

# HANSER



## Leseprobe

zu

## Werkstofftechnik

### Werkstoffe – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung

von Wolfgang W. Seidel und Frank Hahn

ISBN (Buch): 978-3-446-45415-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-45688-4

© 2018 Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort des Herausgebers

## Was können Sie mit diesem Buch lernen?

Wenn Sie dieses Lernbuch durcharbeiten, dann erwerben Sie umfassende Kenntnisse über Werkstoffe, die Sie bei der Entwicklung von Projekten und für die Lösung produktionstechnischer Aufgaben benötigen.

Der Umfang dessen, was wir Ihnen anbieten, orientiert sich an

- den Studienplänen der Hochschulen und Berufsakademien für Technik,
- den Lehrplänen der Fachschulen für Technik in den Bundesländern.

Jeder Problemkreis wird in praxisgerechter, dem Stand der Technik entsprechender Form aufgearbeitet.

Das heißt, Sie können dabei stets folgenden Fragen nachgehen:

- Welches werkstofftechnologische Problem stellt sich dar?
- Welche Struktur und Eigenschaften der Werkstoffe liegen vor?
- Wo liegen die Lösungsmöglichkeiten und Grenzen?
- Welche Prüfverfahren sind einzusetzen?

## Wer kann mit diesem Buch lernen?

Jeder, der

- sich weiterbilden möchte,
- elementare Kenntnisse in der Mathematik und den Naturwissenschaften besitzt,
- grundlegende Kenntnisse in der Mechanik erworben hat.

Das können sein:

- Studierende an Fachhochschulen und Berufsakademien und Ingenieure,
- Studierende an Fachschulen für Technik und Techniker,
- Schüler an beruflichen Gymnasien, Berufsoberschulen und Berufsfachschulen,
- Facharbeiter, Gesellen und Meister während und nach der Berufsausbildung,
- Umschüler und Rehabilitanden,
- Teilnehmer an Fort- und Weiterbildungskursen,
- Autodidakten

vor allem im Bereich der Maschinenbautechnik.

## Wie können Sie mit diesem Buch arbeiten?

Ganz gleich, ob Sie mit diesem Buch in Schule, Betrieb, Lehrgang oder zu Hause im „stillen Kämmerlein“ arbeiten, es wird Ihnen endlich Freude machen.

*Warum?*

Ganz einfach, weil Ihnen hierzu, unseres Wissens, zum ersten Male in der technischen Literatur ein Buch vorgelegt wird, das bei der Gestaltung die Gesetze des menschlichen Lernens zur Grundlage machte. Deshalb werden Sie in jedem Kapitel zuerst mit dem bekanntgemacht, was Sie am Ende können sollen: mit den Lernzielen.

– Ein Lernbuch also! –

Danach beginnen Sie, sich mit dem Lerninhalt, dem Lernstoff, auseinanderzusetzen. Schrittweise dargestellt, ausführlich beschrieben in der linken Spalte des Buches und umgesetzt in die technisch-wissenschaftliche Darstellung auf der rechten Seite des Buches. Die eindeutige Zuordnung des behandelten Stoffes in beiden Spalten macht das Lernen viel leichter, umblättern ist nicht mehr nötig. Zur Vertiefung stellen Ihnen die Autoren Beispiele vor.

– Ein unterrichtsbegleitendes Lehrbuch. –

Jetzt können und sollten Sie sofort die Übungsaufgaben durcharbeiten, um das Gelernte so abzusichern, festzumachen. Den wesentlichen Lösungsgang und das Ergebnis der Übungen haben die Autoren am Ende des Buches für Sie aufgeschrieben.

– Also auch ein Arbeitsbuch mit Lösungen. –

Sie wollen sicher sein, dass Sie richtig und vollständig gelernt haben. Deshalb bieten Ihnen die Autoren nun einen lernzielorientierten Test an, zur Lernerfolgskontrolle. Ob Sie richtig geantwortet haben, sagt Ihnen die Testauflösung am Ende des Buches.

– Ein lernzielorientierter Test mit Lösungen. –

Trotz intensiven Lernens über Beispiele und Übungen und der Bestätigung des Gelernten im Test als erste Wiederholung verliert sich ein Teil des Wissens und Könnens wieder, wenn Sie nicht bereit sind, am Anfang oft und dann in immer längeren Zeiträumen zu wiederholen!

Das wollen Ihnen die Autoren erleichtern.

Sie haben die jeweils rechten Spalten des Buches auch noch so geschrieben, dass hier die wichtigsten Lerninhalte als Satz, stichwortartig, als Formel oder als Skizze zusammengefasst sind. Sie brauchen deshalb beim Wiederholen und auch Nachschlagen meistens nur die rechten Buchspalten zu lesen.

– Schließlich noch Repetitorium! –

Diese Arbeit ist notwendigerweise mit dem Aufsuchen der entsprechenden Kapitel oder gar dem Suchen von bestimmten Begriffen verbunden. Dafür verwenden Sie bitte das Inhaltsverzeichnis am Anfang und das Sachwortverzeichnis am Ende des Buches.

– Selbstverständlich mit Inhalts- und Sachwortverzeichnis. –

Sicherlich werden Sie durch die intensive Arbeit mit dem Buch „Ihre Bemerkungen zur Sache“ unterbringen wollen, um es so zum individuellen Arbeitsmittel zu machen, das Sie auch später gern benutzen. Deshalb haben wir für Ihre Notizen auf den Seiten Platz gelassen.

– Am Ende ist „Ihr“ Buch entstanden. –

Möglich wurde dieses Lernbuch für Sie durch die Bereitschaft der Autoren und die intensive Unterstützung durch den Verlag und seine Mitarbeiter. Beiden sollten wir herzlich danken.

Nun darf ich Ihnen viel Freude und Erfolg beim Lernen wünschen!

*Manfred Mettke*

# Vorwort

Die Eigenschaften von Bauteilen für Maschinen, Anlagen, Geräte, Fahrzeuge, Apparate usw. hängen sehr wesentlich davon ab, ob der richtige Werkstoff verwendet wird. Für technische Berufe sind deshalb Kenntnisse über Werkstoffe unerlässlich.

Das vorliegende *Lernbuch* folgt dem Wunsch, angehenden Technikern, Studenten technischer Fachrichtungen und Teilnehmern von Fortbildungsveranstaltungen das Studium werkstofftechnischer Grundlagen nach einer bewährten didaktischen Konzeption zu ermöglichen. In leicht erlernbarer Form vermittelt die zweispaltige Darstellung die chemischen und physikalischen Grundlagen der Werkstoffe, die daraus abzuleitenden Eigenschaften und deren Prüfung sowie die Verarbeitbarkeit und die Anwendungsmöglichkeiten. Werkstoffgruppen, einzelne Werkstoffe und Verfahren zur gezielten Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften sind *exemplarisch* beschrieben.

Vordergründig wird der Zusammenhang zwischen Struktur, Gefüge und den Eigenschaften und deren mögliche Beeinflussung (Wärmebehandlung, Veredlung etc.) deutlich gemacht. Neben wichtigen Konstruktionswerkstoffen einschließlich der *Verbundwerkstoffe* sind die Themen *Werkstoffprüfung* sowie *Korrosion* und *Korrosionsschutz* Gegenstand des Buches. Einteilung und Bezeichnung der Werkstoffe erfolgen in Anlehnung an das gültige Normenwerk.

Besonderer Dank gilt Frau Angela Bergner, Hochschule Mittweida, für ihre Unterstützung bei der weiteren Aktualisierung der grafischen Darstellungen, Frau Ute Eckardt, Frau Christine Fritsch und Frau Katrin Wulst vom Verlag für die kontinuierliche Förderung des Buches.

Chemnitz und Mittweida, im Sommer 2018

*Die Autoren*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	15
<b>1 Struktur und Eigenschaften der Metalle</b> .....	19
1.0 Überblick .....	19
1.1 Metallbindung und Gitterstruktur .....	19
1.1.0 Übersicht .....	19
1.1.1 Wechselwirkung zwischen Atomen .....	20
1.1.2 Kristallstruktur der Metalle .....	25
1.1.2.1 Der kristalline Zustand (Idealkristall) .....	25
1.1.2.2 Gittertypen .....	28
1.1.2.3 Realstruktur .....	32
1.1.2.4 Gitterstruktur und technische Eigenschaften .....	36
1.2 Kristallisation .....	39
1.2.0 Übersicht .....	39
1.2.1 Phasenumwandlungen .....	40
1.2.2 Thermische Analyse .....	42
1.2.3 Übergang flüssig-kristallin .....	43
1.3 Elastische und plastische Verformung .....	48
1.3.0 Übersicht .....	48
1.3.1 Mechanische Beanspruchung .....	48
1.3.2 Elastische Verformung .....	49
1.3.3 Plastische Verformung .....	50
1.4 Thermisch aktivierte Vorgänge .....	56
1.4.0 Übersicht .....	56
1.4.1 Gittervorgänge unter Temperatureinfluss .....	57
1.4.2 Diffusion .....	57
1.4.3 Erholung und Rekristallisation .....	61
Lernzielorientierter Test zu Kapitel 1 .....	67
<b>2 Legierungen</b> .....	69
2.0 Überblick .....	69
2.1 Aufbau der Legierungen .....	69
2.1.0 Übersicht .....	69
2.1.1 Mischkristall .....	70
2.1.2 Überstruktur .....	71
2.1.3 Intermetallische Verbindungen .....	72
2.1.4 Gefügebau der Legierungen .....	73
2.2 Zustandsdiagramme .....	74
2.2.0 Übersicht .....	74
2.2.1 Begriffe, Einstoffsystem .....	75

2.2.2	Zweistoffsysteme (binäre Systeme) .....	76
2.2.2.0	Einführung .....	76
2.2.2.1	Völlige Löslichkeit im festen Zustand .....	78
2.2.2.2	Unlöslichkeit im festen Zustand .....	79
2.2.2.3	System mit begrenzter Löslichkeit im festen Zustand – eutektisches System .....	79
2.2.2.4	System mit begrenzter Löslichkeit im festen Zustand – peritektisches System .....	82
2.2.3	Das Lesen der Zweistoffdiagramme .....	83
2.2.3.1	Regeln .....	83
2.2.3.2	Beispiele .....	83
2.3	Legierungseigenschaften .....	86
2.3.0	Übersicht .....	86
2.3.1	Tendenzen .....	87
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 2 .....	90
<b>3</b>	<b>Eisen-Kohlenstoff-Legierungen</b> .....	<b>91</b>
3.0	Überblick .....	91
3.1	Reines Eisen .....	91
3.2	Komponente Kohlenstoff .....	93
3.3	Allgemeines zum System Eisen-Kohlenstoff .....	94
3.4	System Eisen-Eisencarbid (Fe-Fe <sub>3</sub> C) .....	95
3.5	Die Gefügearten des Systems Eisen-Eisencarbid .....	99
3.6	Einteilung der Eisenwerkstoffe .....	103
3.7	Stabiles System Eisen-Kohlenstoff (Fe-C) .....	104
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 3 .....	106
<b>4</b>	<b>Wärmebehandlung der Eisenwerkstoffe</b> .....	<b>108</b>
4.0	Überblick .....	108
4.1	Grundlagen der Wärmebehandlung .....	108
4.1.0	Übersicht .....	109
4.1.1	Erwärmung in das Austenitgebiet (Austenitisierung) .....	111
4.1.2	Abkühlung aus dem Austenitgebiet .....	113
4.2	Thermische Verfahren .....	126
4.2.0	Übersicht .....	126
4.2.1	Glühen .....	126
4.2.1.1	Diffusionsglühen .....	128
4.2.1.2	Grobkornglühen .....	128
4.2.1.3	Normalglühen .....	129
4.2.1.4	Glühen auf kugelige Carbide .....	130
4.2.1.5	Spannungsarmglühen .....	132
4.2.1.6	Rekristallisationsglühen .....	133
4.2.2	Härten und Anlassen .....	135
4.2.3	Vergüten .....	139
4.2.4	Randschichthärten .....	143

4.3	Thermochemische Verfahren	147
4.3.0	Übersicht	147
4.3.1	Einsatzhärten	149
4.3.2	Nitrieren	153
4.4	Thermomechanische Verfahren	157
4.4.0	Übersicht	157
4.4.1	Verfahrensgrundlagen	158
4.4.2	Verfahrensvarianten	159
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 4	161
<b>5</b>	<b>Eisengusswerkstoffe</b>	<b>163</b>
5.0	Überblick	163
5.1	Erstarrung und Gefügeausbildung von Eisengusswerkstoffen	163
5.1.0	Übersicht	163
5.1.1	Einteilung der Eisengusswerkstoffe	164
5.1.2	Schwindung, Lunker, Gasblasen und Seigerung	165
5.1.3	Gefügeausbildung bei Eisengusswerkstoffen	169
5.1.3.1	Stabile und metastabile Erstarrung	169
5.1.3.2	Grundgefüge	170
5.1.3.3	Der Einfluss von Abkühlgeschwindigkeit und Wandstärke des Gussteiles	172
5.1.3.4	Graphitformen bei Gusseisen	174
5.2	Gusseisen mit Lamellengraphit	177
5.2.0	Übersicht	177
5.2.1	Erschmelzung und chemische Zusammensetzung	177
5.2.2	Wärmebehandlung	179
5.2.3	Eigenschaften und Anwendung	180
5.3	Grauguss mit Kugelgraphit	183
5.3.0	Übersicht	183
5.3.1	Erschmelzung und chemische Zusammensetzung	183
5.3.2	Wärmebehandlung	185
5.3.3	Eigenschaften und Anwendung	188
5.4	Weitere Eisengusswerkstoffe	190
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 5	195
<b>6</b>	<b>Eisenknetwerkstoffe</b>	<b>197</b>
6.0	Überblick	197
6.1	Stähle – Einteilung und Bezeichnungssysteme	197
6.1.0	Übersicht	197
6.1.1	Stahl – Definition	198
6.1.2	Einteilung der Stähle	201
6.1.3	Eisenbegleiter und Legierungselemente	204
6.1.4	Bezeichnung der Stähle	209
6.2	Stahlgruppen	216
6.2.0	Übersicht	216
6.2.1	Baustähle	216

6.2.2	Baustähle für bestimmte Wärmebehandlungen	222
6.2.3	Nichtrostende Stähle	226
6.2.4	Werkzeugstähle	231
6.2.4.1	Unlegierte und legierte Kaltarbeitsstähle	234
6.2.4.2	Warmarbeitsstähle	236
6.2.4.3	Schnellarbeitsstähle	237
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 6	240
<b>7</b>	<b>Nichteisenmetalle (NE-Metalle)</b>	<b>241</b>
7.0	Überblick	241
7.1	Allgemeines zur Werkstoffbezeichnung	242
7.1.0	Übersicht	242
7.1.1	Werkstoff- und Zustandsbezeichnungen nach EN	242
7.2	Aluminium, Aluminiumlegierungen	244
7.2.0	Übersicht	244
7.2.1	Reinaluminium	245
7.2.1.1	Eigenschaften	245
7.2.1.2	Anwendung	246
7.2.2	Aluminiumlegierungen	246
7.2.2.1	Einteilung, Eigenschaften	246
7.2.2.2	Wirkung der Legierungselemente	247
7.2.2.3	Aushärten	249
7.2.3	Legierungstyp, technische Anwendung	252
7.3	Kupfer, Kupferlegierungen	256
7.3.0	Übersicht	256
7.3.1	Reinkupfer	256
7.3.2	Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)	258
7.3.3	Kupfer-Zinn-Legierungen	261
7.4	Magnesium, Magnesiumlegierungen	262
7.4.0	Übersicht	262
7.4.1	Reinmagnesium	263
7.4.2	Magnesiumlegierungen	263
7.5	Titan, Titanlegierungen	264
7.5.0	Übersicht	264
7.5.1	Reintitan	265
7.5.2	Titanlegierungen	266
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 7	266
<b>8</b>	<b>Sinterwerkstoffe</b>	<b>268</b>
8.0	Überblick	268
8.1	Grundlagen der Sintertechnik	268
8.1.0	Übersicht	269
8.1.1	Pulverherstellung	269
8.1.2	Formgebung	269
8.1.3	Sintern	270
8.1.4	Nachbehandlung	272



