



Bibliothek des technischen Wissens

# Werkstofftechnik Maschinenbau

Theoretische Grundlagen  
und praktische Anwendungen

## **6. aktualisierte Auflage**

CD mit Bildern, Aufgaben, Lösungen und Musterklausuren

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsseldorf Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

**Europa-Nr.: 52611**

## Autoren:

Läpple, Volker	Prof. Dr.-Ing.	Schorndorf
Kammer, Catrin	Dr.-Ing.	Goslar
Steuernagel, Leif	Dr. sc. nat.	Clausthal-Zellerfeld

## Lektorat:

Läpple, Volker	Prof. Dr.-Ing.	Schorndorf
----------------	----------------	------------

Verlagslektorat: Dr. Astrid Grote-Wolff

## Autoren der 1. bis 5. Auflage:

Dr.-Ing. Berthold Drube, Prof. Dr. Georg Wittke

## Illustrationen:

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern

Normen wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

6. Auflage 2017

Druck 5 4 3 2

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

ISBN 978-3-8085-5266-7

© 2017 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten

<http://www.europa-lehrmittel.de>

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald, und Michael M. Kappenstein, 60594 Frankfurt, unter Verwendung eines Fotos der Firma TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG, Ditzingen

Layout: G : L WERBEAGENTUR, Axel Ladleif, 41061 Mönchengladbach

Satz: rkt, 51379 Leverkusen

Druck: MedienHaus Plump GmbH, 53619 Rheinbreitbach

# Vorwort

Werkstoffe hatten zu allen Zeiten eine wichtige Bedeutung für den Menschen. Dies zeigt sich unter anderem daran, dass ganze Zeitepochen, wie die Stein-, Bronze- und Eisenzeit, nach den hauptsächlich benutzten Werkstoffen benannt wurden. Ohne die Verfügbarkeit geeigneter Werkstoffe wären technologisch hoch entwickelte Produkte im Maschinen- und Anlagenbau, im Automobilbau, in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie in der Medizintechnik und Biotechnologie nicht denkbar. Erst leistungsfähige Werkstoffe sowie die Fähigkeit zu ihrer wirtschaftlichen Bearbeitung ermöglichen technische Produktinnovationen.

Das vorliegende Lehrbuch „**Werkstofftechnik Maschinenbau**“ gibt einen umfassenden Überblick über die wichtigsten metallischen und nichtmetallischen Werkstoffe, wie

- Stähle und Eisengusswerkstoffe,
- Nichteisenmetalle und deren Legierungen,
- Kunststoffe,
- keramische Werkstoffe sowie
- Verbundwerkstoffe.

Das Lehrbuch ist nach drei thematischen Schwerpunkten gegliedert:

- 1. Aufbau und Eigenschaften von Werkstoffen:** Ein beanspruchungsgerechter und wirtschaftlicher Werkstoffeinsatz erfordert das Wissen um die Zusammenhänge von Struktur, Gefüge, Eigenschaften und die daraus resultierenden Anwendungsgrenzen von Werkstoffen sowie die Kenntnis des Werkstoffverhaltens unter den gewählten Betriebsbedingungen. Der Werkstoffaufbau sowie die daraus resultierenden typischen Werkstoffeigenschaften werden daher ebenso im Buch erläutert, wie die vielfältigen Möglichkeiten ihrer gezielten Veränderung.
- 2. Wechselwirkungen zwischen Werkstoffeigenschaften und Fertigungsverfahren:** Technische Produkte müssen nicht nur ihre Funktion sicher erfüllen, in zunehmendem Maße kommt auch der Wirtschaftlichkeit der Fertigung eine wesentliche Bedeutung zu. Daher müssen die Fertigungsverfahren optimal auf die eingesetzten Werkstoffe abgestimmt werden. Im Lehrbuch werden daher die wichtigsten Fertigungsverfahren sowie ihre Anwendbarkeit auf bestimmte Werkstoffgruppen behandelt. Darüber hinaus wird aufgezeigt, welche Auswirkungen die Verarbeitung, wie z.B. das Schweißen, auf die Werkstoffeigenschaften haben kann.
- 3. Werkstoffprüfung:** Im Rahmen der Qualitätssicherung und Qualitätsverbesserung, zur regelmäßigen Überwachung von Bauteilen und Anlagen, zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten sowie zur Klärung von Schadensfällen stehen heute vielfältige Werkstoffprüfverfahren zur Verfügung. Die wesentlichen in der Praxis angewandten Prüfverfahren für metallische und nichtmetallische Werkstoffe stellen den dritten Schwerpunkt des Buches dar. Das Kapitel Werkstoffprüfung soll es insbesondere dem Praktiker ermöglichen, Versuche optimal zu planen und Prüfergebnisse differenziert zu bewerten.

