträgt bis zu 700 HV.

Für Tribosysteme mit *schmirgelter* Beanspruchung ist dieser Stahl nicht geeignet.

Anwendung: Brechbacken, Schläger und Rosette für Maschinen der Hartzerkleinerung, Herzstücke von Weichen

13.1.2 Das tribologische System

Der Begriff System wird in der Technik immer dann verwendet, wenn eine Gesamtheit von mehreren **Elementen** einem **bestimmten Zweck dienen**, sich **gegenseitig beeinflussen** und **äußereren Einflüssen** ausgesetzt sind (→ Beispiele).

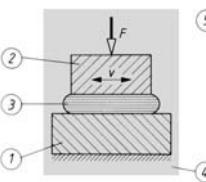
Größere Systeme können in kleinere Teilsysteme untergliedert werden. Durch diese Betrachtungsweise lassen sich vielschichtige Systeme leichter

- analysieren (Systemanalyse),
- verändern,
- optimieren (Systemoptimierung).

Beispiele: Kräftesysteme in der Mechanik zur Analyse der Beanspruchungsarten

Korrosionssystem (→ Bild 12.5)

Tabelle 13.2: Tribosystem

Elemente/Beispiele	Tribosystem	Elemente/Beispiele
2 Gegenkörper (-stoff): Wellenzapfen, Führungsprisma, Gestein, Pressmassen		5 Beanspruchungskollektiv , bestehend aus den Größen:
3 Zwischenstoff : Schmierstoff (verschleißmindernd), Abrieb (verschleißfördernd)		<ul style="list-style-type: none"> • Normalkraft F_N, nach Richtung, Betrag und zeitlichem Ablauf sehr unterschiedlich • Relativgeschwindigkeit v der Bewegung (gleitend, wälzend, stoßend, oder strömend bei Flüssigkeiten oder Gasen) • Temperatur T wirkt besonders auf die Zähigkeit (Viskosität) des Schmierstoffs ein und begünstigt zusammen mit der • Beanspruchungszeit t_B Reaktionen zwischen Verschleißpaarung und Umgebungsmedium
1 Grundkörper (der für den Verschleiß wichtigere): Lagerschale, Führungsbahnen, Baggerschaufel, Förderband, Drehmeißel		
4 Systemumhüllende sind die umgebenden Stoffe, meist Luft mit Anteilen an O_2 , CO_2 , SO_2 oder H_2O und Staub		

13.1.3 Der Bereich der Tribologie

Tribologische Probleme existieren in allen Bereichen der Technik und berühren Konstruktion und Fertigung von Bauteilen sowie die Unterhaltung von Maschinen und Anlagen. Die folgende Übersicht soll zeigen, dass sich verschleißbehaftete Vorgänge aus vielen Bereichen der Technik in das Tribosystem einordnen lassen (Tabelle 13.3).

Ziel dieser Betrachtungsweise ist es, vorhandene und neue Tribosysteme zu gestalten im Sinne von

- **Reibung vermindern**, Wirkungsgrad steigern,
- **Verschleiß senken**, damit Lebensdauer und Zuverlässigkeit erhöhen,
- **Schmiermittelverbrauch** und damit Wartungskosten senken,
- **Verschleißteile regenerierbar gestalten**, um damit die Instandhaltungskosten zu senken.

Die Analyse eines Tribosystems geschieht in vier Stufen:

- I Funktion des Systems beschreiben,
- II Beanspruchungskollektiv ermitteln,
- III Struktur des Systems, d.h. seine stoffliche Zusammensetzung ermitteln,
- IV Verschleißkenngrößen ermitteln.

Tabelle 13.3: Tribosysteme in der Technik

Funktion	Beispiele	Elemente des Tribosystems			
		Grundkörper 1	Gegenkörper 2	Zwischenstoff 3	Umgebungsmedium
Bewegung führen + abdichten	Gleitlager Radsatz	Lagerschale Rad	Wellenzapfen Schiene	Öl, Fett Evtl. Fett	Luft Luft
	Kolben/Zylinder	Zylinder	Kolben	Öl	Abgas
Energieübertragung	Getriebe	Antriebsritzel	Gegenrad	Getriebeöl	Luft
	Kupplung	Belag	Scheibe	–	Luft
Stoff-förderung -bearbeitung -umformung	Bagger	Baggerzahn	Gestein	Staub	Luft
	Spanen	Meißelflächen	Span	Kühlschmierstoff	Luft
	Schmieden	Gesenk	Werkstück	Oxidschicht	Luft
Stofffluss steuern	Auslassventil	Ventilkegel	Ventilsitz	Oxidschicht	Abgase

13.2 Reibung und Reibungszustände

13.2.1 Reibkraft und Reibungszustände

Reibung ist der Widerstand, welcher die Bewegung von zwei aufeinander gleitenden oder -wälzenden Körpern hemmt oder auch verhindert (→ Haftriebung).

In der Berührungsfläche treten die Reibkräfte paarweise auf (Aktion/Reaktion) und versuchen

- den schnelleren Körper zu bremsen und den
- langsameren oder ruhenden zu beschleunigen.

Ursachen der Reibung sind Adhäsionskräfte durch ungleiche elektrische Ladungen (Dipolkräfte) und Mikrokontakte zwischen den Rauheitsspitzen mit der Folge: → hohe Flächenpressung → Verformung → Verschweißung und Abscheren.

Um die Relativbewegung gegen den Widerstand der Reibkraft aufrecht zu erhalten, muss Energie (Verlustarbeit) aufgebracht werden (Tabelle 13.4).

Haftriebung liegt ohne eine Relativbewegung vor. Sie gehört streng genommen nicht zum Bereich der Tribologie.

Beispiel: Motorkupplung beim Anfahren. Motorseite wird gebremst (evt. abgewürgt). Getriebeseite wird beschleunigt.

Die Reibkraft $F = F_N f$ entsteht in der Kontaktfläche und wirkt längs des Reibweges. Diese Reibarbeit setzt sich überwiegend in Wärme um sowie zur plastischen Verformung und Abscheren der Mikrokontakte.

Reibzahl f (auch μ) ist das Verhältnis von Normalkraft F_N und Reibkraft F_R und wird durch Versuche ermittelt.

Tabelle 13.4: Reibungsarten

Haftriebung	Widerstand, der die Relativbewegung zweier sich berührender Körper verhindert
Gleitreibung	Widerstand, der die Relativbewegung zweier sich berührender Körper hemmt
Rollreibung	Widerstand, der das Rollen eines Zylinders auf der Unterlage hemmt, idealisiert mit Linienberührung und der Relativgeschwindigkeit Null (kein Schlupf)
Wälzreibung	Rollreibung mit Gleitanteil (Schlupf)
Innere Reibung (Viskosität)	Widerstand in einem Körper, der eine Relativbewegung innerer Volumen- oder Stoffteilchen behindert

13.2.2 Reibungszustände

Reibungszustand ist die Art der Kontakte zwischen den Reibpartnern. Er hat großen Einfluss auf Reibzahl und Verschleiß.

Festkörperreibung als Trockenreibung tritt bei direktem Kontakt der Reibpartner auf. Ursache der Reibkräfte sind

- **Adhäsionskräfte** (→) und
- **Verformung** der Mikrokontakte.

Die Feingestalt technischer Oberflächen ist ein „Raugebirge“. Bei Kontakt berühren sich nur die Spitzen. Mikrokontakte (Bild 13.1).

Diese wirkliche Berührungsfläche beträgt nur einen Bruchteil der scheinbaren (rechnerischen).

Mikrokontakte sind gekennzeichnet durch hohe Flächenpressungen mit folgenden Erscheinungen:

- **Plastische Verformung** mit örtlich hohen Temperaturen,
- **Verschweißungen** und Abscherungen

infolge der Relativbewegung. Der Partner mit dem größeren E-Modul dringt mit seinen Spitzen in den anderen ein. Beim Gleiten schiebt er die Oberfläche des weicheren wulstartig vor sich her (ähnlich einer Rolle auf Kunststoffboden).

Die Oberflächenschichten werden dadurch im Mikrobereich

- impulsartig beansprucht,
- elastisch und plastisch verformt,
- schockartig erwärmt (Blitztemperaturen) und abgeschreckt (Rissbildung und Reibmartensit),
- durch abgelöste verfestigte Partikel zerfurcht,
- aktiviert, d.h. reaktionsfähiger gegenüber dem Zwischenstoff oder Umgebungsmedium.

Dieser stark verschleißende Vorgang tritt nur im Vakuum oder in Schutzgas auf. Bei Zutritt von Luft und von Schmierstoffen als Umgebungsmedium finden an den Werkstoffoberflächen tribochemische Reaktionen statt. Sie erzeugen **Grenzschichten** (→), die **Grenzschichtreibung** ermöglichen.

Grenzschichten vermindern Adhäsion, Reibung und die Mikroverformung und erhöhen damit die Belastbarkeit des Tribosystems.

Beispiel: Beim Anlaufen eines Verbrennungsmotors aus dem Stillstand werden diese Zustände nacheinander durchlaufen. Der stärkste Verschleiß tritt in der Anlaufphase mit kaltem Öl auf.

Adhäsion ist das Haften von festen oder flüssigen Körpern aneinander. Die Kräfte beruhen auf ungleichen elektrischen Ladungen von Dipolmolekülen oder von Kettenmolekülen mit polaren (elektrische Ladung tragende) Seitengruppen wie Öle und Polymere.

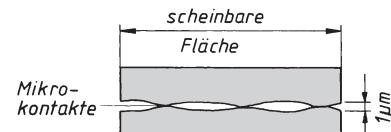


Bild 13.1 Mikrokontakte

Verschweißungen zeigen besonders gleiche und weiche Metalle mit reinen Oberflächen und kfz-Metalle stärker als hexagonal strukturierte.

Bei ungleichen Kristallgittern ist das Verschweißen erschwert. Gegenüber liegende Atomschichten müssen zunächst eine gleiche Orientierung annehmen. Diese Gitterverzerrung erfordert Energie.

} Diese Einzelvorgänge kennzeichnen die
tribologische Beanspruchung
und die
tribochemische Reaktion

Grenzschichten entstehen durch

- Luftsauerstoff als Oxidschichten,
- Adhäsion als angelagerte Moleküle der Schmierstoffe,
- Reaktion der Schmierstoffzusätze mit Metall als Sulfidschichten,
- Polymerisation von Kettenmolekülen der Schmierstoffe zu zähen Reibpolymeren, die aktivierte Oberfläche wirkt als Katalysator.

Grenreibung tritt bei kleinen Geschwindigkeiten und hohen Belastungen der Reibpartner auf. Dabei wird ein vorhandener Schmierfilm örtlich durchbrochen.

Flüssigkeitsreibung. Kennzeichen ist die Trennung der Reibpartner durch einen lückenlosen Schmierfilm (→).

Dann wird die **äußere Reibung** zwischen den Partnern in den Schmierstoff verlagert und zur **inneren Reibung** zwischen den Molekülen des Schmierstoffs. Die Übergänge zwischen den Reibungszuständen können an der Stribeck-Kurve verfolgt werden.

13.2.3 Stribeck-Kurve

Bild 13.2 zeigt die Änderung der Reibzahl μ in Abhängigkeit von der Drehzahl (Relativgeschwindigkeit) in einem geschmierten Gleitlager.

Die Reibkraft im Lager, damit auch die Reibzahl, besteht aus zwei Anteilen (Bild 13.2 gestrichelte Kurven):

- Reibkraft F_{Rf} der Festkörperreibung,
- Reibkraft F_{Rh} der Flüssigkeitsreibung.

Mit steigender Gleitgeschwindigkeit bildet sich mehr und mehr ein Schmierfilm aus, die Festkörperreibung F_{Rf} sinkt, bis bei der Übergangs-drehzahl $n_{ü}$ der Öldruck so groß geworden ist, dass kein Festkörperkontakt mehr erfolgen kann.

Hier beginnt die **hydrodynamische** Schmierung. Die jetzt auftretende Reibung ist vom Viskositäts-Temperatur-Verhalten abhängig (→ 13.3.2). Lagerungen sollen oberhalb der Übergangs-drehzahl ohne die verschleißbehaftete Mischreibung arbeiten. Die Kurvenlage wird verschoben durch:

Die Trennung der metallischen Stoffe wird durch die Grenzschichten übernommen.

Voraussetzung ist ein Schmierfilm mit einer Mindestdicke h_0 .

$$h_0 > R_{t1} + R_{t2},$$

d.h. h_0 muss größer als die Summe der Rautiefe sein.

Die Kurve wurde erstmals 1902 von Stribeck aufgestellt.

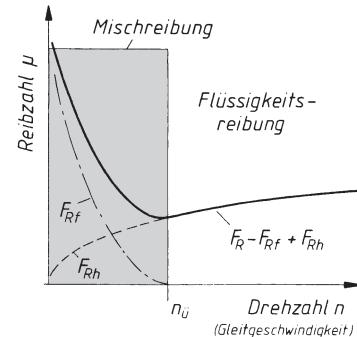


Bild 13.2 Stribeck-Kurve vereinfacht

Im schraffierten Bereich der **Mischreibung** ist ein Steilabfall der Reibung erkennbar. Hier wechseln kurzzeitige Festkörperkontakte mit Flüssigkeitsreibung ab. Es kann zu ruckartigem Gleiten kommen (slip-stick). Der Öldruck reicht noch nicht aus, um einen tragfähigen Schmierfilm zu bilden.

Im tiefsten Punkt der Kurve liegt reine **Flüssigkeitsreibung** vor, wenn die Festkörperreibung F_{Rf} zu Null geworden ist.

Verschiebung der Kurve nach links	Abflachung des rechten Kurvenastes durch
<ul style="list-style-type: none"> • dickflüssigeres Öl • kleinere Flächenpressung • kleinere Rautiefe der Partner 	<ul style="list-style-type: none"> • dünnflüssigeres Öl • größere Flächenpressung • Öle mit Zusätzen (→ Strukturviskosität)

Flüssigkeitsreibung wirkt ohne Verschleiß allein im Schmierstoff, die Reibung hängt von dessen Viskosität ab.

Flüssigkeitsreibung, (auch Schwimmreibung oder Vollschmierung d.h. die Erzeugung des beständigen Schmierfilms kann nach drei Mechanismen erfolgen (Tabelle 13.5).

Der lückenlose Schmierfilm entsteht durch Druckaufbau (Tabelle 13.5) von außen oder im Innern des Öles. Einflussgrößen sind Dicke des Schmierspaltes, Viskosität und Temperatur des Schmiermittels.

Tabelle 13.5: Erzeugung des Schmierfilms

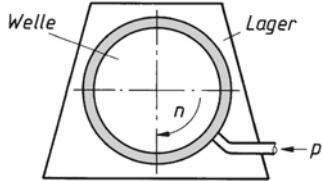
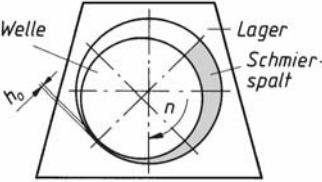
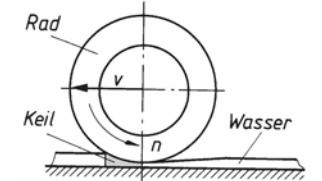
hydrostatisch (aerostatisch)	Eine äußere Pumpe erzeugt vor dem Anfahren den Schmierfilm, der die Reibpartner trennt. Hydrostatischer Schmierfilm	
hydro-dynamisch (aero-dynamisch)	Druckaufbau durch Adhäsion der Öl moleküle, die in den sich verengenden Spalt gezogen werden. Voraussetzungen sind ausreichende Relativgeschwindigkeit der Körper und Viskosität des Schmierstoffes. Hydrodynamischer Schmierfilm	
	Verdrängungswirkung von Flächen, die sich aufeinander zu bewegen Aquaplaning	

Tabelle 13.6: Zusammenfassung, Reibungszustände

Zustand	Kennzeichen	Verschleiß	Beispiel
Festkörperreibung	Trockenreibung (im Vakuum) Gleiten ohne Zwischenstoff. Bei Metallen erfolgt Adhäsion mit Stoffübertragung und Abscheren. Die Adhäsionsneigung ist umso kleiner, je unterschiedlicher die Kristallgitter der Partner sind.	Sehr hoch „Fressen“	Bremsbelag/Scheibe Radspurkranz/Schiene
	Grenzschichtreibung Als Zwischenstoff treten Grenzschichten auf, die durch tribochemische Reaktionen der Reibpartner mit dem Umgebungsmedium (Luft) und dem Zwischenstoff (Ölzusätze) entstehen.	Grenzschichten vermindern Reibung und Verschleiß	Schnecken- und Hypoidgetriebe Drahtziehen
	Grenzreibung Durch Adsorption bilden sich auf oxidischen Oberflächen molekulare Schmierstofffilme.		
Mischreibung	Schmierfilm zeitweise unterbrochen, Festkörper- und Flüssigkeitsreibung wechseln ab.		Start mit kaltem Öl
Flüssigkeitsreibung	Lückenloser Schmierfilm, Reibung zwischen den Partnern wird verlagert in die Reibung zwischen den Schmierstoffmolekülen.	Reibung und Verschleiß minimal	Lager im Dauerbetrieb
Gasreibung	Lückenloser Gasfilm trennt die Reibpartner.		

13.3 Schmierstoffe

13.3.1 Allgemeines

Die vielfältigen Anforderungen bei den Tribo-Systemen in der Technik verlangen unterschiedliche Schmierstoffe. Neben der technischen Optimierung geht es dabei auch um die wirtschaftliche Optimierung, d.h. für jeden Anwendungsfall muss die erforderliche Güte und Mindestmenge eingesetzt werden.

Basis der meisten Schmierstoffe sind Mineralöle, d.h. Kohlenwasserstoffe mit unterschiedlicher Molekülform und -länge. Eigenschaften und das Betriebsverhalten der Schmierstoffe lassen sich z.T. aus der Molekülstruktur erklären.

13.3.2 Eigenschaften und Kenngrößen

Viskositätseinfluss

Viskosität (auch Zähigkeit) einer Flüssigkeit kennzeichnet die Kraft, mit der sich die Moleküle einer Verschiebung in Schichten widersetzen (innere Reibung) und ist wegen der Bedeutung für den Schmierfilm (Tabelle 13.7) ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal von Schmierstoffen.

Tabelle 13.7: Einfluss der Viskosität

Viskosität	Auswirkung auf den Schmierfilm
zu niedrig (dünnflüssig)	Druck im Schmierspalt zu klein, Öl abfluss < Ölzufluss, → Mikrokontakte
zu hoch (dickflüssig)	Druck zu groß, innere Reibung steigt, starke Erwärmung

Strukturviskosität zeigen Stoffe mit einem geringeren Anstieg der Reibung bei steigender Gleitgeschwindigkeit, d.h. der rechte Ast der Striebeckkurve verläuft mit kleinerer Steigung, also flacher, d.h.:

- Steigende Schergeschwindigkeit ergibt
- fallende Viskosität.

Ursache und Wirkung: Öle enthalten Polymere, deren Fadenmoleküle regellos verteilt sind und die Flüssigkeitslamellen (Bild 13.3) verklammern. Mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit richten sie sich parallel aus, die Klammerwirkung lässt nach und die Viskosität sinkt.

Einteilung der Schmierstoffe erfolgt nach der Konsistenz in:

- **Öle** unlegiert, legiert (mit Zusätzen) oder synthetisch,
- **Fette**,
- **Festschmierstoffe**.

Basis sind Paraffinöle, aus Kettenmolekülen bestehend, die durch die Raffination von Benzolabkömmlingen sowie S-, O- und N-Verbindungen getrennt werden.

Daneben gibt es Naphtenöle, das sind Kettenmoleküle mit Ringschluss (keine Benzolringe).

Ursache der Viskosität: Öle bestehen aus Kettenmolekülen, die miteinander verfilzt sind. Bei Bewegung müssen sie beschleunigt oder verzögert werden. Gleichzeitig erfolgt ein Abscheren, das zu kleineren Ketten führt (Alterung und Scherstabilität des Öles).

Schmiernittel mit Strukturviskosität sind besonders geeignet für Systeme, die mit ständig wechselnden Stillständen und Drehzahlen arbeiten, weil sie

- bei niedrigen Drehzahlen zäh genug sind, den Schmierfilm aufrecht zu erhalten,
- bei höheren Drehzahlen ihre Reibung niedriger ist als bei normalen Ölen.

Beispiel: Kraftfahrzeugmotore und -getriebe

Strukturviskosität besitzen z.B.

Schmieröle durch Zusätze wie Polyisobutylen, oder Polymethacrylate, Schmierfette durch die Dickungsmittel (Seifen), Kunstharzlacke mit thixotropem Verhalten.

Einheiten der Viskosität

Wenn sich ein Gegenkörper auf einem Schmierfilm gegenüber einem ruhendem Grundkörper bewegt, denkt man sich den Schmierstoff in dünnen, parallelen Schichten aufeinander abgleitend. Das ist das Modell der sog. laminaren Strömung (Bild 13.3).

Dabei tritt ein Geschwindigkeitsgefälle $\Delta v/\Delta y$ auf, die sog. Schergeschwindigkeit (zwischen den unendlich dünn gedachten Lamellen). Die Verschiebekraft je Flächeneinheit ist die Schubspannung τ , nach Newton das Produkt aus

$$\text{Schubspannung } \tau = \text{Viskosität } \eta \cdot \text{Schergeschwindigkeit } \Delta v/\Delta y$$

Der Proportionalitätsfaktor η ist die dynamische oder absolute Viskosität.

Einheit der dynamischen Viskosität ist die Pascalsekunde $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (oder Millipascalsekunde $\text{mPa} \cdot \text{s}$)

Mithilfe der Dichte ergibt sich die kinematische Viskosität ν .

$$\text{Kinem. Viskosität } \nu = \text{dyn. Viskosität } \eta / \text{Dichte } \rho$$

Dem Viskositätsbegriff liegt das newtonsche Gesetz zu Grunde: Laminare Strömung und keine Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit.

Zur Bestimmung der Viskositätswerte gibt es genormte Verfahren.

Bestimmung der Viskosität

Es existieren zahlreiche Messmethoden. Das ergab sich aus der Breite der Flüssigkeiten von dünnflüssig bis zäh in Abhängigkeit von der Temperatur, aber auch von durchsichtigen und undurchsichtigen Flüssigkeiten.

Die einzelnen Verfahren haben unterschiedliche Messbereiche für Viskosität und Temperaturen. Basis der Messungen ist das Wasser bei 0 °C mit

$$\eta_{\text{Wasser}} = 1,002 \text{ mPa} \cdot \text{s},$$

$$\nu_{\text{Wasser}} = 1,0038 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Die laminare oder Schichtenströmung lässt sich in Versuchen nicht exakt verwirklichen, es treten Wirbel auf (Turbulenzen), die mit steigender Geschwindigkeit zunehmen. Deshalb wird die so gemessene Viskosität als Scheinviskosität bezeichnet. Weitere Eigenschaften sind in Tabelle 13.9 aufgeführt.

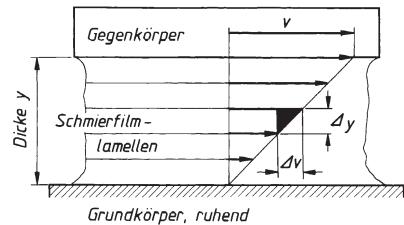


Bild 13.3 Laminare Strömung

Einheit der dynamischen Viskosität η :

$$[\eta] = \frac{\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{m}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

Blaise Pascal, franz. Philosoph und Physiker
1623 – 1682.

Einheit der kinematischen Viskosität ν :

$$[\nu] = \frac{\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2}{\text{m}^2 \cdot \text{kg}} = \frac{\text{kgm} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Normen: DIN 1342/03 Allgemeine Grundlagen

Beispiel: Messung der kin. Viskosität durch Zeitmessung.

Ausfluss der temperierten Flüssigkeit aus genormten Gefäßen (Kapillar-Viskosimeter).

DIN 51562/99 (4 Teile) nach Ubbelohde,
DIN 53012/03 Fehlerquellen und Korrekturen

Beispiel: Messung der dyn. Viskosität durch Zeitmessung.

Fallzeit einer Kugel in der temperierten Flüssigkeit in genormten Gefäßen (Fall-Viskosimeter),
DIN 53015/01 nach Höppler.

Tabelle 13.8: Übersicht, Einflüsse auf die Viskosität

Einflussgröße	Veränderung der Viskosität	Erklärung
Molekülbau	Mit steigender Moleküllänge steigt die Viskosität, ähnlich wirkt sich eine Verzweigung der Kettenmoleküle aus.	Längere Molekülketten haben größere Berührungsflächen, damit stärkere zwischenmolekulare Kräfte (\rightarrow 9.3.1), eine mechanische Verklammerung bei Verzweigungen wirkt im gleichen Sinne.
Temperatur	Stärkste Einflussgröße! Eine Temperatursteigerung um 10 °C erniedrigt die Viskosität auf die Hälfte bis ein Drittel. In der Kälte steigt sie stark an.	Die Wärmebewegung vergrößert den Abstand der Moleküle, dadurch fallen die abstandsabhängigen, zwischenmolekularen Kräfte stark ab.
Druck	Druckerhöhung steigert die Viskosität bei 2000 bar auf das 2...3-fache.	Die Zusammendrückbarkeit (Kompressibilität) von Flüssigkeiten ist gering, deshalb nur geringe Annäherung der Moleküle bei Druckerhöhung.
Zeit, Umgebungsmedium	Öle ändern mit der Zeit ihre Viskosität und damit die Schmierfähigkeit. Sie müssen periodisch ausgetauscht werden (Ölwechsel).	Oxidation durch den Luftsauerstoff, die Abbaustoffe verdicken das Öl (Verharzung). Thermischer Kettenabbau durch höhere Temperaturen und mechanischer Abbau der Ketten durch Scherbeanspruchung ergibt kürzere Moleküle, die Viskosität sinkt.

Viskositäts-Temperatur-Verhalten

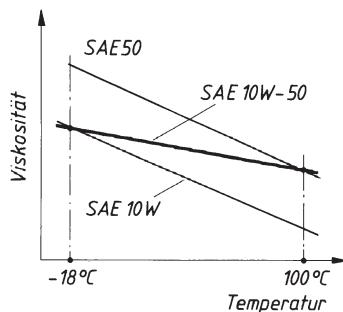
Angestrebt wird eine geringe Temperaturabhängigkeit. Sie wird in Viskositäts-Temperaturdiagrammen dargestellt (Bild 13.4).

Starken Temperaturschwankungen sind z.B. Kfz-Motorenöle ausgesetzt:

- Kaltstart und Vollastbetrieb,
- Winter- und Sommerbetrieb.

Einbereichsöle zeigen zwischen den Temperaturen –18 °C und +100 °C einen starken Abfall der Viskosität, sodass sie nur im Winter (SAE 10W, Bild 13.4) oder nur im Sommer (SAE 50) die beiden gegensätzlichen Forderungen erfüllen (\rightarrow):

Mehrbereichsöle überdecken mehrere der SAE-Klassen (SAE 10W-50), d.h. ihre Kurve verläuft flacher. Ideal wäre ein waagerechter Verlauf. Mehrbereichsöle enthalten Viskositätsverbesserer (\rightarrow), deren Fadenmoleküle sich bei Erwärmung ausdehnen und dadurch verdickend wirken.

**Bild 13.4** V, T-Kurven von Motorölen

Hinweis: SAE-Viskositätsklassen DIN 51511/Z

Anforderungen sind:

- Dünnflüssig genug, um den Kaltstart zu ermöglichen,
- Dickflüssig, um bei heißem Motor den Schmierfilm aufrecht zu erhalten.

Viskositätsverbesserer sind Polymermoleküle mit relativen Molekülmassen von $2 \cdot 10^4 \dots 10^6$ aus Ethylen-Propylen oder Styrol-Butadien.

Tabelle 13.9: Beispiele für weitere Schmierstoffeigenschaften

Schmierstoffe sollen ...	Eigenschaft, Prüfung, Normung
bei höheren Temperaturen nicht verdampfen, wenig oxidieren und geringe Rückstände durch Verharzung, Verkokung aufweisen	Verdampfungsverlust in Masse-%, wenn das Öl 1 h bei 250 °C und geregelter Luftzufuhr gehalten wird, DIN 51581-1/03 Künstliche Alterung nach verschiedenen Methoden. Messung des Koksrückstandes , DIN 51551/93 und DIN 51352-2/85
bei tiefen Temperaturen noch fließen (nicht kristallisieren)	Ermittlung des Pourpoints (Trübungspunkt), DIN ISO 2176/97, früher Stockpunkt genannt.
wenig Säuren (Oxidation) bilden	Neutralisationszahl ist die Masse Kaliumhydroxid KOH in mg, die zur Neutralisation der Säuren in 1 g Öl erforderlich ist.
mit Wasser nicht emulgieren	Wasserabscheidevermögen , DIN 51589-1/91
mit Luft keinen Schaum bilden	Luftabscheidevermögen , DIN 51381/88

13.3.3 Öle

Minerale Öle sind Mischungen aus linearen oder verzweigten Alkanen (Parafinbasisöl) oder ringförmigen Cyclo-Alkanen (Naphthenbasisöl). Unlegierte Öle sind nur für einfache Beanspruchungen geeignet (Tabelle 13.10). Die Vielzahl der Anforderungen bei den vielen Anwendungsbereichen, wie z.B. Kühlmaschinen, Dampfturbinen, Vakuumpumpen usw. ergibt eine ebenso große Anzahl von Sorten.

Tabelle 13.10 zeigt eine Sortenauswahl mit den Kurzbezeichnungen. Legierte Öle sind für große Belastungen geeignet, sog. HD-Öle (heavy duty), und enthalten Zusätze (Tabelle 13.13).

Tabelle 13.10: Kurzbezeichnung der Schmierstoffe und Kennzeichnung der Behälter, Geräte und Schmierstellen nach DIN 51502/90

Stoffart (Anwendung)	Kennbuchstabe(n)	Normen (Symbol)
Stoffgruppe 1: Mineralöle		
Normalschmieröle	AN	DIN 51501/79
Bitumenhaltige Schmieröle	B	DIN 51513/86
Umlaufschmieröle	C	DIN 51517/04
Hydrauliköle (HL, HLP)	H	DIN 51524/85
Hydrauliköle (HVLP)	HV	DIN 51524-3/90
Motoren-Schmieröle	HD	
Schmieröle für Kfz.-Getriebe	HYP	
Kältemaschinenöle	K	DIN 515503-1/97
Wärmeträgeröle	Q	DIN 51522/98
Kühlschmierstoffe	S	DIN 51385/91
Schmier- und Regleröle	TD	DIN 51515-1/97

Kennzeichnung von Schmierölen

CL-68

Stoffart (Anwendung)	Kennbuchstabe(n)	Normen (Symbol)
----------------------	------------------	-----------------

Stoffgruppe 2:
Schwer entflammbare Hydraulikflüssigkeiten für Bergbau, Walzwerke, Flugzeuge

Öl-in-Wasser-Emulsionen	HFA	DIN 24320
Wasser-in-Öl-Emulsionen	HFB	
Wässrige Polymerlösungen	HFC	
Wasserfreie Flüssigkeiten	HFD	

Stoffgruppe 3: Synthese- oder Teilsyntheseflüsseigkeiten, biologisch abbaubar, für Anlagen der Nahrungsmittelindustrie, Baumaschinen

Ester, organisch	E	
Perfluor-Flüssigkeiten	FK	
Synthet. Kohlenwasserstoffe	HC	
Ester der Phosphorsäure	PH	
Polyglykolöle	PG	
Silikonöle	SI	

Kasten: Mineralöl;

C Schmieröl C, Tabelle 13.10, Stoffgruppe 1;

L Korrosionsbeständigkeit, (Tabelle 13.11)

68 Viskositätskennzahl, (Tabelle 13.12)

Tabelle 13.11: Zusatz-Kennbuchstaben für Schmierstoffe (ausgenommen sind Motorschmieröle, Schmieröle für Kfz-Getriebe und schwer entflammbare Hydraulikflüssigkeiten).

Zusatz-	Schmierstoffart
D	Schmieröle mit detergierenden Zusätzen, z.B. Hydrauliköl HLPD
E	Schmieröle, die in Mischung mit Wasser verwendet werden, z.B. Kühlenschmierstoff SE
L	Schmierstoffe mit Wirkstoffen zum Erhöhen des Korrosionsschutzes und/oder der Alterungsbeständigkeit, z.B. Schmieröl DIN 51517-CL-100
F	Schmierstoffe mit Festschmierstoff-Zusatz (z.B. Graphit, Mo-Disulfid), z.B. Schmieröl CLPF
M	Wassermischbare Kühlshmierstoffe mit Mineralölanteilen, z.B. Kühlshmierstoff SEM
S	Wassermischbare Kühlshmierstoffe auf synthetischer Basis, z.B. Kühlshmierstoff SES
P	Schmierstoffe mit Wirkstoffen zum Herabsetzen von Reibung und Verschleiß im Mischreibungsgebiet und/oder zur Erhöhung der Belastbarkeit, z.B. Schmieröl DIN 51517-CLP-100
V¹⁾	Schmierstoffe, die mit Lösungsmitteln verdünnt sind, z.B. Schmieröl DIN 51513-BBV

¹⁾ Kennzeichnung nach der Verordnung über gefährliche Stoffe (GefStoffV)

Tabelle 13.12: Kennzahlen für die Viskosität (fett) nach DIN 51519 (Viskositäten sind ca.-Werte)

ISO-Viskositätsklasse	Mittelpunktsviskosität bei 40° V mm ² /s	Grenzen d. dynam. Viskosität bei 40 °C min. mPa · s	max.
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,6
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,0
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650
ISO VG 2200	2200	1980	2420
ISO VG 3200	3200	2880	3520

Tabelle 13.13: Zusätze zu Schmierölen

Eigenschaftsmangel	Zusätze (Additives)	Stoffe und Wirkungsweise
Viskosität sinkt stark mit steigender Temperatur	VI-Verbesserer (VI = Viskositätsindex). Die V, T-Kurve wird flacher	Polymere Kettenmoleküle ($M_f = 2 \cdot (10^4 \dots 10^6)$) aus PMMA, PE-PP, SB. Die Knäuelmoleküle strecken sich und erhöhen die innere Reibung.
Bei Misch- und Grenzreibung kommt es zu Adhäsionsverschleiß, die Reibzahl steigt	Verschleißminderer AW - (anti-wear) und EP-Zusätze (extreme pressure)	Polare Zusätze bilden Adsorptionsschichten (elektrostatische Anziehung zum Metall), organische Cl-, Mo-, P-, S- und Zn-Verbindungen bilden durch Triboreaktionen Gleitschichten (die Reibzahl sinkt).
Feststoffteilchen lagern sich auf den Metalloberflächen ab	Detergentien	Zusätze fördern die Benetzung durch Öl und lösen Ablagerungen ab.
Feststoffteilchen (Abrieb) lagern im kalten Öl ab	Dispersantien	Zusätze halten die Teilchen (Ruß) in Schwebeflüssigkeit, keine Kältschlammbildung.