8.2	Eigenschaften, Anwendungsgebiete . . . . .	272
8.2.0	Übersicht . . . . .	273
8.2.1	Sintermetalle . . . . .	273
8.2.2	Gesinterte Carbidhartmetalle (Hartmetalle) . . . . .	274
8.2.3	Oxid- und Mischkeramik . . . . .	274
8.2.4	Nichtoxidkeramik . . . . .	276
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 8 . . . . .	277
<b>9</b>	<b>Korrosion und Korrosionsschutz</b> . . . . .	<b>278</b>
9.0	Überblick . . . . .	278
9.1	Grundlagen . . . . .	278
9.1.0	Übersicht . . . . .	278
9.1.1	Ursachen der Korrosion . . . . .	279
9.1.2	Chemische Korrosion . . . . .	279
9.1.3	Elektrochemische Korrosion . . . . .	280
9.1.4	Passivierung . . . . .	282
9.2	Korrosionsarten . . . . .	283
9.2.0	Übersicht . . . . .	283
9.2.1	Korrosionsarten ohne mechanische Beanspruchung . . . . .	284
9.2.1.1	Gleichmäßige und ungleichmäßige Flächenkorrosion . . . . .	284
9.2.1.2	Lochkorrosion . . . . .	284
9.2.1.3	Spaltkorrosion . . . . .	285
9.2.1.4	Bimetallkorrosion (Kontaktkorrosion) . . . . .	285
9.2.2	Korrosionsarten mit mechanischer Beanspruchung . . . . .	286
9.2.2.1	Spannungskorrosion/Spannungsrissskorrosion . . . . .	286
9.2.2.2	Schwingungsrissskorrosion . . . . .	286
9.2.2.3	Erosions- und Kavitationskorrosion . . . . .	287
9.3	Korrosionsschutz . . . . .	288
9.3.0	Übersicht . . . . .	288
9.3.1	Aktiver Korrosionsschutz . . . . .	289
9.3.1.1	Werkstoffauswahl . . . . .	289
9.3.1.2	Korrosionsschutzgerechtes Konstruieren . . . . .	290
9.3.1.3	Katodischer Korrosionsschutz . . . . .	290
9.3.1.4	Beeinflussung des Korrosionsmediums . . . . .	291
9.3.2	Passiver Korrosionsschutz . . . . .	292
9.3.2.1	Vorbereitung der Oberfläche . . . . .	292
9.3.2.2	Organische Beschichtungen . . . . .	292
9.3.2.3	Metallische Überzüge . . . . .	294
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 9 . . . . .	297
<b>10</b>	<b>Kunststoffe</b> . . . . .	<b>298</b>
10.0	Überblick . . . . .	298
10.1	Struktur von Kunststoffen . . . . .	298
10.1.0	Übersicht . . . . .	299
10.1.1	Entstehung der Makromoleküle . . . . .	299
10.1.2	Räumliche Anordnung der Makromoleküle . . . . .	302
10.1.3	Hilfs- und Zusatzstoffe . . . . .	306

10.2	Eigenschaften und Verarbeitung von Kunststoffen . . . . .	307
10.2.0	Übersicht . . . . .	307
10.2.1	Allgemeine Eigenschaften . . . . .	308
10.2.2	Thermisch mechanische Eigenschaften von Kunststoffen . . . . .	310
10.2.2.1	Einfluss von Struktur und Temperatur . . . . .	310
10.2.2.2	Einfluss der Belastungsdauer/-geschwindigkeit . . . . .	317
10.3	Verarbeitung von Kunststoffen . . . . .	319
10.4	Ausgewählte Kunststoffe . . . . .	321
10.4.0	Übersicht . . . . .	322
10.4.1	Thermoplaste . . . . .	322
10.4.1.1	Polyethylen PE . . . . .	322
10.4.1.2	Polypropylen PP . . . . .	323
10.4.1.3	Polystyrol PS . . . . .	324
10.4.1.4	Polyvinylchlorid PVC . . . . .	324
10.4.1.5	Polyethylenterephthalat PET . . . . .	325
10.4.1.6	Weitere technische Thermoplaste . . . . .	326
10.4.2	Duroplaste . . . . .	327
10.4.2.1	Epoxidharz EP . . . . .	327
10.4.2.2	Ungesättigtes Polyesterharz UP . . . . .	328
10.4.2.3	Polyurethan (vernetzt) PUR . . . . .	329
10.4.3	Elastomere . . . . .	330
10.4.3.1	Naturkautschuk NR . . . . .	330
10.4.3.2	Styrol-Butadien-Kautschuk SBR . . . . .	331
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 10 . . . . .	332
<b>11</b>	<b>Verbundwerkstoffe</b> . . . . .	<b>333</b>
11.0	Überblick . . . . .	333
11.1	Die Struktur von Verbundwerkstoffen . . . . .	333
11.1.0	Übersicht . . . . .	333
11.1.1	Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde . . . . .	334
11.1.2	Verbundwerkstoffe – ihre Einsatzziele . . . . .	338
11.2	Teilchen- und faserverstärkte Verbundwerkstoffe . . . . .	339
11.2.0	Übersicht . . . . .	339
11.2.1	Teilchenverstärkte Verbundwerkstoffe . . . . .	340
11.2.2	Faserverstärkte Verbundwerkstoffe . . . . .	344
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 11 . . . . .	351
<b>12</b>	<b>Werkstoffprüfung</b> . . . . .	<b>352</b>
12.0	Überblick . . . . .	352
12.1	Grundlagen der Werkstoffprüfung . . . . .	352
12.1.0	Übersicht . . . . .	352
12.1.1	Werkstoffbeanspruchung . . . . .	353
12.1.2	Werkstoffprüfung – Begriff, Aufgaben und Einteilung der Werkstoffprüf- verfahren . . . . .	355
12.2	Mechanische Werkstoffprüfung . . . . .	358
12.2.0	Übersicht . . . . .	358

12.2.1	Zugversuch	358
12.2.1.0	Übersicht	358
12.2.1.1	Prüfprinzip	359
12.2.1.2	Versuchsauswertung, Kenngrößen	362
12.2.1.3	Werkstoffverhalten unter Zugbeanspruchung	369
12.2.2	Härteprüfung	374
12.2.2.0	Übersicht	374
12.2.2.1	Härteprüfung nach Brinell	376
12.2.2.2	Härteprüfung nach Vickers	378
12.2.2.3	Härteprüfung nach Rockwell (HRC)	380
12.2.2.4	Instrumentierte Eindringprüfung – Martenshärte	382
12.2.2.5	Umwerten von Härtewerten	384
12.2.3	Zähigkeitsprüfung	385
12.2.3.0	Übersicht	385
12.2.3.1	Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy	387
12.2.4	Bruchmechanische Werkstoffprüfung	392
12.2.4.1	Linear elastische Bruchmechanik LEBM	394
12.2.4.2	Fließbruchmechanik FBM	397
12.2.5	Dauerschwingprüfung	402
12.2.5.0	Übersicht	402
12.2.5.1	Dynamische Beanspruchung und Werkstoffverhalten	403
12.2.5.2	Dauerschwingversuch	405
12.2.5.3	Das Dauerfestigkeitsdiagramm nach Smith	414
12.3	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	418
12.3.0	Übersicht	418
12.3.1	Durchstrahlungsprüfung	419
12.3.2	Ultraschallprüfung	423
12.3.3	Magnetische Prüfverfahren	428
12.3.3.1	Einführung	428
12.3.3.2	Magnetpulverprüfung	429
12.3.3.3	Wirbelstromprüfung	432
12.4	Gefügeanalyse – Materialographie	436
12.4.0	Überblick	436
12.4.1	Makroskopische Untersuchungen	436
12.4.2	Lichtmikroskopie	437
12.4.3	Rasterelektronenmikroskopie	442
12.4.4	Transmissionselektronenmikroskopie	445
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 12	446
	<b>Lösungsteil</b>	448
	<b>Weiterführende Literatur</b>	464
	<b>Auskunfts- und Beratungsstellen</b>	464
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	465

# 2 Legierungen

## 2.0 Überblick

Metallische Werkstoffe begegnen uns überwiegend als Legierungen. Reine Metalle (technisch rein, d. h. mit bestimmten zulässigen Mengen an Verunreinigungen) finden sehr begrenzt, für spezielle Fälle Verwendung. Nachdem im Kapitel 1 die reinen Metalle in ihrem prinzipiellen Aufbau beschrieben und wichtige, daraus abzuleitende Eigenschaften erklärt wurden, wenden wir uns nun der Struktur realer technischer Werkstoffe zu. Neben Metallen können auch Nichtmetalle in Legierungen enthalten sein. Diese spielen für die Eigenschaften teilweise eine große Rolle. Anhand von Zweistofflegierungen wird in diesem Kapitel ein Überblick über den *Legierungsaufbau*, die so genannten *Zustandsdiagramme* und die *Eigenschaften der Legierungen* gegeben.

Sie lernen in diesem Kapitel Zusammenhänge kennen, die für das Verständnis metallurgischer Prozesse (Herstellung der Legierungen), von Aushärtvorgängen bei Leichtmetall-Legierungen, der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen u. a. Vorgänge erforderlich sind.

## 2.1 Aufbau der Legierungen

### Lernziele

Der Lernende kann . . .

- erklären, was „im festen Zustand löslich“ bedeutet,
- alle in Legierungen möglichen Phasen nennen und beschreiben,
- Beispiele für typische Mischkristallbildung nennen,
- intermetallische Phasen erklären (typische Kristallstruktur und Eigenschaften),
- das Gelernte prinzipiell auf Mehrstoffsysteme (Mehrstofflegierungen) übertragen.

### 2.1.0 Übersicht

Aufbau und Eigenschaften metallischer Werkstoffe lassen sich einfach beschreiben, indem zunächst die möglichen Phasen betrachtet werden, die allein oder nebeneinander existieren. Verschiedene Elemente können je nach Gittertyp, Gitterparameter und Atomradius gemeinsame Gitterstrukturen bilden.

Der Grad der Mischbarkeit oder Löslichkeit im festen Zustand und die Fähigkeit, gemeinsam Phasen zu bilden, unterscheidet die *Legierungssysteme*. Man kennt Einlagerungs- und Austauschmischkristalle, Überstrukturen und intermetallische Phasen. Liegen Kristallite der beteiligten Komponenten bzw. verschiedene Legierungsphasen im Gesamtgefüge nebeneinander vor, so spricht man von einem *Kristallgemisch* (Kristallgemenge).

Legierungen sind Stoffsysteme, die aus mindestens zwei Komponenten (Atome/Ionen von mindestens zwei verschiedenen Elementen) bestehen und überwiegend metallischen Charakter haben.

### 2.1.1 Mischkristall

Häufig sind Metalle bereits bei der Erstarrung fähig, andere Elemente (Metalle oder Nichtmetalle) im kristallinen Gitter mit einzubauen. Es entstehen *atomare Mischungen* oder  *feste Lösungen*.

Im Gegensatz zu valenzmäßig abgesättigten chemischen Verbindungen kann das Mischungsverhältnis in weiten Grenzen variabel sein. Man unterscheidet *Austausch-* oder *Substitutionsmischkristalle* und *Einlagerungsmischkristalle*, s. Abschnitt 1.1.2.3.

Substitution = Austausch

- *Austausch-* oder *Substitutionsmischkristalle* (Bild 2.1-1)

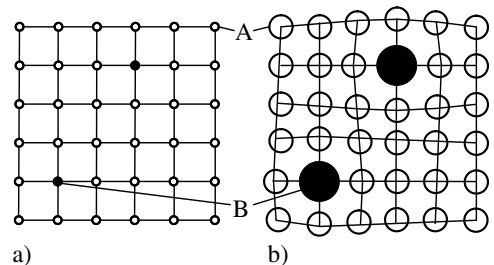
Die Atome beider Elemente nehmen die gleichen Gitterplätze ein. Diese Phase kann sich nur bilden, wenn sich die Atomradien wenig unterscheiden. Es sind ausschließlich Metalle beteiligt, und man spricht von echten Legierungen.

*Löslichkeit* oder *Mischbarkeit im festen Zustand* ist das Vermögen eines Elements, fremde Elemente im kristallinen Gitter mit einzubauen (während der Erstarrung oder durch Diffusion bei hohen Temperaturen).

*Beispiele für Mischkristallbildung* (Mk-Bildung)

Cu-Ni,  $\gamma$ -Fe-Ni, Ag-Au    lückenlose  
Mk-Reihen

Cu-Ag, Cu-Zn, Ni-Ag    begrenzte  
Mischbarkeit



**Bild 2.1-1** Austauschmischkristall (Substitutionsmischkristall)

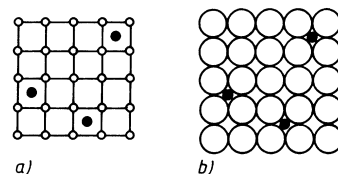
A, B verschiedene Atomarten

a) Gittermodell

b) Kugelmodell (unterschiedliche Atomgröße bewirkt Gitterverzerrungen)

- *Einlagerungsmischkristalle* (Bild 2.1-2)

Atome des Zusatzelements (Metalle oder Nichtmetalle) lagern sich auf Zwischengitterplätzen des Wirtsgitters (Gitter des Grundmetalls) ein. Eingelagert werden kleinere Atome (Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenstoff). Der  $\alpha$ -,  $\gamma$ - und  $\delta$ -Mischkristall im System Eisen-Kohlenstoff sind technisch wichtige Beispiele für diese Legierungsart.



**Bild 2.1-2** Einlagerungsmischkristall

(ohne Gitterverzerrungen)

a) Gittermodell

b) Kugelmodell

Bei Mischkristallphasen bleibt das Grundgitter erhalten. Die substituierten oder eingelagerten Atome verursachen, schon allein durch die Unterschiede im Atomdurchmesser, Gitteraufweitungen. Diese Verzerrungen führen zu Eigenschaftsänderungen. Man erhält z. B. durch die Blockierung der Gleitebenen einen deutlich erhöhten *Verformungswiderstand* (*Mischkristallverfestigung*). Auch andere, physikalische Eigenschaften ändern sich deutlich. Darauf wird im Abschnitt 2.3 näher eingegangen.

Die Verteilung der Fremdatome B in einem Grundgitter von A kann sehr unterschiedlich sein.