Das Lehrbuch wurde auf das Studium abgestimmt. Aufgrund der anschaulichen Vermittlung auch komplexer Zusammenhänge des breiten Themenspektrums und seiner Praxisnähe dient es aber auch dem Industriemeister und Techniker sowie dem Ingenieur in der Praxis als wertvolles Nachschlagewerk. Das Buch kann darüber hinaus in der technischen Aus- und Weiterbildung eingesetzt werden.

Das **Verzeichnis englischer Fachbegriffe** trägt zur Erweiterung des englischen Fachwortschatzes bei. Die ausführliche **Aufgabensammlung** sowie zwei **Musterklausuren** mit ausführlichen **Lösungen** auf der CD unterstützen den Lernerfolg. Darüber hinaus enthält die CD das gesamte **Bildmaterial** des Buches.

Die **6. Auflage** befindet sich auf dem **neuesten Stand der europäischen und internationalen Normung**. Insbesondere die Grundlagenkapitel, die Kapitel zu den Nichteisenmetallen sowie das Kapitel zur Kunststofftechnik wurden gründlich überarbeitet und aktualisiert.

Kritische Hinweise und Vorschläge, die zur Weiterentwicklung des Buches beitragen, nehmen wir unter der Verlagsadresse oder per E-Mail ([lektorat@europa-lehrmittel.de](mailto:lektorat@europa-lehrmittel.de)) dankbar entgegen.

# Inhaltsverzeichnis

## 1 Werkstofftechnologie in Industrie und Wirtschaft

1.1	<b>Werkstoffe und Werkstofftechnik</b>	11
1.2	<b>Bedeutung der Werkstofftechnik</b>	11
1.3	<b>Wirtschaftliche Aspekte der Werkstofftechnik</b>	12
1.4	<b>Werkstoffbegriff und Werkstoffeinteilung</b>	12
1.4.1	Stoffe und Werkstoffe	12
1.4.2	Einteilung der Werkstoffe	13
1.4.3	Entwicklung der Werkstofftechnik	15
1.4.4	Werkstoffprüfung	15
1.5	<b>Eigenschaften der Werkstoffe</b>	16
1.6	<b>Werkstoffauswahl</b>	17

## 2 Grundlagen der Metallkunde

2.1	<b>Aufbau der Metalle</b>	18
2.2	<b>Atombau und Periodensystem der Elemente</b>	19
2.2.1	Bau der Atome	19
2.2.2	Periodensystem der Elemente (PSE)	20
2.3	<b>Chemische Bindungen</b>	22
2.3.1	Primäre chemische Bindungen	22
2.3.1.1	Ionenbindung	23
2.3.1.2	Atombindung	23
2.3.1.3	Metallbindung	24
2.3.2	Sekundäre chemische Bindungen	25
2.3.2.1	Dispersionsbindungen	25
2.3.2.2	Dipol-Dipol-Bindungen	26
2.3.2.3	Dipol-Ion-Bindungen	26
2.3.2.4	Induktionsbindungen	26
2.3.2.5	Wasserstoffbrückenbindungen	26
2.4	<b>Gitteraufbau der Metalle</b>	27
2.4.1	Kristallgittermodelle	27
2.4.2	Entwicklung von einfachen (primitiven) Kristallgittern	28
2.4.3	Kristallgitter von Metallen	29
2.4.3.1	Kubisch-flächenzentriertes Gitter (kfz)	29
2.4.3.2	Hexagonales Gitter dichtester Kugelpackung (hdP)	30
2.4.3.3	Kubisch-raumzentriertes Gitter (krz)	30
2.4.3.4	Packungsdichte der Kristallgitter	30
2.4.3.5	Vergleich von kubisch-flächenzentriertem Gitter und hexagonal dichtester Kugelpackung	32
2.5	<b>Realkristalle und Gitterbaufehler</b>	33
2.5.1	Realkristalle	33
2.5.2	Gitterbaufehler	33
2.5.2.1	Nulldimensionale Gitterbaufehler	33
2.5.2.2	Eindimensionale Gitterbaufehler	34
2.5.2.3	Zweidimensionale Gitterbaufehler	38