Synthetische Öle. Mineralöle sind *Gemische* unterschiedlicher chemischer Verbindungen. Synthetische Öle sind aus einfachen Kohlenwasserstoffen durch chemische Reaktionen hergestellt, wie z.B. Silikonöle und *einheitlicher* aufgebaut. Sie enthalten ebenfalls Zusätze, sind teurer und unterscheiden sich punktuell (→) von Mineralölen.

Vorteil	Auswirkung
Pourpoint niedriger, Verdampfungsverlust geringer, Temperatureinfluss auf Viskosität geringer, alterungsbeständiger	Einsatz i. d. Kälte, Einsatzmöglichkeit bis 250 °C, Reibung niedriger, Energieeinsparung Ölwechsel seltener

13.3.4 Fette

Fette wirken im Schmierspalt durch langsame Abgabe von flüssigem Schmierstoff unter der Scherbeanspruchung und dichten die Schmierstelle gegen Eindringen von Wasser und Staub ab. Die homogene Mischung aus Öl und Verdickern soll bei Lagerung und unter Druck möglichst stabil bleiben. Die Öle sind naphtenbasisch, ihre ringförmigen Moleküle neigen weniger zur Entmischung.

Kennzeichnende Eigenschaft ist die Konsistenz. Sie entspricht der Viskosität der Schmieröle und wird durch die **Konuspenetration** (→) ermittelt.

Dabei wird ein Kegel unter genormten Bedingungen in das Fett gedrückt. Zähes Fett lässt ihn weniger eindringen als dünnflüssigeres. Der Eindringweg (Penetration) ergibt die Kennzahl (Tabelle 13.14 Teil 2).

Kurzbezeichnungen für Fette (Tabellen 13.14)

Die Teile 1 bis 4 enthalten Symbole für die Ölsorte (1), die Konsistenzzahl (2), das Verhalten gegenüber Wasser mit Höchsttemperatur (3) und die unterste Gebrauchstemperatur (4).

3 Kennbuchstaben für die max. Gebrauchstemperatur und Verhalten gegen Wasser

Symbol	Wasser- ¹⁾ Verhalten	T_{\max} in °C	Symbol	T_{\max} in °C	Wasser- ¹⁾ verhalten	
C	0 oder 1	60	N	140	nach Vereinbarung	
D	2 oder 3		P	160		
E	0 oder 1		R	180		
F	2 oder 3		S	200		
G	0 oder 1		T	220		
H	2 oder 3		U	> 220		
K	0 oder 1	120	¹⁾ Ziffern: 0 keine; 1 geringe; 2 mäßige; 3 starke Änderung			
M	2 oder 3					

Wirkung der Fette beruht auf einer schwammartigen Verdickung der Öle durch Verdickungsmittel, meist Seifen der Metalle Li, Ca, Na mit langketigen Fettsäuren (auch in Kombinationen z.B. mit Al, sog. Komplexfette).

Seifen entsprechen den Salzen der Metalle mit Mineralsäuren. Sie besitzen eine faserige Struktur.

Fette auf z.B. Rapsölbasis sind umweltverträglich und für Maschinen in Forst- und Landwirtschaft geeignet.

Norm: Ermittlung der Konuspenetration nach DIN ISO 2137/97:

Ruhepenetration: Das Fett wird ohne mechanische Beanspruchung geprüft.

Walkpenetration: Das Fett wird vor der Messung in einem Fettknete gewalkt. Infolge der Strukturviskosität ist dieser Wert höher als die Ruhepenetration.

Tabellen 13.14: Kennzahlen und -buchstaben für Fette (Teile 1...4)

1 Schmierfettverwendung	Symbol
Wälz-und Gleitlager, Gleitflächen DIN 51825	K
Geschlossene Getriebe DIN 51826	G
Offene Verzahnungen, (Haftschmierstoffe)	OG
Für Gleitlager und Dichtungen	M
Schmierfette auf Synthesebasis	1)

¹⁾ Kennbuchstaben aus Tabelle 11.10 Stoffgruppe 3

2 Konsistenzkennzahlen (NLGI-Klassen¹⁾)

Kennzahl	Walk-Penetration in 0,1 mm	Konsistenz, Verwendung		Kennzahl	Walk-Penetration in 0,1 mm	Konsistenz, Verwendung		
000	445...475	↓	fast flüssig	Zentralschmier-Lager, Getriebe-schmierung	3	220...250	mittel	Gleit- und Wälzlager
00	400...430				4	175...205		Wasserpumpen
0	355...385				5	130...160		Wasserpumpen
1	310...340				6	85...115	steif	Blockfette
2	265...295		weich	Gleit- und Wälzlager	¹⁾ NLGI: National Lubrification Grease Institute			

Kennzeichen für Fette aus Mineralölen mit Naphthenbasis ist ein Dreieck, mit Syntheseölbasis ein Rhombus mit Buchstaben und Ziffern.

K LP 2 K – 30 (Tabellen 13.14, Teile 1...4)

– 30 untere Gebrauchstemperatur bis – 30 °C (Tabelle 4)

K obere Gebrauchstemperatur bis 80 °C (Tabelle 3)

2 Konsistenzklasse 2 (Tabelle 2)

L, P Zusätze wie für Öle (Tabelle 13.11)

K für Wälzlager (Tabelle 1)

4 Kennzahlen für die niedrigste Gebrauchstemperatur T_{\min}

T_{\min} °C –	Kennzahl	T_{\min} °C –	Kennzahl
– 10	– 10	– 40	– 40
– 20	– 20	– 50	– 50
– 30	– 30	– 60	– 60

Der Einsatzbereich hängt von Grundöl und Dickungsmittel ab und liegt zwischen – 60 und 300 °C.

Komplexe **Ca-Fette** sind wasserbeständig und ertragen höhere Temperaturen (bis 300 °C), **Li-Fette** sind Mehrzweckfette und besonders für Wälzlager geeignet.

13.3.5 Festschmierstoffe

Diese Stoffe können aufgrund ihrer Kristallstruktur in dünnsten Schichten abscheren. Dabei bleiben kleinste Partikel in den Rauheitsmulden zurück, wo sie die Oberflächen glätten und Mikrokontakte verhindern. Voraussetzung ist eine genügend kleine Partikelgröße (0,1...1 µm). Festschmierstoffe werden eingesetzt bei hohen Temperaturen oder bei Forderung nach Ölfreiheit (Tabelle 13.15).

Tabelle 13.15: Festschmierstoffe, Eigenschaften und Anwendung

Stoff	Beschreibung	Anwendung
Talkum	Magnesiumsilikat, weißes Mineral, fettiger Griff	Pulver, Gleit- und Trennmittel für z.B. Reifendecke/Schlauch, in Kabeln, Schneiderkreide
Graphit	Reiner Kohlenstoff, schwarzes Mineral, höhere Wärmeleitfähigkeit und Temperaturbeständigkeit in Luft (550 °C) als MoS ₂ , preisgünstiger	Pulver (4...25 µm) für Sicherheitsschlösser, Pasten mit rückstandsfrei verdampfenden Flüssigkeiten. Zusatz zu Fett und Öl, Bestandteil von Sinterwerkstoffen für Gleitzwecke (Stromabnehmerteile, Kolbenringe f. Gaskompressoren)
Bornitrid (hex. BN)	Wegen des Graphitgitters als weißer Graphit bezeichnet, in Luft stabil bis 1000 °C, in Inertgas bis 1800 °C	Beschichtung (sog. coatings) mit Spray bzw. Pasten (Schlichte) von gießtechnischen Geräten und Anlagen, die mit Al-, Mg-, Zn-, Pb-Schmelzen oder Schlacken Kontakt haben. Geringe Benetzung und Reibung zwischen Schmelze/Wand. Trennmittel beim Löten, Sintern und Warmumformen
Molybdän-disulfid MoS₂	Synthetische Verbindung, bleigraue Kristalle, höhere Druckfestigkeit (Dichte) und Beständigkeit im Vakuum (Pumpen) als Graphit, bis ca. 400 °C beständig, mit Korngrößen von 0,1...10 µm	Pulver und Pasten für Grundbehandlung von Gleitstellen, die nicht mehr nachgeschmiert werden können: Stopfbuchsenpackungen, Kreuzgelenke. Gleitlacke für Nabe-Welle-Verbindung zur Verhütung von Reiboxidation (Passungsrost), Bestandteil von Sinterwerkstoffen für Gleitzwecke (in Verbindung mit PTFE (Teflon) und hex. BN)

Die Strukturen der Festschmierstoffe sind sich ähnlich: Molekülgitter mit starken Kräften innerhalb der netzartigen Moleküle und schwache Kräfte (größere Abstände) zwischen ihnen.

Hinweis: Kristallgitter des Graphits, Bild 1.6

Anwendung für Gleitlager mit niedrigen Gleitgeschwindigkeiten, oszillierenden Bewegungen im Mischreibungsgebiet, bei Forderung nach Ölfreiheit und bei hohen Temperaturen, wie Schrauben an Auspuffanlagen und Rohrleitungsflanschen.

Festschmierstoffe sind auch Bestandteil von Verbundwerkstoffen für Gleitfunktionen. Anwendungsformen sind Pasten, Sprays und Einlagerungen in Sinterwerkstoffen.

13.4 Verschleiß

Verschleiß ist der Materialverlust durch die tribologische Beanspruchung. Dabei wird die Oberfläche der Reibpartner:

- schockartig an den Rauspitzen erwärmt und abgeschreckt,
- evtl. durch Martensitbildung verfestigt (sog. Reibmartensit) und
- durch abgelöste Partikel zerfurcht (Abrasion) und chemisch aktiviert.

13.4.1 Verschleißmechanismen

Die Abtragung erfolgt nach unterschiedlichen, physikalisch-chemischen Mechanismen, die vielfach in Kombination miteinander auftreten (Tabelle 13.16).

Tabelle 13.16: Verschleißmechanismen

Verschleißmechanismus	Kennzeichen	Erscheinungsbild	Gegenmaßnahmen
Adhäsion	Verschweißungen im Mikrobereich, wo örtlich hohe Temperaturen (Blitztemperaturen) auftreten	Fresserscheinungen, Bremsspuren, Aufbauschneide	Reibpartner mit unterschiedlicher chemischer Struktur wählen
Abrasion (Furchung)	Zerspanung im Mikrobereich, Riefen durch harte Teilchen im Zwischenstoff oder durch die Adhäsion entstandene, abgescherte, verfestigte Teilchen	Riefen auf z.B. Brems scheiben oder an Gleitlagern bei verunreinigtem Öl	Hartstoffpartikel im Grundkörper, Einbettungsfähigkeit des Gegenkörpers
Oberflächenzerrüttung	Rissbildung in der Oberfläche durch wechselnde Spannungen und Verformungen hervorgerufen	Grübchenbildung bei Wälzlagern, an Zahnrändern	Dickere Randschicht, gehärtet (bei Stahl)
Tribo-chemische Reaktion	Reaktionsprodukte beeinflussen den Verlauf des Verschleißes. Sie entstehen durch Reaktion der Reibpartner mit dem Umgebungsmedium unter Wirkung der Tribobbeanspruchung	Reiboxidation, (Passungsrost), Wirkung der Öl-Additiva auf die Oberflächen (Hypoidöle)	Festschmierstoffe in dünnen Zwischenschichten

13.4.2 Verschleißarten

Für den Verlauf des Verschleißvorganges ist die eingeleitete Energie, d.h. der zeitliche Ablauf von Kräften (konstant, stoßartig) und die Richtung von Relativbewegungen maßgebend. Danach werden zahlreiche Verschleißarten unterschieden (Tabelle 13.17). Bei offenen Tribosystemen (Materialförderung) tritt meist **Erosion** (→) auf.

Erosion: Allgemein die Abtragung von Werkstoff durch strömende Medien.

Spülverschleiß durch Flüssigkeiten mit Feststoffteilchen.

Erosionkorrosion, wenn Korrosionsprodukte durch Erosion fortwährend abgetragen werden.

Das folgende Beispiel soll zeigen, dass der Begriff verschleißfester Werkstoff relativ ist. Zur Beurteilung müssen insbesondere die Verschleißarten und Verschleißmechanismen betrachtet werden.

Beispiel: Strahlverschleiß (\rightarrow) von pneumatisch gefördertem Gut, das unter **verschiedenen Winkeln** auf eine Fläche (Stahl oder Gummi) trifft. Das Diagramm (Bild 13.5) zeigt das Verschleißverhältnis von Gummi zu St 35J0 (St 37).

Bei einem **flachen** Anstrahlwinkel (Gleit- oder Schrägstahlverschleiß) zeigt Gummi einen mehrfachen Verschleiß. Bei **senkrechtem** Strahl (Prallstrahlverschleiß) ist der Gummi widerstandsfähiger als der Stahl.

Es zeigt sich, dass Härte allein nicht gleichzeitig höhere Verschleißfestigkeit bedeuten muss.

Verschleißfestigkeit ist eine Eigenschaft des gesamten Tribotro-Systems

Begriff: Strahlverschleiß entsteht durch Feststoffteilchen im Trägergas.

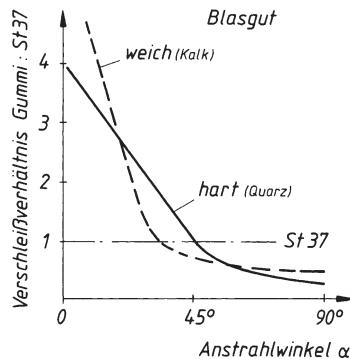
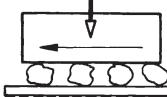


Bild 13.5 Einfluss des Anstrahlwinkels auf den Verschleiß bei der pneumatischen Förderung
(nach Uetz)

Tabelle 13.17: Verschleißarten

Verschleißpaarung	Verschleißart	Beanspruchung	Beispiele	Erscheinungsform des Verschleißschadens
Festkörper mit und ohne Schmierung	Gleitverschleiß		Gleitlager Führungsbahnen Drehmeißel	Fressen, Rieben, Laufspiegel, Rattermarken, Rieben, Verschleißmarken, Auskolkung
	Wälzverschleiß (Rollverschleiß mit Schlupf)		Wälzlager, Zahnräder, Werkzeuge für Gewinderollen	Grübchenbildung (Pittings), Abblätterungen, Schälungen
	Stoßverschleiß		Ventilstöbel und -sitze, Prägewerkzeuge	Grübchenbildung, Schälungen, Ausbrechungen
	Schwingverschleiß		locker sitzende Spann- und Schrumpfverbindungen	Passungsrost (Reiboxidation), Aufrauhen der Oberfläche, Fressen, Oxidwallbildung

Tabelle 13.17: Verschleißarten, Fortsetzung

Verschleiß-paarung	Verschleißart	Beanspruchung	Beispiele	Erscheinungsform des Verschleißschadens
Festkörper mit Partikeln als Zwischenstoff (Abrasion)	Korngleitverschleiß		Staub in Gleitlagerstellen: Förderketten	Kratzer, Riefen, Einbettung harter Teilchen
Festkörper mit Gegenstoff	Kornwälzverschleiß Gleitverschleiß abrasiv ↓ erosiv	Gegenkörperfurchung Teilchenfurchung	Schienenfahrzeuge: Laufflächen Baggerlöffel, Förderrutschen für Gestein Strangpressen von keramischen Massen	Walzspuren, Einbettung harter Teilchen, Riefen, Ausbrechungen flache Riefen, Auswaschungen (Mulden)

13.4.3 Verschleißmessung und -kenngrößen

Betriebsversuche in realen Tribosystemen sind sehr aufwändig, solche mit einzelnen Bauteilen weniger. Modellversuche mit Probekörpern (dem Bauteil und seiner Beanspruchung ähnlich) oder mit einfachen Probekörpern sind leicht wiederholbar und in den Einflussgrößen variabel.

Von den vielen „Tribometern“ mit geometrisch unterschiedlichen Körpern und Gegenkörpern ist als Beispiel das Stift-Ring-Tribometer dargestellt (Bild 13.6).

Verschleiß kann durch die Änderung z.B. als Längenabnahme, Volumen- oder Massenverlust gemessen und zu Bezugsgrößen in Verhältnis gesetzt werden.

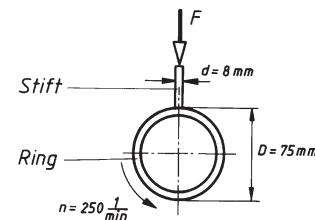
Dadurch ergeben sich spezifische, vergleichbare Werte (Beispiele Tabelle 13.1), gleiche Versuchsbedingungen vorausgesetzt.

Vielfach wird eine bestimmte Werkstoffpaarung als 1 oder 100 % gesetzt und im Vergleich mit anderen Paarungen ein relativer Verschleißwiderstand ermittelt (Bild 13.5).

Modellversuche bilden die zahlreichen Systemelemente des Tribosystems nach, z.B.

- Werkstoffe gegen Vergleichswerkstoff, meist 100Cr6 gehärtet,
- Geometrie der Körper (Stift/Scheibe, Stift/Walze, Walze/Ebene, 4-Kugeln),
- Kraft (konstant), Bewegung (gleichbleibend, schwelend oder intermittierend),
- Zwischenstoff (Vakuum, Luft, Schmierstoff, Schleifpapier).

Beispiel: Verschleißprüfung mit Stift-Ring

**Bild 13.6** Stift-Ring-Anordnung

Verschleißwiderstand ist der Kehrwert der Verschleißgrößen.

Tabelle 13.18: Beispiele für Verschleißkenngrößen

Messgröße	Bezugsgröße	Verschleißgröße W	Formelzeichen	Einheit (Beispiel)
Länge l	Zeit t	Verschleißgeschwindigkeit	$W_{l/t}$	mm/h
Volumen V	Weg s	Verschleiß-Weg-Verhalten	$W_{v/s}$	mm^3/km
Masse m	Weg s		$W_{m/s}$	g/km

13.4.4 Verschleißschutz

Maßnahmen zur Verminderung des Verschleißes müssen das jeweilige Tribosystem analysieren und versuchen durch Änderung der Einflussgrößen den Verschleiß zu vermindern. Im Einzelnen sind dies (Übersicht):

Werkstoffpaarungen haben unterschiedliche Widerstände gegenüber den 4 Verschleißmechanismen. Einflussfaktoren sind:

- die Härte der Partner,
- chemische Bindungen und Kristallgitter der Stoffe in den Oberflächen, die sich berühren.

Damit kann Verschleißschutz durch Werkstoffänderung auf zwei Wegen erreicht werden.

- Massive Ausführung des auf Verschleiß beanspruchten Bauteiles aus entsprechenden Werkstoffen wird oft bei Bauteilen von offenen Systemen mit verschleißenden Gütern gewählt.
- Beschichtung der Bauteile mit Schichtwerkstoffen, die der Tribobearbeitung angepasst sind (→).

Stähle können durch Wärmebehandlung im Randbereich verändert werden (Tabelle 13.19).

Übersicht: Maßnahmen zum Verschleißschutz

Maßnahme	Beispiele
Belastung ändern	Flächenpressung verkleinern
Bewegungen ändern	Wälz- statt Gleitvorgänge vorsehen
Zwischenstoff ändern	Schmierstoff mit anderer Viskosität oder mit Zusätzen
Verschleißmechanismen berücksichtigen	Den überwiegenden Mechanismus durch Werkstoffänderung <i>eines</i> Partners (oder beider) verkleinern oder ganz unterdrücken

Dabei muss ein größerer Verschleißabtrag konstruktiv berücksichtigt werden.

Beispiel: Baggerverschleiß, Wiederaufarbeitung durch Auftragschweißen.

Hinweis: Schichtwerkstoffe, Eigenschaften und Verfahren zum Aufbringen sind im Abschnitt 11.2 behandelt.

Tabelle 13.19: Verschleißschutzschichten durch Stoffeigenschaftändern

Werkstoffe	Schicht	Schutzwirkung	Verfahren	Hinweis
C-arme Stähle	Martensit	Abrasion, Oberflächenzerrüttung	Einsatzhärten	5.6.3
Vergütungsstähle			Randschichthärten	5.6.2
Nitrierstähle	Fe- und Al-Nitride	Adhäsion	Nitrieren	5.6.4
Werkzeugstähle	Fe-Boride	Adhäsion, Abrasion	Borieren	5.6.5
Temperguss	Ledeburit, Fe-Carbid	Adhäsion, Abrasion	Umschmelzhärten	5.6.2

Adhäsion bewirkt Stoffübergänge mit Aufschweißungen im Mikrobereich und evtl. zusätzlicher Abrasion durch abgescherete, kleine Teilchen z.B. bei Mangelschmierung in Lagerstellen. Ursache sind Diffusionsvorgänge an der Grenzfläche. Bei der Kombination Metall/Metall sind kfz.-Metalle ungünstig, weniger adhäsiv sind:

- krz. und hex. kristallisierende Metalle mit
- heterogenen Gefügen,
- Metall gegen Kunststoff und (→)
- Metall gegen Keramik.

Beispiele: Stahlteile (krz.) werden von jeher mit Lagermetallen auf der Basis Cu, Sn, Pb oder Al (mit anderem Kristallgitter) kombiniert.

Kunststoffe (PTFE, PA) haben geringe Haftneigung zu Metallen.

(→ Lagerwerkstoffe 11.3)

Bei hohen Temperaturen bewahren sich Legierungen auf Co-Basis (hex.) oder nicht-metallische Stoffe (Graphit, Siliciumcarbid SiC, Siliciumnitrid Si_3N_4).

(→ keramische Werkstoffe 8.4)

Kunststoffe und keramische Stoffe neigen wegen der festen Bindung ihrer Elektronen nicht zu Adhäsion und sind auch gegenseitig als Partner geeignet. Hartstoffsichten gehören ebenfalls dazu. Auch Festschmierstoffe mindern die Adhäsion.

Abrasion (Furchung) durch harte Teilchen des Gegenkörpers tritt insbesondere bei Anlagenteilen zur Förderung oder Zerkleinerung von mineralischen Stoffen auf. Zum Schutz sind dickere Schichten von Hartstoffen erforderlich.

Massive Werkstoffe müssen einen hohen Carbideanteil im Gefüge besitzen. Das bedeutet Einsatz hoch legierter Werkstoffe (→).

Bei Abrasion sollte die Härte des Grundkörpers um den Faktor 1,3 höher sein als die des angreifenden, abrasiven Stoffes. Dann bleibt der Verschleiß gering (Tieflage), während bei Unterschreiten des Wertes der Verschleiß steil ansteigt (Hochlage).

Zerspanungswerzeuge werden gegen die Aufbauschneide (Adhäsion), Kolk- und Freiflächenverschleiß (Abrasion) durch Hartstoffsichten geschützt.

Hartstoffsichten für Werkzeuge und Bauteile bieten wegen ihrer Härte Schutz gegen Abrasion. Die Adhäsionsneigung variiert und hängt von der chemischen Struktur ab (Tabelle 13.20).

- Carbide haben einen höheren Metallbindungsanteil. Bei hohen Schneidentemperaturen sind sie gegenüber Stählen durch Diffusionsverschleiß weniger widerstandsfähig als
- Nitride (Atombindungsanteil hoch) oder
- Oxide (Ionenbindungsanteil hoch).

Die dünnen Schichten (1-10 µm) aus zahlreichen Werkstoffen und -kombinationen werden mit Hilfe von CVD/PVD-Verfahren hergestellt und haben z.T. geringste Reibzahlen auch beim Trockenspanen.

Mehrfachschichten (Multilayer) bauen die Eigenspannungen ab und kompensieren die unterschiedlichen Wärmedehnungen zwischen Grundwerkstoff und Schichten (→ Bild 11.12).

Hinweis: Festschmierstoffe → Tabelle 13.14).

Auskleidungen von Rinnen, Rutschen und Rohren mit Schmelzbasalt oder Oxidgemischen von Al- und Zr-Oxiden zu Formstücken vergossen.

Beispiele: Auftragschweißen von Hartlegierungen in Schichten bis zu 6 mm (→ 11.3.4)

Verschleißfestes Gusseisen (→ 6.7)

Ledeburitische Werkzeugstähle (→ Tabelle 4.29)

Beispiele: Beschichten von Wendeschneidplatten, Fräsern, Bohrern, Stanz- und Schnittwerkzeugen. (→ Tabellen 11.16 + 11.17).

Tabelle 13. 20: Vergleich von Hartstoffsichten

Hart-Stoff	Widerstand gegen		Härte HV 0,05
	Adhäsion	Abrasion	
Diamant	+++	++++	10000
TiC	+	+++	3100
TiCN	++	+++	3000
TiN	++	++	2300
TiAlN	++	+++	3000
Al ₂ O ₃	+++	++	2100

Bedeutung: + mittel; ++ hoch; +++ sehr hoch; ++++ extrem hoch

TiAlN-Schichten sind hoch oxidationsbeständig (durch Bildung von Al-Oxid), warmhart und gering wärmeleitend, günstig für Trockenspanen und HSC-Barbeitung.

CrN-Schichten (PVD) sind zäh, chemisch und thermisch stabil, geringe Adhäsion günstig für Umformwerkzeuge und Kunststoffformen.

TiC-Schichten (CVD) haben hohe Härte und Haftfestigkeit auf HS- und Stahlwerkstoffen, hoch abrasivbeständig, weniger gegen Adhäsion und Oxidation.

Reibungs- und verschleißarme Werkstoffpaarungen im Trockenlauf werden z.B. für Gelenkprothesen oder Geräte benötigt, die im Vakuum oder in Kontakt mit Lebensmitteln usw. arbeiten.

Oberflächenzerrüttung entsteht z.B. bei Wälzlagern und Zahnräumen durch periodische, hohe Druckbeanspruchung an punkt- oder linienförmigen Berührungsstellen.

Dabei entstehen unterhalb der Oberfläche Risse. Als Folge lösen sich dünne Partikel aus der Oberfläche heraus, so dass winzige Grübchen übrig bleiben (Pitting-Bildung).

Tribochemische Reaktionen wirken sich auf die chemisch unbeständigen Metalle aus, Edelmetalle, Kunststoffe und Keramik sind nicht gefährdet.

In vielen Fällen ist die Oxidation durch Luftzutritt für die Grenzschicht erwünscht. Schmierstoffzusätze (EP-Zusätze Tabelle 13.13) nutzen solche Reaktionen aus, um dünne, gleitfähige Grenzschichten aufzubauen.

Verschleißschutz von Leichtmetallen

Leichtmetalle haben große Bedeutung für den Leichtbau von Fahrzeugen zur Einsparung von Masse und damit Treibstoff. Durch ihre niedrige Oberflächenhärte sind die Metalle Al, Mg und Ti und ihre Legierungen empfindlich gegen Verschleiß und können durch elektrochemisch aufgebrachte Schichten geschützt werden (Tabelle 13.21).

Tabelle 13.21: Verschleißschutz für Leichtmetalle

Werkstoffe	Schicht	Beschreibung	Verfahren	Hinweis
Aluminium und Legierungen	Al-Oxid, (Kepla-Coat ¹⁾)	z.T. in das Substrat einwachsend, elektrisch isolierend, auch Korrosionsschutz	Hartanodisation, plasmachemische Oxidation	7.3.3
Magnesium und Legierungen	Mg-Oxid (Al, Cu), (Magoxid-Coat ¹⁾)	konturengetreue Beschichtung 15...20 µm, Korrosionsschutz	Plasmachemische Oxidation	-
Titan und Legierungen	Titancarbide, Titannitride	Eindiffundieren von C, O und N in die Randschicht	Tiduran®- und Tidunit®-Verfahren	7.5.3
Alle	Ni-P + (SiC)	Außenstromloses Abscheiden von Ni-P		11.2.6

¹⁾ ® AHC-Oberflächentechnik (www.ahc-oberflächentechnik.de)

Beispiele: Lager für Trockenlauf, Beschichtung von Titanprothesen mit Kohlenstoffsschichten.

(→ Tabelle 11.17)

Gleitelemente aus PTFE (Teflon) oder PE für Gegenkörper aus Stahl.

Widerstandsfähig sind zähe Werkstoffe mit hoher Härte, oder gehärteten Oberflächen, z.B. durch Einsatzhärten erzeugt und mit Dicken von min. 0,2...0,3 x Modul in mm.

(→ Einsatzstähle 5.6.3)

Höhere Lebensdauer wird auch durch hohe Reinheitsgrade der Stähle erreicht, z.B. mit vakuumerschmolzenen Stählen.

(→ Wälzgerätschäfte 4.6.1)

Beispiel: Bei Stahl tritt in Schrumpfverbindungen bei Zutritt von Luft die sog. Tribooxidation (Passungsrost) auf. Ursache ist die Aktivierung der Oberflächenatome durch die minimale Relativbewegung bei elastischen Formänderungen.

Abhilfe durch Gleitlacke oder Pasten, evtl. Umkonstruktion von form- zu kraftschlüssigen Verbindungen.

Beispiele: Kfz-Räder aus Al- oder Mg-Legierungen, Beschlagteile, Hydraulik-Zylinder aus Al-Rohren, Gebläserotoren aus Ti-Legierungen.

Zylinderlaufflächen für Verbrennungsmotoren (→ folgendes Beispiel).

Beispiel: Tribosystem Kolben/Zylinderlauffläche in Kfz-Motoren

Monolithische Zylinder-Kurbelgehäuse aus Al-Druckguss-Legierungen müssen durch Beschichtung verschleißfester gemacht werden (→).

Motoren mit höherer Laufleistung bestehen heute aus übereutektischen AlSi-Legierungenn, z.B. AlSi17CuMg, (Alusil ®). Steigender Si-Gehalt erhöht den Verschleißwiderstand (→), verschlechtert jedoch die Gießeignung für komplexe, dünnwandige Bauteile.

Moderne Verbundlösungen: Zylinderlaufbüchsen aus hoch Si-haltigen Al-Legierungen, werden pulvermetallurgisch hergestellt und eingeossen. Der prozessbedingte Anteil von Al-Oxid erhöht den Verschleißwiderstand (→ Sprühkom-paktieren 11.2.8).

Beschichtung durch außenstromlos abgeschiedene Schichten aus Ni mit feinsten Einlagerungen von NiP und evtl. Hartstoffteilchen aus SiC (→ 11.2.6), z.B. für Motoren im Rennsport eingesetzt.

Tragkristalle im Gefüge sind hier die primär ausgeschiedenen Si-Kristalle mit einer Härte von ca. 1400 HV. Durch Hohnen bzw. Ätzen entstehen in der eutektischen Grundmasse flache Riefen oder Mulden als Schmierstoffreservoir für die hydrodynamische Schmierung.

Alternativlösung: Herstellen poröser Zylinderbüchsen (Preform) aus Si-Kristallen, die in die Kokille eingelegt und beim langsamem Einströmen der Schmelze getränkt werden. So entsteht eine hoch Si-haltige Laufflächenschicht, die ohne Trennfläche in den Gehäusewerkstoff übergeht.

(Lokasil®, Kolbenschmidt).

Literaturhinweise

Fachzeitschrift

GfT, Gesellschaft für
Tribologie

Tribologie und Schmierungstechnik. Curt Vincentz Verlag, Hannover
Arbeitsblatt 7/2002 Tribologie Definitionen Begriffe Prüfung und
weitere Blätter zur Schmierung von Wälzlagern, Zahnrädern u.a.
(www.gft-ev.de)

Czichos, H. u. K.-H. Habig
Gießmann, H.:
Pursche, G. (Hrsg.)
Duesmann, M.:
VDI-Bericht 624
VDI-Bericht 1764
AWT

Tribologie Handbuch. Vieweg Verlag, 2002
Wärmebehandlung von Verzahnungssteilen. Expert-Verlag, 2004
Oberflächenschutz vor Verschleiß. Verlag Technik Berlin, 1990
Hochleistungsbauteile für Verbrennungsmotoren. Expert-Verlag, 2004
Beschichtungen für Hochleistungsbauteile VDI-Verlag, 1986
Zylinderlaufbahn, Hochleistungskolben, Pleuel VDI-W, 2003
Verschleißschutz-Ratgeber
(www.iwt-bremen.de)

Firmen-Informationen

AHC-Oberflächentechnik

(→ auch bei 11.2. Schichttechnik)
Gleit- Trenn- und Verschleißschichten auf Eisen und NE-Metallen
(www.ahc-oberflächentechnik.de)

Bodycote Metal Technology

Beschichtungen und Wärmebehandlung
(www.bodycote.de)

Verschleißschutztechnik Keller

Beschichten von Werkzeugen für Umformen, Zerspanen, Druckgießen
(www.vst-keller.de)

Fraunhofer-Institut Schicht-
und Oberflächentechnik

Reibungsminderung und Verschleißschutz
(www.ist.fhg.de)

14 Werkstoffprüfung

14.1 Aufgaben, Abgrenzung

Das Fachgebiet der Werkstoffprüfung ist sehr umfangreich. Alle Werkstoffe müssen immer wieder geprüft werden – neben den metallischen Werkstoffen auch Kunststoffe, Gläser, keramische Stoffe, Halbleiter und Verbundwerkstoffe. Hauptaufgaben der Werkstoffprüfung sind die Sicherung der Qualität der Produkte in den Fertigungsgängen (Wareneingangs-, Produktionskontrolle), die Untersuchung von Schäden und die Ermittlung von Werkstoffeigenschaften in Forschung und Entwicklung, daneben auch die Entwicklung geeigneter Prüfverfahren. Es gibt zahlreiche Normen¹.