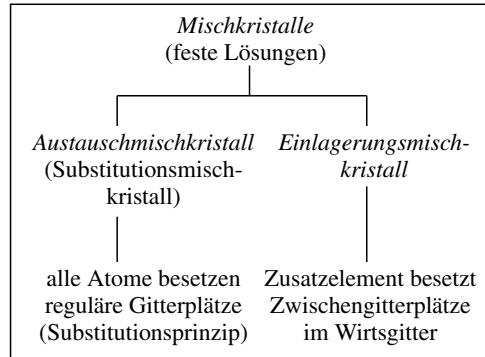
Verteilung gleichmäßig: *Homogener* Mischkristall

Verteilung ungleichmäßig: *Inhomogener* Mischkristall

## 2.1.2 Überstruktur

Überstrukturen (Bild 2.1–3b) sind Ordnungsphasen. Sie sind eine Sonderform des Austauschmischkristalls. Bei einem bestimmten Mengenverhältnis und in einem bestimmten Temperaturintervall stellt sich eine gleichmäßige und symmetrische Atomverteilung ein, ohne dass sich der Gittertyp ändert.

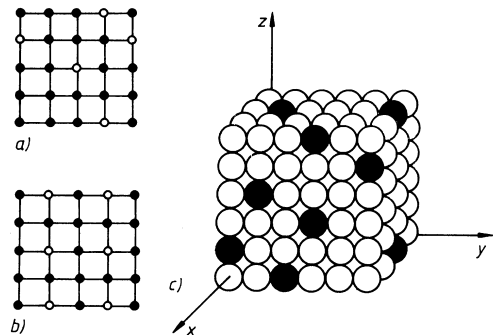
Die Bildung derartiger Ordnungsphasen führt teilweise zu sprunghaften Änderungen der elektrischen und magnetischen Eigenschaften in den betreffenden Werkstoffbereichen.



Mischkristalle werden mit griechischen Buchstaben bezeichnet.

Verwechslungsmöglichkeiten:

- a) polymorphe Metalle, z. B.  $\alpha$ -Fe,  $\gamma$ -Fe
- b) bestimmte intermetallische Phasen, z. B.  $\vartheta$  oder  $\Theta$ , für  $\text{Al}_2\text{Cu}$



**Bild 2.1–3** Atomanordnungen im Austauschmischkristall (ohne Gitterverzerrungen)

- a) Mischkristall (Fremdatome zufällig im Gitter verteilt)
- b) Überstruktur (geordnete Struktur der substituierten Atome)
- c) räumliche Darstellung eines Austauschmischkristalles

*Überstrukturen* sind Ordnungsphasen mit charakteristischen Eigenschaften.

Beispiele für Überstrukturen:  
 $\text{AuCu}$ ,  $\text{AuCu}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{Al}$ ,  $\text{FeCo}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Fe}$

### 2.1.3 Intermetallische Verbindungen

Einige Metalle bilden miteinander oder mit Nichtmetallen Verbindungen mit metallischem Charakter. Man spricht auch von *intermetallischen Phasen* oder *intermediären Kristallarten* (Bilder 2.1–4 bis 2.1–6). Die Atome der Stoffe A und B sind darin im definierten Verhältnis  $m : n$  eingebaut. Jede intermetallische Verbindung  $A_mB_n$  kristallisiert, abweichend vom Gittertyp des reinen Stoffes A oder B, in einem eigenen typischen Gitter.

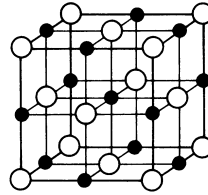
Das Gitter ist meist kompliziert. Intermetallische Phasen weisen neben der metallischen Bindung auch ionische Bindungsanteile auf. Sie sind deshalb thermisch und mechanisch sehr stabil. Viele von ihnen sind hart und spröde.

Sie werden mit der Formel  $A_mB_n$  wie klassische chemische Verbindungen bezeichnet. Wertigkeiten, nicht exakt stöchiometrische Zusammensetzungen und Gitterstruktur (keine Molekülstruktur im Sinne der Chemie) unterscheiden intermetallische Phasen von chemischen Verbindungen.

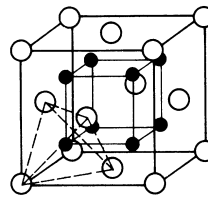
Beachten Sie!

Griechische Buchstaben werden in der Werkstofftechnik mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet:

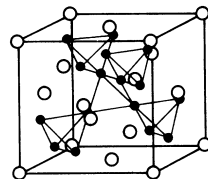
- Achsenwinkel zur Darstellung des Raumgitters und der Elementarzelle
- Gittermodifikationen reiner Metalle (polymorphe Metalle, z. B.  $\alpha$ -Fe,  $\gamma$ -Fe,  $\delta$ -Fe)
- Bezeichnung fester Phasen, z. B. Mischkristalle, Überstrukturen, Intermetallische Phasen



**Bild 2.1–4** Intermetallische Phase, NaCl-Typ (z. B. Hartstoffe TiC, TiN, VC, NbC, TaC und in verschiedenen aushärtbaren Legierungen)



**Bild 2.1–5** Intermetallische Phase,  $Mg_2Pb$ -Typ (z. B.  $Mg_2Si$ ,  $Mg_2Pb$ ,  $Al_2Cu$ )



**Bild 2.1–6** Intermetallische Phase,  $MgCu_2$ -Typ (z. B.  $CuBe_2$ ,  $MgCu_2$ , aushärtbare Legierungen)

*Intermetallische Verbindungen* (Metall/Metall) oder *intermediäre Verbindungen* (Metall/Nichtmetall) zeichnen sich durch eine eigene, meist komplizierte Gitterstruktur aus. Dazu gehören die harten und spröden *Carbide* (z. B. WC,  $W_2C$ ,  $Mo_2C$ , VC, TiC) und *Nitride* (z. B. TiN,  $Mo_2N$ ,  $Fe_4N$ ). Die Schmelztemperaturen und die Mikrohärtewerte dieser Phasen liegen hoch.

## 2.1.4 Gefügeaufbau der Legierungen

Erstarrt eine Schmelze, in der zwei Atomarten (A + B) als *homogene Lösung* vorliegen, so können je nach Art der beteiligten Elemente

- Mischkristalle oder intermetallische Phasen (einzeln oder nebeneinander) oder
- reine Kristalle der beteiligten Elemente (nebeneinander oder mit Phasen nach a) gemischt auftreten.

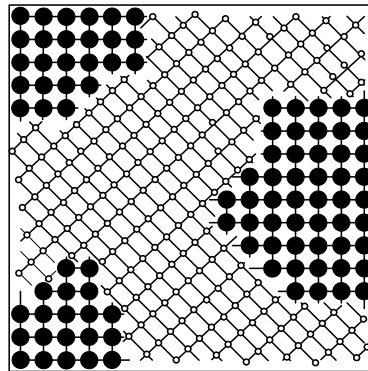
Besteht der Werkstoff nur aus Kristallen einer einzigen Phase, so weist er ein homogenes Gefüge auf.

Existieren verschiedene Phasen als Kristallite in einer Legierung nebeneinander, so spricht man von einem heterogenen Gefüge bzw. einem *Kristallgemisch* (Bild 2.1–7). Praktische Bedeutung:

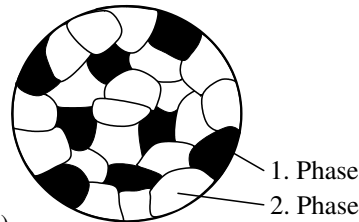
- *Homogene Mischkristalle* werden z. B. bei korrosionsbeständigen Stählen gefordert.
- *Heterogene Gefüge* (harte und weiche Kristallite nebeneinander) sind z. B. bei verschiedenen Lagerwerkstoffen erwünscht.

Legierungen können im festen Zustand folgende *Phasen* enthalten:

- reine Kristalle von A und B
- Austauschmischkristalle, Überstrukturen
- Einlagerungsmischkristalle
- intermetallische Phasen



a)



b)

**Bild 2.1–7** Kristallgemisch (heterogenes Gefüge)

a) Kugelmodell (2 Atomarten)

b) Gefüge (2 beliebige, verschiedene feste Phasen)

In einem *Kristallgemisch* (Kristallgemenge) existieren mindestens zwei Phasen (nicht mischbar) im Gefüge nebeneinander (*heterogenes Gefüge*).

### Übung 2.1–1

Welche Mischkristallarten kennen Sie?

### Übung 2.1–2

Welche Haupteigenschaften haben intermetallische Phasen?

### Übung 2.1–3

Was ist ein Kristallgemisch?



des Rohstahles werden in 250 mm dicken und 1500 mm . . . 2000 mm breiten endlosen Strängen (Brammen) *vergossen*. Der restliche Teil des *Stahles* wird zu Blöcken, Dünnbrammen oder dünnen Bändern vergossen. Nach dem Vergießen schließt sich zwingend das Walzen oder Schmieden an. Bild 6.1–1 gibt schematisch einen Überblick über den Prozess der Stahlherstellung.

### Übung 6.1–1

Was ist Roheisen?

### Übung 6.1–2

Welche Aufgabe hat der Prozessschritt Frischen bei der Stahlherstellung?

### Übung 6.1–3

Warum müssen die Stähle ausgiebig entschwefelt werden?

### Übung 6.1–4

Welche Ziele werden mit der Warmumformung verfolgt?

## 6.1.2 Einteilung der Stähle

In der DIN EN 10 020 werden die *Stähle* unterteilt nach *chemischer Zusammensetzung* und *Hauptgüteklassen*. Nicht genormt, aber in der Praxis häufiger angewandt, ist die Einteilung nach Verwendungszweck, Weiterverarbeitung oder bestimmten chemischen oder physikalischen Eigenschaften der *Stähle*.

- a) Einteilung nach der chemischen Zusammensetzung
- unlegierte Stähle
  - legierte Stähle
  - nichtrostende Stähle

Wird der in Tabelle 6.1–1 aufgeführte Grenzgehalt nicht überschritten, ist der Stahl unlegiert. Weist mindestens ein Element einen größeren Anteil auf, handelt es sich um einen legierten Stahl. Überschreitet der Chromgehalt 10,5 % und der Kohlenstoffanteil ist kleiner als 1,2 %, dann ist der Werkstoff der Gruppe der nichtrostenden Stähle zuzuordnen.

b) Einteilung nach Hauptgüteklassen

- *Edelstähle* (legiert und unlegiert)
- *Qualitätsstähle* (legiert und unlegiert)

*Edelstähle* haben einen Phosphor- und Schwefelgehalt der Schmelzenanalyse von  $\leq 0,02\%$  und weisen einen besonders niedrigen Gehalt an nichtmetallischen Einschlüssen auf. Durch ihre hohe Reinheit und homogene Zusammensetzung sind *Edelstähle* besonders gut für Randschichthärtung und Vergüten geeignet. Es gibt legierte und unlegierte *Edelstähle*. Um ein gleichmäßiges Ansprechen auf ein Wärmebehandlungsverfahren zu garantieren, muss der Anteil der Legierungselemente exakt eingehalten werden.

*Qualitätsstähle* müssen Mindestanforderungen an Zähigkeit, Korngröße und/oder Umformbarkeit erfüllen, dürfen aber einen höheren Phosphor- und Schwefelanteil als die *Edelstähle* aufweisen und haben allgemein einen geringeren Reinheitsgrad.

c) Einteilung nach Verwendungszweck, Weiterverarbeitung, nachfolgenden Wärmebehandlungsverfahren, besonderen chemischen, physikalischen und thermischen Eigenschaften

Bei der Konstruktion oder Verwendung zeigt sich, dass eine praxisnahe Einteilung der *Stähle* nach ihrem Verwendungszweck, bestimmten Verarbeitungsverfahren oder Eigenschaften sinnvoll ist. Es werden *Stähle* für konstruktive Aufgaben zur Aufnahme und Übertragung von Kräften und Momenten (Baustähle) und *Stähle* zur Bearbeitung anderer Werkstoffe (Werkzeugstähle) unter-

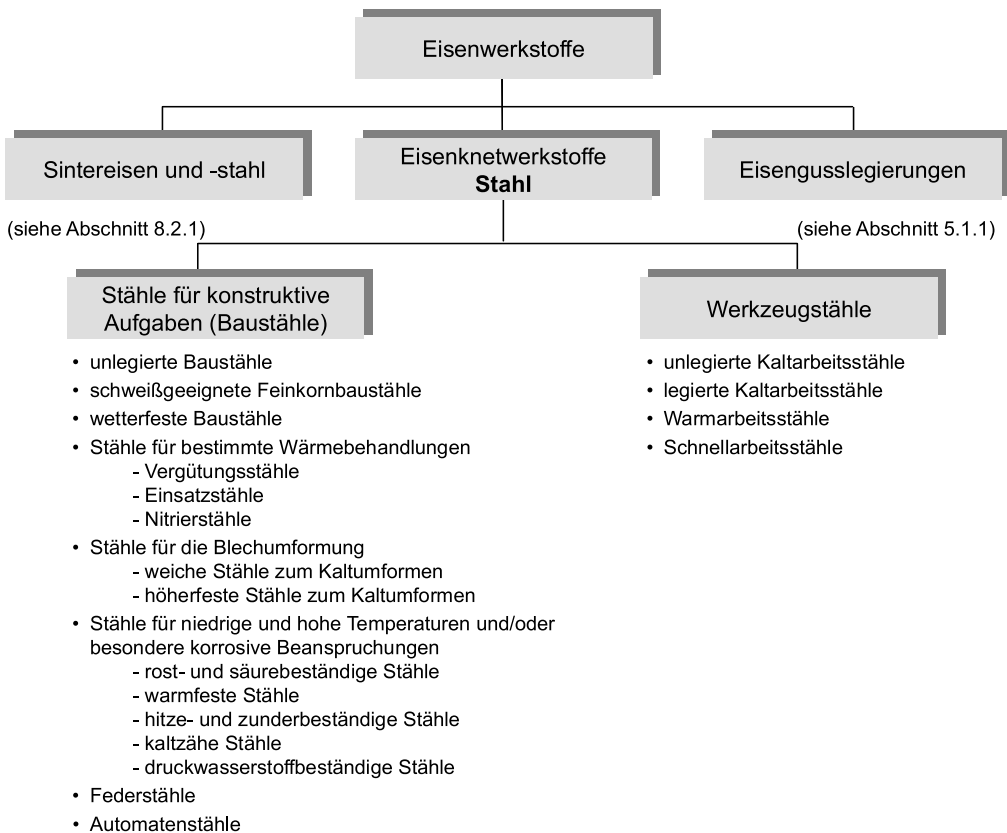
**Tabelle 6.1–1** In DIN EN 10 020 festgelegte Grenzgehalte zwischen unlegierten und legierten Stählen

Element	Grenzgehalt in Masse-Prozent
Aluminium	0,30
Bor	0,0008
Bismut	0,10
Cobalt	0,30
Chrom	0,30
Kupfer	0,40
Lanthan und die im Periodensystem nachfolgenden 14 Elemente (einzeln gewertet)	0,10
Mangan	1,65
Molybdän	0,08
Niob	0,06
Nickel	0,30
Blei	0,40
Selen	0,10
Silicium	0,60
Tellur	0,10
Titan	0,05
Vanadium	0,10
Wolfram	0,30
Zirkonium	0,05
Sonstige (mit Ausnahme von Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel, Stickstoff) (jeweils)	0,10

*Edelstähle* weisen einen maximalen Phosphor- und Schwefelgehalt von 0,02 % auf. Der zulässige Anteil an nichtmetallischen Einschlüssen ist sehr gering.