2.6	<b>Gefüge</b>	40
2.7	<b>Anisotropie und Textur</b>	42
2.8	<b>Elastische und plastische Verformung</b>	42
2.8.1	Elastische Verformung	43
2.8.2	Plastische Verformung	44
2.8.2.1	Mechanismus der plastischen Verformung	44
2.8.2.2	Gleitebenen und Gleitsysteme	45
2.8.2.3	Schmidtsches Schubspannungsgesetz	46
2.8.2.4	Plastische Verformung von Vielkristallen	47
2.9	<b>Verfestigungsmechanismen</b>	48
2.9.1	Korngrenzenverfestigung	48
2.9.2	Mischkristallverfestigung	49
2.9.3	Teilchenverfestigung	50
2.9.4	Verformungsverfestigung (Kaltverfestigung)	52
2.9.5	Überlagerung der Verfestigungsmechanismen	53
2.10	<b>Thermische aktivierte Prozesse</b>	54
2.10.1	Diffusion	54
2.10.2	Erholung und Rekristallisation	57
2.10.2.1	Verformungsstrukturen	57
2.10.2.2	Erholung	58
2.10.2.3	Rekristallisation	60
2.10.2.4	Kornvergrößerung und sekundäre Rekristallisation	63
2.10.2.5	Kalt- und Warmverformung	64
2.10.2.6	Teilentfestigte Zustände	64
2.10.3	Kriechen	65
2.10.3.1	Kriechen und Werkstoffschädigung	66
2.10.3.2	Primäres Kriechen (Übergangskriechen)	66
2.10.3.3	Sekundäres Kriechen (stationäres Kriechen)	66
2.10.3.4	Tertiäres Kriechen (beschleunigtes Kriechen)	67
2.10.3.5	Warmfeste und hochwarmfeste Stähle und Legierungen	67
2.10.4	Sintern	67
2.10.4.1	Festphasensintern einphasiger Pulver	68
2.10.4.2	Festphasensintern zwei- bzw. mehrphasiger Pulver	69
2.10.4.3	Flüssigphasensintern	70
2.10.4.4	Reaktionssintern	70
3	<b>Grundlagen der Legierungskunde</b>	
3.1	<b>Aggregatzustände und Phasen</b>	71
3.2	<b>Phasenumwandlungen</b>	71
3.3	<b>Mischkristalle und Kristallgemische</b>	72
3.3.1	Mischkristalle	72
3.3.2	Kristallgemische	73
3.4	<b>Intermetallische Phasen und Überstrukturen</b>	74