Werkstoffprüflabors findet man bei Herstellern und Anwendern von Werkstoffen, bei Prüfeinrichtungen wie TÜV und Dekra sowie bei Versicherungen. Werkstoffprüfung ist selbstverständlich Bestandteil der Werkstoffforschung in z.B. Hochschulinstituten, Forschungseinrichtungen wie Max-Planck-, Fraunhofer- und Helmholtz-Instituten.

Die Prüfverfahren werden in unterschiedliche Gruppen eingeteilt:

Werkstoffprüfgruppe	Beispiele
Chemische Analysen	Analyse der mittleren Zusammensetzung von Werkstoffen (Spektralanalyse) oder einzelner Werkstoffbereiche (Mikrosonde)
Untersuchung von Gefügen und Schadstellen	Herstellung von Gefügebildern (Schliffbilder) durch Licht- oder Elektronenmikroskopie. Untersuchung von Bruchflächen (Fraktographie)
Eigenschaftsprüfungen	Ermittlung von Werkstoffkennwerten und -linien zur Qualitätssicherung, z.B. Zugversuch, Härteprüfungen Prüfung von Verarbeitungseigenschaften (technologische Prüfungen), z.B. auf Schmiedbarkeit, Härtbarkeit
Fehlersuche	Aufspüren von Werkstofffehlern ohne Zerstörung des Bauteils mittels durchdringender Medien wie Strahlen, Ultraschall oder Magnetfeldern

Im Rahmen des Buches werden nur die Prüfverfahren näher behandelt, die zum Verständnis des behandelten Lehrstoff wichtig sind oder für den Arbeitsbereich des Technikers oder der Ingenieurin im Maschinenbau bedeutsam sein könnten (Qualitätssicherung). Das ist nur ein kleiner Ausschnitt der o.a. Untersuchungen:

- Prüfung von mechanischen Werkstoffkennwerten (Abnahme und Gütekontrolle),
- Prüfung von Verarbeitungseigenschaften,
- Gefügeuntersuchungen,
- Prüfung von Roh- und Fertigteilen auf Fehler (zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, ZfW)
- Chemische Analyse

¹ DIN-Taschenbücher Materialprüfnormen Nr.: 19, 56, 205, Beuth-Verlag

14.2 Prüfung von Werkstoffkennwerten

Das Eigenschaftsprofil eines Werkstoffes besteht aus vielen Kennwerten und Kennlien. Der Konstrukteur benötigt sie teilweise für die Werkstoffwahl, die Fertigung für die Kontrollen des Rohmaterials und der Fertigungsgänge, aber auch, um Daten für die einzelnen Arbeitsgänge angeben zu können.

Werkstoffkennwerte werden meist an besonders hergestellten *Probekörpern* (kurz Probe) ermittelt. Bei mechanischen Eigenschaften belastet man die Probe bis zum *Bruch* oder bis zu einer bestimmten *Verformung*. Belastung, Verformung und die Zeit werden gemessen.

Verfahrensmerkmale:

Die Belastung kann auf die Proben unterschiedlich wirken.

statische Verfahren	Beispiele
Belastung wird <i>langsam</i> bis zum <i>Höchstwert</i> gesteigert oder schnell aufgebracht und konstant gehalten.	Härteprüfung Zugversuch Zeitstandversuch
dynamische Verfahren	Beispiele
Belastung wird <i>schlagartig</i> aufgebracht oder ändert sich periodisch zwischen zwei Grenzwerten.	Kerbschlagbiegeversuch, Dauerschwingversuche

Nach der Art der Belastung (Zug, Druck, Biegung, Torsion) lassen sich die Verfahren weiter unterteilen.

Art der Beanspruchung	Prüfungsbeispiel
Zug	Zug-, Schlagzugversuch
Druck	Druckversuch
Biegung	Kerbschlagbiegeversuch
Torsion	Torsionsschwingversuch

Probe: In Werkstücken ist der Werkstoff oft nicht homogen verteilt. Damit die Probe zu Durchschnittswerten des Werkstoffes führt, sind Normen für die Entnahme und Bearbeitung der Proben aufgestellt worden. Dabei darf das Werkstoffgefüge nicht durch Erwärmen oder Umformen verändert werden.

Werkstoffkennwerte, Verfahren, Normung

Werkstoffkennwert	Prüfung, Versuch	Normung DIN-Nr.
Statische Verfahren		
Härte	Härteprüfung	
HBW	Brinell	EN ISO 6506
HV	Vickers	EN ISO 6507
HRC	Rockwell	EN ISO 6508
Zugfestigkeit R_m	Zugversuch	EN 10002
Streckgrenze R_e	"	
0,2- % Dehngrenze	"	
$R_{p0,2}$	"	
Bruchdehnung A	"	
Brucheinschnürung Z	"	
Elastizitätsmodul E	"	
Scherfestigkeit	Scher-,	50141
Druckfestigkeit	Druck-,	50106
Biegefestsigkeit – an Keramik	Biegeversuch	EN ISO 7438 EN 843-1
Zeitstandfestigkeit	Zeitstand- versuch	EN 10291
Zeitdehngrenze		

Dynamische Verfahren		
Härte nach Shore	Rücksprunghärte	
Zähigkeit (Kerb-schlagarbeit KV)	Kerbschlagbiegeversuch	EN10045
Dauerfestigkeiten	Umlaufbiegeversuch	50113
σ_w, σ_{Sch}	Dauer-schwing-versuch	50100

14.3 Messung der Härte

Für Mineralien ist die Härteskala nach Mohs eingeführt. Jedes Mineral ritzt das niedrigere und wird selbst vom höheren geritzt. Die Methode ist für Metalle wenig aussagekräftig.

Deshalb wurden ab 1900 bis 1930 drei Verfahren der statischen Härtmessung entwickelt. Sie werden auch heute noch nebeneinander benutzt, da jedes von ihnen seine Anwendungsgrenzen besitzt.

Härte ist der Widerstand des Gefüges gegen das Eindringen eines härteren Prüfkörpers.

Härteprüfungen werden sehr häufig zur Qualitätskontrolle angewandt. Die Gründe sind:

- die Messung erfolgt am Werkstück selbst, es ist keine Probe erforderlich,
- kurze Messzeit, eine Direktabelösung der Härte ist möglich,
- eine empirisch ermittelte Beziehung zur Zugfestigkeit ermöglicht bei Stählen ihre Kontrolle durch eine Härteprüfung am Bauteil (→ Anwendungsbereich).

Die Verfahren unterscheiden sich in Eindringkörper, Prüfkraft und Messwert sowie der Art, wie der Härtewert bestimmt wird.

Bild 14.1 zeigt ein Härteprüfgerät, das zur Messung nach mehreren Verfahren geeignet ist. Auf dem verstellbaren Tisch 1 liegt der Prüfling 2, in den der Eindringkörper 3 mittels des Hebelsystems 4 durch die Gewichtskraft geeicherter Scheiben 6 eingesenkt wird. Dabei bremst der Stoßdämpfer 6, wenn durch den Handhebel 7 die Arretierung gelöst wird. Auf der Mattscheibe 8 kann der Eindruck vergrößert betrachtet und gemessen werden.

14.3.1 Härteprüfung nach Brinell (DIN EN ISO 6506/99, E/04)

Eindringkörper: Als preisgünstige, unempfindliche Körper wurden früher geschliffene Kugeln aus Stahl verwandt. Die Norm schreibt jetzt für alle Stoffe Kugeln aus Sinterhartmetall vor. Der Kugeldurchmesser D hängt ab von

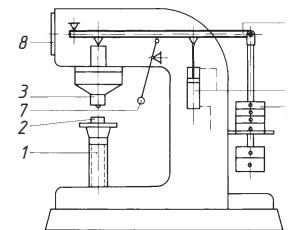
- der *Dicke* der Probe und
- der *Härte* des Werkstoffs.

Mohs-Härte (Friedr. Mohs 1773...1839, Wien)

1 Talkum	2 Gips, Steinsalz	3 Calcit
4 Flußspat	5 Apatit	6 Feldspat
7 Quarz	8 Topas	9 Korund
10 Diamant	(8...10 ritzen Fensterglas)	

Bei Metallen, vor allen bei Stählen, lassen sich Härte und Festigkeit durch Kaltumformen und Wärmebehandlung in weiten Grenzen ändern. Umgekehrt kann aus Härtmessungen auf den *Gefügezustand* geschlossen werden.

Bei allen Verfahren wird ein *Eindringkörper* mit bestimmter *Kraft* in das Werkstück eingesenkt. Am entstehenden *Eindruck* wird ein *Messwert* abgelesen und daraus der *Härtewert* berechnet.



- 1 verstellbarer Auflagetisch
- 2 Probe
- 3 Eindringkörper mit Fassung und Führung
- 4 Hebelsystem
- 5 abnehmbare Scheiben zur Einstellung der Prüfkraft
- 6 Stoßdämpfer
- 7 Auslösehebel
- 8 Mattscheibe zur vergrößerten Abbildung des Eindrucks

Bild 14.1 Schematische Darstellung eines Universal-Härteprüfgerätes

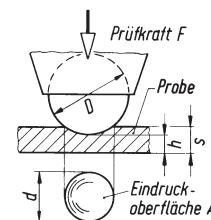


Bild 14.2 Brinellprüfung: Eindringkörper, Eindruck und Messwert

Prüfbedingungen:

- Die Auflagefläche der Probe darf keine sichtbare Verformung zeigen, deshalb richtet sich der Durchmesser D der verwendeten Kugel nach der Probendicke s .
- Deshalb ist der Kugeldurchmesser D in vier Stufen genormt:
- Die entstehende Kalotte soll nicht zu flach sein (unscharfe Ränder), aber auch nicht zu tief (bei unterschiedlicher Eindrucktiefe kaum differenzierte Messwerte). Es soll sein (\rightarrow):
- Messwerte sind nur dann vergleichbar, wenn zwischen Prüfkraft und Kugeldurchmesser-Quadrat ein konstantes Verhältnis bestand. Dieses Verhältnis wird Beanspruchungsgrad genannt und ist für 5 Werkstoffgruppen normiert (Tabelle 14.2).

Tabelle 14.1: Mindestdicke der Proben in Abhängigkeit vom mittleren Eindruckdurchmesser

Eindruck-durchm.	Mindestdicke der Proben für die Kugel-Ø:				
	$D = 1$	2	2,5	5	10 mm
0,2	0,08				
1		1,07	0,83		
1,5			2,00	0,92	
2				1,67	
3				4,00	1,84
4					3,34
5					5,36
6					8,00

Prüfkraft: Die am Prüfgerät einzustellende Prüfkraft F wird aus Tabellen des Normblattes entnommen, oder

- nach Tabelle 14.2 für den vorhandenen Werkstoff und die zu erwartende Härte wird der Beanspruchungsgrad abgelesen und
- die Prüfkraft mit der Formel für den Beanspruchungsgrad berechnet (Kugel-Ø →).

Durch den Eindruck der Kugel wird der Werkstoff plastisch *verformt* und in einem Bereich neben und unterhalb der entstehenden Kalotte *kaltverfestigt*. Damit sich vergleichbare und reproduzierbare Härtewerte ergeben, sind bestimmte Prüfbedingungen festgelegt. Die Höhe h der Kalotte (= Eindrucktiefe) soll höchstens 1/8 der Probendicke s betragen

$$\text{Kugeldurchmesser } D = 1; 2,5; 5 \text{ und } 10 \text{ mm}$$

Der Eindruckdurchmesser d soll deshalb zwischen 24 und 60 % des Kugeldurchmessers D liegen:

$$\text{Mindestdicke } s_{\min} \geq 8 h$$

$$\text{Eindrucktiefe } h = \frac{1}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

$$\text{Eindruckdurchmesser } d = 0,24 D < d < 0,6 D$$

$$\text{Beanspruchungsgrad} = \frac{0,102 F}{D^2}$$

Bei Einhaltung des Beanspruchungsgrades ist bei Werkstoffen von hart bis weich die Bedingung nach c) erfüllt.

Tabelle 14.2: Brinellhärteprüfung, Werkstoffgruppen, Beanspruchungsgrad und erfassbarer Härtebereich

Werkstoffe	Brinell-bereich HBW	Beanspruchungsgrad
St, Ni, Ti		30
Gusseisen ¹⁾	< 140 > 140	10 30
Cu und Legierungen	35...200 > 200 < 35	10 30 2,5
Leichtmetalle	< 35 35...80 > 80	2,5 5/10/15 10/15
Pb, Sn		1

Sinterformteile nach DIN EN 24498-1

¹⁾ Nur mit Kugel 2,5; 5 oder 10 mm

Der **Kugel-Ø D** soll so groß wie möglich gewählt werden. Danach muss nach der Härteprüfung mit Hilfe der Tabelle 14.1 festgestellt werden, ob für den ermittelten Eindruck-Ø d die Mindestdicke kleiner ist als die Probendicke. Andernfalls ist die nächstkleinere Kugel zu verwenden.

Messwert: An der Probe wird der Durchmesser d der entstandenen Kalotte ausgemessen. Hierzu ist eine Genauigkeit von $\pm 0,5\%$ erforderlich, damit der Härtewert nicht mehr als $\pm 1\%$ unsicher ist.

Härtewert: Durch eine sogenannte Zahlenwertgleichung wird aus Prüfkraft F (in N), Kugeldurchmesser D (in mm) und Messwert d (in mm) die Brinellhärte HBW berechnet:

Hinweis: Bei unrunden Eindrücken wird der Mittelwert aus zwei senkrecht aufeinanderstehenden Durchmessern genommen. Das Abmessen erfolgt auf der Mattscheibe des Gerätes, wo ein vergrößertes Bild der Kalotte erscheint.

$$\text{Brinellhärte HBW} = \frac{\text{Konstante-Prüfkraft}}{\text{Eindruckoberfläche}}$$

$$\text{Brinellhärte HBW} = \frac{0,204 \cdot F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

HBW	D, d	F
1	mm	N

Anwendungsbereiche:

Werkstoffe mittlerer Härte bis zu 650 HBW. Bei härteren Werkstoffen verformt sich die Kugel unter Belastung *plastisch*, so dass durch die Abplattung ein weicherer Werkstoff vorgetäuscht wird.

Werkstoffe mit Phasen von unterschiedlicher Härte. Die große 10-mm-Kugel trifft mit Sicherheit viele Kristalle, so dass die Durchschnittshärte des gesamten Gefüges ermittelt wird (z.B. für Lagermetalle und Gusseisen).

Nachprüfung der Zugfestigkeit von wärmebehandelten Teilen aus un- und niedriglegiertem Stahl. Aus vielen Versuchsreihen ist eine angehäherte Beziehung zwischen der Brinellhärte HB und der Zugfestigkeit R_m (im Zugversuch ermittelt) festgestellt worden:

Berechnete Zugfestigkeit $R_m \approx 10/3$ HBW

für un- und niedriglegierten Stahl

Dadurch ist es möglich, Wärmebehandlungen zu kontrollieren, z.B. die Festigkeit vergüteter Teile ohne wesentliche Beschädigung.

Nicht geeignet ist die Brinellprüfung für sehr harte Stoffe (ungenau) und dünne Oberflächenschichten, weil diese in den Grundwerkstoff eingedrückt werden. Dunkle Oberflächen sind ebenfalls ungeeignet, da man auf ihnen den Eindruck nicht erkennt.

In der Praxis wird die Brinellhärte nicht errechnet, sondern aus den Tabellen der Norm abgelesen. Prüfgeräte können die Brinellhärte auch direkt anzeigen. Dabei wird die Kalottenoberfläche über die Eindrucktiefe errechnet.

Härteangaben verschiedener Messungen an gleichen Werkstoffen sind nur dann vergleichbar, wenn sie mit gleichen Prüfbedingungen ermittelt wurden. Eine Härteangabe nach Norm muss deshalb die Prüfbedingungen enthalten:

Kurzzeichen: Die Kurzangabe der Prüfbedingungen erfolgt nach dem Härtewert in der Reihenfolge: Kugel-Ø/eine Zahl, die der Prüfkraft proportional ist/Einwirkdauer (wenn anders als im Regelfall):

350 HBW 10/3000: Brinellhärte von 350,

gemessen mit Hartmetallkugel, $D = 10\text{ mm}$ und $F = 3000/0,102 = 29\,420\text{ N}$
(Standardmessung für Stahl und GJL).

Älteres Kurzzeichen:

HBS Härte mit Stahlkugel gemessen. Heute nicht mehr zulässig.

Eine Bezeichnung der Brinellhärte mit dem Kurzzeichen **HB** ist nicht mehr normgerecht

14.3.2 Härteprüfung nach Vickers (DIN EN ISO 6507/98, E/04)

Eindringkörper: Stumpfe, quadratische Diamantpyramide, empfindlich gegen Stoße und Verkantungen beim Messen. Geeignet für härteste Stoffe und dünne Schichten.

Prüfkraft: Die Pyramide erzeugt geometrisch ähnliche Eindrücke. Deswegen ist die Prüfkraft zwischen 98...980 N ohne Einfluss auf den Härtewert. Bevorzugt Prüfkräfte sind:

Normwerte $F = 49/98/196/294/490/980 \text{ N}$

Die Kraft F soll in ca. 5 s stoßfrei auf den Höchstwert ansteigen und 10...15 s einwirken.

Messwert: An der Probe wird die Diagonale d des Eindrucks gemessen, evtl. als Mittelwert der beiden Diagonalen (Bild 14.3).

Härtewert: HV und HB werden nach ähnlichen Formeln (Zahlenwertgleichungen) gebildet, dem Quotienten aus *Prüfkraft* durch *Eindruckoberfläche*.

Anwendungsbereiche:

Werkstoffe aller Härtgrade, auch härtester Stoffe wie Sinterhartstoffe. Hierbei ergeben sich sehr kleine Eindrücke, deren Diagonale wenige μm beträgt. Je kleiner der Eindruck, umso höher muss die Oberflächengüte sein.

Dünne Randschichten: Hier ist die Prüfkraft im Kleinkraftbereich so zu wählen, dass die Schichtdicke mindestens das 1,5-fache der Eindruckdiagonalen beträgt.

Einzelne Kristalle im Gefüge mit Kräften von 0,01...1 N auf Mikrohärteprüfern, eine Kombination von Härteprüfgerät und Mikroskop.

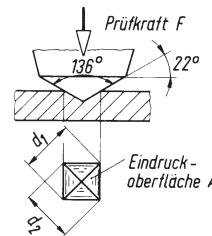


Bild 14.3 Härteprüfung nach Vickers: Eindringkörper, Eindruck und Messwert d .

Kleinkraftbereich: Für Proben, deren Prüffläche sehr klein ist, für dünne Schichten oder wenn die Oberfläche nur wenig beschädigt werden darf, sind kleinere Kräfte genormt. Sie betragen 1,96...49 N (DIN 50133 Bl.2) Die Messunsicherheit der Ableseeinrichtung soll $\pm 1\%$ betragen, (Toleranzbereich der Härte von $\pm 2\%$)

$$\text{Vickershärte HV} = \frac{0,189 F}{d^2}$$

HV	F	d
1	N	mm

Kurzzeichen: Die Kurzangabe der Prüfbedingungen erfolgt durch eine der Prüfkraft proportionale Zahl, zusätzlich durch die Einwirkdauer, wenn sie von der Norm abweicht.

640 HV 50 Vickershärte von 640 mit $F = 50/0,102 = 490 \text{ N}$ und normaler Einwirkdauer.

80 HV 20/30 Vickershärte von 180 mit $F = 20/0,102 = 196 \text{ N}$ und erhöhter Einwirkdauer von 30 s ermittelt.

Die Vickers-Härteprüfung ist die genaueste Messung und hat den breitesten Messbereich.

14.3.3 Härteprüfung nach Rockwell (DIN EN ISO 6508)

Im Gegensatz zu den beiden vorstehenden Verfahren wird hierbei die Härte nicht als Quotient von Kraft durch Eindruckoberfläche errechnet, sondern direkt über die Eindringtiefe bestimmt. Eindringtiefe und Härtewert können an einem Tiefenmessgerät (Messuhr) abgelesen werden.

Hinweis: Das Rockwell-Verfahren ist automatisierbar. Die Prüfzeit ist kurz. Gegenüber der Vickers-Pyramide mit vier Kanten und einer Spitze ist der Rockwell-Kegel unempfindlicher und das Verfahren für die Fertigungskontrolle besser geeignet.

Eindringkörper: Stumpfer Diamantkegel mit einem Spitzenwinkel von 120° . Die Spitze ist mit einem Radius von 0,2 mm gerundet.

Prüfkräfte: Die Prüfgesamtkraft ist konstant und wird in zwei Stufen aufgebracht:

Messverfahren: Die Prüfung erfolgt in mehreren Phasen (Bild 14.4a...b).

- 1 Der Prüfling muss sicher auf der sauberen Auflage liegen, die Prüffläche senkrecht zur Kraftrichtung.
- 2 Der Eindringkörper wird mit der Prüfvorkraft F_0 auf den Prüfling gesetzt und die Messuhr auf Null gestellt. Damit wird eine Messbasis geschaffen und der Einfluss von Auflage und Spiel im Gerät ausgeschaltet (Bild 14.4a).
- 3 Zuschalten der Prüfkraft F_1 . Unter ihrer Wirkung, 2 bis 8 s lang, dringt der Diamant weiter in den Prüfling ein, was an der Messuhr beobachtet werden kann. Wenn der Zeiger zum Stillstand kommt, wird eine Eindringtiefe angezeigt, die für die Messung noch keine Bedeutung hat, weil sie sich aus drei Teilen zusammensetzt (\rightarrow Bild 14.4b).
- 4 Wegnahme der Prüfkraft F_1 . Der Eindringkörper bleibt unter Wirkung der Prüfvorkraft in Kontakt mit dem Prüfling. Die Messuhr zeigt, dass sich der Eindringkörper anhebt: Die elastischen Verformungen gehen zurück. Jetzt wird die *bleibende* Eindringtiefe h angezeigt (Bild 14.4c). Die Skale der Messuhr weist zugeordnete Werte der Rockwellhärte auf, die jetzt abgelesen werden können.

Härtewert: Die Rockwellhärte HRC berechnet sich aus der Differenz zwischen einer Referenz- und der tatsächlichen Eindrucktiefe (\rightarrow Bild 14.5).

Neben dem HRC-Verfahren sind weitere Varianten genormt, die den Anwendungsbereich auf andere Werkstoffe und kleinere Probendicken erweitern (Tabelle 14.3).

Kräfte	Größe
Prüfvorkraft	F_0
Prüfkraft	F_1
Prüfgesamtkraft	F

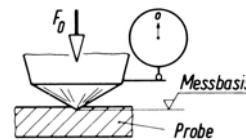
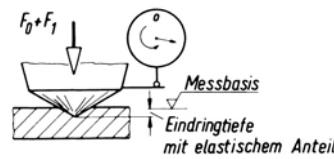
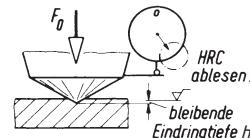


Bild 14.4a Härteprüfung nach Rockwell

Praktisch wird der Auflagetisch mit dem Prüfling hochgedreht, bis die Diamantspitze den Eindringkörper berührt und ihn so weit anhebt, bis die Messuhr auf Null einspielt. Die Prüfgeräte sind so eingerichtet, dass dann auf den Eindringkörper die Prüfvorkraft F_0 wirkt.



- b)
- *plastische* Verformung des Prüflings,
 - *elastische* Verformung des Prüflings,
 - *elastische* Verformung des Gerätes (Federung des Gestells).



c)
Bild 14.4b+c Härteprüfung nach Rockwell

$$\text{HRC} = 100 - h/0,002$$

HRC	h
1	mm

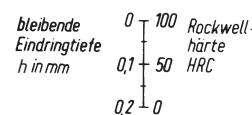


Bild 14.5 Beziehung zwischen Eindringtiefe h und Rockwellhärte HRC

Anwendungsbereiche

Werkstoffe mit Härten $20 < \text{HRC} < 70$. Das Messergebnis liegt schnell vor. Für weichere Werkstoffe gibt es das HRB-Verfahren. Dabei wird anstelle des Diamantkegels eine Stahlkugel von $d = 1/16$ Zoll = 1,59 mm verwendet. Es ist in Deutschland wenig eingeführt.

Gehärtete Randschichten. Schichtdicken sollen das 10-fache der Eindringtiefe h betragen. Deshalb müssen z.B. Einsatzschichten für die Messung dicker als 0,7 mm sein.

Gehärteter Stahl besitzt eine Rockwellhärte von etwa 47...67 HRC. Für Werkstoffe mit höherer Härte ist das Verfahren ungenau, da bei kleinsten Eindringtiefen der Einfluss der Abrundung groß ist.

14.3.4 Vergleich der Härtewerte

Wegen der unterschiedlichen physikalischen Vorgänge bei den einzelnen Messverfahren besteht keine lineare Beziehung unter den gemessenen Härtewerten. Umrechnungsformeln sind nicht bekannt. Mittels zahlreicher Versuchsreihen sind die Umrechnungstabellen nach DIN EN ISO 18265/04 aufgestellt worden. Sie vergleichen in kleinen Sprüngen die verschiedenen Härtewerte.

14.3.5 Dynamische Härteprüfung nach Shore

Messprinzip: Harte Werkstoffe haben bei Verformung einen höheren elastischen Anteil (Federung) als weichere Stoffe (\rightarrow).

Messverfahren: Ein Körper von der Masse 20 g fällt in einem Röhrchen senkrecht auf den Prüfling und wird zurückgefedert. Die Rücksprunghöhe ist ein Maß für die Härte des Prüflings. Das Gerät wird Skleroskop oder Sklerograph genannt.

Als Eichpunkt wird die Härte eines perlitischen, glasharten abgeschreckten Stahles (0,8 % C) mit 100° Shore angesetzt. Seine Rücksprunghöhe wird in 100 gleiche Abschnitte geteilt.

Es können nur Werkstoffe mit gleichen E-Moduln verglichen werden!

Tabelle 14.3 Auswahl von Rockwell-Verfahren

	HRA	HRB	HR15N ¹⁾
Werkstoffe	Sinter-hartmetall	Gusseisen, Cu-Leg.	dünne Schichten
Messbereich	20...88	20...100	66...92
Prüfkräfte $F_0/F_l/F$	98/490/588 N	98/883/981 N	29/117/147 N

¹⁾ Bei den drei HRN-Verfahren (mit Prüfkräften 117,6/265/412 N) ist die maximale Eindringtiefe 0,1 mm. HRN = 100 – 1000 h

DIN EN 10109 enthält ein Schaubild, aus dem die Mindestprobendicke in Abhängigkeit von der Härte abgelesen werden kann.

Näherungsbeziehungen:

Zum schnellen Vergleich dienen die folgenden Näherungsformeln:

- **Brinellhärte HBW $\approx 0,95$ HV**
- **Rockwell- HRC $\approx 0,1$ HV** (im Bereich
härte von
200...400 HV)

Hinweis: Werkstoffverhalten

Werkstoff	Verformungsanteil	
	plastisch	elastisch
weich	stark	gering
hart	schwach	stark

Anwendungsbereich:

Universelle Anwendung, da die Geräte klein, leicht und handlich sind. Sie können überall an die Prüflinge herangebracht werden.

Kontrolle schwerer Werkstücke wie Walzen, Maschinenstände und Schmiedeteile,

Kontrolle der Gleichmäßigkeit in der Härteverteilung bei großen Flächen.

Die Prüflinge müssen genügend Masse haben (min. 5 kg), fest aufliegen oder eingespannt sein.

14.4 Prüfung der Festigkeit bei statischer Belastung

Unter Festigkeit verstehen wir eine nach genormten Versuchen ermittelte Spannung. Sie ist mit einem bestimmten Verformungszustand des Probekörpers verbunden (→).

In den meisten Fällen sind diese Festigkeiten nicht die *wirklich* auftretenden, die *wahren* Spannungen, sondern Rechenwerte aus Prüfkraft und Querschnitt vor dem Versuch, die sog. *Nennspannungen*.

14.4.1 Der Zugversuch (DIN EN 10 002/01)

Eine genormte Probe wird *gleichmäßig* und *stoßfrei* bis zum Bruch gedehnt. Die Dehngeschwindigkeit muss niedrig sein, damit das Ergebnis nicht verfälscht wird (kleiner als 10 % je min oder Spannungszunahme < 10 N/mm² je Sekunde). Kraft und Verlängerung der Probe werden gemessen oder durch schreibende Messgeräte aufgezeichnet.

Dabei wird das Verhalten des Werkstoffes bei *stetig zunehmender* Zugbeanspruchung unter folgenden Bedingungen beobachtet:

- die Spannung ist gleichmäßig über dem Querschnitt verteilt,
- sie wirkt nur in einer Achse, der Stabachse.

Die Werkstoffkennwerte (Tabelle 14.4) des Zugversuches dienen überwiegend als Grundlage für die Abnahme und Qualitätssicherung von Halbzeug und Rohteilen.

Zugproben

Bild 14.6 zeigt schematisch eine Zugprobe. Wie alle Zugprobenformen besteht sie aus einem schlanken Teil mit konstantem Querschnitt (Versuchslänge), der mit Abrundungsradien in die verdickten Enden übergeht. Sie dienen zum Spannen und Krafteinleiten. Neben Gewindeköpfen gibt es weitere Formen, wie Schulter- und Kegelköpfe. Die wesentlichen Maße sind die Meßlänge L_0 und der Durchmesser d_0 . Zwischen beiden soll ein festes Verhältnis (Proportionalität) bestehen (→).

Verformungszustand	Festigkeitsbegriff
geringe plastische Verformung	Dehngrenzen, Streckgrenze
Bruch, beginnende Einschnürung	Zug-, Druck-, Scher- und Biegefestigkeit

Tabelle 14.4: Werkstoffkennwerte aus dem Zug-versuch

Werkstoffkennwert	Formel-zeichen	Einheit
Elastizitätsmodul	E	MPa/GPa
0,2 %-Dehngrenze	$R_{p0,2}$	MPa
Streckgrenze	R_e	MPa
Zugfestigkeit	R_m	MPa
Bruchdehnung	A	1, %
Brucheinschnürung	Z	1, %

$$1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2; 1 \text{ GPa} = 1000 \text{ N/mm}^2$$

So genannte „wahre“ Spannungen sind auf den *Momentanquerschnitt* bezogen und können nur bei einfachen Belastungsfällen ermittelt werden.

Diese Beanspruchung liegt bei Maschinenteilen nur selten vor. Für die Auslegung von Bauteilen sind meist andere Werte wichtiger (Dauerfestigkeiten, Zähigkeit). Aus der Kombination der Festigkeits- und Verformungskennwerte kann man jedoch die Sprödbruchneigung eines Stahles qualitativ abschätzen.

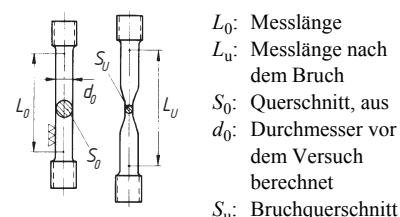


Bild 14.6 Zugprobe (schematisch)

Messlänge L_0 ist der Abstand von zwei Markierungen, die eingeritzt oder leicht mit dem Körner eingeschlagen werden. Bei kerbempfindlichen Stoffen wird ein Lackstreifen aufgetragen und eingeritzt.

Versuchsablauf

Die Probe wird in die Einspannvorrichtungen der Zugprüfmaschine *biegungsfrei* eingesetzt und durch eine steigende Zugkraft so lange gedehnt, bis der Bruch eintritt. Anfangs verlängert sich die Probe elastisch (federnd), die Messmarken würden nach einer Entlastung wieder den Abstand L_0 zeigen. Die elastische Längenänderung ist sehr klein.

Größere Kräfte bewirken eine *plastische* (bleibende) Verlängerung. Bei Entlastung würde sich der Abstand der Messmarken um den elastischen Anteil verkürzen, aber *größer* als L_0 sein.

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Beim Versuch werden Wertepaare von Kraft und Verlängerung gemessen oder die zugehörige Kurve aufgezeichnet. Es sind Werte, die je nach Probengröße *verschieden*, also probenabhängig sind.

Die Probenabhängigkeit der Ergebnisse wird durch Einführung von bezogenen Größen, hier **Spannung** und **Dehnung**, beseitigt (\rightarrow).

So entsteht aus dem Kraft-Verlängerungs-Diagramm das Spannungs-Dehnungs-Diagramm, probenunabhängig und *werkstofftypisch* (Bild 14.7) mit folgenden Abschnitten:

Geradliniger Teil (Hooke'sche Gerade). In diesem Spannungsbereich liegt die Beanspruchung von Bauteilen *während* ihrer Funktion. Spannung und Dehnung sind im Rahmen der Messgenauigkeit proportional, d.h. eine Verdoppelung der Spannung würde auch die Dehnung verdopeln. Es gilt das Hooke'sche Gesetz:

Hooke'sches Gesetz $\sigma = \varepsilon \cdot E$

$$\text{mit } \varepsilon = \Delta L_{\text{el}} / L_0$$

Die sog. *zulässigen Spannungen* in einem Bau teil liegen stets auf der Hooke'schen Geraden.

