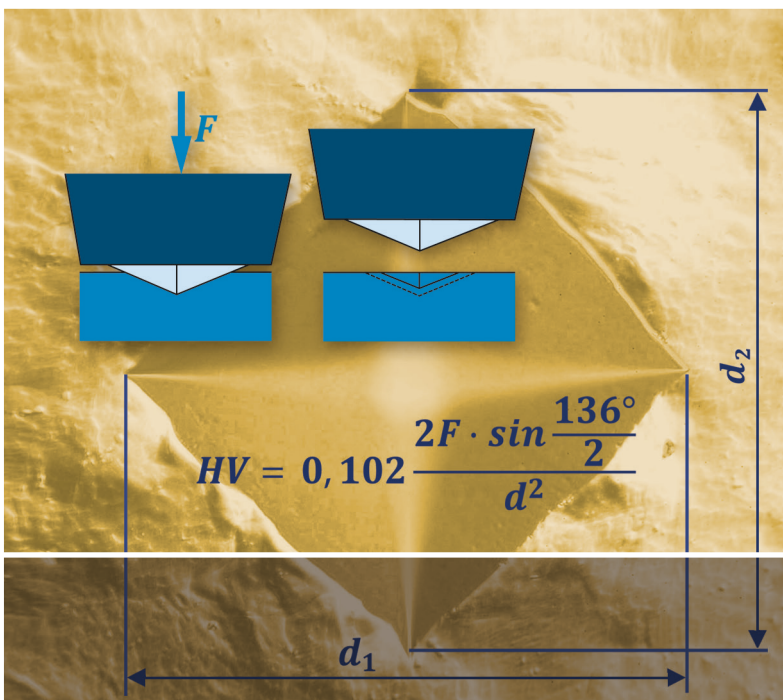


Wolfgang W. Seidel  
Frank Hahn

# Werkstofftechnik

Werkstoffe – Eigenschaften  
Prüfung – Anwendung



11., aktualisierte Auflage

HANSER



# Lernbücher der Technik

herausgegeben von Dipl.-Gewerbelehrer Manfred Mettke,  
Oberstudiendirektor a. D.

## **Bisher liegen vor:**

Bauckholt, *Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik*

Felderhoff, *Elektrische und elektronische Messtechnik*

Felderhoff/Busch, *Leistungselektronik*

Hofmann/Spindler, *Werkstoffe in der Elektrotechnik*

Freyer, *Nachrichten-Übertragungstechnik*

Knies/Schierack, *Elektrische Anlagentechnik*

Schaaf, *Mikrocomputertechnik*

Seidel/Hahn, *Werkstofftechnik*

# **Werkstofftechnik**

## **Werkstoffe – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung**

von Wolfgang W. Seidel und Frank Hahn

11., aktualisierte Auflage

mit 389 Bildern sowie zahlreichen Tabellen,  
Beispielen, Übungen und Testaufgaben

HANSER

*Dipl.-Ing. Wolfgang W. Seidel*  
Chemnitz

Kapitel 1 bis 4, 7 bis 9

*Prof. Dr.-Ing. Frank Hahn*  
Hochschule Mittweida  
Fakultät Maschinenbau  
www.hs-mittweida.de  
hahn1@hs-mittweida.de

Kapitel 5 und 6, 10 bis 12

*Prof. Dr.-Ing. Bernd Thoden*  
Jade Hochschule Wilhelmshaven  
Fachbereich Ingenieurwissenschaften

Kapitel 9  
(bearbeitet bis zur 8. Auflage)



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.

ISBN 978-3-446-45415-6  
E-Book-ISBN 978-3-446-45688-4

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Quelle Einbandbild: Dipl.-Ing. Andreas Eysert (Hochschule Mittweida)

© 2018 Carl Hanser Verlag München  
www.hanser-fachbuch.de  
Lektorat: Ute Eckardt  
Herstellung: Katrin Wulst  
Satz: Dr. Steffen Naake, Brand-Erbisdorf  
Coverrealisierung: Stephan Rönigk  
Druck und Bindung: Friedrich Pustet, Regensburg

Printed in Germany

# 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 Problembereich 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

# Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

<i>A</i>	Anode	–	<i>HM</i>	Martenshärte	N/mm <sup>2</sup>
<i>A</i>	Fläche	mm <sup>2</sup>	<i>HR</i> , <i>HRC</i>	Härte nach Rockwell	–
<i>A</i>	Bruchdehnung	%	<i>HV</i>	Härte nach Vickers	–
<i>A<sub>g</sub></i>	Gleichmaßdehnung	%	<i>I</i>	Intensität der austretenden Strahlung (Durchstrahlungsprüfung)	–
<i>A<sub>i</sub></i>	Haltepunkt (-temperatur)	°C, K	<i>J</i>	J-Integral	N/mm
<i>A<sub>s</sub></i>	momentane Eindruckoberfläche (Martenshärte)	mm <sup>2</sup>	<i>K</i>	Katode	–
<i>A<sub>1</sub></i> ( <i>A<sub>c1</sub></i> / <i>A<sub>r1</sub></i> )	Eutektoide im EKD, 723 °C, Perlitkennlinie	–	<i>K</i>	verbrauchte Schlagenergie (Kerbschlagbiegeversuch)	J
<i>A<sub>c1b</sub></i> / <i>A<sub>c1e</sub></i>	Beginn/Ende der Perlitauflösung	–	<i>K</i> , <i>K<sub>1</sub></i>	Spannungsintensitätsfaktor	N · mm <sup>-2</sup> · mm <sup>1/2</sup>
<i>A<sub>r1b</sub></i> / <i>A<sub>r1e</sub></i>	Beginn/Ende der Perlitbildung	–	<i>K<sub>c</sub></i>	kritischer Spannungsintensitätsfaktor	N · mm <sup>-2</sup> · mm <sup>1/2</sup>
<i>A<sub>3</sub></i>	Linie GOS im EKD	–	<i>K<sub>p</sub></i>	potentielle Energie eines Pendelhammers vor dem Kerbschlagbiegeversuch (Fallarbeit)	J
<i>A<sub>c3</sub></i>	Austenitbildung abgeschlossen	–	<i>KG</i>	Kristallgemisch	–
<i>A<sub>r3</sub></i>	Beginn der Austenitumwandlung	–	<i>KKs</i>	katodischer Korrosionsschutz	–
<i>A<sub>m</sub></i> ( <i>A<sub>rm</sub></i> / <i>A<sub>cm</sub></i> )	Sättigungslinie ES der $\gamma$ -Mk für C (Abkühlung/Erwärmung)	–	<i>KT</i>	Kristallisationstemperaturbereich	°C
<i>DMS</i>	Dehnungsmessstreifen	–	<i>L<sub>c</sub></i>	Versuchslänge einer Zugprobe	mm
<i>D</i>	Kugeldurchmesser (Brinellhärteprüfung)	mm	<i>L<sub>e</sub></i>	Extensometermesslänge (Zugversuch)	mm
<i>E</i>	Elastizitätsmodul	N/mm <sup>2</sup>	<i>L<sub>u</sub></i>	Messlänge der Zugprobe nach dem Bruch	mm
<i>EKD</i>	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm = Eisen-Eisencarbid-Diagramm	N/mm <sup>2</sup>	<i>L<sub>0</sub></i>	Anfangsmesslänge einer Zugprobe	mm
<i>ETB</i>	Erweichungstemperaturbereich	–	<i>L<sub>1</sub></i>	Probenlänge zum Zeitpunkt 1 (momentane Probenlänge während des Zugversuchs)	mm
<i>F</i>	Kraft	N	<i>LEBM</i>	linear elastische Bruchmechanik	–
<i>F<sub>m</sub></i>	Höchstzugkraft	N	<i>M<sub>b</sub></i>	Biegemoment	N · m
<i>F<sub>0</sub></i>	Prüfvorkraft (Rockwellhärteprüfung)	N	<i>M<sub>f</sub></i>	Ende der Martensitbildung (finish)	–
<i>F<sub>1</sub></i>	Prüfzusatzkraft (Rockwellhärteprüfung)	N	<i>M<sub>s</sub></i>	Beginn der Martensitbildung (start)	–
<i>FBM</i>	Fließbruchmechanik	–			
<i>G</i>	Schubmodul (Gleitmodul)	N/mm <sup>2</sup>			
<i>HB</i>	Härte nach Brinell	–			



Mk	Mischkristall	–	SB	Schmelztemperaturbereich	–
$N$	Schwingspielzahl	–	$T$	Temperatur	°C
$N_B$	Bruchlastspielzahl	–	$T_s$	Schmelztemperatur	°C
$N_G$	Grenzlastspielzahl	–	$T_g$	Glasübergangstemperatur	°C
$N_{\dot{U}10}$ ; $N_{\dot{U}50}$ ; $N_{\dot{U}90}$	Schwingspielzahl mit 10 %-, 50 % bzw. 90 %- Überlebenswahrschein- lichkeit	–	$T_t$	Übergangstemperatur (Kerbschlagbiegeversuch)	°C
NiP	Nickelschicht (stromlos)	–	$T_z$	Zersetzungstemperatur	°C
$O$	Oberfläche	mm <sup>2</sup>	SEW	Stahl-Eisen-Werkstoffblatt	–
$P_{\dot{U}}$	Überlebenswahrschein- lichkeit	%	SpRK	Spannungsrissskorrosion	–
PD	Packungsdichte	–	$W$	Widerstandsmoment	mm <sup>3</sup>
$R$	elektrischer Widerstand	$\Omega$	$W$	Energie	J
$R$	technische Spannung	N/mm <sup>2</sup>	$Y$	Geometriefaktor	–
$R_{eH}$	obere Streckgrenze	N/mm <sup>2</sup>	$Z$	Brucheinschnürung	%
$R_{eL}$	untere Streckgrenze	N/mm <sup>2</sup>	$\Delta L$	Längenänderung der Anfangsmesslänge (Zugversuch)	mm
$R_m$	Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	$\Delta L_e$	Verlängerung der Exten- sometermesslänge (Zug- versuch)	mm
$R_{p0,2}$	0,2-Dehngrenze	N/mm <sup>2</sup>	$\Delta L_{elast}$	elastische Verlängerung der Extensometermess- länge bei Höchstzugkraft (Zugversuch)	mm
$R_\sigma$	Spannungsverhältnis	–	$\Delta L_m$	Verlängerung der Exten- sometermesslänge bei Höchstzugkraft (Zugver- such)	mm
$RT$	Raumtemperatur	°C			
$S_u$	kleinster Querschnitt der Zugprobe nach dem Bruch im Bereich der Brucheinschnürung	mm <sup>2</sup>			
$S_0$	Anfangsquerschnitt einer Zugprobe	mm <sup>2</sup>			
$S_1$	Probenquerschnitt zum Zeitpunkt 1 (momentaner Probenquerschnitt während des Zugversuchs)	mm <sup>2</sup>			
$a$	Anrisslänge	mm	$d_0$	Anfangsdurchmesser einer Zugprobe	mm
$a, b, c$	Gitterkonstante	10 <sup>-10</sup> m	$d_1, d_2$	Diagonalenlängen (Vickershärteprüfung)	mm
$a_0$	Anfangsdicke einer Flachzugprobe	mm	d. h.	das heißt	–
$b_0$	Anfangsbreite einer Flachzugprobe	mm	$e$	Änderung der Thermo- spannung	V/K
$c$	Konzentration	Masse-%	$e$	Dehnung bzw. Extenso- meterdehnung	%
$d$	Netzebenenabstand	10 <sup>-10</sup> m	$\dot{e}$	Dehnungsgeschwindigkeit	s <sup>-1</sup>
$d$	Durchmesser des Härteeindrucks (Brinellhärteprüfung)	mm	$e_p$	plastische Extensometer- dehnung	%