*Qualitätsstähle* dürfen einen höheren Phosphor- und Schwefelanteil enthalten.

schieden. Diese teilen sich dann in weitere Untergruppen auf. Wird beispielsweise ein Werkstoff im Bauwesen für Tragkonstruktionen (z. B. Stahlbauhallen) gesucht, so sind die *Stähle* mit den infrage kommenden Verarbeitungs- und Einsetzeigenschaften unter der Gruppe „*Stahl* für den Stahlbau“ (genauer: „unlegierte Baustähle“ und „schweißgeeignete Feinkornbaustähle“ zu finden. Soll der *Stahl* für eine Schmiedematrize eingesetzt werden, wird ein Werkzeugstahl benötigt, der auch höheren Temperaturen standhält. Infrage kommt daher in erster Linie ein Stahl aus der Gruppe der „Warmarbeitsstähle“.



**Bild 6.1–2** Einteilung der Eisenwerkstoffe und Stähle

### Übung 6.1-5

Ist ein Stahl mit 1,5 % Mangan ein legierter Stahl?

### Übung 6.1-6

Welche Vorteile hat ein Edelstahl gegenüber einem Qualitätsstahl?

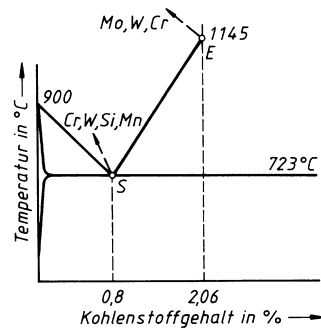
## 6.1.3 Eisenbegleiter und Legierungselemente

Stähle enthalten neben Eisen und Kohlenstoff immer noch weitere Elemente. Die *Stahlbegleitelemente* (C, Mn, Si, S, P) kommen über den Hochofenprozess durch Erze bzw. den Energielieferanten Koks oder Zugabe von Schrott in den *Stahl*. Außerdem reichern sich beim *Frischen* und durch den Kontakt mit der Atmosphäre in der Stahlschmelze Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff an. Sauerstoff und Schwefel können außerdem Verbindungen eingehen, die im Stahl als unerwünschte nichtmetallische Einschlüsse zu finden sind. Um die Eigenschaften des *Stahles* gezielt zu verändern, können *Legierungselemente* in genauer Dosierung zugegeben werden.

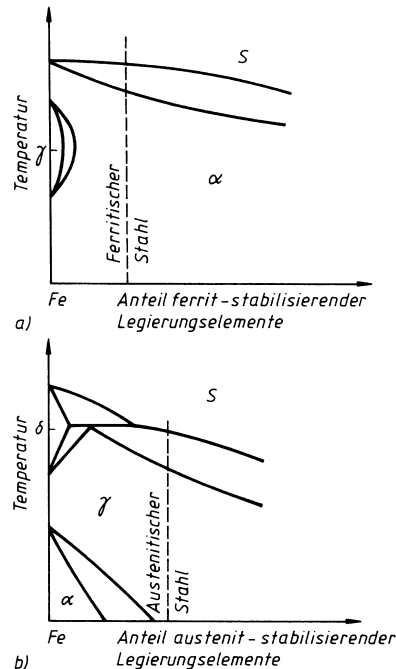
Die Wirkung der *Begleit-* und *Legierungselemente* ist recht unterschiedlich und zum Teil äußerst komplex. So beeinflussen einige Elemente das Gleichgewicht der Phasen, die Löslichkeit von Kohlenstoff in den Mischkristallen und die Umwandlungspunkte im Zustandssystem Fe-Fe<sub>3</sub>C (Bild 6.1-3). Elemente wie Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, W und V erweitern das Ferritgebiet (Bild 6.1-4a) und können bei hoher Dosierung dafür sorgen, dass die  $\alpha - \gamma$ -Umwandlung unterbleibt (ferritische *Stähle*). Bei einem hohen Anteil an Ni, Co, Mn und N kann die Ferritbildung komplett unterdrückt werden (austenitische *Stähle*, Bild 6.1-4b).

**Bild 6.1-4** Einfluss der Legierungselemente auf die Gitterstruktur der Stähle (hochlegiert)

- a)  $\gamma$ -Gebiet eingeschnürt (ferritischer Stahl)
- b)  $\gamma$ -Gebiet erweitert (austenitischer Stahl)



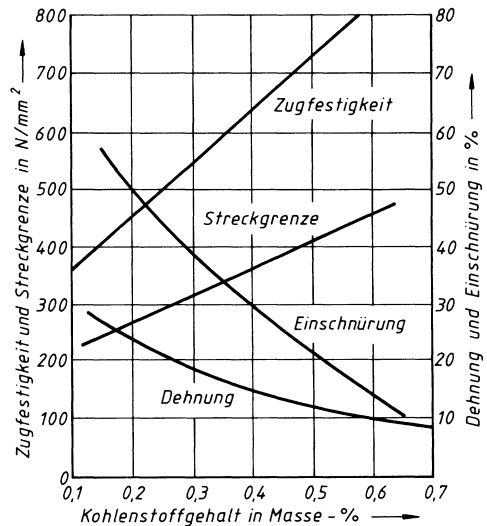
**Bild 6.1-3** Verschiebung der Punkte S und E im System Fe-Fe<sub>3</sub>C durch Legierungselemente



Wie bereits im Abschnitt 4.1 dargestellt, beeinflussen die *Legierungselemente* das Umwandlungsverhalten bei beschleunigter Abkühlung, d. h. vereinfacht: Alle Legierungselemente vermindern die obere und untere kritische Abkühlgeschwindigkeit. Demzufolge verbessern sie die Einhärbarkeit der *Stähle*. Auf der anderen Seite senken die Elemente C, Mn, Cr, Ni, Mo und V die Martensitstarttemperatur  $M_s$ , was einen höheren Restaustenitgehalt beim Härten zur Folge haben kann. Co und Al dagegen erhöhen die  $M_s$ -Temperatur.

Die Elemente Cr, Mo, V, W, Nb und Ta sind wichtige Carbidgebildner. Nitride werden von den Elementen Al, Cr, Mo und V gebildet. Sind die Carbide und Nitride klein und fein verteilt, hat das eine hohe Festigkeit, Warmfestigkeit und Härte bei gleichzeitig ausreichender Zähigkeit zur Folge.

In Tabelle 6.1–2 sind die wichtigsten *Begleit- und Legierungselemente* unter Berücksichtigung ihrer Wirkung und Anwendung zusammengefasst.



**Bild 6.1–5** Mechanische Eigenschaften unlegierter Stähle (warmgewalzt) in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt

**Tabelle 6.1–2** Wirkung und Anwendung der wichtigsten Stahlbegleit- und Legierungselemente

Element	Wirkung und Bedeutung	Anwendung
Kohlenstoff C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wichtigstes Begleit- und Legierungselement im Stahl; wird entweder im Mischkristall gelöst oder liegt gebunden als Carbid oder Carbonitrid vor</li> <li>• sorgt für tetragonale Verspannung im Martensit</li> <li>• erhöht Festigkeit, Härte und Verschleißwiderstand, aber mindert Zähigkeit (Bild 6.1–5); verschlechtert Umformvermögen, Spanbarkeit und Schweißbarkeit</li> </ul>	in allen Stählen vorhanden; C-Gehalt muss auf Verarbeitung, Wärmebehandlung und Einsatzbedingungen exakt abgestimmt werden
Mangan Mn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reduziert kritische Abkühlgeschwindigkeit sehr stark → verbessert Einhärtbarkeit entscheidend</li> <li>• bindet Schwefel; anstelle von FeS bildet sich Mangansulfid (MnS); MnS hat im Vergleich zu FeS eine höhere Schmelztemperatur und wird beim Umformen zu Sulfidzeilen ausgewalzt → verbesserte Warmumformbarkeit; deutlich geringere versprödennde Wirkung als FeS</li> <li>• MnS-Zeilen führen zu Anisotropie (richtungsabhängige Festigkeit und Zähigkeit, haben aber beim Spanen eine spanbrechende Wirkung (verbesserte Spanbarkeit bei Automatenbearbeitung)</li> <li>• stabilisiert Austenit (preiswerte Alternative im Vergleich zu Nickel als Legierungselement in austenitischen Stählen)</li> <li>• wirkt desoxidierend (bindet Sauerstoff, beruhigt Rohstahlschmelze)</li> <li>• Mn führt zu Mischkristallverfestigung im Ferrit (Festigkeitssteigerung, aber auch höhere Span- und Umformkräfte bei Verarbeitung notwendig)</li> </ul>	geringe Mengen in allen Stählen, um den Rest Schwefel im Stahl abzubinden; Mn-legierte Vergütungsstähle, legierte Kaltarbeitsstähle, Hartmanganstähle (äußerst verschleißbeständige hochmangan- und kohlenstoffhaltige austenitische Stähle)
Silicium Si	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wirkt desoxidierend (beruhigend)</li> <li>• erweitert Ferritgebiet</li> <li>• erhöht Festigkeit, insbesondere Streckgrenze und Warmfestigkeit (Legierungselement bei Federstählen)</li> <li>• verbessert Zunderbeständigkeit</li> <li>• vermindert Zähigkeit (Kerbschlagenergie)</li> <li>• hohe Siliciumgehalte verschlechtern Warm- sowie Kaltumformbarkeit und Schweißbarkeit</li> </ul>	Federstähle, Transformatorbleche
Phosphor P	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wirkt stark versprödennd, verursacht Grobkorn</li> <li>• reichert sich bei Erstarrung in der Restschmelze an und verdrängt bei <math>\gamma</math>-<math>\alpha</math>-Umwandlung den Kohlenstoff (Kristallseigerungen) → führt zu Ferritzeilenbildung (hoher P-Anteil im Ferrit neben P-armen Perlitzeilen) → Anisotropie des Stahles, Verminderung der Zähigkeit</li> <li>• neben Stickstoff die Hauptursache für Alterungsanfälligkeit des Stahles, anlassversprödennde Wirkung</li> <li>• stark mischkristallverfestigende Wirkung</li> <li>• erhöht Witterungsbeständigkeit von Baustählen</li> </ul>	höherfeste Stähle für Kaltumformung (IF-Stähle, BH-Stähle, phosphorlegierte Stähle mit $P < 0,12\%$ ); wetterfeste Stähle für den Stahlbau

**Tabelle 6.1–2** Wirkung und Anwendung der wichtigsten Stahlbegleit- und Legierungselemente (*Forts.*)

Element	Wirkung und Bedeutung	Anwendung
Schwefel S	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ist im Stahl praktisch nicht löslich, verbindet sich mit Eisen zu Eisensulfid FeS</li> <li>• Eutektikum Fe-FeS erstarrt erst bei 958 °C (vgl. Abschnitt 2.2.2.2) → Entstehung von Heißrisen beim Warmumformen oder Schweißen (<math>T &gt; 958 \text{ °C}</math>) durch örtliches Aufschmelzen des Eutektikums</li> <li>• erstarrtes FeS ist spröde und führt beim Kaltumformen zu Rissbildung und bei Einsatztemperatur zu niedriger Zähigkeit</li> <li>• Minimierung des Schwefelgehaltes im Stahl ist zwingend notwendig; ausreichend Mangan bindet Schwefelrest ab (Verhältnis S : Mn = 1 : 1,72).</li> <li>• geringe Mengen S (<math>&lt; 0,04 \%</math>) bei ausreichend Mn verbessern die Spanbarkeit</li> </ul>	immer unerwünscht; geringer Schwefelgehalt (0,02...0,04 %) in Automatenstählen verbessert Spanbarkeit
Sauerstoff O	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gelangt über das Frischen in den Stahl</li> <li>• führt im Stahl immer zur Versprödung</li> <li>• durch nachlassende Löslichkeit mit abnehmender Temperatur für O im Stahl kommt es beim Erkalten der Stahlschmelze zur „Kochreaktion“ → Gasblasen im Stahl; Desoxidation mit Al, Mn und Si notwendig</li> <li>• bei ungenügender Desoxidation finden sich spröde, nichtmetallische Eisenoxide (FeO) im Stahl</li> <li>• FeO und FeS bilden niedrigschmelzendes Eutektikum, das Heißrisbildung fördert (siehe Schwefel)</li> </ul>	immer unerwünscht
Wasserstoff H	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wird im schmelzflüssigen, aber auch im erstarrten Zustand aus Atmosphäre aufgenommen</li> <li>• bei Temperaturen unter 200 °C ist keine Löslichkeit mehr vorhanden, atomarer Wasserstoff rekombiniert zu Molekülen und drückt Korngrenzen in kleinen Bereichen auseinander; diese kleinen inneren Risse begünstigen sprödes Versagen insbesondere bei tiefen Temperaturen</li> <li>• Beseitigung von H erfolgt durch Vakuumentgasen und langsame Abkühlung oder Glühung im Bereich 200 °C ... 300 °C</li> </ul>	immer unerwünscht
Stickstoff N	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stahlschmelze nimmt N aus Atmosphäre auf; bei Raumtemperatur keine Löslichkeit für N im Stahl</li> <li>• zwangsgelöster N sammelt sich in Nähe von Versetzungen und blockiert diese → keine Versetzungsbewegung = Versprödung (Reckalterung)</li> <li>• bei 200 °C... 300 °C läuft Reckalterung beschleunigt ab (Anlassversprödung oder wegen Anlassfarbe des Stahles auch Blausprödigkeit genannt).</li> <li>• Fe bildet Nitride (Fe<sub>4</sub>N), die zu Festigkeitssteigerung, aber auch Versprödung führen</li> <li>• N ist ein austenitstabilisierendes Element</li> <li>• beim Nitrieren wird in Randbereich bewusst N eingebracht → nitridreiche Oberfläche ist besonders verschleißbeständig</li> </ul>	austenitische rost- und säurebeständige Stähle; im Randbereich von nitrierten Stählen