Proportionalität nach Norm:

- $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$
- $L_0 = 5,65 \cdot d_0$

Das Normblatt DIN EN 10002 enthält Maße und Richtlinien für die Herstellung der Proben. Es sind auch Proben mit Rechteckquerschnitt möglich. Daneben gibt es Normen für Probestäbe aus Gusseisensorten und Blechen.

Hinweis: Die überlagerte *Biegung* ergibt eine ungleichmäßige Spannungsverteilung über dem Querschnitt. Die Zugspannung an der Außenseite des (gekrümmten) Stabes wäre höher als die rechnerische Nennspannung, d.h. es würde eine niedrigere Zugfestigkeit ermittelt werden.

Bei Keramik führt die überlagerte Biegung sehr schnell zum Bruch der Probe, da Keramik in der Regel nicht plastisch verformbar ist.

Nach weiterer Kraftzunahme beginnt etwa in der Mitte eine örtliche Verkleinerung des Querschnitts, als Einschnürung bezeichnet. An dieser Stelle tritt kurz darauf der Bruch ein.

Begriffe:

$$\text{Spannung } \sigma = \frac{\text{Kraft } F}{\text{Probenquerschnitt } S_0}$$

$$\text{Dehnung } \varepsilon = \frac{\text{Verlängerung } \Delta L}{\text{Messlänge } L_0}$$

Hinweis: Für die Umformtechnik ist die „**wahre**“ **Spannung** im Verformungsbereich wichtig. Für sie wird der sich verjüngende Querschnitt zugrundegelegt (Bild 14.7 Kurve b).

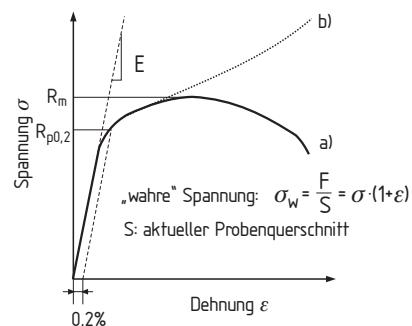


Bild 14.7 Schematische Darstellung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms von a) Aluminium, b) Verlauf der wahren Spannung zu a)

Abweichung von der Gradlinigkeit In der Regel (z.B. Aluminium, Kupfer, austenitischer Stahl, Ausnahme: manche un- und niedrig legierten Stähle, insbesondere Baustahl) gibt es kein scharf definiertes Ende der Hooke'schen Gerade. Das effektive Ende der Hooke'schen Geraden wird als *Dehngrenze* bezeichnet und wird willkürlich über eine bleibende Verformung der Zugprobe nach Entlastung festgelegt.

Bei **Baustahl** und anderen C-armen Stählen steigt die Hooke'sche Gerade mit minimalen, üblicherweise vernachlässigbaren Abweichungen bis zu einem Maximum an, das *Streckgrenze* (obere Streckgrenze) R_{eH} genannt wird, siehe Bild 14.8. Es folgt ein **abfallender Teil**. Die Streckgrenze ist überschritten, die Probe wird *sichtbar* gestreckt, ihre glänzende Oberfläche wird matt. Diese stärkere plastische Verformung wird auch als *Fließen* bezeichnet. Während des Fließens kann die Spannung auch sinken. Das relative Minimum der Kurve ist die untere Streckgrenze R_{eL} .

Der Abfall der Kurve entsteht durch das schlagartige Losreißen der Versetzungen von Kohlenstoffatomansammlungen, den *Cottrell-Wolken*. Wenn Versetzungen an anderen Hindernissen gebremst werden, können sie von hinterherdiffundierenden Kohlenstoffatomen wieder blockiert werden und müssen sich dann erneut losreißen. So kann eine wellige Spannungs-Dehnungs-Kurve im Bereich der *Lüders-Dehnung* entstehen.

Ansteigender Teil (alle Werkstoffe). Mit der plastischen Verformung tritt die Verformungsverfestigung (Kaltverfestigung) auf. Deshalb müssen jetzt für eine weitere Dehnung der Probe auch zunehmende Kräfte bzw. Spannungen aufgebracht werden: Die Kraftanzeige steigt. Bis zum Maximum der Kurve wird die Probe auf der gesamten Messlänge gleichmäßig dünner (\rightarrow).

Gebräuchlich sind die 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$, also die Spannung, die nach Entlastung gemessen eine leicht *messbare* plastische Dehnung von 0,2 % hervorruft. (Bei einer Messlänge von 50 mm sind 0,2 % gerade 0,1 mm.)

Gebräuchlich ist manchmal noch die „technische Elastizitätsgrenze“ genannte 0,001 %-Dehngrenze $R_{p0,01}$.

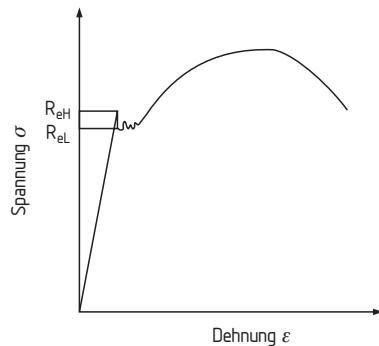


Bild 14.8 Schematische Darstellung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms von Baustahl

Hinweis: Streckgrenze R_e und 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ sind in technischen Dokumenten gleichwertige Grenzspannungen.

Hinweis: Der im Zusammenhang mit Festigkeitsbetrachtungen manchmal gebrauchte Begriff *Fließgrenze* ist der Oberbegriff für Spannungen, die eine erste größere plastische Verformung ergeben.

Hinweis: Die bis zum Maximum auftretende Dehnung heißt deshalb *Gleichmaßdehnung*.

Absteigender Teil. Im Maximum der Kurve tritt bei verformbaren Werkstoffen eine örtliche Querschnittsverkleinerung auf. Sie wird *Einschnürung* genannt. Die weitere Längenänderung der Probe findet nur noch in diesem Bereich statt.

Der schnell abnehmende Querschnitt im Einschnürbereich benötigt kleiner werdende Kräfte zu weiterer Dehnung, deshalb sinkt die Kraftanzeige bis zum Bruch. Beim Bruch geht die *elastische* Dehnung der Probe zurück, übrig bleibt die Bruchdehnung A .

Festigkeitskennwerte

Mit Hilfe der Messwerte und der Zugprobe werden beim Zugversuch also die folgenden Werkstoffkennwerte ermittelt:

$$0,2\%-\text{Dehngrenze } R_{p0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0} \text{ oder}$$

$$\text{Streckgrenze } R_e = \frac{F_S}{S_0};$$

$$\text{Zugfestigkeit } R_m = \frac{F_m}{S_0};$$

In den Formeln für die Festigkeiten sind die folgenden Einheiten üblich:

Kräfte F	Querschnitt S_0	Festigkeiten R
N	mm ²	N/mm ² = MPa

$F_{0,2}$ ist die Kraft, die die Probe um 0,2 % *bleibend* gedehnt hat (nach Entlastung).

F_S ist die Kraft, bei der die Kurve die erste Unstetigkeit zeigt, d.h. wenn die Kraftanzeige erstmals stoppt oder sinkt.

Hinweis: Bei einer Zugprobe werden ja nach Werkstoff **entweder** Streckgrenze R_e **oder** 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ bestimmt.

F_m ist die größte Kraft, die während des Versuches an der Probe wirkte. Sie entspricht dem Maximum der Kurve und wurde früher z.B. an einem Schleppzeiger abgelesen.

Die folgenden Einheiten sind üblich:

A, Z	L_u, L_0	S_0, S_u
1, %	mm	mm ²

Verformungskennwerte

$$\text{Bruchdehnung } A = \frac{L_u - L_0}{L_0};$$

$$\text{Brucheinschnürung } Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0};$$

Darin ist L_0 die Messlänge, am unverletzten Stab gemessen. L_u ist der Abstand der Messmarken nach dem Bruch. Zur Messung werden die Bruchstücke sorgfältig zusammengepasst.

Darin ist S_0 der Ausgangsquerschnitt aus dem Durchmesser d_0 zu berechnen. S_u ist die Bruchfläche. Sie wird nach dem Bruch als Mittelwert von zwei aufeinander senkrecht stehenden Durchmessern berechnet.

Hinweis: Nach Norm wird das Rechenergebnis mit 100 % multipliziert, um ein typisches Ergebnis wie $A = 22\%$ zu erhalten.

Steifigkeitskennwert

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) wird für die Berechnung der elastischen Verformung und von Dehn-, Schrumpf- und Wärmespannungen benötigt.

$$\text{Elastizitätsmodul } E = \frac{\sigma_{\text{el}}}{\varepsilon_{\text{el}}} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}$$

Der E-Modul ist eine gedachte Spannung, die einen Probestab elastisch auf die doppelte Länge (also Dehnung $\varepsilon = 1$) dehnen würde, sofern der Werkstoff diese hohe Spannung aushielte.

Hinweis: Beim Austausch des Werkstoffes Stahl durch andere Werkstoffe muss nicht nur die Festigkeit, sondern auch die Steifigkeit, d.h. der E-Modul beachtet werden (Beispiel).

Wegen des kleineren E-Moduls (1/3 von Stahl) würde der Al-Träger die dreifache elastische Formänderung (Durchbiegung) aufweisen.

Die metallischen Werkstoffe weisen unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Diagramme auf. Eine Wärmebehandlung verändert die Form der Kurve stark (Bilder 14.9).

Werkstoffvergleich

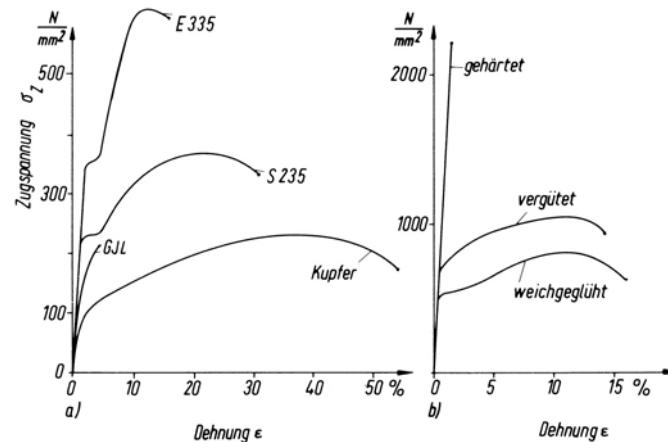


Bild 14.9 Spannungs-Dehnungs-Diagramme

a) Metalle gegläut, b) Stahl mit verschiedener Wärmebehandlung

Zur Ermittlung des E-Moduls werden zwei zugeordnete Werte von Spannung σ und Dehnung ε im *elastischen* Bereich eingesetzt. Dabei muss die Dehnung mit Feinmessgeräten ermittelt werden, die auf 1 µm und weniger ansprechen.

Hinweis: Bei Angaben des E-Moduls ist neben der Einheit MPa auch die Einheit GPa (= 1000 MPa) üblich.

Beispiel: Ein Stahlträger wird durch einen AlCuMg-Träger mit gleichem Querschnitt und gleicher Festigkeit ersetzt. Typische E-Moduln sind:

$$E_{\text{Stahl}} = 210 \text{ GPa}$$

$$E_{\text{Al}} = 70 \text{ GPa}$$

14.4.2 Allgemeines Bruchverhalten

Beim Bruch von Proben (genauso bei Bauteilen in Betrieb) lassen sich zwei extreme Verhaltensweisen beobachten:

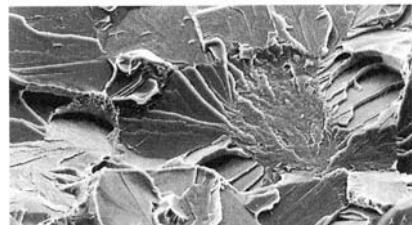
Trennbruch liegt vor, wenn die Probe ohne sichtbare plastische Verformung plötzlich bricht, Kennzeichen für einen spröden Werkstoff. Die Bruchfläche ist wenig uneben und zeigt glatte Spaltflächen (Bild 14.10a).

Trennbruch = Spröder Werkstoff

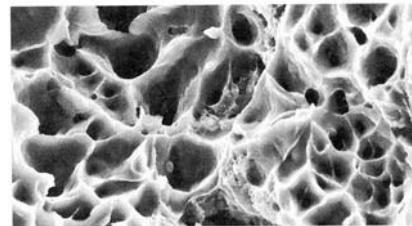
Verformungsbruch liegt vor, wenn die Probe nach starker plastischer Verformung bricht, Kennzeichen für *zähe (duktile)* Werkstoffe. Die Bruchfläche ist zerklüftet, sie zeigt *Waben*, deren Ränder erst in der letzten Phase des Bruches getrennt wurden (Bild 14.10b).

Verformungsbruch = Zäher Werkstoff

Mischbruch. Sehr viele Werkstoffe liegen im Bruchverhalten zwischen diesen Extremen. Dann enthält die Bruchfläche sowohl Spaltflächen als auch Waben (Bild 14.11).



a) Spröder Bruch mit Spaltflächen, G22Mo4



b) Zäher Bruch mit Waben, Baustahl S235J2G

Bild 14.10 REM-Aufnahmen von Bruchflächen

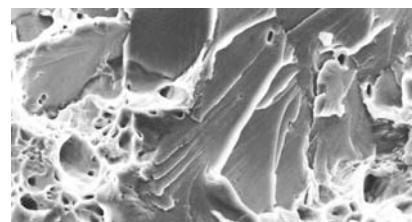


Bild 14.11 Mischbruch

Übersicht: Ursachen für das unterschiedliche Bruchverhalten der Metalle

Ursache	Auswirkungen
Gefüge, feinkörnig	In feinkörnigen Gefügen werden Risse von den Korngrenzen angehalten → Verformungsbruch.
Gefüge, heterogen mit spröder Kristallart	Die sprödere Kristallart lässt keine Verformung zu, Neigung zum Trennbruch. Beispiel: hoch Sn-haltige Bronzen mit spröden intermetallischen Phasen.
Verformungsgeschwindigkeit	Bei langsamer Verformung haben die Versetzungen genügend Zeit, der Beanspruchung zu folgen, bei schlagartiger Belastung nicht, deshalb Neigung zum Sprödbruch.
Temperatur	Bei tiefen Temperaturen werden in krz-Werkstoffen (z.B. Baustahl) die Versetzungen immer weniger beweglich, → Sprödbruch (→ 14.6.2).
Spannungszustand, Form des Bauteils	Kerben verändern das innere Spannungssystem, Gleitbehinderung durch dreiachsiges Zugspannungen → Neigung zum Sprödbruch.

Innere Vorgänge bei Verformung und Bruch

Wir betrachten dazu einen Probestab mit Rechteckquerschnitt, den wir uns zur Vereinfachung sehr grobkörnig denken, so dass ein Kristallit den ganzen Querschnitt einnimmt (Bild 14.12a).

Um die Atome längs der Ebene I zu trennen, muss eine Zugkraft F wirken, die größer ist als der Trennwiderstand der Materie. Bevor jedoch dies durch Steigern der Kraft F geschieht, kommen in den Ebenen II Versetzungen in Bewegung, der Stab verformt sich.

Ursache der Versetzungsbewegung sind Schubkräfte F_q , welche Schubspannungen τ bewirken. Die Bilder 14.12 b+c zeigen, wie die Schubkräfte zustandekommen. Dazu legen wir unter einem beliebigen Winkel α einen Schnitt durch die Probe und machen ein Teilstück frei.

An der Schnittstelle wird der äußeren Belastungskraft F (Bild 14.12 c+d) durch zwei innere Kräfte das Gleichgewicht gehalten:

- **Normalkraft** $F_n = F \sin \alpha$
sie verursacht
Normalspannungen σ
- **Schubkraft** $F_q = F \cdot \cos \alpha$
sie verursacht
Schubspannungen τ

Voraussetzung für ein Wandern von Versetzungen ist eine ausreichend große Schubspannung τ , welche den Gleitwiderstand überwindet, ehe die Normalspannung die Größe des Bruchwiderstandes erreicht.

Die Schubspannung bestimmen wir aus der Schubkraft und der Schnittfläche (Bild 14.12c):

$$\text{Schubspannung } \tau = \frac{F_q}{A_s} = \frac{F \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha}{b \cdot s}$$

Die Schubspannung wird dann ein Maximum besitzen, wenn das Produkt $\cos \alpha \cdot \sin \alpha$ ein solches besitzt. Der zugehörige Winkel α wird aus einer trigonometrischen Betrachtung zu 45° bestimmt.

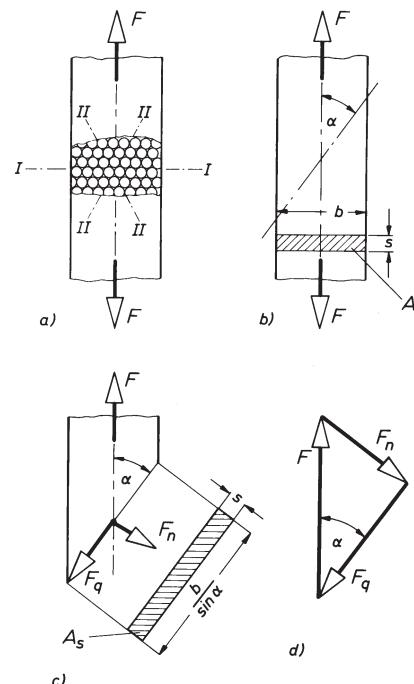


Bild 14.12 Innere Kräfte beim zugbeanspruchten Stab

Hinweis: Die Normalkraft F_N versucht die beiden Schnittufer voneinander zu trennen. Ihr wirkt der **Bruchwiderstand** der Materie entgegen.

Die Schubkraft F_q versucht, die beiden Schnittufer gegeneinander zu verschieben. Ihr wirkt der **Verformungswiderstand** der Materie entgegen.

Aus den Grundlagen der Metallkunde (2.2.2) ist bekannt, dass es leichter ist, Versetzungen zu verschieben als die Atome zu trennen, d.h. für die Gleitebenen gilt:

Verformungswiderstand < Bruchwiderstand

Beachte: Die Größe der Schnittfläche A_s hängt vom Winkel α ab und ist größer als die Querschnittsfläche A (Wurstanschnitt).

$$A_s = A / \sin \alpha = \frac{b \cdot s}{\sin \alpha}$$

In diesen 45° -Ebenen kann zuerst der Verformungswiderstand der Materie durch die maximalen Schubspannungen überwunden werden, wenn es sich um Gleitebenen des Kristallgitters handelt.

Die inneren Schubspannungen erreichen in allen Ebenen, die unter 45° zur Achse der Zugkraft liegen, einen Höchstwert.

Das Bruchverhalten eines Werkstoffes beim Zugversuch wird deshalb zunächst von den Gleitmöglichkeiten seiner Versetzungen abhängen.

Trennbruch mit ebener Bruchfläche senkrecht zur Zugrichtung (Bild 14.13a) tritt bei Werkstoffen ohne Gleitmöglichkeiten oder solchen mit hohem Verformungswiderstand ein.

Dabei steigt die Kraft F , ohne dass die unter 45° wirkende maximale Schubspannung in der Lage ist, den hohen Verformungswiderstand zu überwinden.

Bereits vorher wird in den Ebenen senkrecht zur Zugrichtung die Trennfestigkeit von der Normalspannung überschritten, und die Atome werden getrennt.

Verformungsbruch (Scherbruch) tritt bei dünnen Flachstäben und Werkstoffen mit vielen Gleitmöglichkeiten auf. Nach einer Einschnürung bricht die Probe unter Wirkung der Schubspannungen in einer 45° -Ebene (Bild 14.13 b + e).

Mischbruch als Kombination beider gegensätzlichen Arten tritt bei den meisten Stählen an Rundproben auf.

Infolge der Einschnürung scheren die Kraterränder unter den Schubspannungen im Winkel von 45° ab (\rightarrow Bild 14.13 b-d), während im Kratergrund eine relativ ebene Fläche als Trennbruch entsteht.

14.4.3 Zeitfestigkeiten

Mit Langzeitversuchen unter erhöhter Temperatur werden die *Zeitfestigkeiten* eines Werkstoffes ermittelt und im Zeitstanddiagramm dargestellt. (\rightarrow Kapitel 2.4.6)

Zeitstandversuche werden gemäß EN 10291/01 durchgeführt.

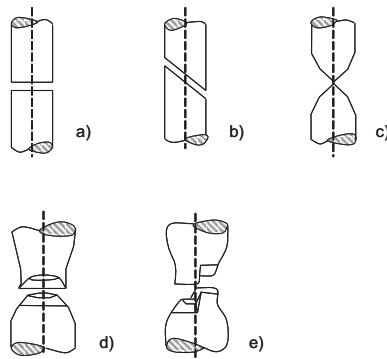


Bild 14.13 Bruchformen beim Zugversuch, schematische Darstellung

- a) Trennbruch durch Normalspannungen,
- b) Scherbruch c) Verformungsbruch durch Schubspannungen, d–e) Mischbruch

Trennbrüche zeigen Werkstoffe, deren Kristalle komplizierte (Keramik) oder stark verzerrte Gitter (Martensit) haben oder solche, in denen eine spröde Kristallart größere Volumenanteile besitzt (Bronze mit intermetallischen Phasen). Korngröße und Kornform der spröden Phase haben großen Einfluss.

Durch die Einschnürung wird das vorherige einachsige Spannungssystem verändert, da durch die geänderte Form auf einmal auch Zugspannungskomponenten schräg zur Zugrichtung auftreten (mehrachsiges Spannungssystem). Sie ermöglichen die weitere plastische Verformung während der Einschnürung.

Bei den meisten Proben bleibt der Kraterrand nicht an einer Probenhälfte stehen, sondern ist unregelmäßig auf beide verteilt.

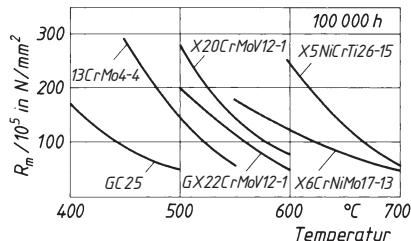


Bild 14.14: Zeitstandschaubild, schematisch

14.5 Prüfung der Festigkeit bei dynamischer Belastung

14.5.1 Allgemeines Verhalten

Beim Zugversuch erfolgt eine einmalige zügige Belastung bis zum *Gewaltbruch*. Viele Bau- und Maschinenteile sind dagegen einer periodisch *schwankenden* Belastung ausgesetzt.

Dabei können sie nach längerer oder kürzerer Zeit bei *niedrigeren* Spannungen brechen. Der Bruch erfolgt durch Ermüdung und heißt *Dauerbruch* oder *Ermüdungsbruch*.

Analogie: Gewichtheber heben ihre Höchstlast nur einmal. Sollten sie dagegen eine Last mehrfach hintereinander heben und senken (mehrere Lastspiele), so würden sie das nur mit einer verkleinerten Last schaffen. Je kleiner die Last, umso mehr Lastspiele bis zur Ermüdung.

- Einmalige Belastung bis zum Bruch
→ erträgt höhere Spannungen
→ führt zu **Gewaltbruch**.
- Periodisch schwankende Belastung
→ nur bei niedrigeren Spannungen
→ führt zu **Dauerbruch** (Ermüdungsbruch).

Übersicht: Vergleich von statischer und dynamischer Belastung

Belastung	Art der Verformung	Lage der Nennspannung	Bruchart und Zeitpunkt
statisch , Zug-, Druck- und andere Versuche			
einmalig bis zum Höchstwert	elastisch, später plastisch	über Streckgrenze R_e oder Dehngrenze $R_{p0,2}$	Gewaltbruch nach Überschreiten von R_m
dynamisch , Dauerschwingversuche			
periodisch ändernd	elastisch	im elastischen Bereich, $\sigma_{\max} \ll R_{p0,01}$	Dauerbruch nach einiger Zeit, wenn $\sigma_{\max} > \sigma_D$

Ursachen des Dauerbruches

Dauerbrüche erfolgen, obwohl die rechnerischen Spannungen (Nennspannungen) im Bauteil sich auf der Hooke'schen Geraden, also im elastischen Bereich befinden. Bei den meisten Bauteilen ist jedoch die Verteilung der Spannungen über dem Querschnitt nicht *gleichmäßig*, es entstehen *Spannungsspitzen* an besonderen Stellen.

Ungleichmäßige Spannungsverteilung tritt auf, sobald die äußeren Kräfte einen biegenden Einfluss besitzen. Dann sind nur wenige Querschnitte maximal beansprucht (die sog. gefährdeten Querschnitte).

Das Verlagern der gleichmäßigen Spannungsverteilung zu örtlichen Spannungsspitzen durch den Kerbeinfluss wird als *Kerbwirkung* bezeichnet und rechnerisch mit der Kerbwirkungszahl β erfasst. Als Kerben wirken bereits kleine Querschnittsänderungen, wie z.B. der Absatz einer Welle, wenn er nicht ausgerundet ist.

Gleichmäßige Spannungsverteilung tritt z.B. bei Zugbeanspruchung langer Stäbe mit konstantem Querschnitt auf. Dabei hat jeder Querschnitt die gleiche Beanspruchung und jedes Werkstoffteilchen im Querschnitt den gleichen Anteil zu übertragen. Die wahre Spannung ist gleich der Nennspannung, wie z.B. bei der Zugprobe im Zugversuch vor der Einschnürung.

Kerbwirkung. Durch Kerben entstehen dreiaxiale Spannungszustände, so dass Zonen im Kerbgrund entstehen, in denen die *effektive* Spannung ein *Mehrfaches* der Nennspannung sein kann. Gefügefehler führen ebenfalls zu solchen Spannungsspitzen.

Entstehung des Dauerbruches

Die Spannungsspitzen führen örtlich zu einer plastischen Verformung mit begleitender Kaltverfestigung und Versprödung. Sie beginnt an der Oberfläche, weil dort die Kristallite

- meist höheren Spannungen unterliegen (bei Biegung und Torsion),
- leichter verformbar sind als im Innern liegende Kristalle,
- mit der Umgebung evtl. chemisch reagieren können.

Die örtliche plastische Verformung im Mikrobereich erzeugt ein Heraustreten (Extrusion) oder Einsinken (Intrusion) von Material und erhöht dadurch die Rauigkeit, damit die Kerbwirkung und die Spannungen im Kerbgrund. Die Folge ist eine *Rissausbreitung*.

Bruchfläche. Typisch für ihr Aussehen sind zwei Teilflächen (Bild 14.15) mit gegensätzlichem Charakter.

Die Dauerbruchfläche entsteht über eine längere Zeit und ist durch das periodische Aufeinanderpressen der Ränder geglättet, sie kann auch Korrosionserscheinungen zeigen. Rastlinien entstehen durch zeitweilige Abnahme der Belastung.

Die Restbruchfläche entsteht durch Gewaltbruch, wenn der Restquerschnitt zu klein geworden ist. Sie zeigt teils sehnige Ausfransungen (Verformungen), meist aber körnige, wenig zerklüftete Flächen (Trennungen), weil durch den Riss eine starke Kerbwirkung entsteht.

14.5.2 Dynamische Belastung

Die rein statische Belastung ist selten. Häufiger tritt eine statische Grundbelastung auf (z.B. Gewichtskräfte), die von dynamisch wirkenden Kräften überlagert wird.

Beispiel: Zylinderkopfschrauben erhalten bei der Montage eine Vorspannung, welche die Dichtung anpresst. Nach dem Setzen der Dichtung wirkt in der Schraube eine Zugspannung σ_u (Bild 14.6).

Mögliche Ausgangspunkte für Risse sind:

Ausgangspunkt	Beispiele
Werkstofffehler	Schlackenteilchen, Randentkohlung
Oberflächenschäden	Kratzer, Bearbeitungsriefen
Kerben (konstruktiv)	Nuten, Wellenabsätze, Bohrungen
Flächenpressung durch Nachbarsteile	Aufgepresste Naben, Auflagefläche von Federringen

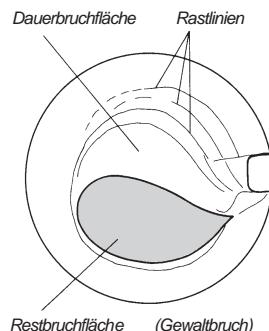


Bild 14.15 Dauerbruch einer Ritzelwelle

Hinweis: Im Restquerschnitt liegt ein sog. mehrachsiges Spannungssystem vor, das eine Verformung sehr erschwert (\rightarrow 14.6.2).

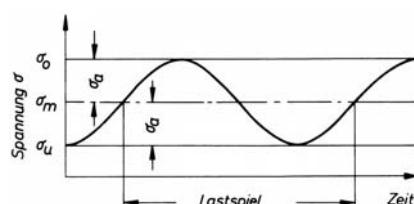


Bild 14.16 Spannungsverlauf bei einer Zugbeanspruchung im Schwellbereich

Bei laufendem Motor entstehen durch den Gasdruck periodische Änderungen der Spannung. Die Spannungsausschläge σ_a pendeln um eine Mittelspannung σ_m .

Lastspiel wird der Ablauf einer vollen Schwingung genannt, in Bild 14.17 sinusförmig skizziert. Dieser Spannungsverlauf ist ein Beispiel für die Beanspruchung eines Bauteiles im sog. *Schwellbereich*.

Übersicht: Dynamische Belastungsfälle

Bel.-Fall	Merkmale
Schwell-Bereich	Oberspannung (σ_u , τ_o) und Unterspannung (σ_u , τ_u) haben die gleiche Richtung. Im Diagramm liegen die Schwingungen nur auf einer Seite zur Nullachse, ähnlich Bild 14.16.
Wechsel-Bereich	Ober- und Unterspannung haben entgegengesetzte Richtungen. Im Diagramm liegen die Schwingungen auf beiden Seiten zur Nullachse, ähnlich Bild 14.17.

Beispiel: Getriebewelle (Bild 14.17a)

Die skizzierte Welle wird durch die Zahnkraft F belastet, sie soll als konstant betrachtet werden. Im Stillstand ist die an der Stelle A liegende Faser spannungslos. Nach einer Viertel-Umdrehung ist sie nach oben gelangt und wird durch die max. Biege-Zug-Spannung σ_o beansprucht (Bild 14.17b).

Nach einer weiteren halben Umdrehung ist Faser A auf der Unterseite und wird durch die max. Biege-Druck-Spannung beansprucht. Nach einem vollen Lastspiel ist Faser A wieder spannungslos, das nächste Lastspiel beginnt.

Der skizzierte Spannungsverlauf ist ein Beispiel für die Beanspruchung eines Bauteiles im sog. *Biegewechselbereich* (die auftretenden Torsionsspannungen sind hier vernachlässigt).

Grundsätzlich kann für alle Arten der Grundbeanspruchung, Zug, Druck, Biegung und Torsion, die Belastung entweder schwellend oder wechselnd sein.

Beobachtungen, die bereits von A. Wöhler im 19. Jahrhundert bei systematischen Versuchen gemacht wurden, zeigen, dass dynamisch belastete Teile nach einer bestimmten Anzahl von Lastspielen brechen, wenn der Spannungsausschlag σ_a zu hoch liegt.

Bei ausreichend niedrigen Spannungen

$$\sigma_m + \sigma_a \quad \text{oder} \quad \tau_m + \tau_a$$

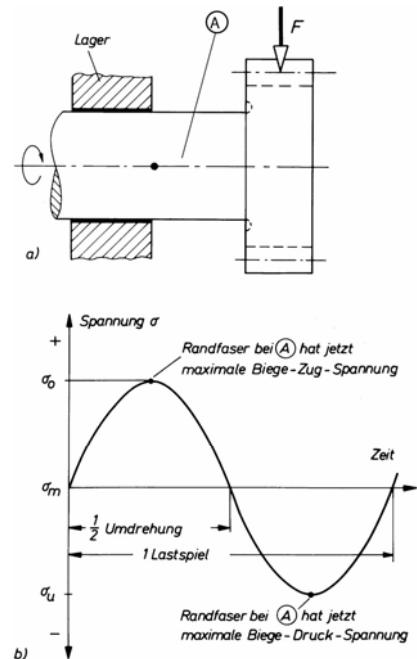


Bild 14.17 Getriebewelle a) schematisch, b) Spannungsverlauf eines Randfaserteilchens

Hinweis: Eine Überlagerung beider Belastungarten ist bereits bei einfachen Bauteilen möglich, wie die Getriebewelle nach Bild 14.16 zeigt: Beim Antrieb in einer Drehrichtung kommt zur Biegewechselbeanspruchung noch die Torsionsbeanspruchung im Schwellbereich hinzu, d.h., die Welle wird wechselnd auf Biegung und schwellend auf Torsion beansprucht.

Ziel der Dauerschwingversuche (Dauerversuche) ist es, diejenigen Mittelspannungen und

werden praktisch *unendlich* viele Lastspiele ertragen. Das Teil ist dauerfest, seine Beanspruchung liegt unterhalb der Dauerschwingfestigkeit.

14.5.3 Dauerschwingfestigkeiten

Dauerschwingfestigkeiten
(Dauerfestigkeit)

$$\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_a \\ \tau_D = \tau_m \pm \tau_a$$

Wichtige Sonderfälle sind:

Schwellfestigkeit $\sigma_{Sch} = 2 \sigma_a ; \tau_{Sch} = 2 \tau_a$

Wechselfestigkeit $\sigma_W = \pm \sigma_a ; \tau_W = \pm \tau_a$

Spannungsausschläge zu ermitteln, welche dauernd, d.h. unendlich viele Lastspiele lang, ohne Bruch ertragen werden können. Diese Spannungen ergeben die *Dauerschwingfestigkeit*.

Dabei sind σ_m und τ_m gewählte Mittelspannungen und σ_a und τ_a die höchsten, ohne Bruch ertragbaren Spannungsausschläge.

Die Unterspannung ist Null. Im Diagramm berührt die Schwingungslinie die Zeitachse.