3.4.1	Intermetallische Phasen . . . . .	74	4.4.2.5	Flussmittel, Lötatmosphären und Vakuum . . . . .	115
3.4.2	Überstrukturen . . . . .	74	4.4.2.6	Lötwerkstoffe . . . . .	116
<b>3.5</b>	<b>Zustandsdiagramme . . . . .</b>	<b>75</b>	<b>4.5</b>	<b>Beschichten . . . . .</b>	<b>118</b>
3.5.1	Binäre Zustandsdiagramme . . . . .	76	4.5.1	Beschichten aus dem flüssigen Zustand . . . . .	119
3.5.1.1	Erstellung binärer Zustandsdiagramme . . . . .	76	4.5.1.1	Schmelztauchen . . . . .	119
3.5.1.2	Lesen binärer Zustandsdiagramme . . . . .	77	4.5.1.2	Emaillieren . . . . .	119
3.5.1.3	Kristallseigerung und Zonenmischkristalle . . . . .	78	4.5.1.3	Anstreichen und Lackieren . . . . .	120
3.5.2	Grundtypen binärer Zustandsdiagramme . . . . .	79	4.5.2	Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand . . . . .	120
3.5.2.1	Vollkommene Unlöslichkeit im festen und flüssigen Zustand . . . . .	79	4.5.2.1	Wirbelsintern . . . . .	120
3.5.2.2	Vollkommene Löslichkeit im festen und flüssigen Zustand (Linsendiagramm) . . . . .	79	4.5.2.2	Thermisches Spritzen . . . . .	120
3.5.2.3	Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand (eutektisches Legierungssystem) . . . . .	80	4.5.3	Beschichten durch Schweißen . . . . .	122
3.5.2.4	Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und begrenzte Löslichkeit im festen Zustand (eutektisches Legierungssystem mit Mischungslücke) . . . . .	81	4.5.4	Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand . . . . .	123
3.5.2.5	Peritektisches Zustandsdiagramm . . . . .	81	4.5.4.1	CVD-Verfahren . . . . .	123
3.5.3	Zustandsdiagramme mit Verbindungsbildung . . . . .	83	4.5.4.2	PVD-Verfahren . . . . .	124
3.5.4	Reale Zustandsdiagramme . . . . .	83	4.5.5	Beschichten aus dem ionisierten Zustand . . . . .	125
3.5.5	Ternäre Zustandsdiagramme . . . . .	84	4.5.5.1	Galvanisches Beschichten . . . . .	125
			4.5.5.2	Chemisches Beschichten . . . . .	126
			4.5.6	Weitere Verfahren zur Erzeugung einer Oberflächenschicht . . . . .	126
<b>4</b>	<b>Wechselwirkungen zwischen Werkstoffeigenschaften und Fertigungsverfahren</b>		4.5.6.1	Plattieren . . . . .	126
<b>4.1</b>	<b>Urformen . . . . .</b>	<b>87</b>	4.5.6.2	Anodische Oxidation (Eloxieren) . . . . .	127
4.1.1	Kristallisation und Gefüge . . . . .	87	4.5.6.3	Phosphatieren . . . . .	128
4.1.2	Gussfehler . . . . .	89	4.5.6.4	Chromatieren . . . . .	129
4.1.3	Gießbarkeit metallischer Werkstoffe . . . . .	91	4.5.6.5	Brünieren . . . . .	130
4.1.3.1	Fließ- und Formfüllungsvermögen . . . . .	91	<b>4.6</b>	<b>Stoffeigenschaften ändern . . . . .</b>	<b>130</b>
4.1.3.2	Schwindung . . . . .	92	4.6.1	Verfestigen durch Umformen . . . . .	130
4.1.3.3	Schmelzverhalten von Gusswerkstoffen . . . . .	92	4.6.1.1	Verfestigen durch Walzen . . . . .	130
4.1.4	Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften beim Gießen . . . . .	92	4.6.1.2	Verfestigen durch Ziehen . . . . .	131
4.1.5	Herstellung (Züchten) von Einkristallen . . . . .	94	4.6.1.3	Verfestigen durch Schmieden . . . . .	132
<b>4.2</b>	<b>Umformen . . . . .</b>	<b>95</b>	4.6.2	Wärmebehandeln . . . . .	132
4.2.1	Kaltumformung . . . . .	96	4.6.2.1	Glühen . . . . .	132
4.2.2	Warmumformung . . . . .	97	4.6.2.2	Härten . . . . .	132
4.2.3	Neue Umformverfahren . . . . .	98	4.6.2.3	Isothermisches Umwandeln . . . . .	133
<b>4.3</b>	<b>Trennen . . . . .</b>	<b>100</b>	4.6.2.4	Anlassen und Auslagern . . . . .	133
4.3.1	Zerteilen und Zerspanen . . . . .	100	4.6.2.5	Vergüten . . . . .	133
4.3.2	Zerspanbarkeit . . . . .	101	4.6.2.6	Tiefkühlen . . . . .	133
4.3.3	Spanformen . . . . .	101	4.6.2.7	Thermochemisches Behandeln . . . . .	133
4.3.4	Automatenlegierungen . . . . .	101	4.6.2.8	Aushärten . . . . .	134
<b>4.4</b>	<b>Fügen . . . . .</b>	<b>102</b>	4.6.3	Thermomechanisches Behandeln . . . . .	134
4.4.1	Schweißen . . . . .	102	4.6.4	Sintern und Brennen . . . . .	134
4.4.1.1	Schweißbarkeit . . . . .	102	4.6.5	Magnetisieren . . . . .	135
4.4.1.2	Einteilung der Schweißverfahren . . . . .	103	4.6.6	Bestrahlen . . . . .	135
4.4.1.3	Beeinflussung der Werkstoffeigen- schaften durch das Schweißen . . . . .	104	4.6.7	Fotochemische Verfahren . . . . .	135
<b>4.4.2</b>	<b>Löten . . . . .</b>	<b>113</b>	<b>5</b>	<b>Gewinnung, Formgebung und Recycling metallischer Werkstoffe und Legierungen</b>	
4.4.2.1	Vor- und Nachteile des Lötens . . . . .	113	<b>5.1</b>	<b>Überblick zur Gewinnung metallischer Werkstoffe . . . . .</b>	<b>136</b>
4.4.2.2	Einteilung der Lötverfahren . . . . .	113	5.1.1	Gewinnung metallischer Rohstoffe . . . . .	136
4.4.2.3	Lötmechanismus . . . . .	113	5.1.2	Verfahren der Metallgewinnung . . . . .	137
4.4.2.4	Metallurgische Probleme beim Löten . . . . .	114	5.1.3	Raffinationsverfahren . . . . .	138
			5.1.4	Metallische Werkstoffe und deren Handelsformen . . . . .	138