**Tabelle 6.1–2** Wirkung und Anwendung der wichtigsten Stahlbegleit- und Legierungselemente (*Forts.*)

Element	Wirkung und Bedeutung	Anwendung
Chrom Cr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sind im Stahl 13 % Cr oder mehr gelöst, wird er rost- und säurebeständig → auf der Oberfläche bildet sich dichte schützende Oxidschicht</li> <li>• verbessert Zunderbeständigkeit und Einhärtbarkeit</li> <li>• bildet Carbide, sind diese klein und fein verteilt, werden Festigkeit und Dauerfestigkeit erheblich verbessert, ohne Zähigkeit zu beeinträchtigen</li> <li>• bildet Nitride; beim Nitrieren wird Verschleißschutz verbessert</li> </ul>	rost- und säurebeständige Stähle, Vergütungsstähle, Einsatzstähle, Nitrierstähle, wetterfeste Baustähle, Werkzeugstähle, warmfeste Stähle, zunderbeständige Stähle
Nickel Ni	<ul style="list-style-type: none"> <li>• steigert Zähigkeit und Tieftemperaturzähigkeit des Stahles</li> <li>• verbessert Einhärtbarkeit erheblich</li> <li>• weisen rost- und säurehaltige Stähle neben Cr auch entsprechenden Ni-Gehalt auf → Korrosionsbeständigkeit steigt</li> <li>• erhöht Warmfestigkeit und Zunderbeständigkeit des Stahles</li> <li>• erweitert Austenitgebiet und ist deshalb wichtigstes Legierungselement der austenitischen Stähle</li> </ul>	Einsatzstähle, Vergütungsstähle, austenitische rost- und säurebeständige Stähle, Werkzeugstähle, kaltzähe Stähle, warmfeste Stähle
Molybdän Mo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• carbid- und nitridbildendes Element, verbessert Einhärtbarkeit des Stahles</li> <li>• Mo und feinstverteilte Mo-Carbide steigern Festigkeit, Dauerfestigkeit und Verschleißbeständigkeit</li> <li>• bei rost- und säurebeständigem Cr-Ni-Stahl wird durch Mo die Beständigkeit gegen Chloridionen, Lochfraß und transkristalline Korrosion erhöht</li> <li>• verbessert Anlassbeständigkeit (mindert Festigkeitsverlust mit zunehmender Anlass temperatur) und beugt Anlassversprödung bei 500 °C vor</li> </ul>	Einsatz-, Vergütungs- und Nitrierstähle, rost- und säurebeständige Stähle, Werkzeugstähle, warmfeste Stähle
Vanadium V	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feinkornbildner</li> <li>• bildet Carbide und Nitride</li> <li>• verbessert Einhärtbarkeit und Anlassbeständigkeit</li> </ul>	Werkzeug-, Nitrier- und Vergütungsstähle, schweißgeeignete Feinkornbaustähle
Wolfram W	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bildet thermisch besonders stabile und harte Carbide, die Warmfestigkeit, Warmverschleißbeständigkeit und Schneidhaltigkeit eines Werkzeuges steigern</li> </ul>	Warm- und Schnellarbeitsstähle
Cobalt Co	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erhöht Einhärtbarkeit und verschiebt Sekundärhärtemaximum von Warm- und Schnellarbeitsstählen zu höheren Temperaturen → Verbesserung der Anlassbeständigkeit</li> <li>• behindert Austenitkornwachstum bei hohen Härtetemperaturen</li> </ul>	Warm- und Schnellarbeitsstähle
Aluminium Al	<ul style="list-style-type: none"> <li>• desoxidiert Stahl und bindet gleichzeitig als Nitridbildner den Stickstoff ab</li> <li>• Al-Nitride behindern bei Feinkornbaustählen das Kornwachstum</li> </ul>	schweißgeeignete Feinkornbaustähle, Nitrierstähle



**Tabelle 6.1–2** Wirkung und Anwendung der wichtigsten Stahlbegleit- und Legierungselemente (*Forts.*)

Element	Wirkung und Bedeutung	Anwendung
Titan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• starker Carbiddbildner</li> <li>• bindet Sauerstoff und Stickstoff und hat kornfeinende Wirkung</li> <li>• wirkt bei rost- und säurebeständigen Stählen interkristalliner Korrosion entgegen</li> </ul>	schweißgeeignete Feinkornbaustähle, IF-Stähle, rost- und säurebeständige Stähle
Kupfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• verbesserte Korrosionsbeständigkeit (wetterfeste Baustähle)</li> <li>• verschlechtert Warmumformbarkeit bei Gehalten über 0,5 %</li> </ul>	wetterfeste Baustähle

### 6.1.4 Bezeichnung der Stähle

In DIN EN 10027 Teil 1 und 2 sind die Stahlbezeichnungssysteme genormt.

a) Kurznamen, die Hinweise auf die Verwendung und die mechanischen oder physikalischen Eigenschaften der Stähle enthalten

Diese Kurznamen werden genutzt, wenn der *Stahl* zum Zweck einer definierten Anwendung erworben wird (z. B. Baustahl, Stahl für Druckbehälter, Elektroblech) und eine nachfolgende Wärmebehandlung nicht mehr vorgesehen ist. Bei diesen *Stählen* stehen die Anwendungseigenschaften (Festigkeit, Zähigkeit, u. U. auch magnetische Eigenschaften), die für das Material garantiert werden, im Vordergrund. Die Kurznamen setzen sich aus Haupt- und Nebensymbolen zusammen (Bild 6.1–6). Die Hauptsymbole kennzeichnen die Stahlsorte und die wichtigste Eigenschaft des Werkstoffes. Die Zusatzsymbole beschreiben z. B. den Behandlungszustand, die Oberflächenbehandlung, den Verwendungszweck oder die Eignung für die Weiterverarbeitung und ergänzen die mechanischen oder physikalischen Eigenschaften (Tabelle 6.1–3 und 6.1–4).

Wichtige Kennbuchstaben für Stahlsorten:

- S Stahl für den Stahlbau
- E Maschinenbaustahl
- P Stähle für Druckbehälter
- L Stähle für Rohrleitungen
- B Betonstahl
- D Flacherzeugnisse zum Kaltumformen
- H Flacherzeugnisse aus höherfesten Stählen zum Kaltumformen

**Tabelle 6.1–3** Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse für die Art des Überzuges nach DIN EN 10027 Teil 1, Tabelle 17 (Auswahl)

Symbol	Bedeutung
+AZ	mit einer Al-Zn-Legierung überzogen (> 50 % Al)
+OC	organisch beschichtet
+S	feuerverzinkt
+SE	elektrolytisch verzinkt
+Z	feuerverzinkt
+ZA	mit einer Zn-Al-Legierung überzogen (> 50 % Zn)
+ZE	elektrolytisch verzinkt
+ZN	Zink-Nickel-Überzug (elektrolytisch)

**Übung 12.2–7**

Was versteht man unter der Härte eines Werkstoffes?

**Übung 12.2–8**

Weshalb ist das Härteprüfverfahren nach Brinell für gehärtete Stähle nicht geeignet?

**Übung 12.2–9**

Wie kann man die Härte dünner Bleche oder nitrierter Randzonen von Werkstücken zuverlässig ermitteln?

**Übung 12.2–10**

Wie unterscheidet sich das Prüfprinzip nach Rockwell (HRC) von den anderen klassischen Eindringverfahren nach Brinell und Vickers?

### 12.2.3 Zähigkeitsprüfung

#### Lernziele

Der Lernende kann . . .

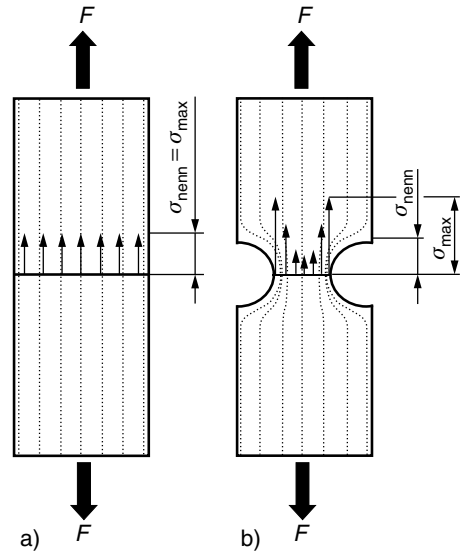
- das Bruchverhalten metallischer Werkstoffe bei schlagartiger Beanspruchung und unter Wirkung eines Kerbes erläutern,
- den Einfluss einer Kerbe auf den Spannungszustand im Bauteil beschreiben,
- das Versuchsprinzip des Kerbschlagbiegeversuches erklären,
- die Übergangstemperatur beim Kerbschlagbiegeversuch bestimmen.

#### 12.2.3.0 Übersicht

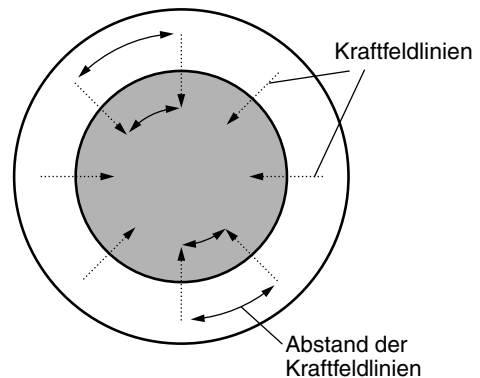
Vom Zugversuch ist bekannt, dass sich ein Großteil der metallischen Werkstoffe plastisch verformen lässt. Ist der Zugstab gekerbt, sind die erreichbaren Bruchdehnungen in der Regel viel kleiner. Wird der Kerb schärfer, d. h. der Kerbradius kleiner, kann es sogar zum *spröden Versagen* kommen (*Sprödbbruch*). Allein die Wirkung des Kerbes kann den Übergang vom gut verformbaren, zähen Werkstoffverhalten zum spröden Werkstoffversagen ohne Anzeichen einer plastischen Verformung führen. Verstärkt wird dieser Trend durch höhere Belastungsgeschwindigkeiten und niedrige Temperaturen. Typische Kerben in der Praxis sind Geometrieübergänge an kraft- und momentenübertragenden Bauteilen wie z. B. an Wellen (u. a. Passfedernuten). Die *schärfste Kerbform* in einem realen Bauteil ist ein *Anriss*. *Zähigkeitsuntersuchungen* sollen die Neigung eines Werkstoffes zum Sprödbbruch unter gleichzeitiger Wirkung einer Kerbe/eines Anrisses untersuchen. Es soll festgestellt werden, ob ein Werkstoff in der Lage ist, Spannungsspitzen an der Rissspitze durch plastische Verformung abzubauen.

Wirkt auf einen geraden Zugstab eine Kraft in axialer Richtung, so sind die Kraftfeldlinien gerade und gleichmäßig verteilt (Bild 12.2–27a). Das hat zur Folge, dass auch die größte Normalspannung in der Ebene senkrecht zur angreifenden Kraft überall gleich groß ist. Die Nennspannung  $\sigma_{nenn}$  (Kraft bezogen auf den kleinsten Querschnitt) ist gleich der Maximalspannung  $\sigma_{max}$ . Da nur eine Normalspannung auftritt, spricht man von einem *einachsigen Spannungszustand*. Ist dagegen der Zugstab gekerbt, müssen die Kraftfeldlinien den Kerb umgehen (Bild 12.2–27b). Im Kerbgrund ist die Dichte der Kraftfeldlinien höher als im Kern des Zugstabes. Das hat *Spannungsspitzen*  $\sigma_{max}$  im Kerbgrund in axialer Richtung zur Folge. Gleichzeitig werden die normalerweise axial verlaufenden Kraftfeldlinien in radialer Richtung nach Innen abgelenkt. Das führt zu einer *radialen Spannung*. Betrachtet man einen Schnitt im Kerbgrund (Bild 12.2–28), so wird deutlich, dass die Kraftfeldlinien nicht nur radial abgelenkt werden, sondern dass diese außerdem ihren Abstand in Umfangsrichtung (tangentielle Richtung) ändern müssen. Es tritt zusätzlich noch eine *tangentiale Spannung* auf. Obwohl nur eine einzige Kraft in axialer Richtung angreift, führt der Kerb zu drei wirkenden Spannungen. Solange sich der Werkstoff nicht plastisch verformt, führt die größere Dichte der Kraftfeldlinien im Kerbgrund zu Spannungsspitzen in allen drei Raumrichtungen. Dabei handelt es sich immer um Zugspannungen.

Bei der Beschreibung des Zugversuches wurde darauf hingewiesen, dass die Verlängerung der Probe mit der Abnahme des Querschnittes verbunden ist. Wird aber der Werkstoff, wie im Kerbgrund, allseitig auseinander gezogen, so kann er sich nicht mehr ohne Weiteres plastisch verformen. Die *Querkontraktion wird behindert*. Wenn eine Probe/ ein Werkstück gekerbt ist, dann ist diese



**Bild 12.2–27** Verlauf der Kraftfeldlinien und Verteilung der axialen Spannung im a) geraden und b) gekerbten Zugstab



**Bild 12.2–28** Schnitt im Kerbgrund einer Zugprobe – Im Kerb werden die Kraftfeldlinien in radialer Richtung abgelenkt und in Umfangsrichtung dichter zusammen gedrängt – Ursache für Radial- und Tangentialspannung im Kerbgrund

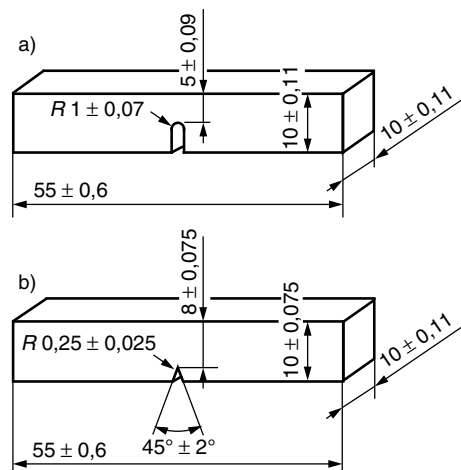
Verformungsbehinderung die Ursache für die Versprödung eines Werkstoffes. Ist ein Werkstoff in der Lage, sich unter diesen Bedingungen trotzdem plastisch zu verformen, dann hat er eine hohe *Zähigkeit*. Er ist in der Lage, die *Spannungsspitzen* im Kerbgrund durch plastische Verformung abzubauen. Spröde Werkstoffe sind dazu nicht in der Lage. Der Riss breitet sich schlagartig aus, ohne dass das Bauteil/Werkstück ein Anzeichen von plastischer Verformung zeigt (Spröd- bzw. Trennbruch).

*Zähigkeit* ist das Vermögen eines Werkstoffes, Spannungsspitzen im Kerbgrund/ an der Rissspitze durch plastische Verformung abzubauen. Durch Kerben in einem Bauteil werden die *Zähigkeit* und das Verformungsvermögen eines Werkstoffes beeinträchtigt.

Kerben erhöhen die *Riss- und Sprödbruchgefahr*. Kerben an Maschinenbauteilen sind Bohrungen, Passfedernuten, Gewinde und Absätze. Sie können aber auch durch Bearbeitungsfehler (z. B. Schleifrisse, Drehriefen) entstehen. Materialfehler wie Lunker, spröde nichtmetallische Einschlüsse oder spröde Gefügebestandteile wirken wie innere Kerben und haben die gleiche versprödende Wirkung.