$f$	Durchbiegung	mm	$v$	Prüfgeschwindigkeit	mm/s
$g, g_n$	Fallbeschleunigung	$m/s^2$	$v_A$	Abkühlgeschwindigkeit	K/s
$h$	bleibende Eindringtiefe	mm	z. B.	zum Beispiel	—
$h$	Fallhöhe des Pendelhammers	m	$\alpha, \beta, \gamma$	Achsenwinkel	°, ', "
$h_1$	Steighöhe des Pendelhammers	m	$\alpha, \beta,$ ...	Gittermodifikationen (verschiedene Gitterarten)	—
hex, hp	hexagonal primitives Gitter	—	$\alpha, \beta,$ ...	verschiedene Phasen (z. B. Mischkristallarten)	—
hdP	hexagonales Gitter dichtester Packung	—	$\beta_K$	Kerbwirkzahl	—
$i$	Ordnungszahl (Dauerschwingversuch)	—	$\delta$	Rissöffnung	mm
i. d. R.	in der Regel	—	$\varepsilon_B$	Bruchdehnung (bei Kunststoffen)	%
$k$	Proportionalitätsfaktor (Zugversuch)	—	$\vartheta$	Temperatur	°C
$k_f$	Fließspannung	$N/mm^2$	$\lambda$	Wellenlänge	$10^{-10}$ m
kfz	kubisch-flächenzentriertes Gitter	—	$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
kp	kubisch-primitives Gitter	—	$\nu$	Querkontraktionszahl bzw. Poisson'sche Zahl	—
krz	kubisch-raumzentriertes Gitter	—	$\varrho$	spezifischer elektrischer Widerstand	$\Omega \cdot mm^2/m$
$m$	Masse des Pendelhammers	kg	$\sigma$	Normalspannung	$N/mm^2$
$m_e$	experimentell bestimmter Anstieg der Hooke'schen Geraden (Zugversuch)	$N/mm^2$	$\sigma$	wahre Spannung	$N/mm^2$
$n$	Anzahl der geprüften Proben (Dauerschwingversuch)	—	$\sigma_{A, P_0=10\%}$	Dauerfestigkeit mit 10 % Überlebenswahrscheinlichkeit	$N/mm^2$
$n$	Polymerisationsgrad	—	$\sigma_D$	Dauerfestigkeit	$N/mm^2$
$n$	Anzahl der Atome je Elementarzelle	—	$\sigma_{nD}$	Gestaltfestigkeit	$N/mm^2$
$p$	Druck, Flächenpressung	$N/mm^2$	$\sigma_M$	Zugfestigkeit (bei Kunststoffen)	$N/mm^2$
$s$	Durchbiegung (Kerbschlagbiegeversuch)	mm	$\sigma_{Sch}$	Schwellfestigkeit	$N/mm^2$
$t$	Zeit	s	$\sigma_W$	Wechselfestigkeit	$N/mm^2$
$t_b$	bleibende Eindringtiefe	mm	$\sigma_a$	Spannungsamplitude	$N/mm^2$
$t_H$	Haltezeit	s, min	$\sigma_m$	Mittelspannung	$N/mm^2$
$v$	Kerbaufweitung	mm	$\sigma_o$	Oberspannung	$N/mm^2$
			$\sigma_u$	Unterspannung	$N/mm^2$
			$\tau$	Tangentialspannung bzw. Schubspannung	$N/mm^2$
			$\varphi$	Umformgrad, Verformungsgrad	—

Symbole für Elemente und chemische Verbindungen sowie Werkstoffbezeichnungen sind in dieser Übersicht nicht enthalten.



# 1 Struktur und Eigenschaften der Metalle

## 1.0 Überblick

Die *Gebrauchseigenschaften* der metallischen Werkstoffe bestimmen neben dem Preis deren praktische Anwendung. Die chemische Zusammensetzung und die Struktur der Festkörper haben in hohem Maße Einfluss auf die technisch nutzbaren Eigenschaften. Die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Struktur und Eigenschaften bildet die Grundlage für das Verständnis aller folgenden Themenkreise, die metallische Stoffe zum Gegenstand haben. Die Ausführungen lassen außerdem prinzipielle Schlussfolgerungen auch für nichtmetallische Stoffe zu. Struktur und Eigenschaften lassen sich technologisch gezielt verändern.

Themenkreis 1 „Struktur und Eigenschaften der Metalle“ beantwortet folgende Fragen:

- Wie sind die Atome in metallischen Stoffen im festen Zustand räumlich angeordnet? (Wesen der Gitterstruktur = Kristallaufbau)
- Weshalb bestimmen Gittertyp und Gitterfehler wichtige Eigenschaften?
- Wie entsteht die Gitterstruktur (Vorgänge bei der Kristallisation)?
- Was bewirkt eine mechanische Beanspruchung des kristallinen Stoffes?
- Welche Vorgänge im Gitter werden durch Zufuhr von Wärmeenergie ausgelöst?

Die Eigenschaften entscheiden darüber, für welche *Beanspruchungen* der jeweilige Werkstoff eingesetzt werden kann. Außerdem ist wichtig, das günstigste Verfahren für die *Formgebung* auszuwählen. Die Kenntnisse über das Werkstoffverhalten ermöglichen in vielen Fällen einen modernen *Veredlungsprozess*, der die mechanische, thermische oder auch chemische Beanspruchbarkeit erhöht.

Die Auswahl der theoretischen Grundlagen, der Verfahren und Beispiele erfolgt nach den Bedürfnissen des Maschinenbaus. Alle Aussagen sind jedoch ebenso zutreffend für ähnliche Industriezweige wie Anlagen-, Apparate-, Kran-, Brücken- und Schiffbau, Fahrzeugbau und andere metallverarbeitende Branchen.

## 1.1 Metallbindung und Gitterstruktur

### Lernziele

Der Lernende kann ...

- die Wechselwirkungen zwischen Atomen in einem Festkörper erläutern,
- die Besonderheiten der Metallbindung nennen,
- Ideal- und Realkristall beschreiben,
- den Zusammenhang Kristallstruktur/Werkstoffeigenschaften an wesentlichen Merkmalen erklären.

### 1.1.0 Übersicht

*Metalle* bzw. *Legierungen* (metallische Stoffe) haben von allen Stoffgruppen mit Abstand die größte Bedeutung im Maschinenbau und in artverwandten Industriezweigen. Dementsprechend werden im Lernbuch die Struktur und die Eigenschaften der metallischen Stoffe berücksichtigt.

Neben allgemein hoher Festigkeit und plastischer Verformbarkeit mit dabei auftretendem Anstieg der *Streckgrenze* (*Verfestigungsvermögen*) zeichnen sich Metalle durch hervorragende elektrische und thermische *Leitfähigkeit* aus. Die kristalline Struktur der Metalle reflektiert Licht. Ein „blankes“ Metallstück oder eine Bruchfläche weist stets den charakteristischen *metallischen Glanz* auf. Die meisten Eigenschaften werden durch die Art der chemischen Bindung, die *Metallbindung*, bestimmt. Ein massives Stück Metall erscheint als homogener Stoff. Fertigt man jedoch einen Schliff an, d. h., wird durch Schleifen und Polieren eine möglichst ideal ebene und saubere Fläche angearbeitet und durch geeignete Chemikalien angeätzt, so erkennt man bei einer Betrachtung im Auflichtmikroskop das *Gefüge*. Im Schliffquerschnitt, d. h. in dem optischen Ausschnitt, der durch das Mikroskop vergrößert zu sehen ist, erkennt man *Körner* (Kristallite) verschiedener Art und Orientierung, *Korn Grenzen* und dazwischenliegende *Korn grenzensubstanz*. Art und Größe der Kristallite bestimmen sehr stark die Eigenschaften der metallischen Stoffe. Die chemische Zusammensetzung allein ist für die Beurteilung der Werkstoffe nicht ausreichend. Die Entstehung und der Aufbau des Gefüges spielen in diesem Kapitel eine große Rolle.

In diesem Kapitel sollen Kristalleigenschaften, insbesondere durch eine Gegenüberstellung idealer und realer Struktur, deutlich gemacht werden.

homogen = einheitlich, gleiche Beschaffenheit

### 1.1.1 Wechselwirkung zwischen Atomen

#### Aufbau der Atome:

Jedes Atom besteht aus einem Kern (*Atomkern*) und einer ihn umschließenden Hülle (*Elektronenhülle*). Bild 1.1–1 zeigt eine Modellvorstellung in stark vereinfachter Form. Wissenschaftler nennen Atomkern und Elektronenhüllen zwei *Energiebereiche* des Atoms. Im Kern existieren die positiv geladenen *Protonen* und die elektrisch neutralen *Neutronen*.

Hauptquantenbahnen 1, 2, 3, 4 usw.

(Elektronenschalen) oder

K, L, M, N usw.

Nebenquantenbahnen s, p, d, f

(Unterschalen)

Atomkern: Protonen (+) und Neutronen  
Atomhülle: Elektronen (-)

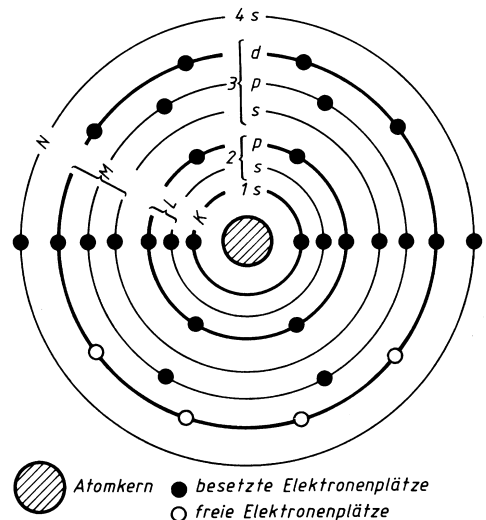


Bild 1.1–1 Atomaufbau (schematisch)

### Ursachen der Wechselwirkungen:

Die Grundeigenschaften der Elemente hängen von der Anzahl und der Anordnung der Elektronen ab. Sie nehmen zunächst energiearme Zustände ein. Der Energiegehalt eines Elektrons lässt sich in seiner relativen Lage zum Kern durch die *Haupt-* und *Nebenquantenbahnen* (auch *Elektronenschalen* genannt) beschreiben.

### Chemische Bindung:

Bei Elektronenabgabe bzw. -aufnahme entstehen Atomrümpfe mit elektropositiver bzw. elektronegativer Ladung (*Ionen*).

Ladungsunterschiede lassen elektrostatische Kräfte entstehen, die für die *Bindung* (= Zusammenhalt des Stoffes durch das sich aufbauende Kraftfeld) zwischen den Ionen verantwortlich sind. Nach der Art der Zusammenlagerung werden typische Bindungsarten unterschieden, die durch verschiedene Zwischenformen nahezu stufenlos ineinander übergehen.

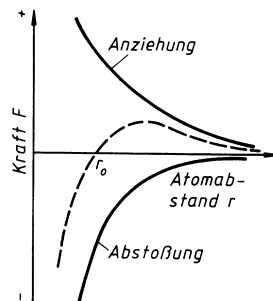
Mit steigender *Kernladungszahl* (= Anzahl der Protonen) und damit zunehmender Anzahl von Elektronen werden auch energiereichere Schalen besetzt. Zu einer hohen Stabilität kommt es, wenn Haupt- und Nebenquantenbahnen vollständig besetzt sind (bei den Edelgasen: Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon, Radon). Man spricht von *Edelgas-konfiguration*. Edelgase sind reaktionsträge und ermöglichen keine stabilen chemischen Verbindungen. Alle anderen Elemente streben einen möglichst stabilen Zustand an.

Konfiguration = bestimmte Anordnung von Teilchen (Elektronen)

Edelgaskonfiguration = Edelgaszustand

### Bildung von Ionen:

- *Elektronenabgabe*: Atomrumpf elektropositiv (*Kation*)  
Anzahl der Protonen > Anzahl der Elektronen
- *Elektronenaufnahme*: Atom elektronegatig (*Anion*)  
Anzahl der Elektronen > Anzahl der Protonen



**Bild 1.1–2** Kraftwirkungen zwischen zwei Atomen (schematisch)

$r_0$  Bindungslänge, die sich bei einer resultierenden Kraft (gestrichelte Kurve)  $F_{\text{ges}} = 0$  einstellt. Es herrscht Gleichgewicht zwischen Anziehung und Abstoßung.

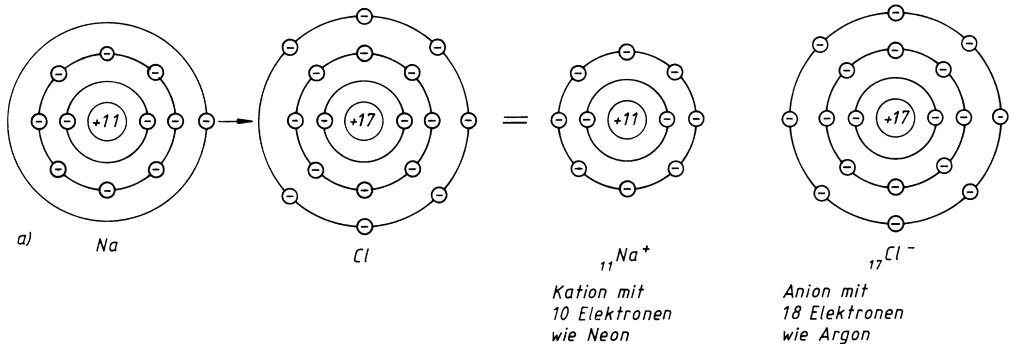
Jede Schale kann nur eine bestimmte Anzahl von Elektronen enthalten:

1. Schale:  $2 \cdot 1^2 = 2$
2. Schale:  $2 \cdot 2^2 = 8$
3. Schale:  $2 \cdot 3^2 = 18$  usw.

Werkstoffeigenschaften werden fast ausschließlich durch die Atomhülle bestimmt.