Die Mittelspannung ist Null. Im Diagramm liegen die Schwingungen symmetrisch zur Zeitachse.

14.5.4 Dauerschwingversuche (DIN 50 100/78)

Die zahlreichen Versuchsarten haben unterschiedliche Ziele:

Versuche	Ziele
Versuche mit glatten, polierten Proben	Ermittlung der Dauerfestigkeit für die Hauptbeanspruchungsarten, Aufstellen von Wöhlerkurven
Versuche mit Proben, die Kerben, Bohrungen, Querschnittsänderungen oder andere Oberflächenmerkmale haben	Ermittlung der Gestaltfestigkeit, d.h. der Kerbwirkungszahl und des Einflusses der Oberflächengüte auf die Dauerfestigkeit
Versuche mit vollständigen Bauteilen oder ganzen Baugruppen	Ermittlung von Schwachstellen und ihre Beseitigung durch Konstruktions- oder Werkstoffänderung

Für alle Dauerversuche ist der Zustand der Probenoberfläche von starkem Einfluss auf die Lebensdauer. Aussagekräftige Messwerte können deshalb nur bei gleichartiger Vorbereitung der Proben und gleichen Umweltbedingungen während des Versuches erzielt werden.

Als Beispiel für einen Versuch der ersten Gruppe (Tabelle) wird der Umlaufbiegeversuch beschrieben, mit dem die Biegewechselfestigkeit σ_{bw} eines Werkstoffes ermittelt werden kann.

Umlaufbiegeversuch (DIN 50 113/82)

Dieser Versuch belastet die Probe durch die Anordnung der Kräfte mit einem konstanten Biegemoment (Bild 14.18). Bei einer Drehung entstehen wechselnde Biegespannungen, die um die

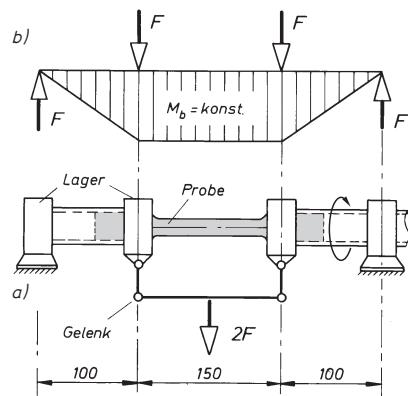


Bild 14.18 Umlaufbiegeversuch, schematisch
a) Probe mit Belastungskräften,
b) Momentenfläche

Mittelspannung Null schwingen (ähnlich den Verhältnissen in Bild 14.17b).

Es werden mehrere Proben gleichen Werkstoffs und gleicher Vorbehandlung mit fallenden Spannungsausschlägen σ_a bis zum Bruch geprüft und die Lastspielzahl bis dahin festgehalten (Bruchlastspielzahl). Proben, welche die Grenzlastspielzahl N_G erreichen, brechen i.A. nicht mehr, so dass sie aus dem Versuch genommen werden.

Wöhlerkurve

Aus den ermittelten Wertepaaren (Bild 14.19), Bruchlastspielzahl N_B und Spannungsausschlag σ_a , die eine große Streuung haben, ergibt sich die Wöhlerkurve (Bild 14.20). Sie fällt von der statischen Festigkeit (mit $N_B = 1$) steil ab, wird für zunehmende Lastspielzahlen flacher.

Deren Abstand zur Abszisse ist der *höchste* noch ertragbare Spannungsausschlag σ_A . Für den Umlaufbiegeversuch ist er identisch mit der Wechselfestigkeit σ_{bw} .

Der annähernd waagerechte Verlauf lässt den Schluss zu, dass eine Probe *nicht unendlich* lang geprüft werden muss, sondern nur bis zu einer praktisch relevanten Grenzlastspielzahl N_G .

In Bild 14.20 geben alle Punkte auf der deutlich abfallenden Kurve die *Zeitfestigkeit* an. Das ist der Spannungsausschlag, der nur eine *begrenzte* Lastspielzahl ausgehalten wird. Bei genaueren Versuchen werden stets mehrere Proben mit *gleicher* Beanspruchung geprüft. Sie brechen bei verschiedenen Lastspielzahlen, die Werte streuen also, siehe Bild 14.20. Für sichere Aussagen ist die Prüfung *vieler* Proben erforderlich, deren Daten mit statistischen Methoden ausgewertet werden. Im Bereich der Zeitfestigkeit sind Streuungen der Bruchlastspielzahl um den Faktor 25 völlig normal (Bild 14.20).

Die Versuchdrehzahlen liegen bei Metallen zwischen 1000 und 10000/min.

Grenzlastspielzahlen sind werkstoff- und problemabhängige Größen (Stahl z.B. $10^6 - 10^7$).

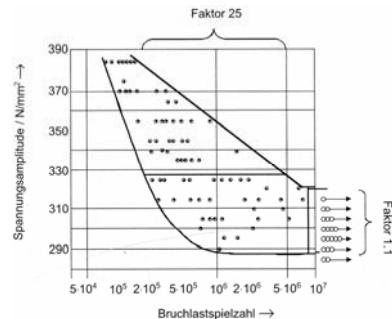


Bild 14.19 Streuung der Wöhlerkurve

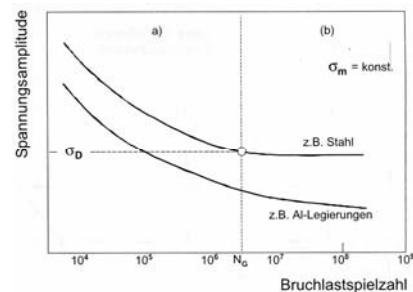


Bild 14.20 Wöhlerkurve, Bereiche: a) Zeitfestigkeit, b) Dauerfestigkeit

Hinweis: Zeitfestigkeiten sind interessant für Bauteile, die während ihres Einsatzes nur eine begrenzte Lastspielzahl durchlaufen.

Hinweis: Wöhlerkurven laufen nicht streng in eine Waagerechte aus, sondern können auch bis zu höchsten Lastspielzahlen stetig abfallen. Das tritt deutlich auf z.B. bei:

- Metallen mit kfz-Kristallgitter,
- bestimmten Konstruktionsfällen, wie z.B. Wälzlagern,
- Dauerversuchen in Salzwasser.

Beachte: Bauteile in korrosiver Umgebung sind nicht dauerfest, sie haben nur Zeitfestigkeiten. Je stärker der Korrosionsangriff, desto eher erfolgt der Dauerbruch.

Die Wöhlerkurve stellt dann die statistische Auswertung eines Streubandes dar. Sie gibt mit einer bestimmten *Wahrscheinlichkeit* den Bruch oder die Dauerfestigkeit σ_D an.

14.5.5 Dauerfestigkeitsschaubild

Einen Überblick über das Dauerschwingverhalten eines Werkstoffes bei verschiedenen Mittelspannungen geben die Dauerfestigkeitsschaubilder (DIN 50 100, Bild 14.21a).

Es zeigt die ertragbaren Ober- und Unterspannungen (Ordinate) über der Mittelspannung (Abszisse) aufgetragen. Die Ordinatenwerte sind nach oben und unten nur bis zur Fließgrenze (Streckgrenze und Quetschgrenze) gültig. Die Verlängerungen der Ober- und Unterspannungen schneiden sich in einem Punkt, der statischen Festigkeit R_m .

Die ertragbaren Spannungsausschläge lassen sich für jede beliebige Mittelspannung als senkrechte Strecken nach oben und unten abgreifen. Bei Spannungen innerhalb des stark umrandeten Feldes treten keine Dauerbrüche auf.

Das Bild zeigt neben dem Dauerfestigkeitsschaubild (Teil a) einige dynamische Belastungsfälle mit seitlich herausprojizierten Spannungs-Zeit-Diagrammen. Die Spannungen erreichen jeweils die Dauerfestigkeiten.

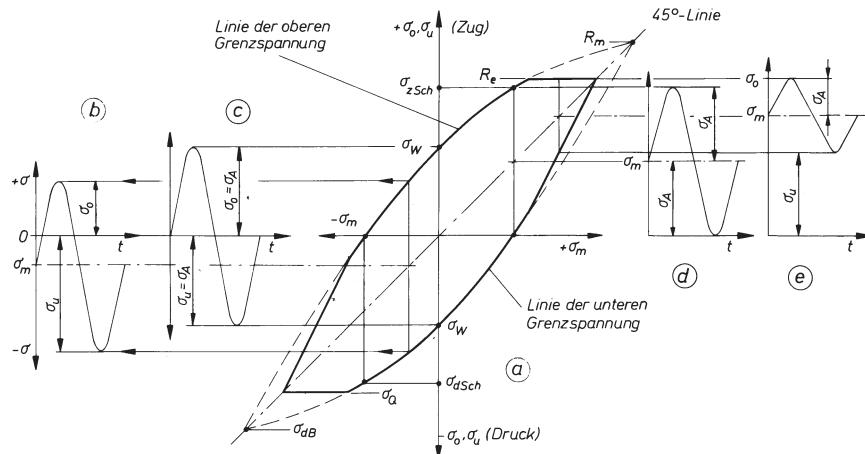


Bild 14.21 Dauerfestigkeitsschaubild für Zug-Druck-Bearbeitung

- Bildteil a) Dauerfestigkeitsschaubild. Für vier verschiedene Mittelspannungen sind die Spannungsausschläge als Hilfslinien eingetragen und seitlich herausprojiziert.
- Bildteil b) Druckbeanspruchung im Wechselbereich, die Unterspannung reicht in den Druckbereich.
- Bildteil c) Zug-Druck-Wechselbeanspruchung. Die Mittelspannung ist Null, die Spannungsausschläge sind gleich und erreichen die Dauerfestigkeit,
- Bildteil d) Zugschwellbeanspruchung, dabei ist die Unterspannung Null, die Mittelspannung gleich dem Spannungsausschlag. Die Oberspannung ist hier gleich der Zugschwellfestigkeit.
- Bildteil e) Zugbeanspruchung im Schwellbereich mit hoher Mittelspannung. Die ertragbaren Spannungsausschläge sind klein. Ober- und Mittelspannung haben die gleiche Richtung.

14.5.6 Dauerfestigkeit und Einflussgrößen

Die Werte der Dauerfestigkeit von Proben und Bauteilen werden von zahlreichen Faktoren beeinflusst, wie die nachstehende Übersicht zeigt.

Einflussgröße	Wirkung auf die Dauerfestigkeit
Kerben	Je schärfere der Kerbradius und je tiefer die Kerbe ist, desto höher ist die Spannungskonzentration im Kerbgrund und desto niedriger ist also die Dauerfestigkeit.
Oberflächenbeschaffenheit	Jede Abweichung vom glatten, polierten Zustand, wie er beim Probestab vorliegt, mindert die Lebensdauer, d.h. die Dauerfestigkeit. Druckeigenspannungen, wie sie durch Kaltumformen beim Walzen, Ziehen oder Kugelstrahlen entstehen und das Randschichtärten erhöhen die Dauerfestigkeit.
Korrosionsbeanspruchung	Bei Versuchen in Vakuum erbringen Proben höhere Bruchlastspielzahlen als im normalen Dauerversuch. Somit wirken schon geringste Gehalte an korrosiven Medien stark auf die Dauerfestigkeit ein. Bei Dauerversuchen in wässrigen Lösungen ergibt sich, dass die Wöhlerkurve tiefer liegt und auch bei 109 Lastspielen noch deutlich abfällt.
Temperatur	Da die Dauerfestigkeit an die Festigkeit gekoppelt ist, nimmt grundsätzlich mit zunehmender Temperatur die Dauerfestigkeit jedes Werkstoffes ab.
Frequenz	Bei Metallen tritt bis zu 104 Lastspielen/min keine Erwärmung auf, in diesem Bereich hat die Frequenz keinen Einfluss. Bei Kunststoffen beginnt bei 10 Hz die Erwärmung mit Erweichung und Abfall der Festigkeiten.

14.6 Prüfung der Zähigkeit

Zähigkeit betrachten wir zunächst als eine Eigenschaft des Werkstoffes und beschreiben sie mit dem Bruchverhalten. Zäh ist ein Werkstoff, bei dem eine Probe oder ein Bauteil auch unter ungünstigen Bedingungen erst nach starker Verformung bricht.

Zur Verformung eines Werkstoffes wird nicht nur eine Kraft allein benötigt, sondern eine Kraft, die „längs eines Weges wirkt“, d.h. eine Arbeit, die Verformungs- und Brucharbeit.

Die Arbeit, die zum Zerbrechen einer Probe aufgebracht werden muss, ist ein Maß für die Zähigkeit eines Werkstoffes.

Neben dem Kristallgitter wirkt sich der Gefügezustand auf die Verformbarkeit und damit auf die Zähigkeit aus (homogen/heterogen, kaltverformt, Korngröße, Ausscheidungen).

Eine plastische Verformung wird erst durch innere Schubspannungen ausgelöst. Deshalb spielt der Spannungszustand eine außerordentliche Rolle.

Die Zähigkeit ist damit keine reine Stoffeigenschaft, sondern wird von der *Form* des Bauteils und dem *Kraftangriff* stark beeinflusst, die den Spannungszustand bestimmen.

In der Umgangssprache wird diese Eigenschaft beschrieben mit:

zäh wie Leder, spröde wie Glas

Leder lässt sich biegen und reißt erst sehr spät, bei Glasscheiben genügt ein Anritzen, und mit geringem Aufwand durch Klopfen mit dem Glasschneider tritt der Bruch ein.

Die Metalle sind verschieden zäh, weil ihre Kristallgitter unterschiedliche Gleitmöglichkeiten besitzen (→ Tabelle 2.9):

Kristall-Gitter	Gleitsysteme	Beispiele
kFZ	12 sehr zäh	Cu, Al, austenitische Stähle Baustähle
krz	keine Hauptgleitebenen zäh/spröde	
hdP kompliziert	3 wenig zäh keine, spröde	Mg, Zn Carbide, Gläser, Diamant

14.6.1 Spannungszustände

Einachsiger Spannungszustand tritt z.B. in der Probe beim Zugversuch vor Beginn der Einschnürung auf. Sie wird durch die äußeren Kräfte *in einer Richtung* des Raumes auf Zug beansprucht (Bild 14.22a).

Es stehen *zwei* oder *drei Achsen* für ein unbehindertes Fließen zur Verfügung (Gleichmaßdehnung mit gleichmäßiger Verjüngung des Querschnitts).

Zweiachsiger (ebener) Spannungszustand tritt z.B. im Blech eines Druckbehälters auf (Luftballon). Bild 14.22b zeigt ein herausgeschnittenes Blechteilchen, an dem allseitig Zugkräfte angreifen.

Ein Schnitt unter einem beliebigen Winkel zeigt, dass in der Schnittfläche *keine Schubkräfte* auftreten (Bild 14.22c), sondern nur Normalkräfte.

Dreiachsiger Spannungszustand tritt bei den meisten Bauteilen auf, bei denen durch *Kerben*, *Absätze* oder *Kröpfungen* eine Kraftumlenkung im Werkstück erfolgen muss.

In solchen Fällen steht *keine* Achse mehr für ein unbehindertes Fließen zur Verfügung, auch wenn die Versetzungen im Gefüge eigentlich beweglich sind.

Dreiachsige Spannungszustände
begünstigen ein sprödes Bruchverhalten des Werkstoffs.

Bild 14.23 zeigt, wie durch Kerben in einem biegebeanspruchten Balken ein solches Spannungssystem im Kerbgrund erzeugt wird. Durch das Umlenken der Kraftwirkungslinien entsteht am Kerbrand ein zweiachsiger Spannungssystem mit σ_x und σ_y (Bild 14.23a).

Beim Schlagen der Probe kommt es zum Einschnüren im Kerbgrund (Bild 14.23b). Dann behindern die spannungslosen Kerbränder den quer-schrumpfenden Kerbgrund und setzen ihn unter Zugspannungen σ_z .

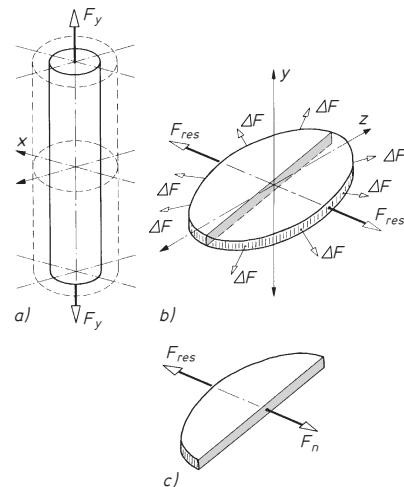


Bild 14.22 Spannungszustände a) einachsig, b) zweiachsig, c) Werkstoffteilchen freigemacht

Beim zweiachsigen Spannungszustand ist eine plastische Verformung in der x-z-Ebene nicht möglich. Es steht nur eine Achse (y-Achse senkrecht zur Oberfläche) für ein unbehindertes Fließen zur Verfügung.

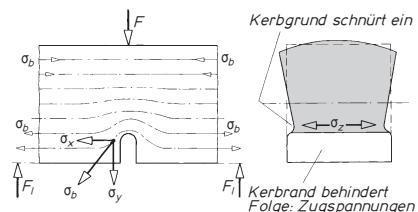


Bild 14.23 Spannungszustand in der Kerbschlagprobe, a) Ansicht, b) Querschnitt mit Bruchfläche

Hinweis: Unterschiedliche Spannungszustände bewirken, dass Proben des gleichen Stahles im Zugversuch brauchbare Bruchdehnung und -einschnürung zeigen, beim Kerbschlagbiegeversuch jedoch spröde brechen können.

14.6.2 Kerbschlagbiegeversuch (DIN EN 10 045/91)

Bei dieser Prüfung wird an einer Probe die Verformungsarbeit bis zum Bruch gemessen. Die Versuchsbedingungen sind so gewählt, dass die Verformung stark behindert wird.

Bedingung	Auswirkung
Schlagartige Belastung	Verformungszeit sehr kurz. Es kommt leichter zu inneren Trennungen als bei langsamem Abgleitvorgängen.
Kerbe	Das verformte Volumen ist klein und nur auf die Umgebung der Kerbe beschränkt.
Dreiachsiger Spannungszustand	Fließbehinderung in allen drei Achsen (Bild 14.23)

Kerbschlagproben

Die Proben stellen einen Balken auf zwei Stützen dar, die durch eine mittig angreifende Kraft (Hammerfinne Bild 14.24) schlagartig auf Biegung beansprucht werden. Im Kerbgrund tritt der mehrachsige Spannungszustand auf.

Scharfe Kerben behindern die Verformung mehr und ergeben kleinere Messwerte. Die Folge ist:

Versuchsergebnisse sind nur dann vergleichbar, wenn sie an Proben gleicher Form ermittelt wurden.

Neben der Kerbform wirken die Querschnittsmaße (Höhe : Breite) und die Auf treffgeschwindigkeit des Pendels auf die Messwerte ein.

Versuchsablauf

Als Prüfmaschinen werden Pendelschlagwerke verwendet, die in Baugrößen von 0,5...300 J genormt sind. Die Probe wird am tiefsten Punkt der Pendelbahn in ein Widerlager eingelegt (Bild 14.25) und das Pendel in die Ausgangslage (1) angehoben.

Es hat dann bei der Fallhöhe h die potentielle Energie W_p (Lageenergie). Nach dem Ausklinken fällt es auf kreisförmiger Bahn nach unten. In der tiefsten Lage (2) ist seine potentielle Energie vollständig in kinetische umgewandelt. Dort trifft die Hammerscheibe auf die Probe und zerschlägt sie. Die zum Bruch erforderliche Schlagarbeit wird vom Pendel aufgebracht, wodurch dessen Energie abnimmt. Beim Weiterschwingen erreicht es in der Endlage (3) nur die

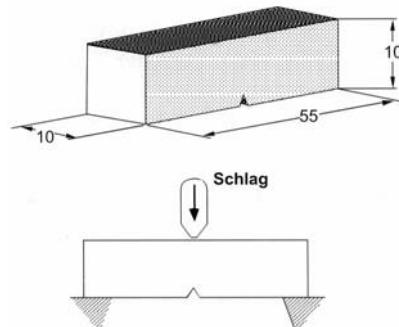


Bild 14.24 Normalprobe mit V-Kerb

Hinweis: In der Literatur findet man auch manchmal Zähigkeitswerte **KU** (Rundkerbprobe).

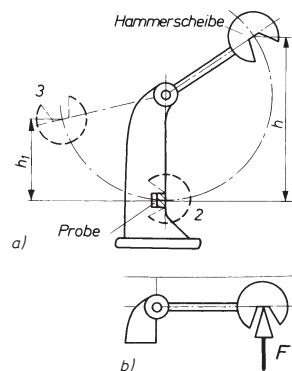


Bild 14.25 Kerbschlagbiegeversuch mit dem Pendelhammer, schematisch dargestellt
a) Pendelschlagwerk, b) Ermittlung der Kraft F

kleinere Steighöhe h_1 und besitzt dort die Überschussenergie $W_{\ddot{u}}$. Damit wird die verbrauchte Schlagarbeit KV zu (\rightarrow):

F ist die Stützkraft, bei waagerechter Stellung des Pendels gemessen (Bild 14.25b). Angaben der Schlagarbeit enthalten die Probenform und das Arbeitsvermögen des Hammers, das normal 300 J (ohne Angabe) beträgt und bei Abweichungen hinter das Symbol KV gesetzt wird.

14.6.3 Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve

Untersucht man viele Proben des gleichen Werkstoffs bei verschiedenen Temperaturen und trägt die Kerbschlagarbeit über der Temperatur auf, so zeigen sich starke Unterschiede im Verhalten der kubisch-flächen- und der kubisch-raumzentrierten Metalle (Bild 14.26).

Kubisch-flächenzentrierte Werkstoffe sind auch bei tiefen Temperaturen zäh (z.B. Kupfer, Nickel und austenitische Stähle).

Kubisch-raumzentrierte Werkstoffe, wie z.B. alle unlegierten, niedrig legierten und die hochlegierten Chromstähle, sind bei höheren Temperaturen zäh (Hochlage), bei tiefen Temperaturen sind sie spröde (Tieflage).

Dazwischen liegt der Steilabfall mit streuenden Messwerten. Die Lage des Steilabfalls wird durch die Übergangstemperatur $T_{\ddot{u}}$ gekennzeichnet. Diese kann z.B. in der Mitte zwischen Hoch- und Tieflage liegen. Bei Stahl ist es auch üblich, diejenige Temperatur als Übergangstemperatur $T_{\ddot{u}27}$ zu bezeichnen, bei der keine Probe weniger als 27 J Kerbschlagarbeit zeigt.

Die Zähigkeit eines Werkstoffs kann auch ohne Messung allein an der Bruchfläche der Probe beurteilt werden. Es gibt zwei Grenzfälle:

Verformungsbruch (Bild 14.27a+b). Merkmal ist eine zerklüftete Bruchfläche, die Ränder haben Stauchungen und Einschnürungen, ein Zeichen für Zähigkeit.

Trennbruch (Bild 14.27c). Merkmal ist eine fast ebene Bruchfläche mit unverformten und glatten Rändern, ein Zeichen für Sprödigkeit.

$$\text{Schlagarbeit } KV = W_p - W_{\ddot{u}} = F(h-h_1)$$

	KV	F	h, h_1
Einheiten sind:	J	N	m

Beispiel:

$KV = 40 \text{ J}$ Spitzerkerprobe mit 300 J geschlagen

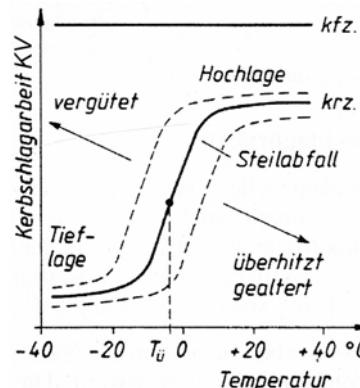


Bild 14.26 Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve

Beachte: Übergangstemperatur $T_{\ddot{u}}$ ist vom Gefügezustand abhängig und lässt sich durch Wärmebehandlung beeinflussen (Bild 14.26).

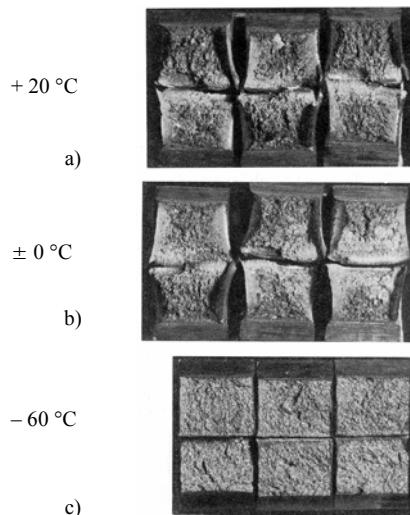


Bild 14.27: Bruchflächen von Proben aus Stahl S235JR bei verschiedenen Temperaturen geschlagen

Anwendungen des Kerbschlagbiegeversuches

- Kontrolle der Wärmebehandlung der Stähle. Bei Überhitzung oder Anlasssprödigkeit liegt die Kerbschlagarbeit niedrig.
- Kontrolle der Gütegruppen von Stählen nach z.B.: DIN EN 10025, DIN EN 10113. Die Stahlsorten müssen die Kerbschlagarbeit bei verschiedenen Temperaturen – und damit die Sicherheit gegen Sprödbruch – nachweisen.
- Kontrolle der Alterungsneigung von Stählen. Hierzu wird die Probe künstlich gealtert d.h. um 10 % gereckt und auf 250...300 °C angelassen. Behält der Stahl seine Zähigkeit, so ist er alterungsbeständig.

Hochfeste Stähle haben eine hochliegende Streckgrenze und nur geringe Verformungsfähigkeit bis zum Bruch. Der Kerbschlagbiegeversuch ist für sie nicht geeignet. Bei ihnen wirken atomare Fehlstellen bereits als Kerben, die zum Rissauslöser werden.

Die Theorie des Sprödbruchverhaltens, die sog. Bruchmechanik, arbeitet mit Begriffen wie kritische *Risslänge*, die bei einer kritischen Zug- oder Biegespannung zu einer *Rissausbreitung* führt. Beide stehen im Zusammenhang mit dem sog. *Spannungsintensitätsfaktor* K_{Ic} , der auch als **Bruchzähigkeit** (→) bezeichnet wird. Spröde keramische Stoffe werden ebenfall damit beurteilt. Die Bruchzähigkeit nimmt bei gleichartigen Werkstoffen mit steigender 0,2 %-Dehngrenze ab (→ Tabelle).

Bruchzähigkeit K_{Ic} (Risszähigkeit), Werkstoffkennwert, der durch aufwändige Versuche ermittelt wird. In der Zugprobe wird durch Schwingungen ein Anriss erzeugt und die Spannung ermittelt, die zur Rissausbreitung benötigt wird. Der Zusammenhang ist

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a} \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \sqrt{\text{mm}} = \text{kN/mm}^{-3/2}$$

mit kritischer Risslänge a

Werkstoff	0,2 %-Dehngrenze/MPa	$K_{Ic}/\text{kN/mm}^{-3/2}$
Vergütungsstähle	1000...2000	2...1
hochfeste Stähle	2000...3000	4...2

14.7 Prüfung von Verarbeitungseigenschaften (technologische Versuche)

Die Prüfungen sind den Verarbeitungsvorgängen nachgeahmt und stellen fest, ob der Werkstoff in der Probe oder im Halbzeug den Arbeitsgang rissfrei übersteht. Meist werden keine Messungen vorgenommen, evtl. Längenmessungen.

Biegeversuch (DIN EN ISO 7438/00, E/04)

Der Versuch soll zeigen, ob die Stahlsorte in kaltem Zustand rissfrei gebogen werden kann. Dabei wird ein Flachstahl von der Dicke a nach Bild 14.28 durch einen Dorn von bestimmten Durchmesser D zwischen zwei gerundeten Kanten hindurchgedrückt. An der Probenunterseite entstehen Zugspannungen. Sie führen bei zu großem Biegewinkel α zu Rissen.

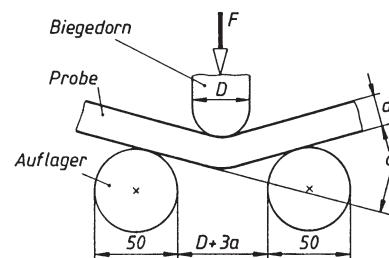


Bild 14.28 technologischer Biegeversuch

Der Dorndurchmesser D in Abhängigkeit von der Dicke a regelt die Beanspruchung. Je kleiner D , um so größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Zugrisse entstehen.

Tiefungsversuch nach Erichsen (DIN EN ISO 20482/03)

Mit einem Werkzeug nach Bild 14.29 wird das Tiefziehen nachgeahmt. In einen Blechstreifen wird dreimal ein Nähfchen solange gezogen, bis an der Unterseite ein Anriss zu sehen ist. Der Weg von der Berührung der Kugel mit dem unverformten Blech bis zum Anriss ist die *Tieflung*. Sie hängt von der Blechdicke ab. Für die Blechqualitäten gibt es unterschiedliche Tiefungswerte, die in Kurvenblättern zusammengefasst sind.

An der Unterseite des Nähfchens lässt sich noch die Korngröße des Werkstoffs beurteilen. Bei Grobkorn entsteht eine *apfelsinenartige* Oberfläche, bei Feinkorn ist die verformte Oberfläche für das Auge glatt.

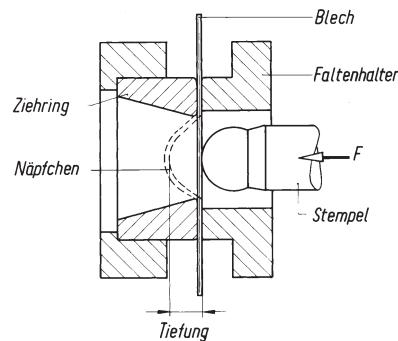


Bild 14.29 Tiefungsversuch nach Erichsen

Stirnabschreckversuch (DIN EN ISO 642/00)

Mit dem Versuch kann die Einhärtung eines Stahles geprüft werden. Eine austenitisierte Probe wird nach Bild 14.30 in eine Vorrichtung gehängt und nur von der Stirnseite her abgeschreckt. Durch Festlegung von Wasserdruck, Rohrquerschnitt und Blende werden konstante Abkühlbedingungen erreicht.

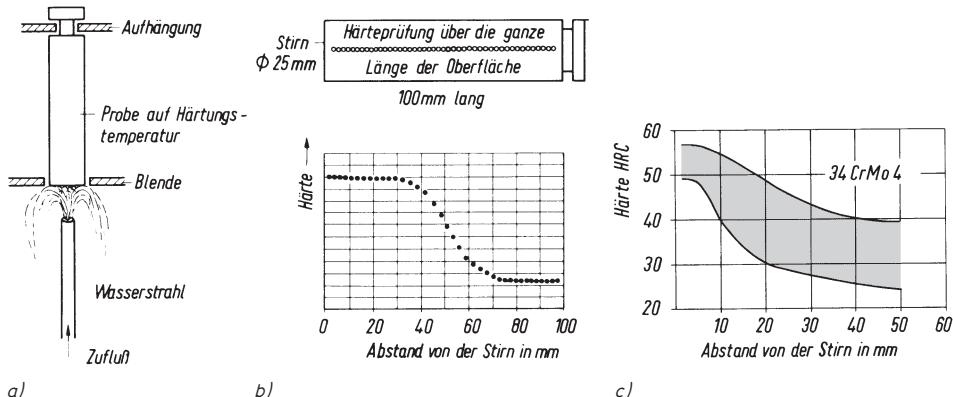


Bild 14.30 Stirnabschreckversuch; a) Versuchsanordnung; b) Stirnabschreckprobe und -kurve; c) Streuband des Vergütungsstahles 34CrMo4

Nach dem Erkalten werden Härtewerte über die ganze Länge der Probe gemessen und über der Länge in ein Diagramm übertragen. Aus dieser *Stirnabschreckkurve* lassen sich Einhärtung oder Durchhärtung des Stahles erkennen (Bilder 14.30c und → 8.6).

Streubänder sind auch in zahlreichen Normen enthalten, z.B. in:

- Vergütungsstähle DIN EN 10083,
- Einsatzstähle DIN EN 10084,
- Werkstoffauswahl aufgrund der Härtbarkeit DIN 17021.

Infolge der Analysenstreuungen ergibt sich in der Praxis für eine Stahlsorte nicht eine Einzelkurve, sondern ein *Streuband*. Die Einhärtung ist auch noch vom Grad der Austenisierung abhängig.

Eine Einengung des Streubandes kann vereinbart und in der Stahlbezeichnung angegeben werden.

Beispiel: Vergütungsstahl 41Cr4H normal 41Cr4HH (oberer Bereich) 41Cr4HL, (unterer Bereich des Streubandes DIN EN 10083)

14.8 Untersuchung des Gefüges

14.8.1 Mikroskopische Untersuchungen

Untersucht werden Strukturelemente in der Größe zwischen $0,001 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$. Dazu müssen sie mikroskopisch vergrößert werden.

Alle Proben haben zunächst räue Oberflächen, die durch den Herstellprozess verursacht wurden. Deshalb müssen sie durch *Schleifen* eingeebnet werden. Durch *Polieren* verschwinden die Schleifspuren und durch *Ätzen* wird ein Relief hergestellt. Es soll *Kontraste* erzeugen, wenn Strahlen auf die Probe fallen (Bild 14.31):

- Lichtstrahlen werden an den geätzten Flächen unter verschiedenen Winkeln reflektiert (Lichtmikroskop),
- Elektronenstrahlen schießen Elektronen unterschiedlich stark aus den Mikroflächen (Raster-Elektronenmikroskop).

Elektronenstrahlen dringen durch Metalle und Keramik, wenn die Proben *sehr dünn* sind. Dann können sie mit der Durchstrahlungs-Elektronenmikroskopie (TEM) untersucht werden. Die nachfolgende Übersicht nennt einige Daten und Anwendungsgrenzen der drei Verfahren.