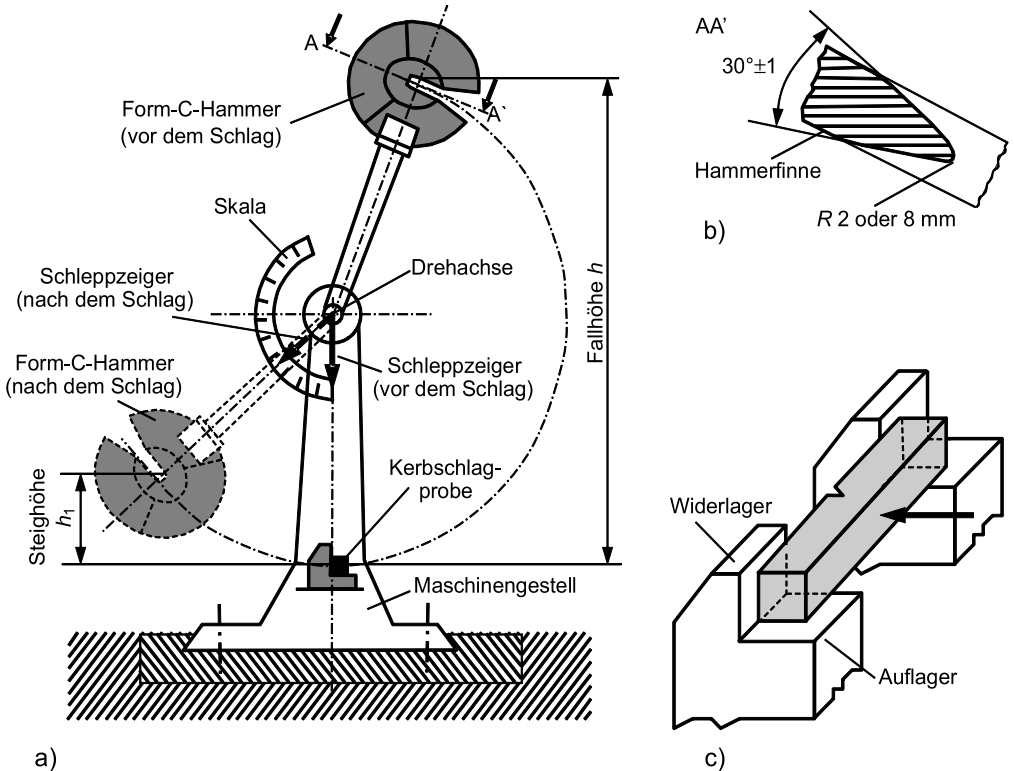
### 12.2.3.1 Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy

Der *Kerbschlagbiegeversuch* ist für die Ermittlung der *Sprödbruchneigung* an metallischen und hochpolymeren Werkstoffen gut geeignet. Der *Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy* und die dazugehörigen Proben (Bild 12.2–29) sind in DIN EN ISO 148-1 genormt. Auch Untermaßproben mit einer geringeren Probenbreite als 10 mm sind prinzipiell zulässig. Die V-Kerbprobe ist aufgrund der höheren Kerbwirkung zu bevorzugen. Beim Kerbschlagbiegeversuch wird eine einseitig in der Mitte gekerbte Probe auf zwei Auflager und mit der gekerbten Seite gegen zwei Widerlager gelegt (Bild 12.2–30). Der herabfallende *Pendelhammer* trifft die Probe mit der Hammerfinne auf der kerbabgewandten Seite. Mit einem einzigen Schlag wird diese entweder durchgebrochen oder durch die Widerlager gezogen. Der Pendelhammer erreicht beim Auftreffen eine Schlaggeschwindigkeit von ca. 5 m/s.



**Bild 12.2–29** Kerbschlagbiegeproben nach DIN EN ISO 148-1

a) Probe mit U-Kerb; b) Probe mit V-Kerb



**Bild 12.2-30** Belastungsprinzip des Kerbschlagbiegeversuches

- a) Pendelschlagwerk
- b) Hammerfinne
- c) Probe liegt auf zwei Auflagern und wird gegen zwei Widerlager geschlagen (Pfeil zeigt die Stelle des Auftreffens der Finne des Pendelhammers)

Beim Auftreffen der Finne wird die Probe gebogen. Bei der Biegung treten Druck- und Zugspannungen auf. Insbesondere im Kerbgrund der Probe liegen Zugspannungsspitzen vor. Diese Belastung wird durch die Spannungsmehrsichtigkeit im Kerbgrund verschärft. Kann ein Werkstoff diese Belastung nicht durch plastische Verformung abbauen, kommt es sofort zur Rissbildung und zur schlagartigen Ausbreitung des Anrisses. Der Werkstoff versagt *spröd*. Es wird nur wenig Energie für Rissbildung und -fortschritt benötigt. Die *verbrauchte Schlagenergie*  $K$

Die *verbrauchte Schlagenergie*  $K$  ist die Energie, die zum Zerschlagen einer Kerbschlagprobe benötigt wird. Sie ist die Differenz der potenziellen Energie des Pendelhammers vor und nach dem Zerschlagen der Probe.

$$K = m \cdot g \cdot (h - h_1)$$

- $m$  Masse des Pendelhammers in kg
- $g$  Erdbeschleunigung in  $\text{m/s}^2$
- $h$  Fallhöhe in m
- $h_1$  Steighöhe in m

ist also ein Maß für den Widerstand eines Werkstoffes gegen die schlagartige Beanspruchung und die kerbbedingte mehrachsige Zugbelastung. Vor dem Versuch hat der Hammer die potenzielle Energie  $K_p = m \cdot g \cdot h$  (= Anfangsenergie). In der Regel wird ein Hammer verwendet, der ein Nennarbeitsvermögen von 300 J hat (auch 100 J oder 150 J sind möglich). Während der Hammer einen Kreisbogen beschreibt, wird die potenzielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. Ein Teil dieser kinetischen Energie wird für das Zerschlagen der Probe benötigt. Das hat zur Folge, dass der Hammer nicht mehr die ursprüngliche Höhe erreichen kann ( $h_1 < h$ ). Die potenzielle Energie nach dem Versuch ist kleiner als davor. Die *verbrauchte Schlagenergie*  $K$ , die notwendig ist, um die Probe zu zerbrechen oder durch das Widerlager zu ziehen, lässt sich aus der Differenz der potenziellen Energie des Hammers vor und nach dem Versuch ermitteln. Die potenzielle Energie des Hammers vor dem Versuch ist bekannt. Die potenzielle Energie nach dem Versuch hängt – außer von der bekannten Masse des Hammers und der Erdbeschleunigung – nur von der *Steighöhe*  $h_1$  ab. *Pendelschlagwerke* besitzen normalerweise eine Skale, auf der durch die Mitnahme eines Schleppzeigers die *verbrauchte Schlagenergie*  $K$  direkt abgelesen werden kann. Streng genommen wird der *Steigwinkel* des Hammers nach dem Versuch gemessen. Dieser ist aber proportional zur *Steighöhe*  $h_1$  und damit zur *verbrauchten Schlagenergie*, sodass die Skale entsprechend kalibriert ist. Nach dem gleichen Prinzip arbeiten auch moderne *Pendelschlagwerke*, bei denen der *Steigwinkel* mithilfe eines digitalen Winkelmesssystems ermittelt und direkt die *verbrauchte Schlagenergie*  $K$  digital angezeigt wird.

Viele Metalle verspröden mit sinkender Temperatur. Der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy erlaubt es, mit wenigen Versuchen die Temperatur zu bestimmen, bei der ein Übergang vom *duktilen* zum *spröden*

Angabe der *verbrauchten Schlagenergie*:

Beispiel 1

$KV_2 = 121$  J bedeutet:

- Nennarbeitsvermögen des Pendelschlagwerkes: 300 J (muss nicht extra angegeben werden)
- Normalprobe mit V-Kerb
- Radius der Hammerfinne: 2 mm
- beim Bruch *verbrauchte Schlagenergie*: 121 J

Beispiel 2

$KV_2 100/5 = 57$  J bedeutet:

- Nennarbeitsvermögen des Pendelschlagwerkes: 100 J
- Untermaßprobe mit V-Kerb und einer Probenbreite von 5 mm
- Radius der Hammerfinne: 2 mm
- beim Bruch *verbrauchte Schlagenergie*: 57 J

Beispiel 3

$KU_8 150 = 65$  J bedeutet:

- Nennarbeitsvermögen des Pendelschlagwerkes: 150 J
- Normalprobe mit U-Kerb
- Radius der Hammerfinne: 8 mm
- beim Bruch *verbrauchte Schlagenergie*: 65 J

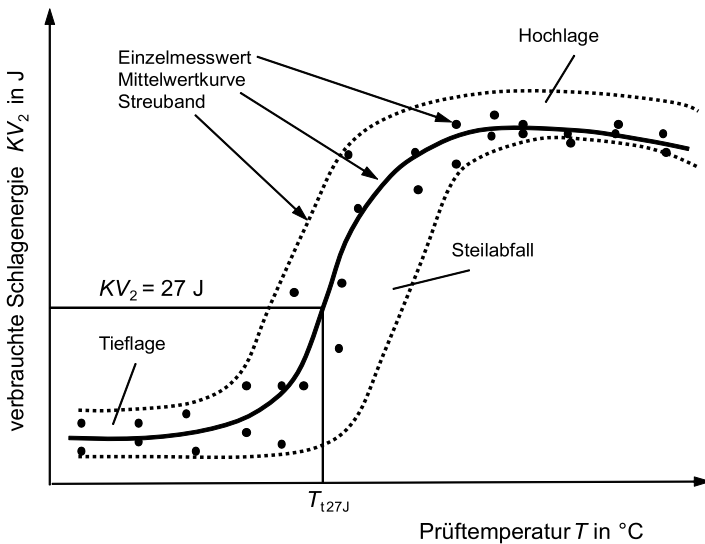
**Vorteile des Kerbschlagbiegeversuches:**

- einfache, schnelle Probenfertigung und Versuchsdurchführung
- schnelle Aussage über *Sprödbrechneigung* ist möglich

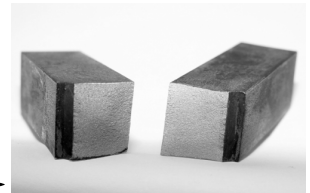
Werkstoffverhalten stattfindet (Temperaturkonzept). Dazu ist es erforderlich, mehrere Proben auf verschiedene Temperaturen zu erwärmen bzw. abzukühlen. Zwischen der Probenentnahme und dem Zerschlagen dürfen nicht mehr als 5 s vergehen, da ansonsten eine unzulässige Veränderung der Temperatur auftritt. Um die Übergangstemperatur  $T_t$  zu bestimmen, werden die Messwerte in ein Verbrauchte-Schlagenergie-Temperatur-Diagramm eingetragen und es wird eine Mittelwertkurve mit dem Streubereich eingezeichnet (Bild 12.2–31).

### Nachteile des Kerbschlagbiegeversuches:

- Die *verbrauchte Schlagenergie* ist eine *integrale Größe* (von Weg und Kraft abhängig), die nichts über die Rissentstehung und -ausbreitung aussagt.
- Die Ermittlung der *verbrauchten Schlagenergie* muss unter definierten Bedingungen erfolgen. Sie ist nicht auf andere Versuchsbedingungen und in die Praxis übertragbar.
- Die *verbrauchte Schlagenergie* und das Bruchverhalten sind von der *Geometrie der Probe/des Kerbes* abhängig. Damit ist die *verbrauchte Schlagenergie* kein Werkstoffkennwert.



Bruchbild Hochlage:  
Verformungsbruch



Bruchbild Tieflage:  
Sprödbbruch

Insbesondere bei krz-Metallen (z. B. ferritisch-perlitischer oder vergüteter Stahl) ergibt sich ein *charakteristischer Steilabfall* der Kurve. Er kennzeichnet den Übergangsbereich vom zähen (Hochlage) zum spröden Werkstoffverhalten (Tieflage). Die *Übergangstemperatur*  $T_t$  gibt einen wichtigen Hinweis, bis zu welcher Temperatur ein Werkstoff eingesetzt werden darf. Am häufigsten wird die Übergangstemperatur über einen definierten Wert der verbrauchten

**Bild 12.2–31** Verbrauchte-Schlagenergie-Temperatur-Kurve (schematisch); Bestimmung der Übergangstemperatur  $T_t$  bei einer bestimmten Kerbschlagarbeit  $KV_2$ , z. B. 27 J

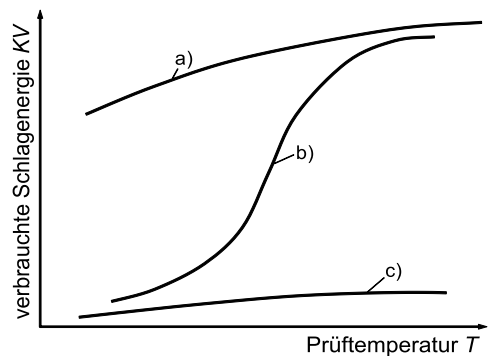
Schlagenergie ermittelt, z. B.:  $KV_2 = 27 \text{ J}$ ,  $= 40 \text{ J}$  oder  $= 60 \text{ J}$  ( $T_{t27\text{J}}$ ;  $T_{t40\text{J}}$ ;  $T_{t60\text{J}}$ ). Aber auch die verbrauchte Schlagenergie, bei der im Bruchbild 50 % Verformungsbruch festgestellt oder 50 % der verbrauchten Schlagenergie der Hochlage erreicht werden, kann zur Bestimmung der Übergangstemperatur herangezogen werden.

Zunehmende Kerbschärfe, die Dicke sowie Breite der Probe und eine ansteigende Schlaggeschwindigkeit führen genauso wie ein höherer Martensitgehalt, ein zunehmender Kaltumformgrad, Gefügeinhomogenitäten oder große nichtmetallische Einschlüsse zum *Ansteigen der Übergangstemperatur* und damit zur Versprödung des Werkstoffes. Bild 12.2–32 zeigt  $KV-T$ -Kurven verschiedener Werkstoffgruppen und Bild 12.2–33 zeigt Stähle verschiedener Behandlungszustände. Da die Übergangstemperatur  $T_t$  nicht nur vom Werkstoffzustand, sondern auch von der *Geometrie* der Probe/des Kerbes abhängt, kann sie auch nicht als Werkstoffkennwert betrachtet werden.

Der *Kerbschlagbiegeversuch* hat als Abnahmeversuch in der metallurgischen Industrie eine große Bedeutung. Auf diese Weise werden alle Stähle für den Stahlbau auf ihre Spröbruchneigung untersucht.

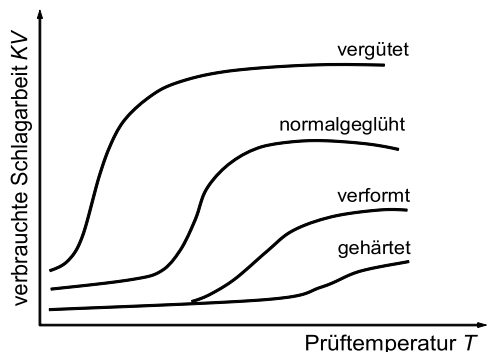
### Anwendung des Kerbschlagbiegeversuches:

- Nachweis möglicher Einsatztemperaturen
- qualitative Bewertung von Wärmebehandlungszuständen
- Untersuchung der Alterungsanfälligkeit von Werkstoffen
- Prüfung von Schweißverbindungen
- wichtiger Abnahmeversuch zur Bestimmung der Güte und Gleichmäßigkeit eines Werkstoffes bzw. seiner Behandlung in der metallurgischen Industrie und in Gießereien



**Bild 12.2–32** Typische  $KV-T$ -Kurven für verschiedene Werkstoffe

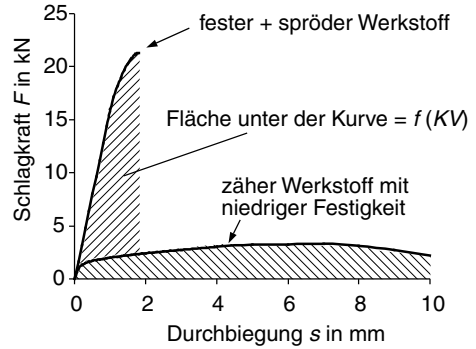
- Al, Cu, Ni, austenitischer Stahl (kfz-Gitter)
- ferritisch-perlitischer oder vergüteter Stahl (krz-Gitter)
- Glas, Keramik, gehärteter und nicht angelassener Stahl (Martensit)



**Bild 12.2–33**  $KV-T$ -Kurven von Stählen in verschiedenen Behandlungszuständen (schematisch)



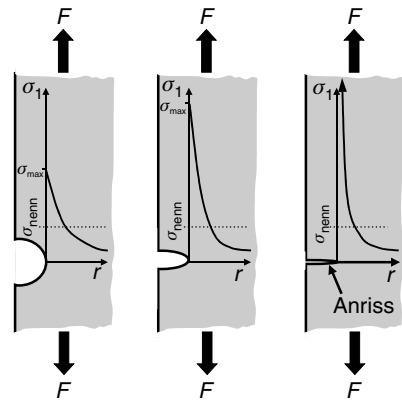
Nachteilig ist, dass man anhand der verbrauchten Schlagenergie nicht erkennen kann, ob der Werkstoff spröd gebrochen ist oder nicht. Ein zäher Werkstoff mit einer sehr niedrigen Festigkeit kann die gleiche verbrauchte Schlagenergie wie ein hochfester, aber spröder Werkstoff aufweisen. Erst wenn die Schlagkraft über die Durchbiegung bestimmt wird, können zur Rissentstehung und zum Rissfortschritt genaue Aussagen getroffen werden (Bild 12.2–34). Die Fläche unter der *Kraft-Durchbiegung-Kurve* ist ein Maß für die verbrauchte Schlagenergie  $K$ . Wird nicht nur die verbrauchte Schlagenergie, sondern auch die Schlagkraft-Durchbiegung-Kurve ermittelt, so handelt es sich um einen *instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch*. Dieser ist in DIN EN ISO 14556 standardisiert.