Infolge dieses Strebens geben teilweise besetzte Schalen leicht Elektronen ab (trifft für Metalle zu) oder nehmen von anderen Atomen Elektronen auf. Die Differenz zwischen der Normalzahl der Elektronen in der äußeren Schale und dem stabilen Zustand abgeschlossener Schalen bezeichnet man als *Wertigkeit (Valenz)* des Elements. Sie drückt aus, welches gegenseitige Bindungsvermögen der Elemente miteinander besteht. Bei sehr stabilen Bindungen, die auf Elektronenaustausch oder -paarbildung beruhen, spricht man von *Hauptvalenzbindungen*.

Die *Ionenbindung* entsteht durch den Übergang von Elektronen (Bild 1.1–3a). Sie ist zwischen einem elektropositiven und einem elektronegativen Element möglich. Die meisten anorganischen Stoffe haben diese Bindungsart. Die Ionenbindung wird auch *Elektrovalenz* genannt.

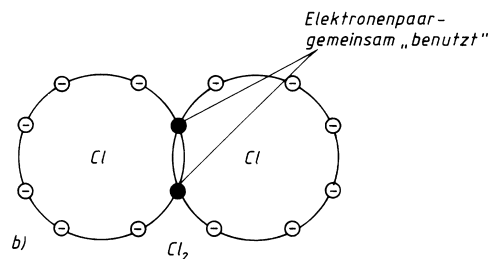


Die *Atombindung* (Bild 1.1–3b) kommt dadurch zustande, dass Elektronenpaare durch zwei Atome gemeinsam benutzt werden. Es ist die typische Bindungsart organischer Stoffe.

### Ursache der chemischen Bindung:

Jedes Atom hat das Bestreben, die äußere Elektronenschale in einen stabilen Zustand, den so genannten Edelgaszustand (= *Edelgaskonfiguration*) zu bringen. Dies geschieht durch Elektronenpaarbildung, Elektronenabgabe oder -aufnahme.

*Wertigkeit (Valenz)* = Anzahl der Einfachbindungen, die ein Atom eines Elementes eingehen kann



### Bild 1.1–3 Chemische Bindungen

- a) Entstehung der Ionenbeziehung (Elektrovalenz) am Beispiel von NaCl (Kochsalz)
- b) Die Atombindung (Elektronenpaarbindung) liegt in einfacher Form beim Chlor-Molekül Cl<sub>2</sub> vor.

**Hauptvalenzbindungen:**

- *Ionenbindung* (elektrostatische Anziehung von Kat- und Anionen), z. B. Alkalimetallverbindungen, Halogenverbindungen
- *homöopolare Atombindung* (Elektronenpaarbindung), z. B. Diamant, Moleküle der Halogenide (z. B. Cl<sub>2</sub>)
- *polare Atombindung* (Verschiebung der Elektronenpaare zum elektronegativen Atom), z. B. organische Verbindungen (zwischen Cl- und C-Atomen im PVC)
- *Metallbindung* (Anziehung von frei beweglichen Elektronen im Elektronengas und den Metallionen)

Der Vergleich lässt erkennen, dass die Grundeigenschaften der Stoffe durch die Art der chemischen Bindung bestimmt werden. Je nach dem chemischen Charakter sind folgende Kombinationen möglich:

- Nichtmetall + Nichtmetall → Atombindung, nicht leitend
- Nichtmetall + Metall → Ionenbindung, schwach leitend
- Metall + Metall → Metallbindung, gut leitend

Für die *Metallbindung* ist charakteristisch:

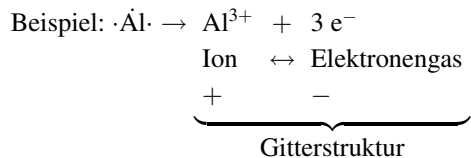
- Metalle besitzen durchweg wenig Außenelektronen (Valenzelektronen). Edelgaskonfiguration wird durch das Abstoßen von Valenzelektronen erreicht.
- Zwischen den Metallionen (+) und den „freien“ Elektronen (man spricht auch von Elektronengas, Elektronenwolke) besteht eine intensive Kraftwirkung, es entsteht das *Metallgitter*.
- hohe Festigkeit, gute Verformbarkeit, sehr gute Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität, teilweise hohe Schmelz- und Verdampfungstemperaturen.

**Tabelle 1.1–1** Vergleich der Grenzfälle Atombindung und Ionenbindung

	Nichtmetall + Nichtmetall	Metall + Nichtmetall
Art der Bindung	Atombindung	Ionenbindung
Prinzip	Elektronenpaar	Abgabe und Aufnahme von Elektronen
Thermisches Verhalten	niedrige Schmelz- und Siedepunkte	hohe Schmelz- und Siedepunkte
Elektrische Eigenschaften	Isolator	Ionenleiter
Beispiel	CH <sub>4</sub>	NaCl

Wir merken uns über die Metallbindung:

- Metalle haben wenige Elektronen auf der äußeren Schale des Atoms.
- Elektronen werden abgegeben (Streben nach Edelgaskonfiguration).





Die beschriebenen Bindungsarten sind Grenzfälle. Die tatsächlich vorhandenen Bindungen sind häufig Übergänge und Zwischenformen.

Außer den Hauptvalenzbindungen können auch schwache Bindungen zwischen den einzelnen Molekülen auftreten. Ein Austausch von Elektronen bzw. die Bildung gemeinsamer Elektronenpaare wie bei den Hauptvalenzbindungen findet nicht statt. Diese Nebenvalenzbindungen (auch Van-der-Waals-Bindungen) beruhen auf der Bildung von Ladungsschwerpunkten (Dipole) in den Molekülen. Der positive Ladungsschwerpunkt eines Moleküls zieht den negativen Ladungsschwerpunkt des benachbarten Moleküls an. Es handelt sich um elektrostatische Anziehung.

In Polymerwerkstoffen sind die Nebenvalenzbindungen für den Zusammenhalt der Makromoleküle untereinander verantwortlich (siehe Kapitel 10).

### Übung 1.1-1

Welcher Energiebereich des Atoms ist für die meisten Eigenschaften der Stoffe bestimmend?

### Übung 1.1-2

Nennen Sie die wichtigsten Arten der chemischen Bindung!

### Übung 1.1-3

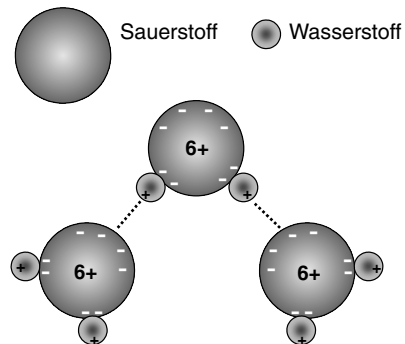
Wodurch ist die Metallbindung charakterisiert?

Wichtige Eigenschaften der metallischen Stoffe:

- gute Festigkeitseigenschaften,
- plastisch formbar, verfestigend,
- gute thermische und elektrische Leitfähigkeit,
- Reflexionsfähigkeit für Licht (metallischer Glanz).

Die Ladungsschwerpunkte entstehen durch:

- gemeinsame Elektronenpaare mit Verschiebung zum elektronegativeren Bindungspartner (Dipol-Dipol-Kräfte)
- Bildung starker Ladungsschwerpunkte durch gemeinsame Elektronenpaare von Wasserstoff mit einem anderen elektronegativeren Element wie z. B. Sauerstoff (Wasserstoffbrückenbindung, Bild 1.1-3c)
- die induzierenden Kräfte eines permanenten Dipols, welche Ladungsverschiebung im benachbarten polarisierbaren Molekül zur Folge haben (Induktionskräfte)
- rein statistisch bedingte Elektronenkonzentration auf einer Seite der Atomhülle eines Moleküls, die wiederum Ladungsverschiebungen im benachbarten Molekül zur Folge haben



**Bild 1.1-3c** Prinzip der Wasserstoffbrückenbindung – positive und negative Ladungsschwerpunkte der Wassermoleküle ziehen sich an

## 1.1.2 Kristallstruktur der Metalle

### 1.1.2.1 Der kristalline Zustand (Idealkristall)

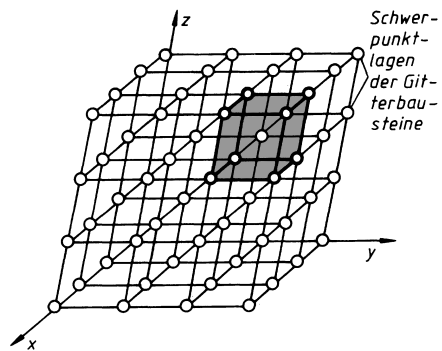
Metalle sind so genannte *echte Festkörper*, d. h., die Atome sind regelmäßig im Raum angeordnet. Zwischen den Atomen (eigentlich Ionen mit dazwischenliegendem Elektronengas) herrschen große Bindungskräfte. Diesen geordneten Teilchenverband nennt man *Kristall* (Bild 1.1–4).

Nicht nur bei Metallen liegen Kristalle vor. Das Wort *krystallos* (griech. Eis) führt uns z. B. zur Struktur des Eises und der Schneeflocken. Die Kristallstruktur ist demzufolge auch äußerlich, mit bloßem Auge, durch ihre regelmäßigen Flächen und symmetrischen Anordnungen erkennbar. Viele Mineralien, Salze, Metallkristalle in Hohlräumen gegossener Metallblöcke usw. machen durch Glanz und Schönheit auf sich aufmerksam.

*Kristalle* sind Anordnungen von Atomen, Ionen, Molekülen oder Molekülgruppen, deren Abstände sich periodisch im Raum wiederholen.

Entsprechend den wirkenden Kräften stellt sich jeweils eine bestimmte *Bindungslänge* (Atomabstand) ein.

*Kristallstruktur* = *Gitterstruktur*



**Bild 1.1–4** Einfache Gitterstruktur im schiefwinkligen Koordinatensystem. Die Elementarzelle ist hervorgehoben.

Flüssigkeiten und „unechte“ Festkörper (z. B. Fensterglas, viele Kunststoffe usw.) sind *amorph* (= gestaltlos). Ihre Atome unterscheiden sich in ihrer Ordnung und Beweglichkeit von der beschriebenen Kristallstruktur. Oft ist der Unterschied nur graduell. Man spricht bei Festkörpern von einer vorliegenden *Fernordnung*, bei Flüssigkeiten und Gläsern von einer existierenden *Nahordnung*, z. B.

- $(\text{H}_2\text{O})_n$  geordnetes Großmolekül des Wassers
- teilweise Kristallinität bei Kunststoffen (organische Hochpolymere)

Kristalle zeigen beim Bestrahlen mit Röntgenstrahlen Interferenzerscheinungen, da die Wellenlängen in der Größenordnung der Atomabstände liegen.

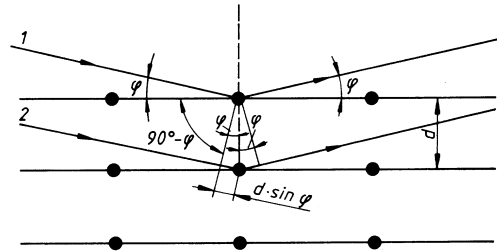
*kristallin* = nah- und ferngeordnet  
(Gitter)

*amorph* = nur nahgeordnet

*Nahordnung*: Bausteine in kleinen Bereichen geordnet (z. B. in Flüssigkeiten)

*Fernordnung*: Bausteine endlos in Gittern geordnet (Kristallstruktur)

Die Methoden zum Nachweis und zum Ausmessen der Kristalle nennt man *Röntgenfeinstrukturanalyse*. Grundlage bietet die *Bragg'sche Gleichung* (Bild 1.1-5).