Übersicht: Mikroskopische Verfahren

Strukturelemente sind: Kristallkörper, ihre Form und Größe, die Korngrenzen mit evtl. Ausscheidungen. Kristallfehler wie z.B. Versetzungen. Bruchflächen für die Erforschung von Schadensursachen.

Die Ätzmittel müssen so beschaffen sein, dass sie mit dem Werkstoff reagieren können. Dabei muss der interessierende Gefügebestandteil optisch herausgestellt werden.

Herstellung und Auswertung solcher Gefügebilder ist Gegenstand eines wissenschaftlichen Fachgebietes, der *Metallographie*. Analog gibt es auch eine *Keramographie*.

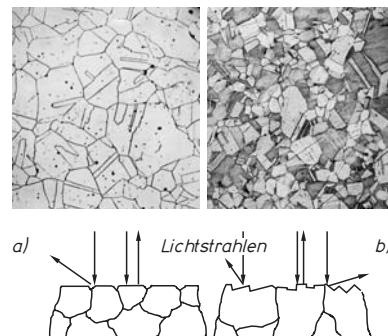


Bild 14.31 Geätzte Metallproben im Schnitt, a) Korngrenzenätzung, b) Kornflächenätzung, schematische Darstellung

	LM, Lichtmikroskop	REM, Raster-Elektronenmikroskop	TEM, Transmissions-Elektronenmikroskop
Vergroßerung	bis zu 1000	bis 200 000	bis 1 000 000
Auflösung, d.h. kleinstter Abstand von 2 Punkten	= $0,3 \mu\text{m}$	$0,01 \mu\text{m}$	$0,001 \mu\text{m} = 1 \text{ nm}$
Schärfentiefe bei 1000-facher Vergrößerung	$0,01 \mu\text{m}$	$35 \mu\text{m}$	–
Gegenstände der Beobachtung	Gefüge, z.B. Bilder 3.11 bis 3.14	Bruchflächen, Gefüge z.B. Bilder 14.6 und 3.8	Gitterstörungen, Spannungsfelder in Gittern

Ultraschallmikroskop. Mit veränderlicher Schallfrequenz (10 MHz...2 GHz) sind Eindringtiefen

Hinweis: Das Prinzip der Ultraschallprüfungen ist unter 14.9.5 behandelt.

bis zu 5 mm möglich. Es können Objekte bis 0,3 µm erkannt werden. Diese Art von Mikroskop ist damit in der Lage, unter der Oberfläche liegende Phasen auf dem Monitor abzubilden und zu speichern (ELSAM, Leica).

14.8.2 Makroskopische Untersuchungen

Schlackeneinschlüsse, Seigerungszonen usw. sind meist größer, so dass sie mit bloßem Auge erkannt werden können. Hier genügt es, geschliffene Flächen zu behandeln, wie z.B. beim Baumann-Abzug:

Fotopapier wird in der Dunkelkammer in Schwefelsäure getränkt und auf die Stirnseite von Stahlprofilen gedrückt. An Schwefelseigerungen wird das Papier durch den entstehenden Schwefelwasserstoff dunkel (Bild 14.32a).

Durch längeres Tiefätzen können Faserstrukturen im Werkstoff und seine Veränderungen beim Umformen sichtbar gemacht werden (Bild 14.32b).

14.9 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Qualitätskontrolle

14.9.1 Allgemeines

Der allgemeine Trend zu Gewichtseinsparung, um Kosten und Energieverbrauch zu senken, führt zu immer kleineren Querschnitten, so dass sich innere Fehler stärker auswirken können. Für Bauteile, deren Bruch Menschenleben gefährdet oder große Folgeschäden nach sich ziehen kann (Sicherheitsbauteile), muss deshalb eine 100-%ige Stückprüfung auf verborgene Fehler erfolgen,

Sicherheitsbauteile sind z.B. Achsen und Lenkungsteile von Fahrzeugen, Druckbehälter, Hochdruckarmaturen, Schweißnähte.

Dabei sollen *fehlerhafte* Rohguss- oder Schmiedeteile und Halbfabrikate bereits *vor* der Weiterverarbeitung und ebenso solche Fertigteile vor dem Einbau oder der Inbetriebnahme ausgesondert werden.

Die *Erkennbarkeit* der Fehler mit Hilfe der einzelnen Verfahren ist unterschiedlich und hängt von Art, Größe und Lage des Fehlers im Prüfling ab.

Anwendung: Zerstörungsfreie Prüfung von Verbunden, wie z.B. Anordnung, Stärke und Richtung von Fasern in einer Matrix, Delaminationen (Ablösungen) und Faserbrüche. Kontrolle von Chips in Telefonkarten.

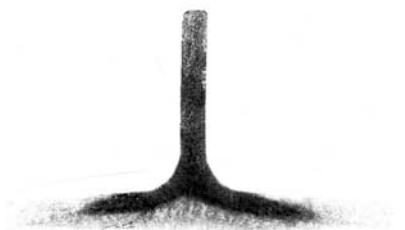


Bild 14.32a Baumann-Abzug: Seigerungszone in einem T-Profil

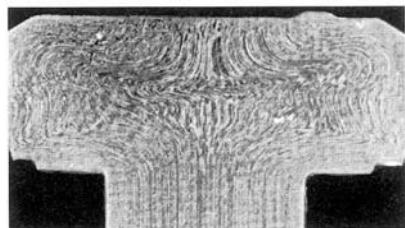


Bild 14.32b Faserverlauf in einem kaltgestauchten Schraubenkopf

Hinweis: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen Terminologie DIN EN 1330, Teile 1–5/97-00.

Übersicht: Fehler und Entstehung

Risse an der Oberfläche und im Innern:

- Schleifrisse durch örtliche Überhitzung beim Ausfall des Kühlschmierstoffes,
- Häriterrisse durch zu schroffes Abschrecken,
- Warmrisse bei Gusssteinen infolge behinderter Schrumpfung in der Form,
- Schmiederisse durch zu schnelle Umformung heterogener Gefüge,
- Schmiedefalten und Doppelungen,
- Spannungsrisse durch zu schnelles Erwärmen von der Oberfläche her. Der Kern löst sich von der Randschicht oder reißt quer.

Prüfdauer und *Kosten* bestimmen daneben das Prüfverfahren für einen gegebenen Fall. So hat jedes Verfahren seine Anwendungsbereiche.

Grundsatz moderner Qualitätssicherung ist, dass die Qualität der Bauteile *produziert* und nicht „*herausgeprüft*“ werden muss.

14.9.2 Eindringverfahren (Penetrierverfahren, DIN EN 571/97)

Prüfprinzip. Oberflächenrisse können durch die *Kapillarwirkung* benetzende Flüssigkeiten aufsaugen. Nach oberflächlichem Entfernen bleiben Reste im Spalt zurück (→).

Fehleranzeige. Durch Aufbringen einer zweiten Entwicklerflüssigkeit oder eines -pulvers entstehen am Rissausgang farbige Markierungen.

Anwendung: Eindringverfahren sind für *alle* Arten von Werkstoffen zur Ortung von Oberflächenrissen geeignet. Für Massenteile sind automatische Erkennungssysteme mit Kameras und Rechner entwickelt worden (Fa. Deutsch).

14.9.3 Magnetische Prüfungen (DIN EN ISO 9934/02)

Prüfprinzip. Die ferromagnetischen Werkstoffe (Eisen-Triade im PSE: Fe, Ni, Co) lassen sich dauerhaft magnetisieren. Im fehlerfreien Werkstück verlaufen die Feldlinien ungestört (Bild 14.33a).

Querrisse stören den Verlauf und lenken die Feldlinien nach außen, wo sie ein Streufeld erzeugen (Bild 14.33a). Längsrisse sind nicht nachweisbar, wenn die Feldlinien das Teil nur in Längsrichtung durchfluten.

Um beide Fehlerarten zu erfassen, werden verschiedene Arten der Magnetisierung gleichzeitig angewandt.

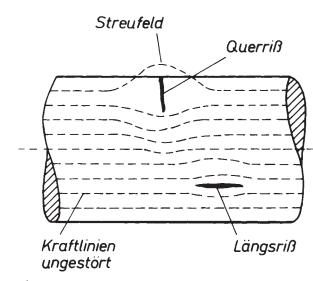
Bild 14.33b zeigt die Kombination von Jochmagnetisierung mit Stromdurchflutung. Der mit Gleichstrom gespeiste Magnet erzeugt im Prüfling ein *längsgerichtetes Magnetfeld*. Es erfassst Querfehler im ganzen Querschnitt. Gleichzeitig wird ein starker Wechselstrom durch den Prüfling selbst geschickt, der ein *schraubenförmiges Wechselfeld* erzeugt. Damit werden Längsfehler in der Randzone erfasst.

Einschlüsse: Gasblasen, Schlackenteilchen, Sandeinschlüsse, Lunker und Bindefehler in Schweißnähten.

Daneben können noch auftreten: Materialverwechslung, falsche Einhärtetiefe oder Kernfestigkeit durch fehlerhafte Wärmebehandlung.

Begriff: Kapillare = Haarröhrchen

Einige Verfahren verwenden Flüssigkeiten, die unter UV-Licht hell aufleuchten (Met-L-Check und UV-Apenol-Verfahren).



a)

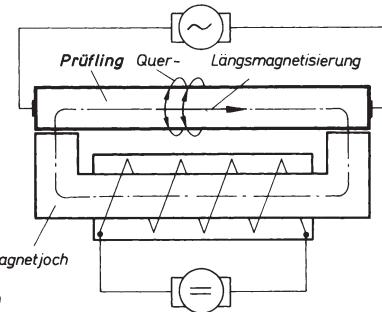


Bild 14.33 Magnetische Rissprüfung,
a) Prüfling mit Längsmagnetisierung,
b) Längs- und Quermagnetisierung kombiniert

Fehleranzeige durch Magnetpulver (Fe_3O_4 oder Fe-Teilchen) in Öl aufgeschlämmt. Im Streufeld werden die Teilchen als Brücke über den Spalt festgehalten und bilden eine *Raupe*.

Induktive Anzeige. Das Streufeld erzeugt in einer kleinen Spule, der *Sonde*, Induktionsströme, die den Fehler akustisch oder optisch am Oszilloskopenschirm anzeigen.

14.9.4 Magnetinduktive Prüfung (Wirbelstromprüfung, DIN EN 12084)

Prüfprinzip: In einer vom Wechselstrom durchflossenen Spule befindet sich ein metallischer Werkstoff (der Prüfling). Durch *Induktion* entstehen in ihm elektrische Ströme. Sie werden als Wirbelströme bezeichnet, weil sie keine eindeutige Richtung wie in einem definierten Leiter (Draht) besitzen.

Die Wirbelströme erzeugen ein magnetisches Feld, das rückwirkend die *Daten* der Spule verändert. Nach dem Ohm'schen Gesetz hängt bei konstanter Spannung der Strom vom elektrischen Widerstand des Prüflings ab. Damit wirken sich alle Gefügeabweichungen, welche den elektrischen Widerstand verändern, auf die Wirbelströme aus.

Messverfahren: Grundsätzlich wird der Prüfling mit einem fehlerfreien gleichen Teil verglichen. Von diesem *Referenzteil* werden die Daten festgehalten und mit denen des Prüflings verglichen.

Fehleranzeige: Änderung im Ausschlag eines Messinstrumentes oder des Kurvenbildes am Oszilloskop. Serienprüfung ist leicht automatisierbar.

14.9.5 Ultraschallprüfung (DIN EN 583, Teil 1–5/97–01)

Prüfprinzip: Schallwellen pflanzen sich in Metallen als mechanische Schwingung geradlinig mit hoher Geschwindigkeit fort. Sie werden an *Grenzflächen* stark reflektiert, so dass der weiterlaufende Schall geschwächt wird.

Die Werkstoffprüfung benutzt Schallwellen, deren Frequenzen über dem Hörbereich liegen und darum *Ultraschall* genannt werden.

Je kleiner der Fehler, desto höher die notwendige Prüffrequenz zur Entdeckung.

Bei der Ultraschallprüfung vergleicht man die Schwächung oder die Reflexion des Schalls an inneren Fehlern mit den Daten eines fehlerfreien Werkstückes.

Fehlerarten und Unterschiede, die magnetinduktiv erfasst werden können:

- Reinheitsgrad von Reinstmetallen
- Gehalt an Legierungselementen
- Wärmebehandlungszustand (Härte, Festigkeit, Einfärbungstiefe)
- Querschnittsminderung durch innere Fehler

Anwendungen:

Fehlerprüfung an Halbzeugen mit zwei Durchlaufspulen und automatischer Aussortierung (Defektograph). Geschwindigkeit des Durchlaufmaterials bis zu 60 m/min.

Fehlerprüfung an Einzelteilen mit einer Tastspule. Sie kann auch in Bohrungen eingeführt werden. Defektometer (Circograph, Dr. Förster).

Sortierung von Teilen mit z.B. unterschiedlicher Härte, Zusammensetzung, Reinheitsgrad, Porosität u.a.

Dickenmessung von Wanddicken, Folien, Isolier- und Platterschichten von einer Seite mit Tastspulen, von beiden Seiten mit Gabelspulen.

Grenzflächen im Material sind z.B. Risse und Trennflächen zwischen Phasen wie z.B. Kristalle verschiedener Dichte, Schlackenteilchen und Gasblasen.

Frequenzbereiche:

Hörbereich: 10...20000 Hz
Ultraschallbereich: 0,5...20 MHz

Erzeugung des Ultraschalls:

Piezoelektrischer Effekt (M. und P. Curie): Einige Kristalle, z.B. Quarz, laden sich bei elastischer Verformung (unter Einwirkung von Kräften) elektrisch auf, so dass eine Spannung gemessen werden kann (Piezoelektrizität: piezo = drücken). Umgekehrt werden beim Anlegen einer hochfrequenten Wechselspannung Schwingungen gleicher Frequenz erzeugt (200 kHz...25 MHz). Sie sind als *Sender* und *Empfänger* geeignet.

Durchschallungsverfahren arbeiten mit getrennten Sende- und Empfangsköpfen, der Schall muss den *dazwischenliegenden* Prüfling durchdringen. Bei Innenfehlern wird der Schall stärker geschwächt als im fehlerfreien Werkstoff. Am Empfangskopf entsteht eine *kleinere* Spannung, die am Messgerät angezeigt wird.

Die Tiefenlage des Fehlers kann beim Durchschallungsverfahren nicht bestimmt werden.

Impuls-Echo-Verfahren. Der Prüfkopf enthält Empfänger und Sender in einem Bauelement vereinigt und sendet Ultraschallstöße (Impulse) von sehr kurzer Dauer ($1\ldots10 \mu\text{s}$) in kurzen Abständen aus. Zwischen den Impulsen ist der Quarz elektronisch als Empfänger für die schwächeren Reflexe von den Grenzflächen geschaltet.

Fehleranzeige: Auf dem Bildschirm sind die Spannungsimpulse als Zacken auf der x-Achse zu sehen (Bild 14.34a). Der Schall durchläuft den Prüfling mit der Dicke s , wird an der Rückwand reflektiert und trifft als Echo wieder auf den Prüfkopf. Während dieser Laufzeit wird der Weg s zweimal zurückgelegt.

Am Bildschirm ist das Eingangssignal und nach der Laufzeit Δt das Rückwandsignal (Echo) zu sehen. Wegen der konstanten Schallgeschwindigkeit kann die x-Achse in Längeneinheiten geeicht werden. Bei Fehlern im Werkstoff liegt das *Fehlersignal* (Fehlerecho) zwischen den beiden Zacken (Bild 14.34b). Seine Tiefenlage kann abgelesen werden.

Beim Impuls-Echo-Verfahren kann die Tiefe des Fehlers bestimmt werden. Die Probenrückseite muss nicht zugänglich sein.

Nachweisgrenzen: Fehler, die parallel zur Schallrichtung liegen, ergeben keine Reflexion. Zum Aufspüren werden Winkelköpfe eingesetzt, die den Schall schräg einleiten. Dabei sind Sender und Empfänger getrennt.

Die Prüfergebnisse unterliegen zahlreichen Einflüssen, die vom Prüfling, den Prüf- und Messgeräten und vom Beobachter ausgehen. Bei unsi-

Prüfkopf ist eine kleine gekapselte Einheit aus Schwingquarz, Dämpfung und Zuleitung, die auf den Prüfling aufgesetzt wird.

Ankoppelung: Wird der Prüfkopf trocken auf den Prüfling aufgesetzt, hindert der Luftspalt die Schallwellen. Darum wird die Luft durch einen Stoff höherer Dichte ersetzt (als *Koppelungsmittel* dienen Wasser, Glyzerin, Pasten).

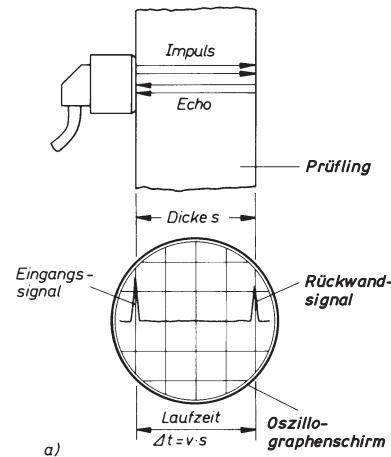


Bild 14.34a Impuls-Echo-Verfahren, schematische Darstellung, Prüfling fehlerfrei

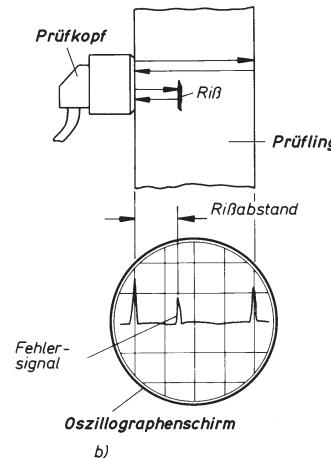


Bild 14.34b Prüfling mit Riss

Anwendung der Ultraschallprüfungen: Günstige Kosten und große Tiefenwirkung führen zu einer breiten Anwendung für Metalle, Gummi und Polymere. Fehlerkontrolle an Schmiede- und

cheren Aussagen wird es durch andere Verfahren ergänzt.

Eine neuere Anwendung der Ultraschalltechnik ist das Ultraschallmikroskop (14.8.1).

14.9.6 Röntgen-/Gamma-Strahlen-Prüfung (DIN EN 444/94)

Röntgen- und Gammastrahlen gleichen physikalisch den Lang-, Mittel- und Kurzwellen der Nachrichtentechnik und dem Licht. Es sind elektromagnetische Schwingungen, die sich geradlinig fortpflanzen. Sie unterscheiden sich durch wesentlich kleinere Wellenlängen und dadurch höhere Frequenzen (Tabelle 14.5).

Auf den kleinen Wellenlängen beruht ihre Fähigkeit, zwischen den Atomen in die Materie einzudringen und sie bei genügend hoher Energie (Frequenz) auch zu durchdringen.

Je kleiner die Wellenlänge, umso größer ist die prüfbare Werkstoffdicke.

Diese Strahlen reagieren beim Durchgang durch Materie auf verschiedene Weise. Daraus ergeben sich wichtige Anwendungen zur Werkstoffuntersuchung (→ Übersicht):

Zur zerstörungsfreien Fehlersuche wird vorwiegend der erste Effekt ausgenutzt. Bei Gegenwart von inneren Fehlern (Hohlräumen) werden die Strahlen weniger geschwächt als bei massivem Werkstoff. Die austretende Strahlung zeigt dadurch Intensitätsunterschiede. Sie werden

- optisch betrachtet (Leuchtschirm, Monitor),
- fotografisch festgehalten (Dokumentation),
- durch Messgeräte angezeigt.

Erzeugung der Strahlen

Röntgenstrahlen. In einer Röntgenröhre (Bild 14.35) werden von der glühenden Kathode Elektronen ausgesandt. Sie treffen, durch die angelegte Hochspannung beschleunigt, auf die Wolfram-Anode. Ihre hohe Geschwindigkeit wird dabei von der Elektronenhülle der W-Atome abgebremst. Die Bewegungsenergie wandelt sich größtenteils in Wärme um, ein kleiner Teil in

Gussrohreilen, Rissprüfung an Schienen und Rädern von Schienenfahrzeugen, Prüfung von Schweißnähten und Klebverbindungen, Dickenmessung.

Tabelle 14.5 Spektrum der elektromagnetischen Wellen

Frequenz f in Hz	Wellenlänge λ	Wellenart
50	$6 \cdot 10^3$ m	technischer Wechselstrom
$10^6 \dots 10^{10}$	300 m...3 cm	Rundfunk und Fernsehen
10^{13}	30 μm	Infrarot
	0,4...0,8 μm	sichtbares Licht
$10^6 \dots 10^{16}$	30 nm	Ultraviolet
$10^{18} \dots 10^{22}$	0,3 nm... $3 \cdot 10^{-5}$ nm	Röntgen- und γ -Strahlen

Hinweis: Das Produkt aus Wellenlänge λ und Frequenz f ist die Lichtgeschwindigkeit c .

Reaktion	Ausnutzung
Absorption der Strahlen durch die Materie, (Schwächung)	Röntgen-Grobstrukturprüfung, (Gefügeuntersuchung auf Fehler)
Beugung an Kristallgitterebenen	Röntgen-Feinstrukturanalyse, (Bestimmung von Kristallgittern und -fehlern)
Anregung der Atome zur Eigenstrahlung	Röntgen-Fluoreszenz, Bestimmung von Legierungsbestandteilen (Spektralanalyse), Anzeige von Strahlen auf Leuchtschirmen und Filmen

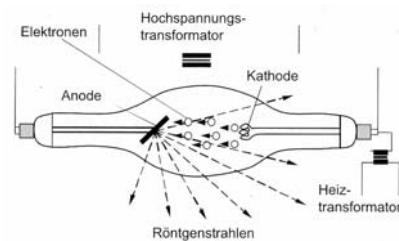


Bild 14.35 Röntgenröhre (schematisch)

eine Bremsstrahlung, in die sog. *Röntgenstrahlung* (C.W. Röntgen, 1895). Deren Frequenz steigt mit der Höhe der angelegten Hochspannung.

Röntgenstrahlen bestehen aus einem Spektrum verschiedener Wellenlängen, Gammastrahler senden eine *konstante* Wellenlänge aus.

Gammastrahlen entstehen durch Kernzerfall radioaktiver Elemente. Aus Kostengründen werden keine natürlichen Strahler (Radium, Thorium), sondern die instabilen Isotope einiger Elemente benutzt, die in Kernreaktoren entstehen (Tabelle 14.6). Gammastrahlen sind kurzwelliger als Röntgenstrahlen (größere Eindringtiefe), benötigen aber längere Belichtungszeiten für Filme.

Strahlenquelle ist das eigentliche Isotop, etwa 0,5...3 mm, zylinderförmig. Sie ist gasdicht in die *Strahlerkapsel* mit Wolfram-Abschirmung eingeschlossen, damit die Strahlung nicht allseitig austreten kann.

Da Gammastrahler nicht „abgestellt“ werden können, besteht das vollständige Isotopengerät aus einer massiven Abschirmung, die meist kugelförmig die Strahlerkapsel umschließt (außen Pb, innen W). Die Strahlerkapsel kann ohne Gefährdung des Personals, evtl. fernbedient, der Abschirmung entnommen werden.

Da sie wesentlich kleiner als eine Röntgenröhre ist, lässt sie sich auch *dichter* an den Prüfling heranbringen, wie z.B. beim Isotopenmolch, einem Gerät, das zur Schweißnahtprüfung auf Baustellen durch Rohre gezogen werden kann.

Fehlnachweismöglichkeiten

Filmaufnahmen halten die geometrische Form des Fehlers dokumentarisch fest, ein Vorteil gegenüber den Ultraschallverfahren.

Die aus dem Prüfling austretenden Strahlen treffen auf eine doppelbeschichtete Filmfolie. Intensitätsunterschiede setzen sich in Schwärzungsunterschiede des Films um. Um hohe Kontraste zu erzielen, werden Verstärkungsfolien beigelegt und die Filmrückseite mit Bleifolien abgedeckt, um Streustrahlen fernzuhalten.

Die entstehende Wärme muss durch Öl- oder Wasserkühlung abgeführt werden. Zur besseren Handhabung und Erfüllung der Vorschriften für Hochspannung und Strahlenschutz ist die Röhre nebst Transformator in ein Gehäuse eingebaut (Eintankanlage).

Hinweis: Das Arbeiten mit Röntgen- oder Gammastrahlen kann zu gesundheitlichen Schäden führen (Verbrennungen, Haarausfall, Veränderung von Erbfaktoren, Krebs).

Tabelle 14.6: Künstliche Gammastrahler

Isotop	Halbwertszeit (HWZ)	0,1-Wert Schicht (Blei)	Herstellung
Cobalt 60Co	5,2 Jahre	42 mm	Neutronenbeschuss (⁵⁹ Co)
Cäsium 137Cs	30 Jahre	24 mm	Uranspaltung
Indium 192In	74 Tage	11,5 mm	Neutronenbeschuss

Halbwertszeit: Zeitraum, nach der die Hälfte der strahlenden Atome zerfallen ist.

Zehntelwertschicht: Für den Strahlenschutz wichtige Größe, die Dicke eines Bleibleches, das die Intensität der Strahlung auf 1/10 ab schwächen kann.

Bildgüte: Zur Kontrolle der Fototechnik werden genormte Drahtstege DIN EN 462 (7 Drähte mit gestufterem Durchmesser im Abstand von 5 mm in Kunststoff gebettet) auf der filmfernen Seite angebracht und mit abgebildet. Mit Hilfe des dünnsten noch erkennbaren Drahtes wird eine Bildgütezahl festgelegt und damit die Bildgüte bewertet.

Anwendung: Kontrolle von Schweißnähten und Gussteilen mit Dicken bis 100 mm bei Stahl, 400 mm bei Al; Lagerschalen für Verbrennungsmotoren, Revisionsuntersuchungen in Kessel-, Brücken- und Flugzeugbau.

Leuchtschirm. Röntgenstrahlen regen bestimmte Kristalle zur Abgabe sichtbarer Strahlen (grün-gelb) an. Diese Stoffe, auf einer Platte aufgetragen, bilden den Leuchtschirm. Auf ihm erscheint ein Schattenbild des Prüflings (Fehler hell), jedoch mit geringer Lichtstärke.

Röntgenbild-Verstärkerröhre: Mit Hilfe der Elektronik kann das Röntgen-Leuchtschirmbild verkleinert und verstärkt werden. Es erhält dann eine 10^3 -fache Helligkeit auf dem Monitor und kann fernsehtechnisch übertragen werden. Beobachter können dann in einem strahlengeschützten Raum sitzen.

Die Verarbeitung der Messdaten im Computer (Tomographie) ist ebenfalls möglich.

Anwendung: bei Leichtmetallen und dünnen Stahlteilen und Kunststoffen (Reifen). Der Beobachter muss durch Bleiglas vor der Streustrahlung geschützt werden.

Anwendung: Prüfung von längs- und spiralschweißten Rohren.

DIN EN 444/94 Grundlagen für die Durchstrahlungsprüfung

Mit industrieller 3-D-Computer-Tomographie lassen sich Dichteänderungen und Fehler nachweisen, sowie ihre Art, Geometrie und Lage im Bauteil charakterisieren.

Tabelle 14.7: Einsatzbereiche zerstörungsfreier Prüfverfahren

Verfahren	physikalischer Effekt	Fehler-prüfung	Anwendbar zur Bestimmung/Ermittlung von			
			Fehler-lage	Fehler-größe	Eigen-schaften	Messen
Eindringverfahren	Kapillarwirkung	+	+	(+)	–	–
Magnetpulver-Prfg. Magnetinduktion	Streufuss Permeabilität	+	+	(+)	–	–
Wirbelstromprüfung	elektr. Leitfähigkeit	+	+	+	+	(+)
Durchschallung Impuls-Echo-Verf. Klangprobe	Absorption Reflexion Eigenresonanz	(+) + +	– + –	(+) (+) –	+	–
Röntgenstrahlen Grobstruktur Feinstruktur	Absorption Interferenz	+	(+)	(+)	(+)	(+)
Gammastrahlen	Absorption	+	(+)	(+)	–	(+)

+ geeignet (+) bedingt geeignet – nicht geeignet

Literaturhinweise, Werkstoffprüfung:

- | | |
|-----------------------------|---|
| DIN-Taschenbücher: | Materialprüfnormen Nr. 19, 56, 205, Beuth-Verlag |
| Grosch, J.: | Schadenskunde im Maschinenbau. Expert-Verlag, 2003 |
| Petzow G.: | Metallographisches keramographisches, plastographisches Ätzen, Gebrüder Bornträger Berlin-Stuttgart, 1994 |
| Steeb/Basler/Deutsch: | Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung, Expert-Verlag, 1993 |
| Deutsch/Platte/Vogt: | Ultraschallprüfung, Springer-Verlag, 1997 |
| Schott, G.: | Werkstoffermüdung – Ermüdungsfestigkeit, Wiley-VCH, 1997 |
| Schumann/Oettel: | Metallographie, Wiley-VCH, Weinheim, 2004 |
| Flegler/Heckman/Klomparens: | Elektronenmikroskopie, Spektrum Akademischer Verlag, 1995 |

Anhang A: Die systematische Bezeichnung der Werkstoffe

A.1 Kennzeichnung der Stähle

Die Europäische Norm DIN EN 10027 hat ältere Normen (DIN 17006 und DIN 17007) abgelöst.

Viele DIN-Normen enthalten noch die alten Bezeichnungen, ebenso Lehrbücher und Literatur. Einen Vergleich einiger Kurznamen enthält Tabelle A.1.

A.1.1 Bezeichnungssystem für Stähle

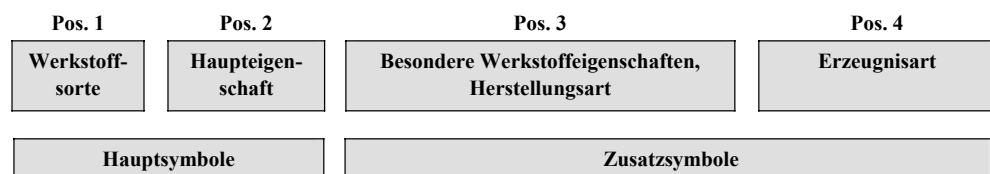
Wie Tabelle A.1 zeigt sind die Kurznamen der *legierten* Stähle nur gering verändert worden. Dagegen gelten für die unlegierten Stähle völlig neue Kurznamen. Sie werden abhängig von der Verwendung des Stahles gebildet, weitere Symbole sind je nach Verwendungszweck unterschiedlich.

Tabelle A.1: Vergleich alter und neuer Kurznamen für Stähle

DIN 17006 u.a.	DIN EN 10027-1
St 37-3	S235J2G3
StE 355	S355N
StE 355 TM	S355M
TStE 355	P355NL1
Ck 35, Cm 35	C35E, C35R
57 NiCrMoV 7 7	57NiCrMoV7-7
X 46 Cr 13	X46Cr13
X 10CrNiTi 18 10	X10CrNi18-10
S-6-5-2-5	HS6-5-2-5
GS-38	GE200
GS-17 CrMo 5 5	G17CrMo5-5
G-X 22 CrMoV 12 1	GXCrMoV12-1

A.1.2 Aufbau des Kurznamens DIN EN 10027-1

Der Kurzname besteht aus einer Folge von Buchstaben und Ziffern auf 4 Positionen:



Beispiel: Baustahl S355J2W+Z

1. S	2. 355	3a. J2	3b. W	+ 4. +Z
Anwendungsbereich Stahlbau	Streckgrenze R_{eff}	Vorgeschriebene Kerbschlagarbeit	Wetterfester Stahl	Feuerverzinkt

Tabelle A.2: Symbole für den Anwendungsbereich auf Pos. 1; Zeichen (G): Wahlweise für Stahlguss.

Symbol	Verwendungszweck	Symbol	Verwendungszweck
B	Betonstahl	M	Elektroblech
(G) C	Unlegierte Stähle mit < 1 % Mn	(G) P	Stähle für Druckbehälter
(G) --	Niedriglegierte Stähle mit < 5 % Σ LE, unlegierte Stähle mit > 1 % Mn, Automatenstähle	R	Schienenstahl
D	Flacherzeugnisse zum Kaltumformen	(G) S	Stähle für den Stahlbau
(G) E	Stähle für den Maschinenbau	T	Feinst- und Weißblech
H	Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus höherfesten Stählen	(G) X	Legierte Stähle mit < 5% Σ LE, (hochlegierte Stähle)
L	Stähle für Leitungsrohre	Y	Spannstahl

A.1.3 Stähle für den Stahlbau

Hauptsymbole		Zusatzsymbole								
1 Bereich	2 Mech. Eigenschaften	3a Herstellungsart, zusätzliche mechanische Eigenschaften				3b Eignung für bestimmte Einsatzbereiche bzw. Verfahren		4		
G S	z.B. Stähle nach DIN EN 10025-2 -3 -4 -5 -6 ¹⁾ G wahlweise vorgestellt	Mindeststreckgrenze R_e, min f. d. kleinsten Erzeugnisbereich	Kerbschlagarbeit KV				C Bes. Kaltformbarkeit D Für Schmelztauchüberzüge E Für Emaillierung F Zum Schmieden H Für Hohlprofile L Für tiefe Temperaturen M Thermomechanisch, normalisierend gewalzt N Vergütet P Zum Vergüten S Schiffbau T Für Rohre W Wetterfest	Tab. A.11 A.12 A.13		
A_v (J)	27	40	60							
Symbol	J	K	L							
Schlagtemperatur in °C										
Temp.	RT	0	-20	-30	-40	-50				
Symb.	R	0	2	3	4	5				
A	Auscheidungshärtend									
M	Thermomechanisch, normalisierend gewalzt									
N	Vergütet									
Q	Andere Merkmale (evtl. 1 oder 2 Folgeziffern)									

Beispiele:

S235JRC: (S) Stahlbaustahl mit $R_e > 235$ MPa, KV = 27 J, bei (R) Raumtemperatur, (C) kaltumformbar,

S355J2+CR: (S) Stahlbaustahl mit $R_e > 355$ MPa, (J) KV = 27 J bei (2) –20 °C, (+CR) kaltgewalzt (→ A.12),

S460NLH: (S) Stahlbaustahl mit $R_e > 460$ MPa, (N) normalisierend gewalzt, (L) für tiefere Temperaturen, kaltzäh, (H) Hohlprofil

A.1.4 Stähle für Druckbehälter

Hauptsymbole		Zusatzsymbole								
Pos. 1	2	3a			3b		4			
G P	z.B. Stähle DIN EN 10028 Stahlguss DIN EN 10213	R_e, min f. d. kleinsten Erzeugnisbereich	B	Gasflaschen		H Hochtemperatur L Tieftemperatur R Raumtemperatur X Hoch- u. Tieftemp.	Tab. A.11 A.12 A.13			
			M	Thermomechanisch,						
			N	Normalisierend gewalzt.						
			Q	Vergütet						
			S	Einfache Druckbehälter						
			T	Rohre						
			G	Andere Merkmale (evtl. 1 oder 2 Folgeziffern)						

Beispiele:

P355M: (P) Druckbehälterstahl mit $R_e \geq 355$ MPa, (M) thermomechanisch gewalzt, KV bei –20 °C geprüft,

P355ML1: desgl. für Tieftemperatur geeignet, kaltzäh, KV nach Tab. 4.10.