<b>5.2 Eisen- und Stahlerzeugung</b> . . . . .	139	6.3.1.8 Zusammenfassung der Wirkungsweisen von Begleitelementen in Stählen	193
5.2.1 Hochofenprozess . . . . .	139	6.3.1.9 Nichtmetallische Einschlüsse	193
5.2.1.1 Hochofen . . . . .	141	6.3.2 Legierungselemente . . . . .	196
5.2.1.2 Reduktionsvorgang . . . . .	141	6.3.2.1 Allgemeine Wirkungsweisen von Legierungselementen in Stählen	196
5.2.1.3 Produkte des Hochofenprozesses . . . . .	144	6.3.2.2 Wirkungsweisen ausgewählter Legierungselemente	203
5.2.2 Direktreduktionsverfahren . . . . .	145	6.3.2.3 Wirkungsweise mehrerer Legierungselemente im Stahl	211
5.2.3 Stahlerzeugung . . . . .	146	<b>6.4 Wärmebehandlung der Stähle</b> . . . . .	212
5.2.3.1 Sauerstoffblasverfahren . . . . .	147	6.4.1 Prinzip einer Wärmebehandlung . . . . .	212
5.2.3.2 Elektrolichtbogenofen-Verfahren . . . . .	149	6.4.2 Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren . . . . .	214
5.2.3.3 Stahl-Sekundärmetallurgie . . . . .	150	6.4.3 Glühen . . . . .	214
<b>5.3 Erzeugung von Nichteisenmetallen</b> . . . . .	151	6.4.3.1 Normalglühen von Stählen . . . . .	214
5.3.1 Gewinnung von Aluminium . . . . .	151	6.4.3.2 Weichglühen von Stählen (Glühen auf kugelige Carbide)	216
5.3.2 Gewinnung weiterer Nichteisenmetalle . . . . .	153	6.4.3.3 Spannungsarmglühen . . . . .	218
<b>5.4 Legieren von Metallen</b> . . . . .	153	6.4.3.4 Rekristallisationsglühen . . . . .	219
<b>5.5 Formgebungsverfahren für metallische Werkstoffe</b> . . . . .	155	6.4.3.5 Diffusionsglühen (Homogenisierungsglühen)	220
5.5.1 Gießen . . . . .	155	6.4.3.6 Grobkornglühen (Hochglühen)	222
5.5.1.1 Formgießen . . . . .	155	6.4.4 Härten . . . . .	222
5.5.1.2 Gießen von Knetlegierungen . . . . .	158	6.4.4.1 Geschichte der Stahlhärtung . . . . .	222
5.5.2 Umformen . . . . .	160	6.4.4.2 Ziele der Stahlhärtung . . . . .	224
5.5.2.1 Walzen . . . . .	161	6.4.4.3 Verfahren . . . . .	225
5.5.2.2 Durchdrücken . . . . .	162	6.4.4.4 Härtetemperatur . . . . .	225
5.5.2.3 Freiform- und Gesenkschmieden . . . . .	162	6.4.4.5 Abkühlgeschwindigkeit und Gefügeausbildung	225
5.5.2.4 Ziehen . . . . .	163	6.4.4.6 Kritische Abkühlgeschwindigkeit . . . . .	232
<b>5.6 Recycling von metallischen Werkstoffen</b> . . . . .	164	6.4.4.7 Kohlenstofflöslichkeit des Austenits	233
5.6.1 Recycling von Stahl und Gusseisen . . . . .	165	6.4.4.8 Temperaturbereich der Martensitbildung	233
5.6.2 Recycling von Nichtmetallen . . . . .	165	6.4.4.9 Restaustenit und Tiefkühlung . . . . .	234
<b>6 Eisenwerkstoffe</b>		6.4.4.10 Abschreckhärte . . . . .	234
<b>6.1 Reines Eisen</b> . . . . .	166	6.4.4.11 Härtespannungen . . . . .	235
<b>6.2 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen</b> . . . . .	168	6.4.4.12 Abschrecken und Abschreckmittel . . . . .	237
6.2.1 Phasenausbildungen in Eisen-Kohlenstoff-Legierungen . . . . .	168	6.4.4.13 Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramme (ZTU-Diagramme)	238
6.2.1.1 Mischkristalle (Ferrit, Austenit und $\delta$ -Ferrit)	168	6.4.4.14 Zeit-Temperatur-Austenitisierungsdiagramme (ZTA-Diagramme)	242
6.2.1.2 Verbindungsphasen (Zementit und $\epsilon$ -Carbid)	170	6.4.5 Anlassen und Vergüten . . . . .	245
6.2.1.3 Stabile Phase (Grafit)	171	6.4.5.1 Innere Vorgänge beim Anlassen . . . . .	246
6.2.2 Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm . . . . .	171	6.4.5.2 Anlassen der legierten Stähle . . . . .	247
6.2.2.1 Erstarrungsformen von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen . . . . .	172	6.4.5.3 Versprödungserscheinungen beim Anlassen von Stählen	248
6.2.2.2 Aufbau des metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramms	173	6.4.5.4 Vergüten . . . . .	250
6.2.2.3 Bezeichnungen im metastabilen System . . . . .	174	6.4.6 Verfahren des Oberflächenhärtens . . . . .	255
6.2.2.4 Erstarrungsvorgänge im metastabilen System . . . . .	174	6.4.6.1 Einteilung der Oberflächenhärtungsverfahren	255
6.2.2.5 Stahlecke des metastabilen Systems . . . . .	178	6.4.6.2 Randschichthärtungsverfahren . . . . .	255
<b>6.3 Eisenbegleiter und Legierungselemente</b> . . . . .	181	6.4.6.3 Thermochemisches Behandeln . . . . .	60
6.3.1 Begleitelemente und nichtmetallische Einschlüsse . . . . .	182	<b>6.5 Eigenschaften und Verwendung von Stählen</b> . . . . .	272
6.3.1.1 Mangan (Mn) . . . . .	182	6.5.1 Einteilung der Stähle . . . . .	272
6.3.1.2 Silicium (Si) . . . . .	183	6.5.1.1 Einteilung der Stähle nach Hauptgüteklassen	272
6.3.1.3 Phosphor (P) . . . . .	185	6.5.1.2 Einteilung der Stähle nach dem Verwendungszweck	274
6.3.1.4 Schwefel (S) . . . . .	187		
6.3.1.5 Stickstoff (N) . . . . .	188		
6.3.1.6 Sauerstoff (O) . . . . .	190		
6.3.1.7 Wasserstoff (H) . . . . .	191		