**Bild 1.1-5** Beugung von Röntgenstrahlen am Gitter

1 und 2 parallele Strahlen

Gleichung nach Bragg

$$2d \cdot \sin \varphi = n \cdot \lambda$$

$\varphi$  Glanzwinkel

$d$  Netzebenenabstand

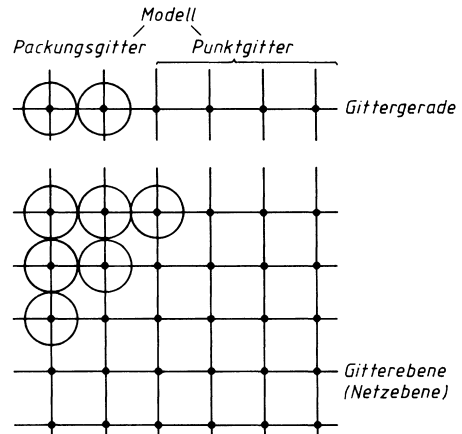
$\lambda$  Wellenlänge

$n$  Beugungsordnung (1, 2 bis  $n$ )

*Gitterstruktur* (Kristallstruktur) ist durch Röntgenstrahlen nachweisbar, da Interferenzen (Beugungserscheinungen) durch die geringe Wellenlänge möglich sind (*Röntgenfeinstrukturanalyse*).

Begriffe, mit denen sich das Raumgitter beschreiben lässt:

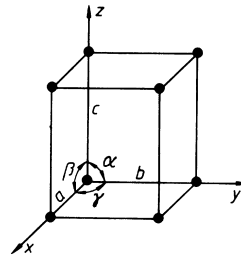
- **Gittergerade** Gerade, auf der in regelmäßigen Gitterabständen Atome liegen
- **Gitterebene, Netzebene** Ebene, die regelmäßig mit Atomen besetzt ist
- **Raumgitter** räumliche, vollständige Betrachtung der Atomanordnung (*Idealkristall*)  
Bild 1.1-4
- **Elementarzelle** kleinste Einheit des Kristallgitters, die alle Merkmale des Gesamtgitters aufweist. Ein Kristall ist aus vielen Elementarzellen zusammengesetzt, die mithilfe der geometrischen Operationen Verschiebung, Rotation und/oder Spiegelung exakt positioniert sind.  
Bilder 1.1-4 und 1.1-7



**Bild 1.1-6** Begriffe für die Beschreibung von Gitterstrukturen

Die Elementarzelle (Bild 1.1–7) dient der näheren Beschreibung des Gitters. Die Achsenabschnitte  $a$ ,  $b$  und  $c$  werden als *Gitterkonstanten* oder *Gitterparameter* (*Gitterabstände*) bezeichnet. Bei den meisten Metallen liegt ihre Größe bei 0,25 bis 0,5 nm, d. h., auf einen Millimeter kommen 2 bis 4 Millionen Atome. Die Gitterparameter werden vom Gittertyp und vom Durchmesser der eingebauten Atome bestimmt. Die Achsenwinkel  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  können von 90 Grad abweichen, wie die Übersicht über die möglichen Kristallsysteme (Tabelle 1.1–2) zeigt.

1 nm = 1 Nanometer =  $10^{-9}$  m



Elementarzelle

**Bild 1.1–7** Kenngrößen für die Beschreibung eines Gittertyps:

$x, y, z$  Achsen

$\alpha, \beta, \gamma$  Achsenwinkel

$a, b, c$  Gitterkonstanten oder Gitterparameter

Ein *Kristallsystem* verkörpert die Gesamtheit von Baueinrichtungen in einem Raumgitter mit gemeinsamen geometrischen Merkmalen, gekennzeichnet durch die *Gitterparameter*  $a, b, c$  und die *Achsenwinkel*  $\alpha, \beta, \gamma$ .

**Tabelle 1.1–2** Kristallsysteme

Kristallsystem	Gitterkonstanten/Achsenwinkel	Gestalt der Elementarzelle (Vergleich)
<i>Triklin</i>	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	allseitig schiefer Ziegelstein
<i>Monoklin</i>	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$	in einer Richtung schiefer Ziegelstein
<i>Orthorhombisch</i>	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	normaler Ziegelstein
<i>Tetragonal</i>	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	in einer Richtung gestreckter Würfel
<i>Rhomboedrisch</i>	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	allseitig schiefer Würfel
<i>Hexagonal</i>	$a_1 = a_2 \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	ein Stück Sechskantmaterial, gerade abgeschnitten
<i>Kubisch</i>	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Würfel

### 1.1.2.2 Gittertypen

Die meisten Metalle kristallisieren kubisch oder *hexagonal*. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Gittertypen im Überblick behandelt.

Die *Anzahl der Atome je Elementarzelle* und die *Packungsdichte* sind zwei Kenngrößen, die anschaulich machen, wie dicht die „Kugeln“ (grobe Modellvorstellung für die Atome) räumlich angeordnet sind.

Die *Packungsdichte* gibt den von den Atomen besetzten Raumanteil wieder.

$n = \text{Anzahl der Atome je Elementarzelle}$  (Eckatome und in Flächen des einfachen geometrischen Grundkörpers eingelagerte Atome gehören nicht nur einer Elementarzelle an)

Beispiel: krz = kubisch-raumzentriert

$$n = 8 \cdot \frac{1}{8} + 1 \cdot 1 = 2$$

Jedes Eckatom gehört im Raumgitter gleichzeitig 8 Elementarzellen an.

In der Mitte des Würfels ist ein Atom eingelagert.

$PD = \frac{\text{Atomvolumen in einer Elementarzelle}}{\text{Volumen der Elementarzelle}}$
---

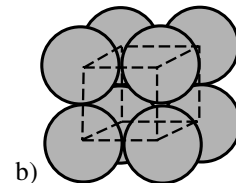
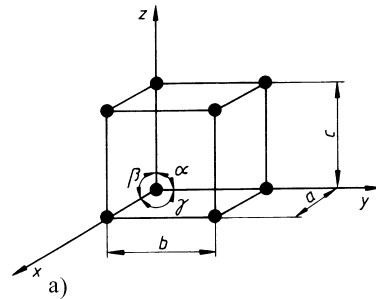
$PD$  Packungsdichte

a) *Kubisch-primitives Gitter kp*

Beispiel:

$$n = 8 \cdot \frac{1}{8} = 1 \quad \text{Polonium Po}$$

$$PD = 0,52$$

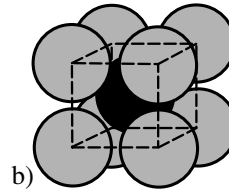
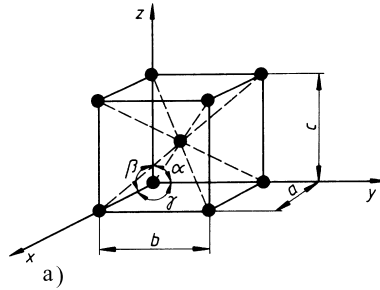


**Bild 1.1-8** Kubisch-primitives Gitter (kp)  
a) Punktgitter (Atome punktförmig dargestellt)  
b) Packungsgitter (Atom-Kugelpackung)

b) *Kubisch-raumzentriertes Gitter krz*

	Beispiele:	
$n = 2$	Chrom	Cr
$PD = 0,68$	Vanadium	V
	Molybdän	Mo
	Wolfram	W
	$\alpha$ -Eisen	$\alpha$ -Fe
	$\beta$ -Titan	$\beta$ -Ti

Das krz-Gitter kann man sich als zwei ineinander gestellte kp-Gitter vorstellen; zusätzlich zu den Eckatomen befindet sich noch ein Atom in der Würfelmitte.



**Bild 1.1-9** Kubisch-raumzentriertes Gitter (krz)  
a) Punktgitter  
b) Packungsgitter

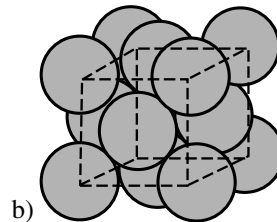
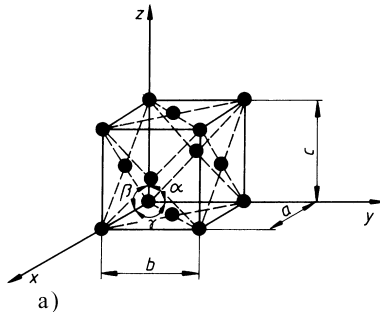
c) *Kubisch-flächenzentriertes Gitter kfz*

	Beispiele:	
$n = 4$	Nickel	Ni
$PD = 0,74$	Kupfer	Cu
	Aluminium	Al
	Gold	Au
	Silber	Ag
	$\beta$ -Cobalt	$\beta$ -Co
	$\gamma$ -Eisen	$\gamma$ -Fe

$$n = 8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4$$

Beim kfz-Gitter befindet sich zusätzlich zu den Eckatomen im Schnittpunkt der Flächen-diagonalen (im Zentrum der Flächen) noch je ein Atom.

Mit 0,74 ist die maximal mögliche Packungsdichte PD erreicht.

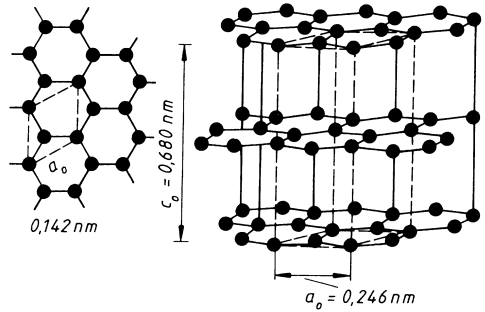


**Bild 1.1-10** Kubisch-flächenzentriertes Gitter (kfz)  
a) Punktgitter  
b) Packungsgitter

d) *Hexagonal primitives Gitter hp*

Beispiel: Graphit C

Ausgesprochenes Schichtgitter. Während die Bindung der Atome innerhalb einer Schicht stark ist, ist der Zusammenhalt zwischen den Schichten infolge ihres relativ großen Abstandes ziemlich schwach. Dadurch gute Spaltbarkeit des Graphits parallel zu den Schichtebenen.



**Bild 1.1-11** Hexagonal-primitives Gitter (hex) – Punktgitter  
 $n = 10^{-9}$  (Nano); 1 nm =  $10^{-9}$  m

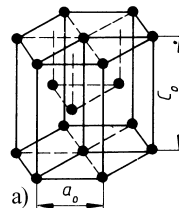
e) *Hexagonal dichteste Packung hdP*

$n = 6$

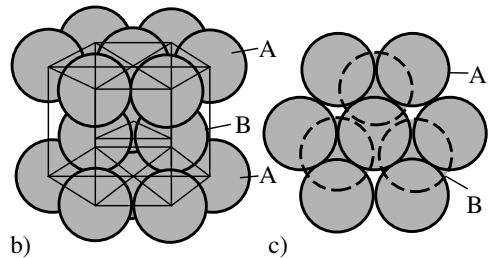
Beispiele:

$PD = 0,74$

Zink	Zn
Cadmium	Cd
Magnesium	Mg
$\alpha$ -Cobalt	$\alpha$ -Co
$\alpha$ -Titan	$\alpha$ -Ti



Mit der Packungsdichte von 0,74 liegt, wie im kfz-Gitter, die dichteste Kugelanordnung im Raum vor. Die Elementarzelle besitzt eine sechseckige Basisfläche. Die Kugelschichten liegen so aufeinander, dass sie sich untereinander berühren, alle Lücken ausfüllen und eine ideal dichte Anordnung ergeben. Bezeichnet man die beiden Kugelschichten mit A und B, so ergibt sich für das hdP-Gitter die Stapelfolge der dichtest gepackten Gitterebenen:



**Bild 1.1-12** Hexagonal dichteste Packung (hdP)  
 a) Punktgitter  
 b) Packungsgitter (Ansicht von vorn)  
 c) Packungsgitter (Ansicht von oben)

$\vdots$   
 $\left. \begin{matrix} A \\ B \\ A \\ B \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{Stapelfolge} \\ \text{hdP} \end{matrix}$   
 $\vdots$





**Übung 1.1–4**

Wann spricht man von „echten“ Festkörpern?

**Übung 1.1–5**

Was ist eine Elementarzelle?

**Übung 1.1–6**

Welche Größen bestimmen einen Gittertyp eindeutig?

**Übung 1.1–7**

Beschreiben Sie die Struktur eines kfz-Gitters!

**Übung 1.1–8**

Erklären Sie den Begriff Stapelfolge!

**Übung 1.1–9**

Was versteht man unter einem polymorphen Metall?

*Beachten Sie:* Griechische Buchstaben werden in der Metallkunde mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet!