P460QH: Druckbehälterstahl mit $R_e \geq 460$ MPa, (Q) vergütet, (H) für höhere Temperaturen. Nach Norm wird eine bestimmte 0,2%-Dehngrenze bei 300 °C gewährleistet.

A.1.5 Stähle für den Maschinenbau

Hauptsymbole		Zusatzsymbole						
Pos. 1	2	3a			3b		4	
G E	wie oben	G	Andere Merkmale, evtl. mit 1 oder 2 Folgeziffern		C	Eignung zum Kaltziehen		A.12
z.B. Stähle DIN EN 10025-2 Stahlguss DIN EN 10293		Beispiele: E295: Baustahl mit $R_e \geq 295$ MPa; GE200: Stahlguss mit $R_e \geq 200$ MPa						

A.1.6 Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus höherfesten Stählen zum Kaltumformen

Pos. 1	2	3a				3b		4
H	$R_{e, \min}$ oder mit Zeichen T DIN EN 10268, 10336	B C I LA M	Bake Hardening Komplexphase Isotroper Stahl Niedrig legiert Thermomech. gewalzt	P T X Y	P-legiert TRIP-Stahl Dualphasen- stahl IF,(interstitiell frei)	D	Für Schmelz- tauch- überzüge	
								Tab. A.13

Beispiel: H420M+Z: (H) Blech mit $R_{e, \min} \geq 420$ MPa, (M) thermomechanisch gewalzt, (Z) feuerverzinkt

A.1.7 Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus weichen Stählen zum Kaltumformen.

Pos. 1	2	3				4
D	Cnn Dnn Xnn nn	Kaltgewalzt Warmgewalzt, für unmittelbare Kaltumformung Walzart (kalt/warm) nicht vorgeschrieben Kennzahl nach Norm	D EK ED H T G	Für Schmelztauchüberzüge Für konv. Emaillierung Für Direktemallierung Für Hohlprofile Für Rohre Andere Merkmale		Tab. A.12 A.13
z.B. Bleche + Bänder DIN EN 10111, 10130, 10209, 10327	Beispiele: DC04H: (FeP04) (H) Blech für Hohlprofile. DC03+ZE: (FeP03) (+ZE) Blech elektrolytisch verzinkt. DX51D+Z: (FeP02G) (D), Blech für Schmelztauchüberzüge, (+Z) verzinkt.					

A.1.8 Nach der chemischen Zusammensetzung bezeichnete Stähle

Bei Stählen, die für eine Wärmebehandlung vorgesehen sind, werden die Gehalte an C und anderen LE (für das Umwandlungsverhalten wichtig) im Kurznamen angegeben.

A.1.8.1 Unlegierte Stähle mit mittlerem Mn-Gehalt < 1 %

Pos. 1	2	3				4	
G C z.B. Vergütungs- Stähle DIN EN 10083-1	nn	Kennzahl = 100-facher C-Gehalt	C D E R	Zum Kaltumformen Zum Drahtziehen Vorgeschrieb. max. S-Gehalt, Vorgeschrieb. S-Bereich (%)	S U W G	Für Federn Für Werkzeuge Für Schweißdraht Andere Merkmale	Tab. A.12

Beispiele: C60S: Stahl mit $60/100 = 0,6\%$ C für (S) Federn

C35E: Vergütungsstahl mit $35/100 = 0,35\%$ C, (E) max. S-Gehalt vorgeschrieben

C35R: Vergütungsstahl wie vorstehend, Automaten sorte

A.1.8.2 Niedriglegierte Stähle (mittlerer Gehalt der LE < 5 %) ohne Zeichen, auch unle- gierte Stähle mit > 1 % Mn, und Automatenstähle.

Pos. 1	2	2a			3	4
G — z.B. Einsatzstähle DIN EN 10084, Automatenstähle DIN EN 10087	nn	Kennzahl = 100-facher C-Gehalt	LE-Symbole nach fallenden Gehalten geordnet, da- nach Kennzahlen mit Bindestrich getrennt in gleicher Folge		—	Tab. A.11 A.12
Kennzahlen sind Vielfache der LE-%. Die Faktoren sind :						
	1000 100	Bor, Ce, N, P, S	10 4	Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr. Cr, Co, Mn, Ni, Si, W		

Beispiele zu niedrig legierten Stählen:

- 9SMn28:** Automatenstahl mit $9/100 = 0,09\%$ C, (S28)/**100** = 0,28 % S, Mn nach Norm
25CrMo4+QT: Niedriglegierter Stahl mit $25/100\%$ C, (Cr4)/4 = 1 % Cr, Mo nach Norm, (QT) vergütet
GS20MnMoNi5-5: (G) Stahlguss, (20) = 0,2 % C, (Mn 5)/4 = 1,25 % Mn, (Mo5)/10 = 0,5 % Mo, Ni nach Norm

A.1.8.3 Hochlegierte Stähle, ein LE hat über Anteil), Die Zahlen geben die wahren %-Gehalte in der Reihenfolge der vorstehenden LE an.

Pos.1	2		2a	3	4
G X	nn	Kennzahl = 100-facher C-Gehalt	LE-Symbole nach fallenden Gehalten geordnet, danach die %-Gehalte der Haupt-Legierungselemente mit Bindestrich in gleicher Folge	—	Tab. A.11 A.12
z. B. Nichtrostende Stähle					
DIN EN 10088					

Beispiele: X6CrNiMo18-9: hochlegiert, mit $6/100 = 0,06\%$ C, (Cr18) = 18 % Cr, (Ni 9) = 9 % Ni, Mo nach Norm.
GX3CrNi13-4: (G) hochlegierter Stahlguss, mit $3/100 = 0,03\%$ C, (Cr13) = 13 % Cr und (4 Ni) = 4 % Ni.

A.1.8.4 Schnellarbeitsstähle

Pos.1	2	2a	3	4
HS	nn	Prozentualer Gehalt der LE in der Folge W-Mo-V-Co (Bindestrich)	—	Tab. A.12

Beispiel: HS6-5-2: (HS) Schnellarbeitsstahl mit 6 % W, 5 % Mo, 2 % V und C-Gehalt nach Norm.

Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse (Pos. 4)**Tabelle A.11:** Für besondere Anforderungen an das Erzeugnis

+C	Grobkornstahl	+H	Mit besonderer Härbarkeit
+F	Feinkornstahl	+Z15/25/35	Mindestbruch einschnürung Z (senkr. z. Oberfläche) in %

Tabelle A.12: Zusatzsymbole für den Behandlungszustand (Pos.4)

+A	Weichgeglüht	+M	Thermomechanisch umgeformt
+AC	Auf kugelige Carbide geeglüht	+N	Normalgeglüht / normalisierend umgeformt
+AR	Wie gewalzt (ohne bes. Bedingungen)	+NT	Nomalgeglüht und angelassen
+AT	Lösungsgeglüht	+P	Ausscheidungsgehärtet
+C	Kaltverfestigt	+Q	Abgeschreckt
+Cnnn	Kaltverfestigt auf min. $R_m = nnn$ MPa	+QA	Luftgehärtet
CPnnn	Kaltverfestigt auf min. $R_{p0,2} = nnn$ MPa	+QO	Ölgehärtet
+CR	Kaltgewalzt	+QT	Vergütet
+DC	Lieferzustd. dem Hersteller überlassen	+QW	Wassergehärtet
+HC	Warm-kalt-geformt	+RA	Rekristallisationsgeglüht
+I	Isothermisch behandelt	+S	Behandelt auf Kaltscherbarkeit
+LC	Leicht kalt nachgezogen / gewalzt	+SR	Spannungsarmgeglüht
+T	Angelassen	+U	Unbehandelt
+TH	Behandelt auf Härtspanne	+WW	Warmverfestigt

Tabelle A.13: Symbole für die Art des Überzuges (Pos. 4)

+A	Feueraluminiert	+SE	Elektrolytisch verzинnt
+AS	Mit einer Al-Si-Legierung überzogen	+T	Schmelzauchveredelt mit PbSN
+AZ	Mit einer AlZn-Legierung (> 50 % Al) überzogen	+TE	Elektrolyt. mit PbSn überzogen (Terne)
+CE	Elektrolytisch spezialverchromt (ECCS)	+Z	Feuerverzinkt
+CU	Cu-Überzug	+ZA	Mit einer ZnAl-Legierung (> 50 % Zn) überzogen
+IC	Anorganische Beschichtung	+ZE	Elektrolytisch verzinkt
+OC	Organische Beschichtung	+ZF	Diffusionsgeglühte Zn-Überzüge (galvannealed)
+S	Feuerverzinnt	+ZN	ZnNi-Überzug (elektrolytisch)

A.1.9 Nummernsystem nach DIN 10027-2/92

Stähle werden mit einer "Eins" mit Punkt und einer vierstelligen Ziffernfolge bezeichnet.

Die ersten beiden Ziffern der Ziffernfolge geben die **Stahlgruppe** an, in die der Stahl gehört (Tafel A.14), die beiden letzten sind **Zählziffern** innerhalb der Gruppe.

Das System unterscheidet unlegierte und legierte Stähle, die jeweils in Grund-, Qualitäts- und Edelstähle unterteilt werden.

Werkstoff	Stahlgruppen-
Stahl	nummer
1.	2080
Hochlegierter	
Cr-Werkzeugstahl	X210Cr12

Tabelle A.14: Werkstoffnummern (Die Zählziffern sind **mit nn** bezeichnet)

Unlegierte Stähle

Werkstoffnummer	Beschreibung
Grundstähle	
1.00nn und 1.90nn	Grundstähle der Norm DIN EN 10025, z.B. EN-S235JR (St 37-2), EN-E295 (St-50)

Qualitätsstähle

1.01nn u. 1.91nn	Allgemeine Baustähle mit $R_m < 500 \text{ MPa}$
1.02nn u. 1.92nn	Sonstige, nicht für eine Wärmebehandlung bestimmte Baustähle mit $R_m < 500 \text{ MPa}$
1.03nn u. 1.93nn	Stähle mit im Mittel $< 0,12\% \text{ C}$ oder $R_m < 400 \text{ MPa}$
1.04nn u. 1.94nn	Stähle mit im Mittel $\geq 0,12 < 0,25\% \text{ C}$ oder $R_m \geq 400 < 500 \text{ MPa}$
1.05nn u. 1.95nn	Stähle mit im Mittel $\geq 0,25 < 0,55\% \text{ C}$ oder $R_m \geq 500 < 700 \text{ MPa}$
1.06nn u. 1.96nn	Stähle mit im Mittel $\geq 0,55\% \text{ C}$ $R_m \geq 700 \text{ MPa}$
1.07nn u. 1.97nn	Stähle mit höherem S- oder P-Gehalt

Edelstähle

1.10nn	Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften
1.11nn	Bau-, Maschinenbau- und Behälterstähle mit $< 0,50\% \text{ C}$
1.12nn	Maschinenbaustähle mit $\geq 0,50\% \text{ C}$
1.13nn	Bau-, Maschinenbau- und Behälterstähle mit besonderen Anforderungen
1.15nn bis 1.18nn	Werkzeugstähle

Legierte Stähle

Qualitätsstähle

1.08nn u. 1.98nn	Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften	
1.09nn u. 1.99nn	Stähle für verschiedene Anwendungszwecke	

Edelstähle

Werkzeugstähle					
1.20nn Cr	1.21nn Cr-Si, Cr-Mn, Cr-Mn-Si	1.22nn Cr-V, Cr-V-Si, Cr-V-Mn, Cr-V-Mn-Si	1.23nn Cr-Mo, Cr-Mo-V, Mo-V	1.24nn W, Cr-W	1.25nn W-V, Cr-W-V
1.26nn außer Klassen 24, 25, 27	Werkstoffe	1.27nn mit Ni	1.28nn Sonstige		

Verschiedene Stähle

1.32nn Schnellarbeitsstähle <i>ohne</i> Co	1.33nn Schnellarbeitsstähle <i>mit</i> Co	1.35nn Wälzgerätestähle	1.36nn Werkstoffe mit bes. magnetischen Eigenschaften <i>ohne</i> Co
1.37nn Werkstoffe mit besonderen magnetischen Eigenschaften <i>mit</i> Co	1.38nn Werkstoffe mit besonderen physikalischen Eigenschaften <i>ohne</i> Ni	1.39nn Werkstoffe mit besonderen physikalischen Eigenschaften <i>mit</i> Ni	

Chemisch beständige Stähle

1.40nn Nichtrostende Stähle mit < 5 % Ni <i>ohne</i> Mo, Nb und Ti	1.41nn Nichtrostende Stähle mit < 2,5 % Ni <i>mit</i> Mo, <i>ohne</i> Nb und Ti	1.43nn Nichtrostende Stähle mit ≥ 2,5 % Ni <i>ohne</i> Mo, Nb und Ti	1.44nn Nichtrostende Stähle mit ≥ 2,5 % Ni <i>mit</i> Mo, <i>ohne</i> Nb und Ti	1.45nn Nichtrostende Stähle mit Sonderzusätzen
1.46nn Chemisch beständige und hochwarmfeste Ni-Legierungen		1.47nn Hitzebeständige Stähle < 2,5 % Ni	1.48nn Hitzebeständige Stähle mit ≥ 2,5 % Ni	1.49nn Hochwarmfeste Werkstoffe

Bau-, Maschinenbau- und Behälterstähle

1.50nn Mn, Si, Cu	1.51nn Mn-Si Mn-Cr	1.52nn Mn-Cu Mn-V Si-V Mn-Si-V	1.53nn Mn-Ti Si-Ti	1.54nn Mo, Nb,Ti,V W	1.55nn B, Mn-B <1,65 % Mn	1.56nn Ni	1.57nn Cr-Ni mit <1 % Cr	1.58nn Cr-Ni mit ≥1,0 % <1,5 % Cr	1.59nn Cr-Ni mit ≥1,5 % <2,0 % Cr
1.60nn Cr-Ni mit ≥ 2,0 % < 3% Cr	1.62nn Ni-Si Ni-Mn Ni-Cu	1.63nn Ni-Mo Ni-Mo-Mn Ni-Mo-Cu Ni-Mo-V Ni-Mn-V	1.65nn Cr-Ni-Mo mit < 0,4 % Mo + < 2 % Ni	1.66nn Cr-Ni-Mo mit < 0,4 % Mo + ≥ 2,0 % < 3,5 % Ni	1.67nn Cr-Ni-Mo mit < 0,4 % Mo + ≥ 3,5 % < 5 % Ni oder ≥ 0,4 % Mo		1.68nn Cr-Ni-V Cr-Ni-W Cr-Ni-V-W	1.69nn Cr-Ni außer Klassen 57 bis 68	
1.70nn Cr Cr-B	1.71nn Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-B Cr-Si-Mn	1.72nn Cr-Mo mit < 0,35 % Mo Cr-Mo-B	1.73nn Cr-Mo mit ≥ 0,35 % Mo	1.75nn Cr-V mit < 2,0 % Cr	1.76nn Cr-V mit > 2,0 % Cr		1.77nn Cr-Mo-V	1.79nn Cr-Mn-Mo Cr-Mn-V	

1.80nn	1.81nn	1.82nn	1.84nn	1.85nn	1.87nn 1.88nn 1.89nn
Cr-Si-Mo	Cr-Si-V	Cr-Mo-W	Cr-Si-Ti	Nitrierstähle	Nicht für eine Wärmebehandlung beim Verbraucher vorgesehene Stähle.
Cr-Si-Mn-Mo	Cr-Mn-V	Cr-Mo-W-V	Cr-Mn-Ti		Hochfeste, schweißgeeignete Stähle.
Cr-Si-Mo-V	Cr-Si-Mn-V		Cr-Si-Mn-Ti		
Cr-Si-Mn-Mo-V					

A.2 Bezeichnung der Eisen-Guss-Werkstoffe

Nach DIN EN 1560, (Gießereiwesen – Werkstoffkurzzeichen und -nummern) werden Kurzzeichen aus max. 6 Positionen gebildet:

Pos. 1. **EN** für Europäische Norm,

Pos. 2. **GJ** für Gusseisen, J steht für I (iron), um Verwechslungen zu vermeiden,

EN	GJ	3.	4.	5.	6.
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Beispiel:

EN GJ S F-300 H
 ↓ ↓ ↓ ↓
Pos. 3. 4. 5. 6. Kugelgraphitguss (GJS) ferritisch (F),
 $R_m = 300 \text{ MPa}$, wärmebehandelt (H)

Pos. 3. Zeichen für Graphitform

L-	Lamellar-	H-	graphitfrei
S-	Kugel-	X-	Sonderstruktur
V-	Vermicular-		
M-	Temperkohle		

Pos. 6. Zeichen für zusätzliche Anforderungen

D	Gussstück im Gusszustand
H	wärmebehandelt
W	Schweißeignung für Fertigungsschweißungen
Z	zusätzliche Anforderungen nach Bestellung

Pos. 4. Zeichen für Mikro- oder Makrogefüge

Pos. 5. Angabe der mechanischen Eigenschaften

A	Austenit
F	Ferrit
P	Perlit
M	Martensit
L	Ledeburit
Q	Abschreckgefüge
T	Vergütungsgefüge
B	nichtentkohlend geeglüht
W	entkohlend geeglüht
N	grafitfrei

Sorte	Eigenschaft ¹⁾ in MPa
GJL	Mindestzugfestigkeit ¹⁾ oder Härte HB, HV
GJMB	Mindestzugfestigkeit ¹⁾ – Mindestbruchdehnung (%), zusätzlich angehängt
GJMW	- RT: Schlagzähigkeit bei Raumtemperatur, - LT bei Tieftemperatur gemessen
	Anhänger über Herkunft der Probestücke
....S	für getrennt gegossene,
....C	für dem Gussstück entnommene
....U	für angegossene Probestücke (→ Beispiele)

Bezeichnung nach der chemischen Zusammensetzung

Alle anderen Sorten	Bezeichnung wie bei den legierten Stählen mit C-Kennzahl, Symbole der LE, Multiplikatoren mit Bindestrich. Hochlegierte Sorten mit vorgestelltem X (wahre Prozente)
---------------------	---

Beispiele:

EN-GJL-200U EN-GJL-HB150 EN-GJS-350-22-RT EN-GJMB-600-3 EN-GJLA-XNiCuCr15-6-2	Gusseisen mit Lamellengraphit (L) und $R_m = 200 \text{ MPa}$, Probe angegossen; Gusseisen mit Lamellengraphit und einer Härte von 150 HB; Gusseisen mit Kugelgraphit (S), $R_m = 350 \text{ MPa}$, A = 22 % bei RT gemessen; Temperguss (M), nichtentkohlend geeglüht (B), $R_m = 600 \text{ MPa}$, A = 3 %; Gusseisen mit Lamellengraphit (L) in austenitischem Gefüge (A), hochlegt (X) mit 15 % Ni, 6 % Cu und 2 % Cr.
---	---

A.3 Bezeichnung der NE-Metalle

A.3.1 Allgemeines

Reinmetalle werden mit den chemischen Symbolen bezeichnet, dahinter folgt der Metallgehalt in Prozent.

Legierungen werden nach dem Basismetall und dem Hauptlegierungselement in nachstehender Reihenfolge benannt (Chemische Symbole der Metalle).

1. Symbol des Basiselementes	Kurzzeichen	Beschreibung
2. Symbol des Hauptlegierungselementes,	CuCr	Cu-Legierung mit Cr nach Norm. Ohne weitere Angabe, nur eine Sorte!
3. Prozentzahl des Hauptlegierungselementes	CuAl10Ni	Cu-Legierung mit 10 % Al und Ni nach Norm
Zur weiteren Klärung können angefügt werden:		
4. Symbol des dritten Legierungselementes,	CuNi25Zn15	Cu-Legierung mit 25 % Ni und 15 % Zn
5. Prozentzahl des dritten LE (wenn zur Unterscheidung von ähnlichen Sorten nötig).	TiAl6V4	Ti-Legierung mit 6 % Al und 4 % V
Beachte: Abweichungen von diesen Regeln sind evtl. in den Normen für die einzelnen NE-Metalle festgelegt.		

A.3.2 Bezeichnung von Aluminium und -legierungen,

DIN EN 573: Aluminium und Aluminiumlegierungen, Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug

DIN EN 573-1: Numerisches Bezeichnungssystem

Normbezeichnung **EN AW - 1 2 3 4** 4 Ziffern + Buchstabe für nationale Variante
 für Aluminium **A** 3.+ 4. sind Zählpziffern
 für Halbzeug **W** 2. Ziffer für Legierungsvariante
 1. Ziffer für Legierungsreihe (Tabelle A.15)

Tabelle A 15: Aluminium-Legierungsserien nach DIN EN 573-3

Leg.-Serie	Legierungselemente	Leg.-Serie	Legierungselemente
1 x x x	Al unlegiert	5 x x x	Al Mg + Mn, Cr, Zr
2 x x x	Al Cu + weitere	6 x x x	Al MgSi + Mn, Cu, PbMn
3 x x x	Al Mn + Mg	7 x x x	Al Zn + Mg, Cu, Zr
4 x x x	Al Si + Mg, Bi, Fe, MgCuNi	8 x x x	Sonstige, Fe, FeSi, FeSiCu

DIN EN 573-2 Bezeichnungssystem mit chemischen Symbolen

Beispiel für Normangabe: EN AW-6061 [Al Mg1SiCu] als Ausnahme auch EN AW-**Al Mg1SiCu**

Tabelle A.16: Bezeichnung der Werkstoffzustände durch Anhängesymbole aus Buchstaben und bis zu 2 Ziffern nach DIN EN 515 Al und Al-Legierungen, Halbzeug

Symbol	Basiszustand	Bedeutung der Ziffer
F	Herstellungszustand	keine Grenzwerte für mechanische Eigenschaften
O1		1 hocherhitzt, längs abgekühlt
O2	weichgeglüht	2 thermomechanisch behandelt
O3		3 homogenisiert

Symbol	Zustand	Bedeutung der 1. Ziffer	Bedeutung der 2. Ziffer
H	kaltverfestigt	1 nur kaltverfestigt 2 kaltverf. + rückgeglüht 3 kaltverf. + stabilisiert 4 kaltverf. + einbrennlackiert	2: 1/4-hart, 4: 1/2-hart, 6: 3/4-hart, 8: vollhart, härtester Zustd. geg. O
H34			
T	wärmebehandelt	1: aus Warmformtemp. abgeschreckt + kaltausgehärtet 2: aus Warmformtemp. abgeschreckt + kaltverfestigt + kaltausgehärtet 3: lösungsgeglüht + kaltverfestigt + kaltausgehärtet 4: lösungsgeglüht + kaltausgehärtet (stabiler Zustand) 5: aus Warmformtemp. abgeschreckt + warmausgehärtet 6: lösungsgeglüht + warmausgehärtet 7: lösungsgeglüht + überhärtet 8: lösungsgeglüht + kaltverfestigt + warmausgehärtet 9: lösungsgeglüht + warmausgehärtet + kaltverfestigt	— stabile Zu- stände

Tabelle A.17: Erhöhung der Festigkeit um ΔR_m im Zustand Hx8 gegenüber dem weichgeglühten (O)

R_m weich (O)	ΔR_m hart Hx8	R_m weich (O)	ΔR_m hart Hx8
bis 40	55	165...200	100
45...60	65	205...240	105
65...80	75	245...280	110
85...100	85	285...320	115
105...120	90	325... mehr	120
125...160	95		

Beispiel:**H24:** bedeutet: (2) kaltverfestigt + rückgeglüht; (4) auf ½-hart kaltverfestigt.**H18:** bedeutet (H) kaltverfestigt, (8) vollhart**A.3.3 Bezeichnung von Kupfer und -legierungen**

DIN EN 1412 Kupfer und Kupferlegierungen, Europäisches Nummernsystem. Die Normangabe besteht aus 6 Zeichen.

C	2.	3.	4.	5.	6.
----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Zeichen 1: C Zeichen für Kupfer**Zeichen 2: Buchstabe für die Erzeugnisform**

B	Blockform zum Umschmelzen	M	Vorlegierung	S	Werkstoff in Form von Schrott
G	Gußerzeugnis	X	nicht genormte		
F	Schweißzusatz, Hartlote	R	raffiniertes Cu in Rohform	W	Knetwerkstoffe

Zeichen 3. bis 5: Zähzliffern für genormte Sorten und 0...799 für nichtgenormte 800...999**Zeichen 6: Buchstabe(n) für Legierungssystem**

A, B	Cu	G	CuAl	L,M	CuZn Zweistofflegierung
C, D	Cu, niedriglegiert, $\Sigma LE < 5\%$	H	CuNi	N,P	CuZnPb
E, F	Legierungen $\Sigma LE > 5\%$	J	CuNiZn	R,S	CuZn Mehrstofflegierung
		K	CuSn		

Beispiele: für Kupferwerkstoffe

CG383H: (G) Gußerzeugnis aus einer (H) CuNi-Legierung,
CW101C: (W) Knetwerkstoff aus (C) niedriglegiertem Cu (CuBe2)
CW508L: Knetwerkstoff aus einer(L) CuZn-Legierung (Messing)

DIN EN 1173/95 Kupfer und Kupferlegierungen, Zustandsbezeichnungen

Tabelle A.18: Anhängesymbole, bestehend aus einem Buchstaben und 3 Ziffern für bestimmte Eigenschaftswerte.

Buchstabe	Eigenschaft und Kennwert	Beispiel
A	Bruchdehnung in Prozent:	A005: A = 5 %
B	Federbiegegrenze	B370: 370 MPa
D ¹⁾	gezogen, ohne vorgeg. mech. Eigenschaften	
G	Korngröße	
H	Härte HB oder HV	H030 HB10
M ¹⁾	wie gefertigt, ohne vorgeg. mech. Eigenschaften	
R	Zugfestigkeit,	R700: 700 MPa
Y	0,2%-Dehngrenze	Y350: 350 MPa

¹⁾ Die Buchstaben D und M werden ohne weitere Bezeichnungen verwendet

Beispiele:

Normbezeichnung	Maßnorm	Werkstoff	Eigenschaften
Band EN 1652 CuBe2 R1200	EN 1652	CuBe2 -----	R1200 (Zugfestigkeit)
Stange EN 12164 CuZn39Pb M	EN 12164	CuZn39Pb3	M (ohne vorgegebene Eigenschaften)

A.4 Bezeichnung der Kunststoffe

Normung: DIN EN ISO 1043-1 Basispolymere, Kennbuchstaben und Kurzzeichen,
 -2 Kurzzeichen für Verstärkungsstoffe
 DIN EN 14598/05 Bezeichnung für verstärkte härtbare Formmassen
 (SMC und BMC)

Tabelle A.19: Kurzzeichen für Kunststoffe und Verfahren

Symbol	Polymer	Symbol	Polymer
AAS	Methacrylat-Acrylat-Styrol	ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol	FF	Furanharze
APP	ataktisches Polypropylen	Hgw	Hartgewebe
BS	Butadien-Styrol	Hm	Harzmatte
CA	Celluloseacetat	Hp	Hartpapier
CAB	Celluloseacetobutyrat	LCP	Liquid Crystals Polymers
CAP	Celluloseacetopropionat	MF	Melaminformaldehyd
CP	Cellulosepropionat	MP	Melamin- Phenolformaldehyd
EC	Ethylcellulose	PA	Polyamide
EP	Epoxid	PAI	Polyamidimide

Symbol	Polymer	Symbol	Fertigungsbegriffe
PAN	Polyacrylnitril	PVC	Polyvinylchlorid
PAR	Polyarylat	PVDC	Polyvinylidenchlorid
PB	Polybuten	PVDF	Polyvinylidenfluorid
PBT(P)	Polybutylenterephthalat	PVF	Polyvinylfluorid
PC	Polycarbonat	SAN	Styrol-Acrylnitril
PCTFE	Polychlortrifluorethylen	SB	Styrol-Butadien
PDAP	Polydiallylphthalat	SI	Silicon
PE	Polyethylen	TPU	Thermoplastische Polyurethane
PEEK	Polyaryletherketon	UF	Harnstoff-Formaldehyd
PEI	Polyetherimid	UP	Ungesättigte Polyester
PES	Polyethersulfon		
PET(P)	Polyethylenterephthalat		
PFPEF	Polytetrafluorethylen- Perfluorpropylen	MFI	Schmelzindex
PI	Polyimid	RIM	Reaction Injektion Moulding (RSG)
PMMA	Polymethylmethacrylat	RSG	Reaktionsharz-Spritzguss (RIM)
POM	Polyoxymethylen, (Polyacetal, Polyformaldehyd)	BMC	Bulk Moulding Compound (Formmasse)
PP	Polypropylen	GMT	Glasmattenverstärkte Thermoplaste
PPO	Polyphenyloxid	SMC	Sheet Moulding Compound (Duroplast)
PPS	Polyphenylensulfid		Verstärkte Kunststoffe
PS	Polystyrol	AFK	Asbestfaserverstärkter Kunststoff
PSU	Polysulfon	BFK	Borfaserverstärkter Kunststoff
PTFE	Polytetrafluorethylen	CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
PTP	Polytetephthalate	GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
PUR	Polyurethan	MFK	Metallfaserverstärkter Kunststoff
		SFK	Synthesefaserverstärkter Kunststoff.
			Beispiel: PP-GF20 Polypropylen, glasfaserverstärkt (20 %)

Kurzzeichen für Polymergemische (blends) werden aus den Komponenten mit Pluszeichen gebildet, das Ganze in Klammern. Beispiel: (ABS+PC).

Tabelle 4.20: Zusatzeichen für besondere Eigenschaften der Polymere (mit Bindestrich angehängt)

Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
C	chloriert	D	Dichte	E	verschäumt, verschäumbar
F	flexibel	H	hoch	I	schlagzäh
L	linear	M	mittel, molekular	N	normal, Novolack
P	weichmacherhaltig	R	erhöht, Resol	U	ultra, weichmacherfrei
V	very, sehr	W	Gewicht	X	vernetzt, vernetzbar

Bildquellenverzeichnis:

Allianz Zentrum für Technik, Ismaning: 12.3, 14.7; Aluminium-Journal (Brockmann): 10.3;
Bode-Verlag, Westhalten: S. 12;
Bürgel, R.: Handbuch der Hochtemperaturtechnik, Vieweg: 2.45, 2.53;
Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf: 3.9, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 5.8, 5.11, 5.12, 5.20, 5.30;
CemeCon, Aachen: 11.13; Degussa-Information: 5.54; DEMAG-Nachrichten: 3.22, 3.23;
Deutsches Kupfer-Institut, Berlin: 7.7;
Fachverband Pulvermetallurgie FPM, Hagen: 2.14, 11.4, 11.5, 11.6, 11.7;
Firma Carl Gomann, Remscheid: 5.53; Firma Hermann C. Stark, Berlin: 11.1;
Guillery, P.: Werkstoffkunde für Ingenieure, Vieweg: 2.34, 2.41;
Hougardy, P.: Die Umwandlung der Stähle: 5.2, 5.3, 5.21, 5.25, 5.28;
Institut für Schweißtechnik TU Braunschweig: 2.5, 2.20, 2.36;
International Nickel GmbH, Düsseldorf: 2.13, 2.15, 2.62;
KAMAX, Bad Lauterberg: 2.22; Kunst, H. in VDI-Berichte 852 S. 562: 5.52;
Macherach, E.: Praktikum in Werkstoffkunde, Vieweg: 2.33, 2.35, 2.36, 2.37, 2.38, 2.40, 2.64;
Mannesmann-Informationen: 9.2; Stahlwerke Peine-Salzgitter: 5.16;
Meins, W. (Hrsg.): Handbuch Fertigungstechnik, Vieweg: 2.44, 2.51;
Thyssen-Information: 1.2, 1.3, 4.5, 4.6; Verband kunststofferzeugender Industrie: 9.1;
Zentrale für Gußverwendung, Düsseldorf: 6.5, 6.6, 6.2, 6.4, 6.5, 6.7, 6.8, 6.9, 6.11...6.15.