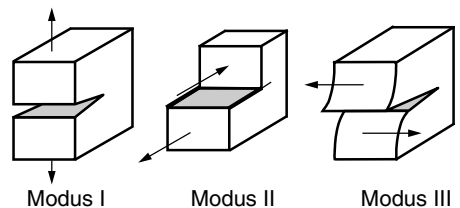
**Bild 12.2–34** Vergleich von Schlagkraft-Durchbiegung-Kurven (instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch)

**12.2.4 Bruchmechanische Werkstoffprüfung**

Im vorangegangenen Abschnitt wurde darauf hingewiesen, dass die Kerbschlagarbeit kein Werkstoffkennwert ist, da sie von der Proben- und Kerbgeometrie abhängt. Das heißt, dass in der Praxis andere und unter Umständen härtere Bedingungen vorliegen. Geht man von unterschiedlich gekerbten Zugstäben aus, führt ein abnehmender Kerbradius zu immer größeren Spannungsspitzen  $\sigma_{max}$  und einer *zunehmenden Spannungsmehrachsigkeit* im Kerbgrund (Bild 12.2–35). Die Spannungsspitzen sind dann am größten, wenn im Werkstück ein *scharfer Anriss* vorliegt. Obwohl in jedem Werkstoff Fehler vorhanden sind, kommt es in der Technik vergleichsweise selten zum Versagen. Versagen ist ein plötzlicher und unkontrollierter Rissfortschritt (*instabile Rissausbreitung*) bis zur Trennung des Werkstoffes. Bei zähen Werkstoffen verformt sich trotz der mehrachsigen Belastung der Werkstoff an der Risspitze. Der Riss wächst nur langsam, und für die weitere Rissausbreitung ist eine zunehmende Belastung notwendig (*stabiler Rissfortschritt*). Aus diesen Beobachtungen lassen sich folgende Fragestellungen ableiten:



**Bild 12.2–35** Einfluss des Kerbradius auf die größte Normalspannung im Kerbgrund bei rein elastischer Verformung



**Bild 12.2–36** Grundbelastungsarten, die zum instabilen Risswachstum führen können

# Sachwortverzeichnis

## A

Abkühlgeschwindigkeit 114  
Abkühlmedium 136  
Abkühlverlauf 125  
Abschreckmittel 136  
Abtrag, muldenförmiger 284  
Abtragsrate 284  
ADI 186  
Aktivierungsenergie 58  
akustisches Verfahren 423  
Al-Gusslegierung 254  
Alitieren 148  
Al-Knetlegierung 253  
allgemeiner Baustahl 103, 217  
allotrope Modifikation 31  
Al-Sinterwerkstoff 255  
Alterung 280  
Aluminium 244  
Aluminiumbronze 261  
Aluminium-Knetwerkstoff 242  
Aluminiumlegierung 246  
Aluminiumoxid 275  
amorph 25  
Anfangsdurchmesser 361  
Anfangsmesslänge 361  
Anisotropie 37  
Anlassen 135, 138, 140, 152  
Anlassfarbe 138, 279  
Anlassschaubild 139  
Anlauffarben 279  
Anode 291  
anodische Teilreaktion 280  
Anodisieren 296  
Anstrichstoff 293  
Antistatika 307  
ataktisch 304  
Atomaufbau 20  
Atombindung 22  
Aufhärte 137  
Aufkohlen 148 f., 151  
Aufkohlungstiefe 150  
Aufflichtmikroskop 442  
Ausferritisieren 185 f.  
Ausforming 157

Aushärten 249  
Auslagern 250  
Ausscheidungshärtung 252  
Austauschmischkristall 70  
Austenit 97, 99, 101  
Austenitformhärten 157  
austenitischer korrosionsbeständiger Stahl 230  
Austenitisieren 111  
Austenitisierungstemperatur 122  
Austenitisierungszeit 122  
Austenitisierungszustand 111  
Austenitstufe 122  
Austenitumwandlung 113  
Automatenlegierung 255

## B

Badnitrieren 153  
Bainit 113, 123, 139  
Bainitisieren 125, 141  
Bainitstufe 120, 122 f.  
Baustahl 216  
–, allgemeiner 103, 217  
–, unlegierter 217  
–, vergüteter 220  
–, wetterfester 221  
Bauteilprüfung 356  
Bauxit 244  
Belastung, schwingende 403  
Belüftungselement 282  
Berylliumbronze 261  
Beschichten 147, 292  
–, elektrostatisches 293  
–, organisches 292  
Bezeichnung, alphanumerische 242  
–, numerische 242  
Biegespannung 49  
Bimetallkorrosion 285  
binäres System 76  
Blaubruch 257  
Blockseigerung 168  
Bornitrid, kubisches 274  
Boudouard'sches Gleichgewicht 150  
Brinell, Härteprüfung 376  
Bronze 261

Bruch 54

Bruchdehnung 366

Brucheinschnürung 366f.

Bruchzähigkeit 395

## C

Carbid 72

Carbidauflösung 111

Carbidhartmetall, gesintertes 274

Carbonitrieren 148, 152f.

Cermets 275

chemische Bindung 21

chemische Korrosion 279

Chromalitieren 148

Chromieren 148

Copolymerisat 301

CTOD-Konzept 397

Curie-Punkt 92

## D

Dauerbruch 404

Dauerfestigkeit 404, 407

Dauerfestigkeitsdiagramm 414

Dauerschwingfestigkeit 404

Dauerschwingprüfung 402

Dauerschwingversuch 405

Defekt 35

Dehngrenze 365

Dehnung 362

–, wahre 368

Dehnungsgeschwindigkeit 372

Dehydrierung 148

Dendrit 47, 173f.

Desoxidation 199

Diffusion 57

–, konzentrationsabhängige 58

Diffusionsglühen 128

Diffusionskoeffizient 46, 59

Diffusionsverfahren 148

Dilatometerkurve 92, 138

Dimensionierung 51

Dispersionshärten 248

Doppelhärtung 152

Drucksintern 271

Duktilität 102

Dural 249

Duraluminium 249

Durchdringungsverbund 337

Durchlaufspule 435

Durchschallungsverfahren 426

Durchstrahlungsprüfung 419

Duroplast 303, 315, 327

dynamische Härteprüfung 375

## E

Edelgaskonfiguration 21

Edelstahl 202

Eigenspannung 132

Eindringtiefe 60

Einhärtbarkeit 125

Einhärte 137

Einhärtungs-Härtetiefe 144

Einkristall 37

Einlagerungsmischkristall 70

Einsatzhärten 143

Einsatzhärtungstiefe 151

Einsatzstahl 224

–, carbonitriert 224

–, einatzgehärtet 224

Einschluss, nichtmetallischer 167

Einsetzen 149, 151

Einstoffsystem 75

Eisen 91

Eisencarbid 93, 101

Eisen-Eisencarbid-Diagramm 95, 99f.

– mit Gefügebezeichnungen 100

– mit Phasenbezeichnung 96

Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD) 95, 99f.,  
167

Eisenwerkstoff 103

elastische Verformung 49

Elastomer 304, 316, 330

elektrochemische Korrosion 280

elektrochemische Spannungsreihe 281

Elektrolyt 280

Elektrolytkupfer 258

Elektronengas 23

Elektronenhülle 20

Elektronenpaarbindung 22

Elektronenstrahlhärten 143, 146

elektrostatisches Beschichten 293

elektrostatisches Pulverspritzen 293

Elektrovalenz 22

Elementarzelle 25ff.

Eloxieren 296

energieelastische Verformung 310

Enthalpie 41

Entkohlen 148

Entmischung 251f.

entropieelastische Verformung 311

Entropieelastizität 311

Entzinkung 260

Epoxidharz 327

Erholung 61

Ermüdung 403

Ermüdungsbruch 404

- Erosionskorrosion 287  
Erstarrung, metastabile 169  
–, stabile 169  
Erstarrungstemperatur 41  
Erstarrungsvorgang 44  
Erwärmung, induktive 144  
Eutektikale 81  
Eutektikum 79, 85  
eutektische Reaktion 79  
eutektisches Gefüge 79  
eutektisches System 79  
Eutektoid 97  
Extensometermesslänge 361
- F**  
Fadenlunker 165  
Farbstoff 307  
Faser 344  
Faserparadoxon 345  
Federkennlinie 49  
Federsteifigkeit 49  
Feinkorn 47  
Feinkornbaustahl, schweißgeeigneter 218  
Fernordnung 25  
Ferrit 98 f., 101  
ferritischer korrosionsbeständiger Stahl 227  
Ferritisieren 179  
ferrum 91  
Festigkeit 36, 354  
Feuerverzinken 294  
Flächenkorrosion, gleichmäßige 284  
–, ungleichmäßige 284  
Flammhärten 143 ff.  
Fließbruchmechanik 397  
Fließen 52  
Fließgrenze 36, 52, 132  
Fließspannung 52  
Fließverhalten 36  
Fremdatom 33  
Fremddiffusion 58  
Frischen 199  
Füll- und Verstärkungsstoffe 306
- G**  
Galvanisieren 295  
Galvanotechnik 294  
Gammastrahlung 419 f.  
Gasaufkohlung 149 f.  
Gasblasen 166  
Gasnitrieren 153  
Geflecht 346  
Gefüge 34, 270  
–, dendritisches 47  
–, eutektisches 79  
–, feinkörniges 46  
–, grobkörniges 46  
–, heterogenes 73  
Gefügeanalyse 436  
Gefügemengen-Schaubild 100, 125  
Gefügestruktur, heterogene 73  
Gelege 346  
gesintertes Carbidhartmetall 274  
Gestrick 346  
Gewaltbruch 286, 404  
Gewebe 346  
Gitterbaufehler 32, 35  
Gitterebene 26  
Gittergerade 26  
Gitterkonstante 27  
Gitterparameter 27  
Gitterstruktur 25  
Gittertyp 28  
Glasfaser 345  
Glastemperatur 311  
Glasübergangstemperatur 311  
Gleichgewicht, thermodynamisches 75  
Gleichmaßdehnung 365  
Gleitebene 36, 52  
Gleitlagerlegierung 255  
Gleitrichtung 36, 52  
Glühdauer 126  
Glühen 126  
–, auf kugelige Carbide 130  
Glüh­temperatur 127  
Graphit 30, 93  
Graphiteutektikum 104  
Graphitform 174  
Grauguss 104, 171  
– mit Kugelgraphit 183  
–, perlitischer 106  
Grenzspielzahl 407  
Grobkorn 47  
Grobkornglühen 128  
Großwinkelkorn­grenze 34  
Grundgefüge 170  
Grüns­pan 257  
Gusseisen 103, 164  
–, ausferritisches 186  
–, meliertes 171  
– mit Lamellengraphit 177  
– mit Vermikulargraphit 194  
–, weißes 171  
Gussmessing 260

**H**

Haltepunkt 43 f., 80  
Haltezeit 43  
Härtbarkeit 137  
Härte 374  
Härten 125, 135  
–, gebrochenes 125  
Härteprüfung 374  
–, dynamische 375  
–, indirekte 375  
– nach Brinell 376  
– nach Rockwell 380  
– nach Vickers 378  
Härteprüfverfahren 374  
Härtereitechnik 110  
Härteriss 142  
Härtetemperatur 127  
Härteverfahren 136  
Hartguss 193  
Hartmetall 274  
Hartstoff 274  
Hauptvalenzbindung 22 f.  
heißisostatisches Pressen 271  
Heißpressen 271  
heterogenes Gefüge 73  
hexagonal dichteste Packung 30  
hexagonal primitives Gitter 30  
Hilfs- und Zusatzstoffe 306  
Hilfsdurchflutung 432  
Hochglühen 128  
hochschmelzendes Metall 273  
homogen 20  
Homogenisieren 128, 250  
Hooke'sche Gerade 364

**I**

Idealkristall 25 f.  
Impfen 45, 172, 248  
Impuls-Echo-Verfahren 426  
Inchromieren 148  
indirekte Härteprüfung 375  
Induktionshärten 143  
induktive Erwärmung 144  
Induktor 146  
instrumentierte Eindringprüfung 382  
instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch 392  
interkristallin 286  
intermediäre Verbindung 72  
intermetallische Verbindung 72, 248  
Ionenbeziehung 22  
Isoforming 160  
isotaktisch 304  
isotherme Umwandlung 141

Isotop 420  
–, radioaktives 422  
Isotropie 38

**J**

J-Integral 397  
Jochmagnetisierung 431

**K**

Kaltarbeitsstahl 234  
–, legierter 235  
–, unlegierter 235  
Kaltaushärten 250  
Kaltumformung 36, 53, 133, 135  
Kaltverfestigung 36, 135  
Kaltverformung 36, 53, 133, 135  
Katode 290  
katodische Teilreaktion 280  
Kavitationskorrosion 287  
Keim 44  
Keimbildung, heterogene 44 f.  
–, homogene 44 f.  
Keimzahl 45  
keramische Technologie 268  
Kerbschlagbiegeprobe 387  
Kerbschlagbiegeversuch 387  
–, instrumentierter 392  
Kernhärtung 151  
Kernladungszahl 21  
Kleinwinkelkorngrenze 34  
Knickpunkt 77, 80  
Kohlenstofffaser 345  
Komponente 77  
Konode 84  
Kontaktkorrosion 285  
Konzentration 76  
Korn 34  
Kornform 269  
Korngrenze 34, 44  
Korngrenzsubstanz 34, 44  
Kornverfeinerung 129  
Kornvergrößerung 128  
Korrosion 278  
–, chemische 279  
–, elektrochemische 280  
Korrosionsarten 283  
Korrosionsbeanspruchung 289  
Korrosionselement 280  
Korrosionsermüdung 286  
Korrosionserscheinung 283  
Korrosionsgeschwindigkeit 294