- a) Gittermodifikationen reiner Metalle, z. B.  $\alpha$ -Fe,  $\gamma$ -Fe,  $\delta$ -Fe
- b) Mischkristallarten bei Legierungen (s. Abschnitt 2.2.2)

**1.1.2.3 Realstruktur**

Die bisherige Beschreibung der Anordnung der Atome als Idealkristall enthält bedeutende Fehler. Abgesehen davon, dass die Atome bzw. Metallionen in Wirklichkeit keine Kugelgestalt haben und sich nicht in Ruhe befinden, sondern um die Ruhelage herum schwingen, berücksichtigt der *Realkristall*

- a) die endliche Begrenzung (d. h., es ist eine Oberfläche des Kristalls vorhanden – Begriff *Kristallit*),
- b) die Existenz gestörter Bereiche (d. h., die Ordnung ist in bestimmten, kleinen Volumeneinheiten gestört – Begriffe *Fehlordnung*, *Gitterbaufehler* oder *Defekte*).

Die Gitterdefekte werden nach ihrer räumlichen Ausdehnung in ein-, zwei- und dreidimensionale Baufehler bzw. Punkt-, Linien-, Flächen- und Raumdefekte unterschieden.

*Punktdefekte*

*Leerstellen* (Gitterlücken) sind nicht besetzte Gitterplätze. Ihre Anzahl vergrößert sich z. B. bei plastischer Verformung und mit zunehmender Temperatur.

<i>Idealkristall</i>	idealisiertes Modell, mathematisch beschreibbar, existiert in Wirklichkeit nicht
<i>Realkristall</i>	gestörter Kristall (Kristall mit Fehlordnung), die Abweichungen vom idealen Aufbau (Gitterfehler oder Defekte) werden berücksichtigt; Kristallwachstum unregelmäßig, unreine Kristallsubstanz

*Fremdatome* (Bild 1.1–14) können gleiche Gitterplätze wie Atome des Wirtsgitters (substituiert = ersetzt, ausgetauscht) oder Zwischengitterplätze (eingelagert) einnehmen. Die Zwischengitteratome müssen deutlich kleiner sein als die Atome des Wirtsgitters. Die Austauschatome können größer, aber auch kleiner sein als die Wirtsgitteratome (Prinzip der Mischkristallbildung bei Legierungen; s. Abschnitt 2.1.1).

Die Punktdefekte führen zur Gittereinengung oder -aufweitung. Bei eingebauten Fremdatomen hängt die Größe der hervorgerufenen Gitterverspannung vom Unterschied der Atomdurchmesser ab.

Wirtsgitter = Grundgitter (= Matrix)

### Liniendefekte

*Versetzungen* sind Liniendefekte, die in großer Dichte im Gitter vorkommen und die Werkstoffeigenschaften in hohem Maße beeinflussen.

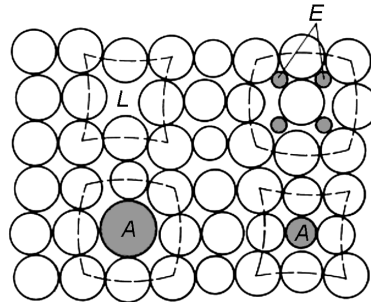
*Stufenversetzungen* kann man sich als Randlinie einer zusätzlich eingeschobenen Gitterebene vorstellen (Bild 1.1–15).

*Schraubenversetzungen* schrauben sich wendeltreppenartig um die Versetzungslinie (Bild 1.1–16).

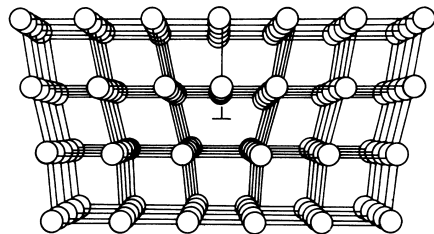
Versetzungen entstehen bei der Kristallisation und sie vervielfachen sich bei der plastischen Verformung (s. Abschnitt 1.3.3).

Versetzungen haben folgende Eigenschaften:

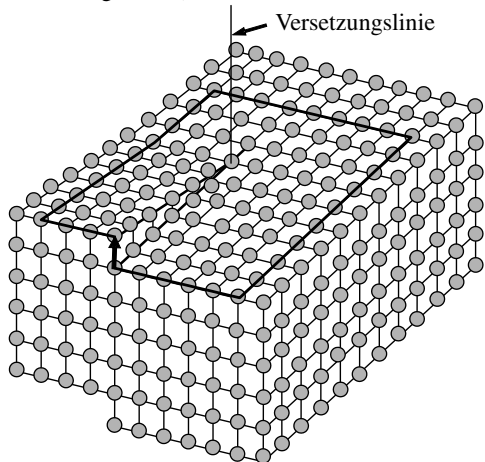
- Sie haben einen *Richtungssinn* (+, -); ziehen sich an oder stoßen sich ab.
- Sie können sich bewegen; bei der Deformation der Metalle und Legierungen wird das *plastische Verhalten* (= Fließverhalten) durch ein massenhaftes Wandern von Versetzungen bewirkt. Ein versetzungsfreier Idealkristall wäre nicht plastisch formbar, er würde bei genügend hoher mechanischer Belastung spröde brechen.
- Versetzungen bilden eine Ursache für *Eigenstressungen* und *Verfestigung* (s. angegebene, hohe Versetzungsdichte nach einer plastischen Deformation). (s. Tabelle 1.1–3)



**Bild 1.1–14** Punktförmige Gitterdefekte  
L Leerstelle, A Austauschatome, E  
Einlagerungsatome



**Bild 1.1–15** Stufenversetzung in einem  
primitiven Gitter (räumliche Anordnung der  
Atome angedeutet)



**Bild 1.1–16** Schraubenversetzung

**Tabelle 1.1–3** Versetzungsdichte bei Metallen  
(in  $\text{cm}/\text{cm}^3 = \text{cm}^{-2}$ )

Normal	$10^7 \dots 10^8 \text{ cm}^{-2}$
Nach plastischer Deformation	bis $10^{12} \text{ cm}^{-2}$

### Flächendefekte

Zu den *Flächendefekten* gehören die *Korn-  
grenzen* und *Stapelfehler*.

Ein *Kristallit* (auch *Korn* genannt) ist in sich noch in *Subkörner* unterteilt, d. h. Bereiche, deren Gitterorientierung bis zu etwa  $10^\circ$  voneinander abweichen. Diese *Kleinwinkelkorn-  
grenzen* (Subkorn-  
grenzen) werden durch aneinandergereihte Versetzungen gebildet (Bild 1.1–17).

*Großwinkelkorn-  
grenzen* (normale Korn-  
grenzen) trennen Kristallite gleicher oder verschiedener Atomarten voneinander (Bild 1.1–18). Die Gitterorientierung der Bereiche schließt größere Winkel ein, und die Abstände der Kristallite betragen mehrere Atomabstände.

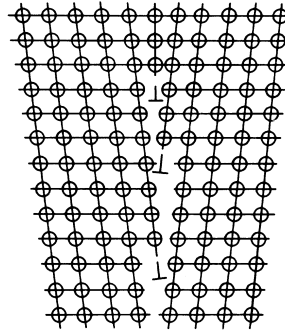
*Phasengrenzen* trennen Bereiche voneinander, die sich in der chemischen Zusammensetzung und/oder der kristallinen Struktur unterscheiden.

Herkömmlich hergestellte technische Legierungen (z. B. Stähle, Gusseisenwerkstoffe, Aluminiumlegierungen) bestehen nicht nur aus einem Einzelkristall sondern aus sehr vielen Kristallen.

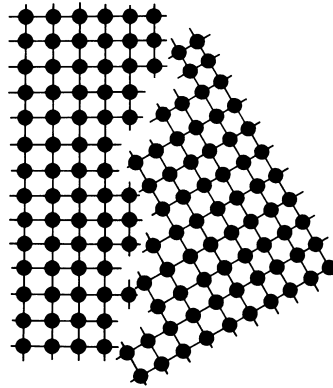
Betrachtet man eine präparierte Probe eines metallischen Werkstoffes mit einem Auflichtmikroskop, so erkennt man das *Gefüge*. Einzelheiten mikroskopischer Untersuchungen werden im Abschnitt 12.4.2 behandelt. Das Gefüge besteht aus vielen Körnern (Kristalliten), Korngrenzen (Großwinkelkorn-  
grenzen) und einer mehr oder weniger deutlich sichtbaren Korngrenzsubstanz (Ablagerungen).

Die Entstehung des Gefüges bei der Erstarrung einer Metallschmelze wird im Abschnitt 1.2.3 ausführlich beschrieben.

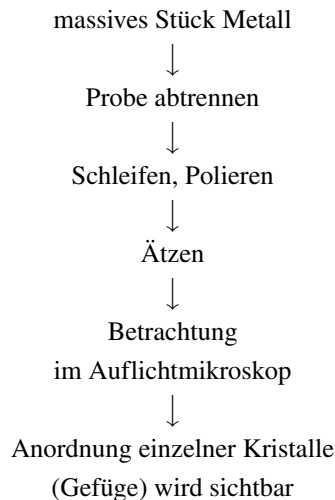
Nebenstehend: Kurzfassung der Technik der Probenpräparation und des Mikroskopierens.



**Bild 1.1–17** Kleinwinkelkorn-  
grenze



**Bild 1.1–18** Großwinkelkorn-  
grenze



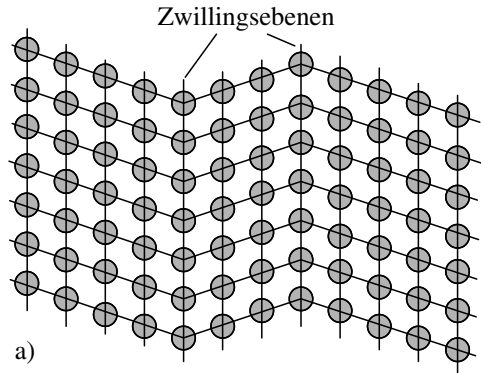
Einen Sonderfall bilden die *Zwillingsgrenzen*. Zwei Kristallite sind spiegelsymmetrisch angeordnet (Bild 1.1–19a). Die sich auf der Zwillingsgrenze befindenden Atome liegen auf Gitterplätzen, die beiden Kristallzwillingen gemeinsam sind. Die Zwillingsgrenze ist die Spiegelebene der beiden benachbarten Kristalle.

Zwillingsgrenzen lassen sich als Großwinkelkorngrenzen mit ungestörtem Gitteraufbau auffassen. Zwillinge entstehen, wenn Atome durch Scherung aus ihrer Lage verschoben werden.

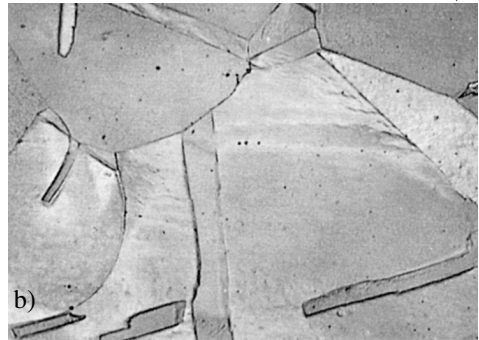
Von einem *Stapelfehler* spricht man, wenn z. B. die Schichtfolge der Gitterebene wie folgt ausfällt:



Innerhalb eines Kugelstapels existieren die kubisch-flächenzentrierte und die hexagonale Struktur dichtester Packung nebeneinander.



a)



b)

**Bild 1.1–19** Zwillingsstruktur

a) Gitterstruktur eines Zwillings

b) mikroskopische Aufnahme von verformtem Reinkupfer. Die Streifen im Gefüge (durch Parallelen begrenzt) markieren die Zwillingsstruktur.

Vergrößerung: 200 : 1

**Tabelle 1.1–4** Gitterbaufehler (Defekte)

Art des Defekts	Beispiele
Punktdefekte	Leerstelle (L) Zwischengitterplatz (Z) Fremdbausteine
Liniendefekte	Versetzungen Stufenversetzungen Schraubenversetzungen
Flächendefekte	Korngrenzen Zwillingsgrenzen Stapelfehler Phasengrenzflächen

} als Spezialfälle

### Übung 1.1–10

Was ist ein Realkristall?

### Übung 1.1–11

Wie verändern Gitterlücken (Leerstellen) und Zwischengitterplätze die Struktur des Gitters in ihrer Umgebung?

### Übung 1.1–12

Welche Eigenschaften haben Versetzungen im Gitter?

### Übung 1.1–13

Erklären Sie den Begriff Stapelfehler!

### 1.1.2.4 Gitterstruktur und technische Eigenschaften

Physikalische und technische Eigenschaften werden sowohl vom Grundgitter des Kristalls als auch von der Art, Anzahl und Anordnung der Gitterfehler und gitterfremden Bausteine bestimmt.