Sachwortverzeichnis

- 0,2 %-Dehngrenze 378
 α -Eisen 85
 γ -Eisen 86
 γ -Mischkristall 88 f., 96
- A**
Abkühlgeschwindigkeit 41
–, kritische 147
Abkühlkurve des Reineisens 84
Abkühlverlauf 78 f.
– von Rundbolzen 153
Abkühlwirkung von Abschreckmitteln 153
Abrasion 312, 364
Abscheiden aus der Gasphase 316
Abschrecken 152
Abschreckmittel 152
Adaptronik 327
Adhäsion 312, 363
Adhäsionskraft 350
Aktivierung, thermische 62
Aktivierungsenergie 58, 65
Aktivlot 327
Aktor 327
Alkane 250
Alterung 80
–, künstliche 80, 166
ALUCOBOND 287
Aluminieren 184
Aluminium, unlegiertes 208
– -Gusslegierung 211 f.
– -Legierung, aushärten 212
–, Spannungs-Dehnungs-Diagramm 376
Aluminiumnitrid AlN 242
Aluminumoxid 239
Aluminumtitanat 240
Amorphe C-Schicht 317
Anforderungsprofil 15
Anhängezeichen für die Gießart 205
Anisotropie 42
–, ebene 122
–, senkrechte 122
Anlassen 154
Anlassgefüge 154 f.
Anlassschaubild 154, 161
- Anlasssprödigkeit 163
Anlegierungstechnik 307
Anodenschlamm 215
Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe 236
Antihaftbeschichtung 317
ARAMID AR 261
ataktisch 258
Atomgitter 12, 13
Atomradius 35
Aufhärtbarkeit 149
Aufhärtung 111
Aufkohlen 175
Aufkohlung in Salzbädern 177
Aufkohlungstiefe 176, 179
Auftraglöten 315
Auftragschweißen 315
Aushärteten 164
Aushärtung von AlCuMg 213
– – G-AlSiMg 214
Auslagern 166, 213
Ausscheidung, inkohärente 165
–, kohärente 165
– aus übersättigten Mischkristallen 79
Austausch-Mischkristall 70
Austenit 86, 88, 96
Austenitbildner 98
Austenitformhärten 169
Austenisierung 138
Austenitkorngröße 139
Austenitzerfall 92, 146 f.
Automatenstahl 120
- B**
Bainitisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI) 195
Baumann-Abzug 396
Baustahl 111
– höherer Festigkeit 113
–, wasserfester 344
–, wetterfester 115
Bauteil, kaltgeformt 49
Bauxit 206
BAYER-Verfahren 206

- Beanspruchung, tribologische 347, 350
 Beanspruchungsgrad 370
 Behinderung, sterische 257
 Belastung, dynamische 384
 Beizsprödigkeit 102, 332
 Belüftungselement 336
 Benzolring 277
 beruhigt vergossen 106
 Beschichten 312
 Bezeichnung der Eisen-Guss-Werkstoffe 409
 – – Kunststoffe 412
 – – NE-Metalle 410
 – reiner Metalle 204
 – von Aluminium und -legierungen 410
 – – Kupfer und -legierungen 411
 Bezeichnungssystem für Stähle 403
 bidirektional (BD) 289
 Biegehalbmesser 111
 Biegeversuch 393
 Bimetall-Element 335
 Bimetall-Korrosion 226, 339
 Bindung, metallische 31
 Bindungsenergie Q 33
 Bindungskraft 32 f.
 Blasformen 271
 Blockpolymer 258
 Blockseigerung 106
 BMC 265
 BONDAL 287
 Borcarbid B₄C 242
 Borieren 184
 Bornitrid BN 243, 359
 Bridgeman-Verfahren 43
 Brinellhärte 371
 Bruchdehnung 378
 Bruchform, Zugversuch 382
 Brucheinschnürung 378
 Bruchspannung 249
 Bruchverhalten 380
 Bruchzähigkeit 393
 B-Stahl 122
- C**
 Carbidbildner 109
 Carbonitrid 180
 Carbonitrieren 178
 Carbonyl-Verfahren 301
 Cermet 306
 C-Faser HM 261
 – HT 261
- CFC 243
 Chemische Reaktion 332
 Chromieren 184
 Cluster 51, 165
 CMC 286
 composite 286
 Copolymer 258
 CP-Stahl 122
 C-Schicht, amorphe 317
 Cu-Sorte 216
 CuZn-Gusslegierung 220
 CVD-Verfahren 313, 316, 318
- D**
 Dauerbruch 383
 Dauerfestigkeitsschaubild 388
 Dauerschwingfestigkeit 386
 DECHEMA-Tabellen 345
 Deckschicht 337, 340
 Dendriten 36
 Depolarisation 334
 Desoxidation 102, 104 f.
 Desoxidationsreaktion 106
 Detergentien 357
 Diamant 13
 diamond like carbon 317
 Dichte 34, 35
 Differenzialbauweise 22
 Diffusion 63
 Diffusionsglühen 144
 Diffusionskoeffizient 64
 Diffusionsschicht 180
 Diffusionsschweißen 285
 Diffusionsstrom 67
 Dilatometerkurve 85
 Dipol 333
 Direkthärteten 179
 Direkthärtetestahl 178
 Direktreduktion 103, 301
 Dispersantien 357
 Dispersionsschicht 320
 DP-Stahl 122
 Druckgusslegierung 234
 Druckgusswerkstoff 232
 Durchdringungsverbund 287
 Durchdringungsverbundkeramik 297
 Durchdringungsverbundwerkstoff 291
 Durchhärtung 150
 Durchschallung 402
 Durchschallungsverfahren 399

- Duroplaste, faserverstärkte 262
Duroplastverarbeitung 265
dynamische Härteprüfung nach Shore 374
– Belastung 384
- E**
Edelstahl 101
–, legierter 108
–, unlegierter 107
Eigenkeim 41
Eigenschaften der eutektischen Legierungen 77
Eigenschaftsprofil 16, 17
Eigenschaftsverbesserung durch Veränderung der Oberfläche 312
Eigenschaftsvergleich Metall – Ingenieur-Keramik 237
– Metall-Polymer 247
– Metall-Polymer-Keramik 21
Eigenverstärkung 260
Einbereichsöl 355
Eindringverfahren 397, 402
Einhärtbarkeit 149
Einhärtungstiefe 149
Einlagerungsmischkristall 71
Einsatzhärten 174
Einsatzhärtungstiefe 179
Einsatzstahl 175
Einschluss 397
Eisen, eutektisches 96
–, übereutektisches 96
–, untereutektisches 96
Eisenbegleiter 100
Eisen-Kohlenstoff-Diagramm 94
Elastizitätsmodul 35, 379
Elastomere 280
Elektrochemische Reaktion 332
Elektrolytkupfer 215
Elektronegativität EN 32
Elektronenpaarbindung 12
Elektronenstrahlverdampfung 319
Elektrostahlverfahren 104
Elektrostriktion 328
Element, galvanisches 334
Elementarzelle 37
Energieminimum 32, 57
Entbinderung 303
Enthosphorung 105
Entropie-Maximum 57
Entschwefelung 192
- Entzinkung 338
Epoxidharz EP 264
Erosion 340, 360
Erosionkorrosion 360
Erstarrung, Konzentrationsänderung 88
–, metastabile 87
–, stabile 87
Erstarrungsvorgang 41
Erwärmungsart, Vergleich 137
Erzeugnisformen für Al-Legierungen 209
ESU, Elektro-Schlacke-Umschmelzen 105
Eutektikum 76, 89
Eutektoid 90
Extrudieren 271
- F**
Fadenmolekül 247
Faser, natürliche 289
Faseranordnung, BD 262
–, MD 262
–, UD 262
Faserverbund 287
Faserverbundwerkstoff,
 Richtungsabhängigkeit 289
Faserverlauf 396
Faserverstärkte Duroplaste 262
Faserwerkstoff 288
Federband aus nichtrostenden Stählen 126
Federstahl 125
–, warmgewalzt + vergütet 126
Feinkorn 55
Feinkornbaustahl, schweißgeeigneter 114
–, vergüteter schweißgeeigneter 115
Ferrit 85, 91 f., 96
Ferro-Titanit 305
Festigkeit, spezifische 290
Festigkeitsbeanspruchung 339
Festkörperreibung 350, 352
Festschmierstoff 359
Fett 358
–, Kurzbezeichnung 358
Feuerraffination 215
Flächenkorrosion, gleichmäßige 337
Flacherzeugnis 121
Flammhärtens 172
Flammspritzen 314
Fließkurve 54, 62
Fließpress-GMT 290
Fließvermögen 301
Flüssigkeit, magnetorheologische 330

- , rheologische 330
- Flüssigkeitsreibung 351 f.
- Flussmittel zum Hartlöten 326
 - zum Weichlöten 325
- FMEA 4
- Formänderungsfestigkeit 53
- Formbeständigkeitstemperatur HDT 268
- Formgedächtnis-Legierung (FGL) 327 f.
- Formhärtens 169
- Formmassetypen 263
- Formpress-GMT 290
- Forschungsinstitute 1
- Fremdkreim 41
- Fremdstromschutz 346
- Frischen 103
- Fügen 29
- Fugenlöten 324
- Fülldichte 301
- Funktionswerkstoff 3

- G**
- Galvanische Spannungsreihe 334
- Galvanischer Schutz 345
- Galvanisches Element 334
- Gammastrahl 401 f.
 - , künstlicher 401
- Gasaufkohlung 177
- Gasnitrieren 182
- Gasreibung 352
- Gattierung 192
- Gefüge **9, 15, 40**
 - , Chromstahl 99
 - der Lagerwerkstoffe 322
 - , kolumnares 43
- Gemischlegierungstechnik 307
- Gießeigenschaft 189
- Gießkeilprobe 191
- Gitterfehler 50
 - , Zusammenfassung 52
- Gitterkonstante 35, 37
- Glasübergangstemperatur 266
- Gleichgewicht 57
 - , chemisches 105
- Gleitebene **45, 46**
- Gleitlagerfolie 324
- Gleitlinie 45
- Gleitmodul 267
- Gleitmöglichkeit 47
- Gleitrichtung 46
- Gleitschichten 322

- H**
- Halbmetsallatom 11
- Halbwertszeit 401
- Harnstoffharz 264
- Härtbarkeitsschaubild 128
- Hartbearbeitung 238
- Härte 369
 - , Einfluss des Kohlenstoffs 129
 - , Brinell 369
 - – Rockwell 372
 - – Vickers 372
 - , dynamische nach Shore
 - , Härteverzug 156
 - , Vergleich 374
- Hartlot 325
- Hartstoffsicht 364
 - , Vergleich 364
- Hartverchromen 320
- Hebelbeziehung 74, 78, 89
- Heißgaskorrosion 341
- Heißisostatisches Pressen (HIP) 304
- Hexagonales BN 243
 - Kristallgitter (hDP) 38
- Hitzebeständigkeit 117

- Hochdruckgasabschrecken 154
Hooke'sches Gesetz 376
Horizontalstrangguss 193
HS-Stahl 304
Hüttenkupfer 215
Hybridbauweise 18
Hybridgewebe 289
Hydrathülle 333
Hysterese 43
- I**
Impuls-Echo-Verfahren 399, 402
Induktionshärten 172
Induktive Einzelstabvergütung 164
Infiltrieren 305
Ingenieurkeramik, Bausteine 237
Inhibitor 345
Integralbauweise 22
Intermetallische Phase 71
Ion, Entstehung 332
Ionenbindung 12
Ionenleitfähige Medien 332
Ionenleitfähigkeit von H_2O 333
Isomerie 251
Isopren 280
Isostatisches Pressen 302
isotaktisch 258
Isotop 401
Isotropie 42
- K**
Kaltarbeitsstahl 130
Kaltarbeitstahl 129
Kaltfließpressstahl 124
Kaltstauchstahl 124
Kaltverfestigung 48, 53, 57, 218
Kathodenerstäubung 319
Kathodischer Schutz 345
Kavitation 340
Keramik-Matrix-Verbund 296
Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve 392
Kerbschlagbiegeversuch 391
Kerbschlagprobe 391
Kerbschlagzähigkeit 249
Kerbwirkung 383
Kette, gestreckte 257
–, lineare 257
–, verzweigte 257
Kettenlänge, Einfluss 256
Kettenmolekül 246 f.
- , Vernetzung 247
Knetlegierung 205
Kohlenstoff, Einfluss 97
Kohlenstoffäquivalent 111
Kohlenstoffatom 250
Kohlenstoffdesoxidation 105
Kohlenstoffschicht 317
Kohlenwasserstoff, kettenförmiger 250
–, ringförmiger (Aromaten) 251
Kokillenguss 193, 205
Kondensationswärme 32
Konuspenetration 358
Koordinationszahl 37
Korngleitverschleiß 362
Korngrenze 51
Korngrenzenseigerung 144
Korngrenzenverfestigung 55, 57, 218
Korngröße 61
Korngrößenklasse 61
Kornverfeinerung 55
Kornvergrößerung 61
Kornwachstum 62
Kornwälzverschleiß 362
Korrosion 331, 339
–, interkristalline 338
–, klimatische 312
–, örtliche 337
–, selektive 338
– und thermische Beanspruchung 341
– unter Tribo-Beanspruchung 340
Korrosionsbeanspruchung 131
Korrosionselement 335
Korrosionserscheinung 337
Korrosionsriß 338
Korrosionsschaden 331
Korrosionsschutz 341
Korrosionssystem 337, 342
Kresolharz PF 263
Kriechen 66, 118
Kriechfestigkeit, Erhöhung 68
Kriechgeschwindigkeit 67 f.
Kriechmodul 270
Kriechvorgang 67
Kristallerholung 59
Kristallfehler 49
Kristallgitter 15, 38
–, hexagonales (hdP) 38
–, kubisch-flächenzentriertes (kfv) 39
–, tetragonale 39
– wichtiger Metalle 39

- Kristallisationswärme 32, 42
 Kristallschmelzpunkt 267
 Kristalleigerung 75, 221
 Kristallsystem **37**
 Kroll-Verfahren 229
 Kubisches Bornitrid CBN 13, 243
 Kugeldruckhärte 249
 Kugelmodell 9
 Kugelpackung, dichteste 38
 Kunststoff, glasfaser verstärkter (GFK) 261
 – -Formenstahl 131
 –, teilkristalliner 259
 –, Werkstoffkennwerte 249
 –, Zusätze 261
 Kunststoffe und Verfahren, Kurzzeichen 255
 Kupfer 215
 –, niedriglegiertes 218
 – -Aluminium-Legierung 222
 – -Nickel-Legierung 223
 – -Nickel-Zink-Legierung 224
 – -Zink-Legierung 219
 – -Zinn-Legierung 221
 Kurzzeichen für Mg-Legierungen 226
 Kurzzeitgasnitrieren 182
- L**
 Lager, selbstschmierendes 324
 Lagermetall 323
 Lagerwerkstoff, Anforderung 322
 –, Gefüge 322
 Langerzeugnis 121
 Laserdispergieren 315
 Laserhärtten 173
 Laserlegen 315
 Laser-Umschmelzhärten 173
 LA-Stahl 122
 Lastspiel 385
 Latex 280
 Ledeburit 89, 96
 Leerstelle 50
 Leerstellendiffusion 64
 Legierung, aushärtbare 166
 –, eutektische 76
 –, eutektische oder naheutektische 77
 –, heterogene 82
 –, höherfeste 56
 –, homogene 82
 –, untereutektische 93
 Legierungssysteme mit vollkommener
 Mischbarkeit 70
- Legierungstruktur **70**
 Leichtbau 6
 Leistung, spezifische 171
 Leitfähigkeit λ 34
 –, elektrische 48
 Leitwert, Vergleich 34
 Lichtbogenofen 104
 Lichtbogen-Spritzen 314
 Lichtbogenverdampfung 319
 Linearer Ausdehnungskoeffizient 34
 Linienhärtung 172
 Liquidus-Linie 73
 Lochkorrosion 338
 Lokalelement 335
 Löslichkeitslinie 76
 Lösungsbehandeln 166, 213
 Lösungsdruk 333
 Lotwalzplattieren 293
- M**
 Magnesium 224
 Magnesium-Gusslegierung 226
 Makromolekül 246
 Mangan Mn 102
 Mantelhärtung 172
 Martensit 146, **147**
 Martensitbildung 164
 Masseschmelzfließrate 271
 Massivgleitlager 322
 Matrix 286
 mechanisch legieren 294
 Mechanismus des Formgedächtnis-Effektes
 329
 Medium, ionenleitfähiges 332
 Meehanite-Guss 193
 Mehrbereichsöl 355
 Mehrfachschicht 319, 364
 Melaminharz MF 264
 MeliCon 288
 Metall 35
 –, amorphes 36
 –, polymorphes 39
 Metallatom 11
 Metallbindung **12**
 Metallgitter 32
 Metallmatrix-Durchdringungsverbund 295
 – -Faserverbund 293
 – -Teilchenverbund 293
 – -Verbundwerkstoff 292
 Metallphysikalische Reaktion 332

- Metallschaum 295
Methanreihe 250
Mg-Knetlegierung 228
Mikrokerbe 339
Mikrokontakt 350
magnetische Prüfung 397
magnetinduktive Prüfung 398
makroskopische Untersuchung 396
mikroskopische Verfahren 395
MIM 302
Mischbruch 382
Mischcarbid 102
Mischkeramik 239
Mischkristall, übersättigter 165
Mischkristallbildner 109
Mischkristall-Legierung, Eigenschaften 75
Mischkristallverfestigung 48, 54, 57, 75, 218
Mischreibung 351 f.
Mischungslücke 76
MMC 286
Mohs-Härte 369
Molekülgitter 12, 13
Molybdändisulfid 359
Monomer 246
MPF 264
multidirektional 289
- N**
Nanotechnologie 6
Naturfaser 261
Naturkautschuk 281
Nichtmetallatom 11
Nichtoxidkeramik 237
Nickel 232
Nickelmartensit 167
Nitridbildner 110
Nitrieren 180
Nitrierhärtetiefe 181
Nitrierstahl 181
Nitrocarburieren 180
Normalglühen 140
- O**
Oberflächenbehandlung 6
Oberflächenzerrüttung 365
ODS-Legierung 68, 294
Öl 356
-, synthetisches 357
Ordnung, sterische 257
overlay 322
- Oxidation, anodische 209
-, chemische 209
Oxidationsmittel 334
Oxidkeramik 237
- P**
Packungsdichte PD 38
PAN-Faser 297
Passivierung 343
Passivschicht 337
Pendelschlagwerk 391
Periodisches System der Elemente 11
Perlit 90, 92, 142
-, körniger 143
Perlitbildung 92
Perlitstufe 152
Pfannenmetallurgie 104
Phase 8, 14
-, intermetallische 71, 119
-, im System Cu-Zn 81
Phenolharz 263
Phosphor 100 f.
Piezokeramik 327, 328
Plasmanitrieren 182
Plasmaspritzen 314
Platine, geschweißt 123
Plattierung 288
Platzwechsel 57
PM-Spritzgießen 302
Polarität 272
Polyaddition 252, 254
Polyamid, Wasseraufnahme 276
Polyblend 260
Polybutylentherphthalat 278
Polycarbonat 278
Polyesterharz 264
Polyethersulfon 279
Polyethylen 257, 259, 272
Polyethylentherephthalat 278
Polygonisierung 59
Polyimid 280
Polykondensation 252
Polymer 246
-, σ , ε -Linien 249
-, faserverstärktes 289
-, Verstärkungsfaser 261
Polymerbeton 291
Polymerisation 252 f.
Polymerisationsgrad 253
Polymer-Pyrolyse 244

- Polymethylmetacrylat 275
 polymorph **14**, 39
 Polyoxymethylen 277
 Polyphenylensulfid 279
 Polypropylen 258, 259, 273
 Polystyrol 274
 Polytetrafluorethylen 275
 Polyvinylchlorid 273
 Prallstrahlverschleiß 361
 Pressbarkeit 301
 Pressbarkeitsschaubild 302
 Pressdichte 302
 Pressdruck 302
 Pressen, isostatisches 302
 Presshärten 169
 Presskörperfestigkeit 301
 Primärbindung 256
 Primärgefüge 40
 Primärkristall 144
 Primärzementit 93
 Propfpolymer 258
 Prüfung, magnetische 397
 –, magnetinduktive 398
 Pseudolegierung 69, 305
 PSZ, Teilstabilisiertes ZrO₂ 239
 Pulver, fertiglegiertes 308
 –, nanoskaliges 244
 Pulveraufkohlung 176
 Pulvereigenschaft 301
 Pulverherstellung 301
 Pulvermetallurgie 299
 PVD-Verfahren 313, 316, 318
- Q**
 QPQ-Verfahren 183
 Qualitätsstahl 101
 –, legierter 108
 –, unlegierter 107
- R**
 Randentkohlung 151
 Randschichthärteten 171
 Randschichthärtung 231
 Rapid-Prototyping 26
 Rattermarke 341
 Raumnetzmolekül 246 f.
 Reaktion, anodische 336
 –, chemische 332
 –, elektrochemische 332
 –, kathodische 336
- , metallphysikalische 332
 –, tribochemische 350, 365
 Reaktionsharzmasse 264
 Reckalterung 166
 Recycling 4
 Reduktionsmittel 334
 Regeneration 4
 Reibkorrosion 341
 Reibkraft 349
 Reibungsart 349
 Reibungszustand 349 f.
 Reihe 2000 Al Cu 211
 – 3000 Al Mn 210
 – 4000 Al Si 210
 – 5000 Al Mg 210
 – 6000 Al MgSi 210
 – 7000 AlZn 211
 Reinheitsgrad 101
 Rekristallisation 60, 61
 Rekristallisationsglühen 145
 Rekristallisationsschaubild 60
 Rekristallisationstemperatur 60 f.
 Restaustenit 148
 RIMLOC-Verfahren 293
 Rockwellhärte 373
 Roheisen 103
 Rohkupfer 215
 Rohr, geschweißtes 123
 Röntgen-/Gamma-Strahlen-Prüfung 400
 Röntgenröhre 400
 Röntgenstrahl 400, 402
 Rost 337
 Ruhepenetration 358
- S**
 Salzbad 153
 Salzbadnitrieren 183
 Sandwich-Platte 287
 Sauerstoff 101
 – -Aufblasverfahren 103
 – -Korrosion 336
 Schadenstoleranz 296
 Schalenhärter 149
 Schalenhartguss 200
 Schicht, außenstromlos abgeschiedene 320
 – mit speziellen Funktionen 318
 Schichtstruktur 316
 Schichtverbund 287
 Schichtverbundwerkstoff 287
 Schichtwerkstoff 311, 316

- Schlagzähigkeit 249
Schleuderguss 205
Schmelzfluss-Elektrolyse 207
Schmelzindex 271
Schmelzinfiltation 293
Schmelzpunkt 35
Schmelztemperatur 34
Schmiedbarkeit 100
Schmiedefaser 44
Schmierfilm 352
Schmieröl, Zusatz 357
Schmierstoff 353
–, hydrodynamische 351
–, Kurzbezeichnung 356
Schnappverbindung 270
Schneckenspritzgießmaschine 271
Schneidmechanismus 165
Schnellarbeitsstahl 132
Schrägstrahlverschleiß 361
Schraubenversetzung 51
Schubmodul 267
– -Temperaturkurve 267
Schutz, galvanischer 345
–, kathodischer 345
Schwefel 100 f.
Schweißeignung 111, 118
Schweißzusatz 315
Schwellfestigkeit 386
Schwerkraftseigerung 106
Schwingungskorrosion (SwRK) 340
Schwingverschleiß 361
Schwundausgleich 304
Seigerung 106
Seigerungszone 396
Sekundär-Aluminium 206
Sekundärbindung 256, 267
Sekundärgefüge 40
Sekundärhärte 132
Sekundärmetallurgie 104
Sekundärzementit 93, 97
Selbstauhärtung 214
Sensor 327
Sherardisieren 184
Sicherheitsbauteil 396
Siebanalyse 301
Silicium 102
Siliciumcarbid 241
Siliciumnitrid 242
Silikatkeramik 237
Silizieren 184
Sinterhartmetall 306
Sintern 300, 303
– mit flüssiger Phase 304
Sinterschmieden 305
Sintertemperatur 303
Sinterwerkstoff, Einteilung 308
SiSiC 297
slip-stick 351
SMC 265
Sol-Gel-Verfahren 244
Solidus-Linie 73
Sonderguss 190, 200
Spaltkorrosion 337
Spaltlöten 324
Spannung, galvanische 334
Spannungsgarmglühen 143
Spannungs-Dehnungs-Diagramm 379
–, Aluminium 376
Spannungs-Dehnung-Linie, isochrone 269
Spannungsintensitätsfaktor 393
Spannungsrelaxation 66
Spannungsriskkorrosion (SpRK) 339
Spannungszustand 390
–, einachsiger 390
–, zweiachsiger 390
–, dreiachsiger 390
Spektralanalyse 9
Spendermittel 174
Spezifische Festigkeit 290
Spongiosa 338
Spritzen, thermisches 313
Spritzgießen 271
Spritzzsätze 314
SpRK, anodische 339
–, Flüssigmetall induzierte 339
–, kathodische 339
Sprödbruchsicherheit 112
Sprühkompaktieren 294, **309**
Spülverschleiß 360
Squeeze-Casting 206
Stäbchenmodell 9
Stahl 97, 108
–, austenitischer 98, **116**, 344
–, austenitisch-ferritischer 344
–, Bezeichnungssystem 403
–, Einteilung 107
–, ferritischer 98, **117**, 344
–, Glühtemperatur 140
–, Härtbarkeit 149
–, hitzebeständiger 120

- , hochwarmfester 119
 - , höherfester 123, 141
 - , Kaltumformen 121
 - , kaltzäher 115
 - , korrosionsbeständiger 344
 - , martensitaushärtender 167
 - , nichtrostender 107 f.
 - , perlitischer 90
 - , rostfreier 116
 - , überperlitischer 93
 - , unlegierter 107
 - , unterperlitischer 91 f.
 - , Vergleich austenitischer und ferritischer 118
 - , Wärmebehandlung 136
 - , warmfester 119
 - Stahldraht für Federn 126
 - Stahlerzeugnis 107
 - Stahlguss 133
 - für Druckbehälter 134
 - , hitzebeständiger 135
 - , korrosionsbeständiger 134
 - Stahlgusswerkstoff 134
 - Standardpotential 334
 - Stängelkristallisation 43
 - Stapelfehler 52
 - Sterische Behinderung 257
 - Ordnung 257
 - Stickstoff N 101
 - Stillstandskorrosion 340
 - Stirnabschreckkurve 149, 394
 - Stirnabschreckversuch 394
 - Stöchiometrische Rechnung 88
 - Stoff, polarer 272
 - , unpolarer 272
 - Stoffeigenschaft ändern 136
 - Stoßverschleiß 361
 - Strahlverschleiß 361
 - Streckdehnung 249
 - Streckgrenze 378
 - Streckgrenzerhöhung 56
 - Streckspannung 249
 - Streckung, mechanische 259
 - Streck-Kurve 351
 - Strukturschaum 270
 - Strukturviskosität 353
 - Strukturwerkstoff 2
 - Stufenversetzung 50
 - , wandern 53
 - Subkorngrenze 59
 - Substrat 311
 - Sulfidseigerung 144
 - Sulfonitrieren 184
 - Superelastizität 329
 - Supernitrid 320
 - Superplastizität 63
 - syndiotaktisch 258
 - System, metastabiles 95
 - , stabiles 95
- T**
- tailored blancs 123
 - tubes 123
 - Talkum 359
 - Tannenbaumkristall 36
 - Technisch-Wissenschaftliche Vereine 1
 - Teilchen-Verbund 287
 - Teilchenverbundwerkstoff 290
 - Teilchenverfestigung 56, 57
 - Temperguss 196
 - , schwarzer 197
 - , weißer 197
 - Temperrohrguss 196
 - Tenifer®-Verfahren 183
 - Tetraederwinkel 250
 - Textur 43
 - Thermische Aktivierung 58
 - Ausdehnung 34
 - Thermisches Spritzen 313
 - Thermomechanische Behandlung 170
 - Thermomechanisches Verfahren 168
 - Thermoplaste, amorphe 266
 - , Dauergebrauchstemperatur 283
 - Thermoplaste, teilkristalline 266
 - Thermoplastische Elastomere 282
 - Polymere für Gleitlager 324
 - Thermoplastverarbeitung 271
 - Thixogießen 227
 - Tieftemperaturbehandlung 148
 - Tiefungsversuch 394
 - Titan 229
 - -Aluminid 72, 231
 - -Carbid 13
 - -Gusslegierung 231
 - -Legierung 230
 - , niedriglegiertes 230
 - , unlegiertes 229
 - Tonerde, reine 206
 - Trennbruch 380, 382, 392
 - Trennen 27

- Tribologie 347
Tribologische Beanspruchung 347
Tribooxidation 312
Tribosystem 348
– in der Technik 349
TRIP-Stahl 122
Trockenbatterie 334
Trockengleitlager 324
TWIP-Stahl 122
- U**
Überhitzen 61
Übersicht Aluminium-Verwendung im Automobilbau 215
– Beschichtungsverfahren 320
– Druckgießen 233
– Eigenschaften der NE-Metalle **203**
– Einfluss der Faserverstärkung 262
– Korrosionsschutzschichten 342
– Maßnahmen zum Verschleißschutz 363
Überstruktur **70**
Überzeit 61
Ultraschallprüfung 398
Umformen 26
–, nomalisierendes 169
Umformgrad 53
Umgehungsmechanismus 165
Umlaufbiegeversuch 386
unberuhigt vergossen 106
Unidirektional 289
Unidirektionale GMT 290
Universal-Härteprüfgerät 369
Unterkühlung 41, 42
Untersuchung, makroskopische 396
- V**
Vakuumbehandlung 44
Vakuumhärten 154
Vakumsintern 303
Vanadieren 184
Verbundungsschicht 180
Verbund Metall-Keramik 298
Verbundgleitlager 322
Verbundguss 285
Verbundkonstruktion 284
Verbundschweißen 285
Verdüsung 301
Verfahren, thermomechanisches 168
–, dynamisches 368
–, mikroskopische 395
- , statisches 368
Verfestigungsexponent n 54, 121
Verfestigungsstrahl 185
Verfestigungswalze 185
Verformung 350
–, elastische 45
–, plastische 45
Verformungsbruch 380, 382, 392
Verformungsgrad 48
Vergleich Bau- und Vergütungsstähle mit Gusseisenwerkstoffen 187
– einiger Fertigungsverfahren 24
–, Härtewerte 374
– von Fertigungsverfahren 25
Vergüten 160
Vergütung durch isothermische Umwandlung 164
Vergütungsstahl 161
Vergütungsverfahren 163
Verschleiß 360
Verschleißart 360
Verschleißbeanspruchung 131
Verschleißkenngröße 362
Verschleißmechanismus 360
Verschleißminderer 357
Verschleißprüfung 362
Verschleißschutz 363
– für Leichtmetalle 365
Verschleißschutzschichten durch Stoffeigenschaftändern 363
Versetzung 50
Versetzungsverfestigung 53
Verwertung von Kunststoffabfällen 4
Vicat-Erweichungstemperatur 268
Vickershärte 372
Viskosität 353
–, Bestimmung 354
–, Einheiten 354
– -Temperatur-Verhalten 355
VI-Verbesserer 357
Volumenschmelzfließrate 271
- W**
Walkpenetration 358
Wälzlagerstahl 125
Walzplattieren 288
Walztextur 44
Wälzverschleiß 361
Wanddickenempfindlichkeit 191
Wannenofen 207

- Warmarbeitsstahl 130 f., 155
Warmbadhärten 160
Wärmeausdehnung 35
Wärmedehnung, Vergleich 34
Warmumformung 62
Wasserstoff 102
Wasserstoffkorrosion 336
Wasserstoffkrankheit 216
Wechselfestigkeit 386
Weichglühen 142
Weichlot 325
Weißbearbeitung 238
Welded Tubes 123
Werkstoff, anorganisch-nichtmetallischer 236
–, gradierter 285
–, nichttoxischer 240
–, oxidischer 239
–, Pulvermetallurgischer 299
Werkstoffanwendung, innovative 7
Werkstoffkennwerte nichtmetallisch
 anorganischer Stoffe 245
Werkstoffnummer 407
Werkstoffschichtverbund 284
Werkstoffsubstitution 18
Werkstoffverbund 18, 284
Werkstoffwahl 20
Werkstoffwissenschaft 1
Werkzeug, funksicher 56
Werkzeugstahl 127
Werkzeugstahlguss 130
Wirbelbett 153
Wirbelstromprüfung 398, 402
Wöhlerkurve 387
- Y**
Y-Stahl 122
- Z**
Zehntelwertschicht 401
Zeilengefüge 44
Zeitdehngrenze 66, **119**
Zeit-Dehnungs-Linie 269
- Zeitfestigkeit 382
Zeitstandfestigkeit 66, **119**
Zeitstandsbild 66, 382
Zeitstandversuch 67
Zeitstandzugversuch 268
Zementieren 175
Zementit 88, 96
Zementitausscheidung 93, 96
Zementit-Kristall 87
–, primärer 96
Zerrüttung 312
Zersetzungstemperatur 266
Zinnpest 332
Zirkonoxid 239
ZTA 138
ZTU-Schaubild 128, **138**, 157
– für isotherme Umwandlung 160
– für kontinuierliche Abkühlung 158
Zugfestigkeit 378
Zugfestigkeit-Temperatur-Kurve 267
Zugprobe 375
Zugversuch 375
–, Bruchform 382
Zunder 337
Zunderung 120
Zustandsbezeichnung **204**, 208
Zustandsdiagramm 73, **74**
– Al-Cu 79
– Auswertung 81
– Blei Zinn 76
– Cu-Ni 73
– mit intermetallischen Phasen 80
– Lesen 74
Zustandsschaubild Cu-Zn 219
– Fe-Cr 98
– Fe-Mn 98
Zweifachsintertechnik 305
Zwillingsbildung 47, 75
Zwischengitterdiffusion 64
Zwischengitterplatz **71**, 86
Zwischenschicht 312