Korrosionsinhibitor 292  
Korrosionsmedium 285  
Korrosionsprodukte 279  
Korrosionsschaden 278  
Korrosionsschutz 288  
–, aktiver 288 f.  
–, katodischer 290  
–, passiver 288  
–, zeitweiser 292  
korrosionsschutzgerechtes Konstruieren 290  
Korrosionszeitfestigkeit 286  
Kristall 25  
Kristallerholung 134  
Kristallgemenge 73  
Kristallgemisch 73, 87  
kristallin 25  
Kristallisation 44  
Kristallisationsgeschwindigkeit 44, 46  
Kristallit 34  
Kristallseigerung 128, 168, 261  
Kristallstruktur 25  
Kristallsystem 27  
kritische Abkühlgeschwindigkeit 116, 118  
kritischer Spannungsintensitätsfaktor 395  
kritisches Korrosionssystem 286  
kubisch-flächenzentriertes Gitter 29  
kubisch-primitives Gitter 28  
kubisch-raumzentriertes Gitter 29  
Kugelgraphit 175  
Kühlzeit-Schaubild 125  
Kunststoff 298 f.  
Kupfer 256  
–, sauerstofffreies 258  
Kupferlegierung 258  
Kupferwerkstoff, Bezeichnung 243  
Kupfer-Zink-Legierung 258  
Kupfer-Zinn-Legierung 261  
Kurzzeitfestigkeit 407

**L**  
Lamellengraphit 175  
Laminat 346  
Laserstrahlhärten 143, 146  
latente Wärme 41, 44  
Ledeburit 99, 101  
Leerstelle 32  
Legierung 69  
Leichtmetall 241  
Lichtmikroskopie 437  
linear elastische Bruchmechanik 394  
Liquiduslinie 78  
Liquiduspunkt 77

Lochfraß 284  
–, chloridinduzierter 284  
Lochkorrosion 284  
Lokalelement 282  
Longitudinalwelle 424  
Löslichkeit 70  
Löslichkeitslinie 81  
Lösungsglühen 250  
Lüdersdehnung 364  
Lufthärter 137  
Lunker 165

**M**  
Magnesiumlegierung 263  
magnetische Permeabilität 428  
Magnetpulverprüfung 429 f.  
Makromolekül 299  
Manganbronze 261  
Martenshärte 382 f.  
Martensit 113  
martensitischer korrosionsbeständiger Stahl 228  
Martensitstufe 120, 122  
Matrix 334  
mechanische Beanspruchung 48  
mechanisch-thermisches Verfahren 158  
Mehrprobenmethode 400  
Mehrstoffbronze 261  
meliertes Gusseisen 171  
Messing 258  
Metall, hochschmelzendes 273  
–, seltenes 241  
Metallbindung 23  
Metallgitter 23  
metallische Überzüge 294  
metallischer Glanz 24  
Metallkeramik 273  
Metallmatrix-Verbundwerkstoff 335  
Metalloxid 274  
metastabile Erstarrung 169  
metastabiles System Fe-Fe<sub>3</sub>C 94  
Mikrolunker 173  
Mischbarkeit 70  
Mischkeramik 275  
Mischkristall 70, 87  
–,  $\alpha$ - 98  
–,  $\gamma$ - 97  
Mischkristallfestigkeit 87  
Mischkristallreihe, ununterbrochene 78  
Mischkristallverfestigung 71  
Mischmagnetisierung 432  
Mischungslücke 80  
MMC 335  
Monomer 299

**N**

Nahordnung 25  
Naturkautschuk 330  
Netzebene 26  
Nichteisenmetall 241  
Nichtoxidkeramik 276  
Nitrid 72, 153, 155  
Nitrieren 143, 148, 153 f., 225  
Nitrier-Härtetiefe 154  
Nitrierstahl 225  
Nitrocarburieren 148, 153 f., 225  
Normalglühen 125, 129  
Normalisieren 129  
Normalpotenzial 281  
Normalspannung 48  
Nuklid 422

**O**

obere Streckgrenze 364  
Oberflächenhärten 143  
Oberflächenvorbereitung 292  
Ölhärter 137  
Opferanode 291

**P**

Packungsdichte 28  
Passivierung 282  
Passivschicht 282  
Patentieren 125  
Patina 257  
Pendelglühung 131  
Pendelhammer 388  
Pendelschlagwerk 388  
Peritektikum 98  
peritektische Reaktion 82  
peritektisches System 82  
Perlit 98 f., 102, 113, 115  
Perlitisieren 125, 179  
Perlitstufe 116, 120, 122  
Permeabilität, magnetische 428  
Phase 39  
–, intermetallische 72  
Phasengrenze 34  
Phosphideutektikum 88  
pH-Wert 291  
Pigment 293  
Plasma 39  
plastische Verformbarkeit 36  
plastische Verformung 50  
Plastizität 51  
Platelet 340  
PMC 335  
Polyaddition 300

Polyamid 326  
Polyaryletherketon 326  
Polycarbonat 326  
Polyesterharz 328  
Polyethylen 322  
Polyethylenterephthalat 325  
Polykondensation 301  
Polymerblend 301  
Polymerisation 300  
Polymermatrix-Verbundwerkstoff 335  
Polymethylmethacrylat 326  
Polymorphie 31  
Polypropylen 323  
Polystyrol 324  
Polytetrafluorethylen 326  
Polyurethan 329  
Polyvinylchlorid 324  
poröser Körper 273  
Porosität 270  
Potenzialdifferenz 281  
Pressen, heißisostatisches 271  
–, hydrostatisches 270  
–, isostatisches 270  
Primärkristall 85  
Primärrekristallisation 61, 134  
Primärzementit 93  
Probe 355  
Probenpräparation 34  
Pull-out-Effekt 349  
Pulveraufkohlung 149  
Pulverbeschichtung 293  
Pulverherstellung 269  
Pulvermetallurgie 273  
Pulverspritzen, elektrostatisches 293

**Q**

Qualitätsstahl 202  
quasibinärer Schnitt 106  
Quasiisotropie 38  
Quellung 280

**R**

radioaktives Isotop 422  
Randhärte 155  
Randhärtung 151  
Randschichthärten 136, 143, 222  
Rasterelektronenmikroskop 443  
Raumgitter 26  
Reaktionssintern 271  
Realkristall 32  
Regel von Matthiesen 88  
Reinaluminium 245  
Reinkupfer 256

- Reintitan 265  
Rekristallisation 61  
–, primäre 134  
–, sekundäre 134  
Rekristallisationsdiagramm 63, 133  
Rekristallisationsglühen 62, 65, 133 f.  
Rekristallisationstemperatur 61  
Restaustenit 113, 118  
Rissablenkung 341  
Rissabstumpfungslinie 401  
Rissbildung 286  
Rockwell, Härteprüfung 380  
Röntgenfeinstrukturanalyse 26  
Röntgenstrahlen 419  
Rotguss 262
- S**
- Säurekorrosion 281  
Salzbadaufkohlung 149  
Sättigungslinie 81  
Sauerstoffkorrosion 281  
Schadenslinie 413  
Schalenhartguss 193  
Schalenhärtung 136  
Scherspannung 49  
Schichtgitter 30  
Schichtverbund 337  
Schlagenergie, verbrauchte 388  
Schlickergießverfahren 270  
Schmelzbereich 314  
Schmelztauchen 294  
Schmelztemperatur 41  
Schmelzwärme 41  
Schneidkeramik 274  
Schnellarbeitsstahl 237  
Schraubenversetzung 33  
Schrumpfung 165, 270  
Schüttverfahren 270  
Schwächungsgesetz 420  
schweißgeeigneter Feinkornbaustahl 218  
Schwellbereich 406  
Schwellfestigkeit 414  
Schwermetall 241  
Schwingbeanspruchung 406  
schwingende Belastung 403  
Schwingungsrissskorrosion 286  
Seebeck-Effekt 42  
Seigerung 168  
Sekundärgraphit 104  
Sekundärkristall 85  
Sekundärrekristallisation 61, 65, 134  
Sekundärzementit 93, 98  
Selbstdiffusion 58  
Selbstdurchflutung 431  
Sheet Moulding Compound 335  
Sherardisieren 148  
Silberbronze 261  
Siliciumbronze 261  
Siliciumcarbid 276  
Siliciumnitrid 276  
Silumin-Effekt 248  
Sinterbronze 273  
Sintereisen 273  
Sintern 270  
Sintertechnik 268  
Sintertemperatur 271  
Sintertonerde 274  
Sinterwerkstoff 268  
Skin-Effekt 146  
SMC 335  
Soliduslinie 78  
Soliduspunkt 77  
Sondermessing 260  
Spaltkorrosion 285  
Spannung 48  
–, technische 362  
–, wahre 362, 368  
–, zulässige 51  
Spannungsarmglühen 132  
Spannungsintensitätsfaktor, kritischer 395  
Spannungskorrosion 286  
–, interkristalline 260  
Spannungsreihe, thermoelektrische 42  
Spannungsrissskorrosion 286  
spezifischer elektrischer Widerstand 89  
Sphäroguss 183  
Spritzgießen 320  
Sprödbruch 54  
stabile Erstarrung 169  
stabiles System Eisen-Kohlenstoff 94, 104  
Stabilisator 307  
Stahl 103, 197  
–, austenitischer korrosionsbeständiger 230  
–, eutektoider 103  
–, ferritischer korrosionsbeständiger 227  
–, martensitischer korrosionsbeständiger 228  
–, übereutektoider 103  
–, untereutektoider 103  
Stahlbegleitelement 204  
Stahlguss 164, 190  
Stapelfehler 35  
Stapelfolge 30  
Steifigkeit 364  
Stengelkristall 173  
Stoffeigenschaftsänderung 108



Strangpressen 270  
 Streckgrenze 36, 87, 132, 249  
 –, obere 364  
 –, untere 364  
 Streckgrenzenverhältnis 139, 142  
 Stufenversetzung 33  
 Styrol-Butadien-Kautschuk 331  
 Substitutionsmischkristall 70  
 syndiotaktisch 304

## T

Taktizität 304  
 Tangentialspannung 48  
 Tastspulverfahren 434  
 technische Spannung 362  
 Teilkristallinität 304  
 Temperguss 164, 191  
 Temperkohle 106, 176  
 Tempern 106  
 Tertiärzementit 93  
 Textur 37  
 thermische Analyse 42  
 thermische Hysterese 45  
 thermodynamisches Gleichgewicht 41, 75  
 thermoelektrische Spannungsreihe 42  
 Thermoelement 42  
 thermomechanische Behandlung 158  
 Thermoplast 302, 322  
 Thermospannung 42  
 Titan 264  
 Titancarbid 265  
 Titancarbidbehandlung 148  
 Titanlegierung 266  
 Titanoxid 275  
 transkristallin 286  
 Transversalwelle 424  
 Treibmittel 307  
 Treppenstufenverfahren 410  
 Tropfenschlag 287

## U

Überhitzen 47, 112  
 Überlebenswahrscheinlichkeit 408  
 Überstruktur 71  
 Überzeiten 47  
 Ultraschallprüfung 423  
 Umformgrad 63, 368  
 Umschmelzhärten 179  
 Umwandlungsverstärkung 341  
 unlegierter Baustahl 217  
 untere Streckgrenze 364  
 Urformen 268

## V

Valenz 22  
 Verbindung, intermediäre 72  
 –, intermetallische 72  
 verbrauchte Schlagenergie 388  
 Verbundwerkstoff 333 f.  
 –, faserverstärkter 344  
 –, kurzfaserverstärkter 337  
 –, langfaserverstärkter 337  
 –, Metallmatrix- 335  
 – mit nichtmetallisch-anorganischer Matrix 335  
 –, Polymermatrix- 335  
 –, teilchenverstärkter 337, 340  
 Verdampfungswärme 41  
 Veredeln 248 f.  
 Verfahren, akustisches 423  
 –, thermisches 110, 126  
 –, thermochemisches 110, 148  
 –, thermomechanisches 110, 158  
 Verfestigung 52  
 Verformung, bleibende 50  
 –, elastische 49  
 –, energieelastische 310  
 –, entropieelastische 311  
 Verformungsbruch 54  
 Verformungsgrad 63  
 Verformungsverfestigung 366  
 Verformungswiderstand 36, 53  
 Vergütungsstahl 222  
 Vergüten 139, 222  
 vergüteter Baustahl 220  
 Vergütungsschaubild 139  
 Vergütungsstahl 103  
 Vermikulargraphit 175  
 Verschleiß 287  
 Verschleißwiderstand 135  
 Versetzung 33  
 Versprödung 280  
 Verstärkungsphase 334  
 Verzunderung 279  
 Vickers, Härteprüfung 378  
 Vielkristall 37  
 Viskoelastizität 311  
 viskoplastisch 314  
 Vlies 346  
 Vollhartguss 193  
 Vulkanisation 330

## W

wahre Dehnung 368  
 wahre Spannung 362, 368  
 Walztextur 51  
 Warmarbeitsstahl 236

Warmaushärten 252  
Warmbadhärten 125  
Wärme, latente 41, 44  
Wärmebehandlung 109  
Wärmeflussseigerung 168  
Wärmeleitfähigkeit 89  
Wärmeleitzahl 89  
Warmfestigkeit 248  
Warmverformung 65  
Wasserhärter 137  
Wasserstofffreiglühen 148  
Wasserstoffkorrosion 281  
Wasserstoffkrankheit 257  
Wechselfestigkeit 414  
Weicheisen 101  
Weichglühen 130, 134  
Weichmacher 306  
weißes Gusseisen 171  
Werkstoffbeanspruchung 353  
Werkstoffkenngröße 355  
Werkstoffprobe 355  
Werkstoffprüfung 352, 355  
–, mechanische 358  
–, zerstörungsfreie 418  
Werkstoffverbund 334  
Werkstoffzustand 243  
Werkzeugstahl 103, 231  
Wertigkeit 22  
wetterfester Baustahl 221  
Whisker 340  
Widerstand, spezifischer elektrischer 89  
Widmannstättensches Gefüge 130  
Wirbelsintern 293  
Wirbelstromprüfung 432  
Wirtsgitter 33  
Wöhlerversuch 405

**Z**

Zähigkeit 354, 387  
Zeitfestigkeit 407  
Zeit-Temperatur-Austenitisierungsdiagramm 112  
Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm 119  
Zementieren 148 f., 151  
Zementit 93, 99, 101  
Zersetzungstemperatur 314  
zerstörungsfreie Werkstoffprüfung 418  
Zink 289  
Zinnbronze 261  
Zonenmischkristall 168, 261  
ZTA-Diagramm 112  
ZTU-Diagramm 119  
–, für isotherme Umwandlung 119  
–, für kontinuierliche Umwandlung 120  
Zug-(Druck-)Spannung 48  
Zugversuch 358  
Zunder 279  
Zustandsdiagramm 74  
Zustandsgröße 40, 75  
Zustandsschaubild 77  
Zweistoffsystem 76, 258  
– Aluminium-Kupfer 249  
– Aluminium-Magnesium 251  
– Bismut-Cadmium 85  
– Blei-Antimon 88  
– Eisen-Eisencarbid 95  
– Eisen-Zink 294  
– Kupfer-Zink 259  
– Kupfer-Zinn 261  
– Nickel-Kupfer 84  
Zwillingsgrenze 35  
Zwischenstufengefüge 113  
Zwischenstufenvergüten 141