In diesem Abschnitt soll besonders auf das *Fließverhalten* (= plastische Verformbarkeit) eingegangen werden.

Die plastische Verformbarkeit der Metalle wird durch das Wandern von Versetzungen in bevorzugten Gleitebenen und Gleitrichtungen ermöglicht. Eine Mindestspannung (Fließgrenze, Streckgrenze) löst die Versetzungsbewegung aus. Der Widerstand gegen Fließen ist niedrig, wenn eine hohe Anzahl von *Gleitebenen* und *Gleitrichtungen* vorliegt. Bei hoher Packungsdichte und großer Symmetrie trifft das zu. Aluminium, Kupfer, Silber – aber auch Stahl bei über 900 °C – sind sehr gut bis hervorragend plastisch verformbar; durchweg liegt kfz-Gitter vor!

#### Hinweise:

Der Begriff Spannung wird hier bereits verwendet. Er wird im Abschnitt 1.3.1 ‚Mechanische Beanspruchung‘ definiert und erläutert.

Die Messung der Mindestspannung, die überschritten werden muss, wenn der Werkstoff fließen soll, wird beim Zugversuch (Abschnitt 12.2.1) beschrieben.

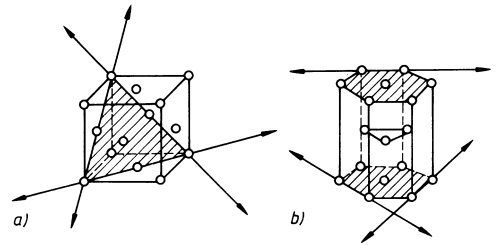
Fließgrenze = allgemein gültiger Begriff

Streckgrenze = Fließgrenze bei Zugbeanspruchung

Gitterdeformationen, hervorgerufen durch Gitterdefekte und Fremdatome, behindern die Versetzungsbewegung in den Gleitebenen (Ebenen dichtester Kugelpackung). Die Energie, die notwendig ist, um Versetzungen zu bewegen, steigt mit zunehmender Gitterspannung immer weiter an. Man benötigt eine hohe Mindestspannung zur Auslösung des Fließvorganges, *Verformungswiderstand* und *Festigkeit* sind angestiegen.

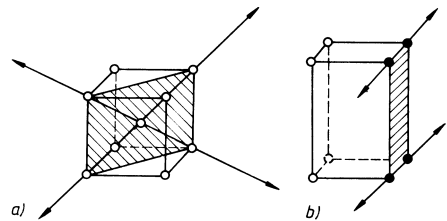
*Gitterstruktur und Fehlordnung* beeinflussen

- Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme
- Wärmedehnung
- Verformbarkeit (Fließverhalten)
- Festigkeitseigenschaften
- Diffusionsvorgänge



**Bild 1.1–20** Bevorzugte Gleitebenen und -richtungen

a) kfz-Gitter b) hdp-Gitter



**Bild 1.1–21** Bevorzugte Gleitebenen und -richtungen

a) krz-Gitter b) tp-Gitter (tetragonal primitiv)

Gleitebenen } ermöglichen das  
Gleitrichtungen } Fließen.

*Kaltverformung* (= Kaltumformung) erhöht die Anzahl der Versetzungen (höhere Versetzungsdichte). Das Fließen wird erschwert, d. h., der Widerstand gegen Formänderung erhöht sich (Kaltverfestigung der Metalle).

Eigenschaften, die in einer bestimmten Richtung gemessen werden, wie z. B. Elastizitätsmodul, elektrische Leitfähigkeit, können an einem Kristall recht unterschiedliche Werte annehmen. Tabelle 1.1–5 und Bild 1.1–22 zeigen für die genannten Größen, dass es darauf ankommt, in welcher Richtung zur Hauptachse des Gitters gemessen wird.

Die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften bezeichnet man als *Anisotropie*.

Anisotrop sind:

- Elementarzelle, Raumgitter, Kristallit (Korn)
- Einkristall*: So bezeichnet man gezüchtete große Kristallite, die für bestimmte technische Anwendungen eine einheitliche Gitterorientierung über größere Bereiche, z. B. in einem Werkstück, besitzen.
- Vielkristall mit Textur*: Kristallite sind durch Korngrenzen getrennt, haben jedoch eine nahezu einheitliche Gitterorientierung.

### Elektrische Leitfähigkeit

$$\kappa = \frac{l}{R \cdot A} \quad \text{in} \quad \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$$

- $l$  Länge des Leiters  
 $R$  Ohm'scher Widerstand  
 $A$  Querschnitt des Leiters

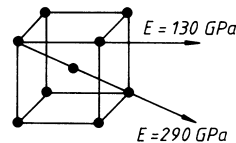
**Tabelle 1.1–5** Anisotropie der elektrischen Leitfähigkeit (Beispiele)

Gittertyp	$\kappa_{\parallel}$	$\kappa_{\perp}$
Mg hex	28,6	23,7
Sn tetr	11,1	7,6
Zn hex	17,9	18,6

bei 0 °C

$\kappa_{\parallel}$  parallel zur Hauptachse

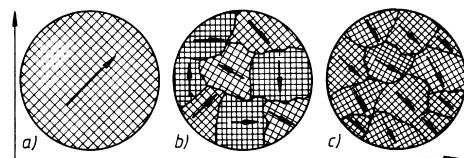
$\kappa_{\perp}$  senkrecht zur Hauptachse des Gitters



**Bild 1.1–22** Richtungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls im krz-Gitter ( $E$  ist eine mechanische Werkstoffkenngröße, erläutert in Abschnitt 12.2.2)

### Anwendungsbeispiele:

- In der Halbleitertechnik benötigt man u. a. hochreines Silicium. Die großtechnische Herstellung erfolgt im *Zonenschmelzverfahren*. Man erhält *Einkristallstäbe* mit hohem Reinheitsgrad.
- Bleche für den Bau elektrischer Maschinen (Dynamo- und Transformatorbleche) erhalten z. T. eine geordnete (gerichtete) *Textur*. Sie werden so zugeschnitten und eingebaut, dass die Magnetisierungsrichtung mit der Richtung der geringsten Leistungsverluste übereinstimmt. Damit kann man bereits im metallurgischen Bereich auf günstigste Leistungsparameter von Transformatoren, Motoren, Generatoren usw. Einfluss nehmen.



**Bild 1.1–23** Anisotropie und Quasiisotropie

- anisotroper Einkristall
- quasiisotroper Vielkristall
- anisotroper Vielkristall (geordnete Textur)

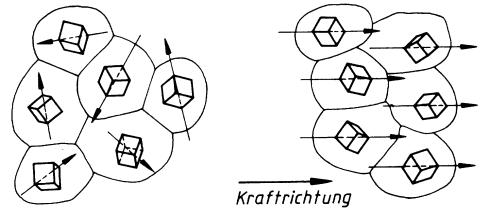
Textur (geordnete, gerichtete): Kristalle sind in eine/mehrere Richtungen bevorzugt ausgerichtet.

Ursachen für geordnete Texturen (gewollt oder ungewollt):

- Umformvorgänge, Deformationen (z. B. Zieh- und Walztexturen, s. Bild 1.1–24)
- Kristallisation aus der Schmelze unter bestimmten Bedingungen
- bestimmte Glühbehandlungen
- elektrolytische Abscheidung

Vielfach tritt die *Anisotropie* bestimmter Kristallbereiche störend auf, z. B. als unkontrollierbare unerwünschte Formänderung bei spanloser Formgebung (Verzug).

*Isotropie* ist die völlige Richtungsunabhängigkeit der Eigenschaften. Die Mehrzahl aller metallischen Werkstoffe ist nahezu isotrop, da die unterschiedliche Gitterorientierung der Einzelkristallite im Mittelwert jeglichen Richtungseinfluss aufhebt. Man spricht von der *Quasiisotropie*. Dieser Zustand wird in der Technik im Allgemeinen angestrebt.



**Bild 1.1–24** Entstehung einer geordneten Verformungstextur (Kristallite drehen sich unter Krafteinwirkung in eine Vorzugsorientierung ein)

Chemische und physikalische Eigenschaften eines metallischen Werkstoffes sind unter gewissen Voraussetzungen von der Richtung abhängig, in der sie gemessen werden bzw. der Werkstoff beansprucht wird.

*isotrop* = richtungsunabhängig

*anisotrop* = richtungsabhängig,

z. B. Elementarzelle

Gitter (ungestört)

Kristallit (= Korn)

Einkristall

Whisker

geordnete Texturen

*quasiisotrop* = nahezu richtungsunabhängig,

z. B. Mehrzahl aller Werkstoffe (polykristalline Struktur mit regelloser Anordnung)

### Übung 1.1–14

Was sind Gleitebenen?

### Übung 1.1–15

Wie nennt man die Richtungsabhängigkeit vieler Eigenschaften?

### Übung 1.1–16

Wie entstehen Texturen?

### Übung 1.1–17

Was ist ein Einkristall?

### Übung 1.1–18

Weshalb liegt bei metallischen Werkstoffen meist Quasiisotropie vor?

## 1.2 Kristallisation

### Lernziele

Der Lernende kann . . .

- Phasenumwandlungen beschreiben (thermische Analyse),
- den Kristallisationsvorgang erklären,
- den Gefügeaufbau metallischer Stoffe erläutern,
- Zusammenhänge zwischen Erstarrungsbedingungen, Kornstruktur und Werkstoffeigenschaften nennen.

### 1.2.0 Übersicht

Metalle können in vier Zuständen auftreten, als Plasma, Gas, Flüssigkeit und Festkörper. Physikalisch unterscheiden sich diese Zustände vor allem dadurch, dass die „Bausteine“ zunehmend „strenger“ geordnet sind.

Während sich im *Plasma* sowohl die Atomkerne als auch die Elektronen unabhängig voneinander bewegen können, ist in der Kristallstruktur des *echten Festkörpers* ein maximales Ordnungsprinzip verwirklicht. Die Werkstofftechnik befasst sich vorwiegend mit dem festen Zustand. Wichtig ist zu wissen, wie ein Werkstoff aus dem flüssigen Zustand entstanden ist. Dieser Abschnitt wird sich daher mit dem Begriff der *Phase* und den wichtigsten *Phasenumwandlungen* befassen. Als Untersuchungsmethode steht uns das klassische Verfahren der *thermischen Analyse* zur Verfügung. In herkömmlicher Weise werden Phasenumwandlungen an *Temperatur-Zeit-Verläufen* besprochen.

Die auftretenden Veränderungen werden am Übergang flüssig–fest ausführlich gezeigt. Sie lernen kennen, dass sich beim Abkühlen einer Schmelze zunächst *Keime* bilden und dass durch Anlagerung weiterer Atome in strenger Gitterorientierung ein *Kristallwachstum* einsetzt. Wenn alle Atome der Schmelze „aufgebraucht“ sind, d. h. in Kristalle eingebaut sind, ist die Erstarrung abgeschlossen. Es ist das Gefüge des Festkörpers entstanden. Die reale Erstarrung in einer Form wird, exemplarisch für alle metallischen Gusswerkstoffe, im Kapitel 5 behandelt. Gießtechnische Einflussfaktoren bleiben hier unberücksichtigt.



### 1.2.1 Phasenumwandlungen

Die Bezeichnung eines Stoffzustandes durch seinen Aggregatzustand (gasförmig, flüssig, fest) ist für unsere Betrachtungen nicht ausreichend. Für das Verständnis der Werkstoffeigenschaften sind der Begriff *Phase* und die Einteilung in *ein-* und *mehrphasige Stoffsysteme* zweckmäßig.

Man bezeichnet Stoffe, die in sich *homogen* sind und durch eine Grenzfläche voneinander getrennt sind, als *Phasen*. Homogen bedeutet, dass hinsichtlich der Zusammensetzung und atomaren Anordnung eine einheitliche Substanz vorliegt. Wenn also bei identischem Druck und Temperatur zwei Kristalle in der chemischen Zusammensetzung, im Gittertyp und im Gitterparameter übereinstimmen, gehören sie zur gleichen Phase. Bereiche ein und derselben Phase haben die gleichen chemischen und physikalischen Eigenschaften. Die *Zustandsgrößen* Druck und Temperatur und bei Mehrstoffsystemen die Konzentration der Einzelstoffe bestimmen, ob eine feste, flüssige oder gasförmige Phase einzeln oder ob zwei Phasen im *Gleichgewicht* nebeneinander vorliegen.

Ruhelage der Atome gibt es nur bei  $T = 0 \text{ K}$  ( $= -273,15 \text{ °C}$ ). Mit zunehmender Erwärmung schwingen die Atome mehr um ihre Lage im Gitter. Die Wärmeenergie wandelt sich in eine *innere Energie* (Schwingungsenergie) um. Mit wachsender Schwingungsweite vergrößert sich der Abstand der Mittelagen der Atome. Sie kennen es bereits aus Erfahrung: Erwärmung dehnt die Körper aus, Abkühlung lässt sie schrumpfen.

*Phasen* = homogene Bestandteile eines stofflichen Systems; abgegrenzte Volumina mit in sich (annähernd) gleichen chemischen und physikalischen Eigenschaften  
Ein stoffliches System kann auch aus *einer Phase* bestehen.

#### Arten von Phasen

- gasförmige, flüssige, feste Phasen z. B. Wasserdampf, Wasser, Eis
- Lösungsphasen z. B. Salzlösung, Mischkristalle (Abschnitt 2.1.1)
- Verbindungsphasen z. B. TiC Titancarbid (Abschnitt 2.1.3)

Druck, Temperatur und Konzentration sind wichtige *Zustandsgrößen*. Sie bestimmen die Zustandsform (Phase) eines Stoffes. (s. Abschnitt 2.2.1)

(Gitter-) *Schwingungsenergie* = Teil der inneren Energie  
Sie steigt mit zunehmender Temperatur.

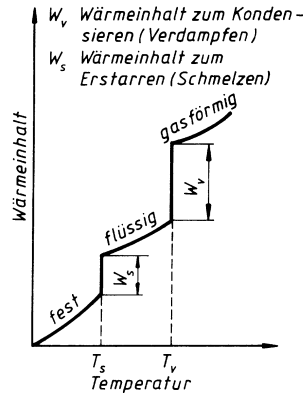
Wird bei reinen Stoffen die *Schmelztemperatur* erreicht, steigt die Temperatur trotz weiterer Zufuhr von Wärmeenergie zunächst nicht weiter an (Bild 1.2–1). Diese Energie wird benötigt, um die Bindungskräfte zu überwinden, d. h. die Kristallstruktur aufzulösen und die Atome in willkürliche Anordnung und unbestimmte Bewegung zu bringen. Diese beim Schmelzen „verbrauchte“ Energie heißt *Schmelzwärme*  $W_s$ . Um ihren Betrag erhöht sich der Wärmeinhalt des metallischen Körpers. Analog sind die Vorgänge beim Übergang flüssig–gasförmig. Der Energiebetrag der *Verdampfungswärme* ist erforderlich, um die Gasphase zu erzielen.

Obwohl dem Stoffsystem bei der Abkühlung ständig Wärme entzogen wird, führt die frei werdende Schmelz- bzw. Verdampfungswärme zu einer konstanten Temperatur, bis die *Phasenumwandlung* abgeschlossen ist. Man nennt diese Enthalpien *latente Wärme* (lat.: verborgene Wärme).

*Enthalpie* ist der Wärmeinhalt eines stofflichen Systems bei konstantem Druck.

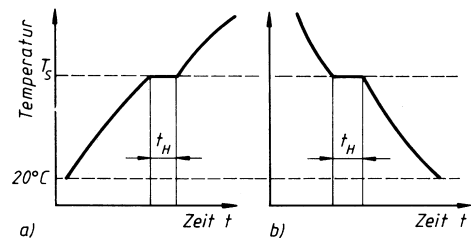
Die Phasenumwandlungen sind reversibel (umkehrbar). Bild 1.2–2 zeigt die Erwärmungs- und Abkühlkurve eines reinen Metalls. Schmelz- und Erstarrungspunkt sind praktisch ein und dieselbe Temperatur  $T_s$ .

Voraussetzung für die Gültigkeit der hier angegebenen Kurven ist das *thermodynamische Gleichgewicht*, d. h. sehr langsames Erwärmen bzw. Abkühlen.



**Bild 1.2–1** Wärmeinhalt eines reinen Stoffes in Abhängigkeit von der Temperatur

*Schmelztemperatur:*  
Übergang (= Phasenumwandlung)  
fest–flüssig  
*Erstarrungstemperatur:*  
Übergang flüssig–fest (Kristallisation)



**Bild 1.2–2** Temperatur-Zeit-Kurven eines reinen Metalls

a) Erwärmung

b) Abkühlung

$T_s$  (Haltepunkt) Schmelz- und Erstarrungstemperatur,  $t_H$  Haltezeit

*Gleichgewicht* liegt vor, wenn unter gegebenen äußeren Bedingungen keine Veränderung (Stoff- oder Energieumsatz) erfolgt (s. a. Abschnitt 2.2.1).

Sehr langsames Erwärmen bzw. Abkühlen kommt dem theoretischen Gleichgewichtszustand nahe.

## 1.2.2 Thermische Analyse

Alle möglichen Phasenumwandlungen, sowohl bei Erwärmung als auch bei Abkühlung, werden in der Werkstofftechnik vorwiegend anhand von Temperatur-Zeit-Kurven diskutiert und gegenübergestellt. Es lohnt sich, einen bewährten, simplen Versuch zu besprechen: die *thermische Analyse*.

Die Temperatur wird mithilfe eines *Thermoelements* gemessen. Bild 1.2–3 erläutert die Versuchsanordnung. Das Prinzip dieser Art der Temperaturmessung beruht auf der Tatsache, dass in einem aus zwei Metallen bestehenden geschlossenen Kreis eine Thermospannung induziert wird, wenn die beiden Kontaktstellen (Lötstellen) auf verschiedene Temperaturen gebracht werden (auch *Seebeck-Effekt* genannt). Die *Thermospannung* ist temperaturabhängig. Das Verhalten der Metalle zueinander lässt sich in einer *thermoelektrischen Spannungsreihe* der Metalle beschreiben. Für praktische Messungen benutzt man genormte Metallpaarungen (Thermoelementpaarungen = dünne Drähte). Die Temperaturmessung mit dem Thermoelement ist technisch weit verbreitet. Die Anwendung ist im Bereich von  $-250\text{ °C}$  bis  $+1\,300\text{ °C}$  möglich. Anlagen der metallurgischen Industrie, der Wärmebehandlungstechnik, Verzinkereien usw. arbeiten häufig mit diesem Messprinzip.

Beim vorliegenden Versuch befindet sich das zu untersuchende Metall in einem Schmelztiegel. Das Thermoelement wird in die Schmelze eingetaucht.

*Thermische Analyse:*

Exakte Messungen zur Ermittlung des Temperatur-Zeit-Verlaufes metallischer Stoffe. Wenn es zu Phasen- und Zustandsänderungen kommt, ändert sich bei Abkühlung und Erwärmung der Temperatur-Zeit-Verlauf. Die Geschwindigkeit, mit der die Temperatur geändert wird, ist gering (= gleichgewichtsnah!).

Zweck der thermischen Analyse:

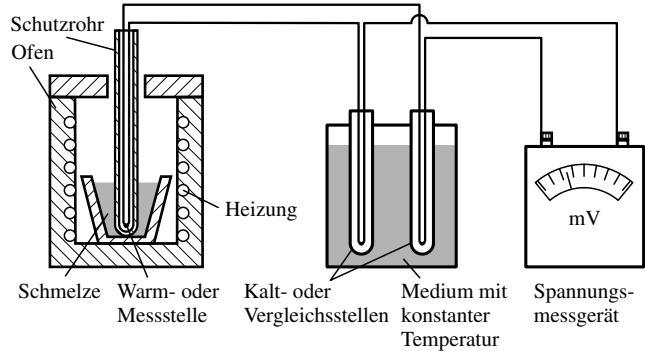
- Ermittlung von Umwandlungstemperaturen (Phasenumwandlungen)
- Aufstellung von Zustandsdiagrammen (s. Abschnitt 2.2.2)

Thermoelektrische Spannungsreihe (Auswahl)  
 $e$  in  $10^{-5}$  V/K (Spannungsänderung je Kelvin, bezogen auf Platin Pt)

Co	Ni	Na	Pt	Al	Fb	Cu	Fe	Sb
-1,6	-1,5	-0,2	0,0	+0,4	+0,45	+0,75	+1,8	+4,7

Genormte *Thermoelementpaarungen* (Beispiele)

Paarung	Einsetzbar bis
Cu/CuNi 45	400 °C
NiCr 10/NiAl 12	900 °C
Pt/PtRh 10	1 300 °C



**Bild 1.2-3** Temperaturmessung mit einem Thermoelement (Versuchsaufbau der thermischen Analyse)

Der Laborofen ermöglicht eine sehr langsame Abkühlung (bzw. Erwärmung). Die Vergleichsstelle wird während des Versuches auf konstanter Temperatur gehalten (z. B. Eis-Wasser-Gemisch bei 0 °C). Am Messgerät wird die Thermospannung abgelesen. Die Zeit wird mit einer Stoppuhr gemessen.

### 1.2.3 Übergang flüssig-kristallin

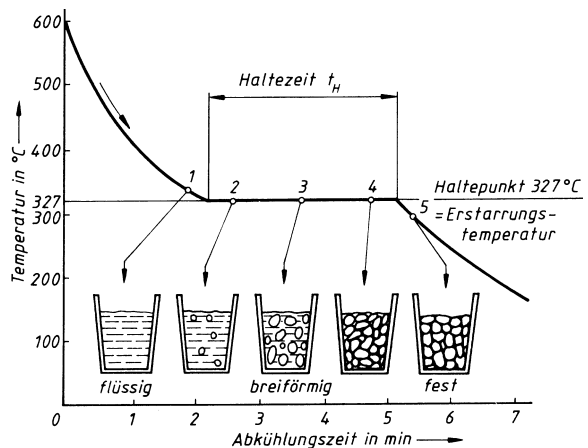
Beim langsamen Abkühlen einer Metallschmelze erhält man zunächst einen kontinuierlichen Temperatur-Zeit-Verlauf (Bild 1.2-4). Im Schmelztiegel liegt unverändert Schmelze vor (1). Kühlt man weiter ab, so bleibt die Temperaturanzeige eine gewisse Zeit (Haltezeit  $t_H$ ) auf einem Wert stehen. Diese charakteristische Temperatur (z. B. bei Pb 327 °C) ist die *Erstarrungstemperatur* (= Schmelztemperatur) des Metalls. Man nennt diese Temperatur *Haltepunkt*.

Erstarrungs-/Schmelztemperaturen einiger Metalle in °C

Hg	Quecksilber	-38,9
Sn	Zinn	232
Pb	Blei	327
Zn	Zink	419
Al	Aluminium	660
Cu	Kupfer	1 083
Fe	Eisen	1 536
W	Wolfram	3 387

Die Punkte 1 bis 5 und die eingezeichneten Pfeile in Richtung der skizzierten Schmelztiegel bedeuten:

- 1 flüssig, d. h. 100 % Schmelze
- 2 Erstarrung hat bereits begonnen; eine kleine Menge fester (kristalliner) Substanz befindet sich in der Schmelze
- 3 ca. 50 % flüssig, ca. 50 % fest
- 4 geringe Restmenge Schmelze
- 5 nach Abschluss der Erstarrung: Es liegt kristallines Gefüge vor



**Bild 1.2-4** Abkühlkurve von reinem Blei (Pb) unter Gleichgewichtsbedingungen (bei sehr langsamer Abkühlung)

Die Temperatur bleibt konstant, weil durch die Erstarrung die Kristallisationswärme (latente Wärme) wieder freigesetzt wird.

Bei reinen Metallen und bei kristallinen nichtmetallischen Stoffen erhält man, stets wiederholbar, bei genügend langsamer Abkühlung diesen Haltepunkt, die *Erstarrungstemperatur*  $T_S$ .

So erhalten Sie einen Haltepunkt bei  $0^\circ\text{C}$ , wenn Sie diesen Versuch mit Wasser im Eisbereiter Ihres Kühlschranks durchführen.

*Haltepunkte* entstehen durch einen bei Phasenumwandlung zusätzlich freigesetzten Energiebetrag (z. B. Kristallisationswärme). Haltepunkte sind leicht messbare Temperaturen bei Phasenumwandlungen beliebiger reiner Stoffe,

z. B.  $0^\circ\text{C}$  Kristallisation von Wasser

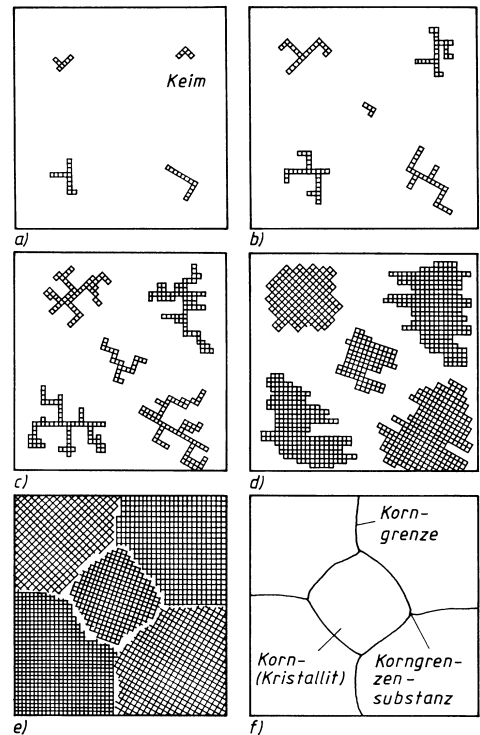
$419^\circ\text{C}$  Schmelzen von reinem Zink

Voraussetzung: Thermodynamisches Gleichgewicht.

*Erstarrungsvorgang (Kristallisation):*

Bild 1.2–5

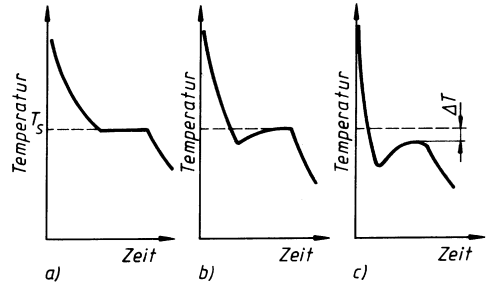
Wird bei der Abkühlung der Schmelze der Haltepunkt erreicht, so entstehen kleine Bereiche, in denen sich die Atome zum Gitter ordnen. Diese ersten Anfänge des kristallinen Zustandes nennt man *Keime*. Dieser der Biologie recht treffend entlehnte Begriff wird für jede Art der Phasenumwandlung verwendet. Von den Keimen ausgehend, wachsen die Kristalle nach allen Richtungen, d. h., die Atome der Schmelze lagern sich an. Stoßen die Kristalle aneinander und ist die Schmelze „aufgezehrt“, so ist die Erstarrung beendet. Im Normalfall liegt nun ein polykristallines, quasiisotropes Gefüge vor. Es wird aus den *Kristalliten* (Körner), den *Korngrenzen* und der *Korngrenzsubstanz* (Verunreinigungen, Einlagerungen) gebildet. Man unterscheidet *homogene Keimbildung* (Eigenkeimbildung) und *heterogene Keimbildung* (s. Übersicht folgende Seite). Die Anzahl der Keime ist, ebenso wie die Geschwindigkeit, mit der der Kristallisationsprozess abläuft (Kristallisationsgeschwindigkeit), technisch sehr wichtig. Diese Parameter bestimmen die Korngröße des Gefüges und damit in erheblichem Maße die mechanischen Eigenschaften des Stoffes.



**Bild 1.2–5** Schematische Darstellung der Erstarrung einer Metallschmelze

Wird die Schmelze *unterkühlt*, d.h. zu schnell abgekühlt, wird der richtige Haltepunkt erst nach Unterschreiten von  $T_s$  (Bild 1.2–6b) oder überhaupt nicht erreicht (Bild 1.2–6c).

Allgemein gilt: Rasche Abkühlung oder extrem rasche Erwärmung (Erhitzung) verschieben Umwandlungstemperaturen (Haltepunkte) zu niedrigeren bzw. höheren Werten, da die Gleichgewichtsbedingung nicht mehr erfüllt ist.



**Bild 1.2–6** Abkühlkurven eines reinen Metalls

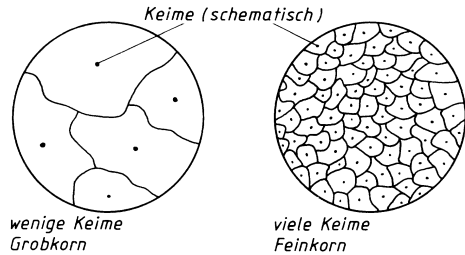
a) Gleichgewicht

b) beschleunigte Abkühlung

c) stark beschleunigte Abkühlung

$T_s$  Erstarrungstemperatur

$\Delta T$  Temperaturdifferenz (thermische Hysterese)



**Bild 1.2–7** Einfluss der Keimzahl auf die Korngröße

Bild 1.2–9 zeigt, dass mit zunehmender Unterkühlung (= Temperaturdifferenz zwischen  $T_s$  und der vorhandenen Temperatur)

- die Anzahl  $n$  der Keime stetig zunimmt,
- die Beweglichkeit der Atome stetig abnimmt (diese Größe lernen Sie noch als *Diffusionskoeffizient  $D$*  kennen),
- durch die Tendenzen von  $n$  und  $D$  die *Kristallisationsgeschwindigkeit* steigt.

Praktisch wird ein feinkörniges Gefüge angestrebt, da im Vergleich zu einem grobkörnigen Werkstoff eine höhere Festigkeit und eine verbesserte Zähigkeit vorliegen. Dazu muss die Keimzahl möglichst hoch sein. Das erreicht man durch eine rasche Abkühlung (z.B. Gießen in Metallformen; rasche Wärmeableitung – Druckguss, Schleuderguss) und/oder durch *Impfen* der Schmelze (Beeinflussung der Keimbildung durch Zugabe geeigneter Substanzen).

*Keime* sind zufällig entstandene, kristallähnliche Atom- bzw. Ionenanhäufungen, von denen die Kristallisation ausgeht.

Man unterscheidet:

- *homogene Keimbildung* (Eigenkeimbildung)  
gilt für den absolut reinen Stoff
- *heterogene Keimbildung*  
Fremdstoffen (Verunreinigungen, Begleitelemente, Legierungselemente) steuern ihre Oberflächenenergie zur Keimbildung bei; erleichtern sie damit!

Langsames Abkühlen (z. B. Gießen in Sandformen; längeres Warmhalten aus gießtechnischen Gründen) begünstigt die Bildung von Grobkorn. An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass eine zu hohe Erwärmung der Schmelze (Schmelzüberhitzung) vor dem Abguss zu grobem Korn bei der Erstarrung führt. Ebenso ist ein längeres Halten dicht unterhalb der Erstarrungstemperatur unbedingt zu vermeiden.

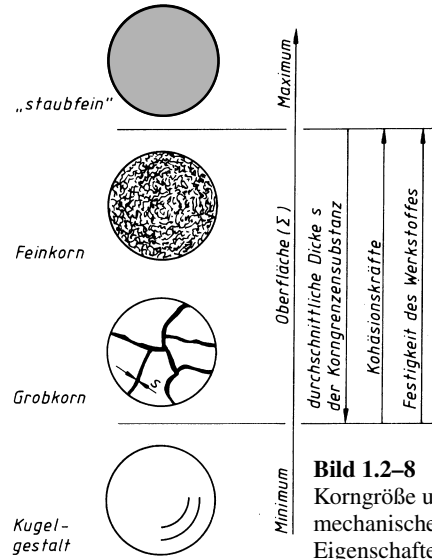
Im Streben nach dem energieärmsten Zustand sind die Kristallite bei noch ausreichender Atombeweglichkeit stets bestrebt, Korngrenzen abzubauen, also zu großen Körnern zusammenzuwachsen.

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Korngröße und den mechanischen Eigenschaften der metallischen Werkstoffe. Je feiner das Korn (kleiner Korndurchmesser bzw. kleine Kornfläche), desto geringer ist die freie Weglänge, die eine Versetzung bei der plastischen Verformung zurücklegen kann. Ein feinkörniges Gefüge erschwert damit die Versetzungsbewegung und führt zu einer höheren Festigkeit. Die vorhandenen Verunreinigungen verteilen sich bei feinkörnigen Werkstoffen auf eine größere Korngrenzfläche, die Dicke  $s$  der Korngrenzsubstanz nimmt ab. Da das Werkstoffversagen (Rissbildung, Risswachstum und Bruch) i. d. R. von den größten Defekten ausgeht, die Defektgröße an den Korngrenzen bei feinkörnigen Werkstoffen aber kleiner wird, nimmt die Zähigkeit zu.

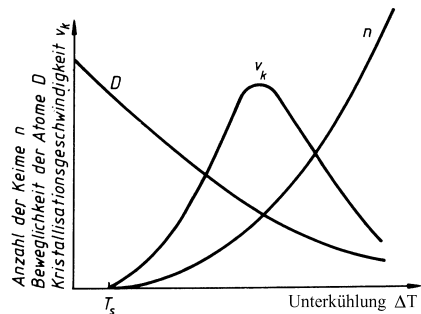
Der Vergleich der Korngrößen im nebenstehenden Bild gilt für eine konstante chemische Zusammensetzung.

Prüfen Sie die Logik dieses Vergleichs!

Mit zunehmender Unterkühlung sinkt die Beweglichkeit der Atome (ausgedrückt durch den Diffusionskoeffizienten  $D$ ; s. a. Abschnitt 1.4.2) und die Zahl der sich bildenden Keime  $n$  (Bild 1.2–9) steigt. Daraus ergibt sich, dass bei einer mittleren Unterkühlung ein Maximum der Kristallisationsgeschwindigkeit liegt. Einflüsse gießtechnischer Art werden hier nicht betrachtet.



**Bild 1.2–8**  
Korngröße und mechanische Eigenschaften



**Bild 1.2–9** Einfluss der Unterkühlung

$n$  Zahl der Keime (Keimzahl)

$D$  Diffusionskoeffizient ( $\hat{=}$  Beweglichkeit der Atome)

$v_k$  Kristallisationsgeschwindigkeit

*Feinkörniges Gefüge* erhält man durch

- rasche Abkühlung der Schmelze,
- Impfen der Schmelze, d. h. Zugabe von keimbildungsfördernden Substanzen.

*Grobkörniges Gefüge* bildet sich

- bei Schmelzüberhitzung (vor der Erstarrung),
- bei langsamer Abkühlung der Schmelze,
- beim Glühen bzw. Halten dicht unterhalb der Erstarrungstemperatur.

Nicht nur beim Gießen entsteht ein Gefüge mit einer bestimmten Korngröße. Auch beim Erwärmen nach einer Kaltumformung (Rekristallisationsglühen, s. Abschnitt 4.2.1) und bei anderen Wärmebehandlungsverfahren (z. B. Normalglühen von Eisenlegierungen, s. Abschnitt 4.2.1) entstehen neue Gefüge. Dabei führen besonders hohe Temperaturen („Überhitzen“) und zu lange Glühzeiten („Überzeiten“) zu unerwünschtem Grobkorn.

Für metallische Werkstoffe gleicher chemischer Zusammensetzung gilt:

*Feinkorn* – hohe Festigkeit und Zähigkeit  
*Grobkorn* – verringerte Festigkeit, erhöhte Sprödigkeit

Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe, z. B. Glühen, bei hohen Temperaturen oder bzw. und bei zu langer Dauer führt zur Kornvergrößerung.

Merke: „Überhitzen“ und „Überzeiten“ führen zu grobkörnigem Gefüge! Nachteilig!

Bestimmte Erstarrungsbedingungen führen dazu, dass der Kristall rasch, stängelförmig in die Schmelze hineinwächst (Bild 1.2–10). Verzweigen sich diese Kristalle tannenbaumähnlich, wird von *Dendriten* gesprochen.

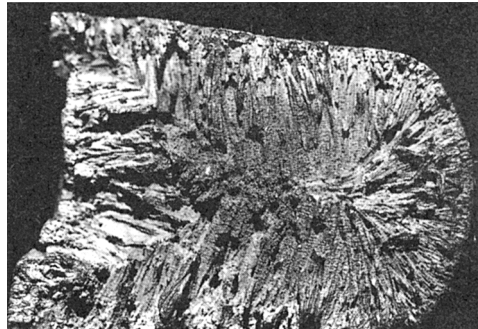


Bild 1.2–10 Dendritenstruktur (1 : 1)

### Übung 1.2–1

Was ist eine Phase und welche Arten kennen Sie?

### Übung 1.2–2

Wie entstehen die Haltepunkte bei der Abkühlung oder Erwärmung reiner Stoffe (z. B. Metalle)?

### Übung 1.2–3

Wie funktioniert ein Thermoelement?

### Übung 1.2–4

Erklären Sie den Erstarrungsprozess einer Schmelze unter Gleichgewichtsbedingungen!

### Übung 1.2–5

Weshalb strebt man meist ein feinkörniges Gefüge an? Wie wird es erzielt?