6.5.2	Unlegierte Baustähle	274	6.5.16.5	Legierte Kaltarbeitsstähle	311
6.5.2.1	Anwendung unlegierter Baustähle	275	6.5.16.6	Warmarbeitsstähle	312
6.5.2.2	Normung und Gütegruppen unlegierter Baustähle	275	6.5.16.7	Schnellarbeitsstähle	314
6.5.2.3	Technologische Eigenschaften unlegierter Baustähle	276	<b>6.6</b>	<b>Eisengusswerkstoffe</b>	320
6.5.2.4	Werkstoffkundliche Besonderheiten unlegierter Baustähle	277	6.6.1	Einteilung der Eisengusswerkstoffe	320
6.5.3	Schweißgeeignete Feinkornbaustähle	277	6.6.2	Stahlguss	321
6.5.3.1	Werkstoffkundliche Grundlagen schweißgeeigneter Feinkornbaustähle	278	6.6.2.1	Gießbarkeit von Stahlguss	322
6.5.3.2	Stahlarten und Gütegruppen	279	6.6.2.2	Wärmebehandlung von Stahlguss	322
6.5.4	Federstähle	282	6.6.2.3	Stahlgussorten	322
6.5.4.1	Anforderungen an metallische Federwerkstoffe	283	6.6.3	Gusseisenwerkstoffe	326
6.5.4.2	Federstahlarten	283	6.6.3.1	Erschmelzung von Gusseisenwerkstoffen	326
6.5.5	Vergütungsstähle	284	6.6.3.2	Gusseisendiagramme	326
6.5.6	Einsatzstähle	285	6.6.3.3	Gusseisen mit Lamellengraphit	327
6.5.7	Nitrierstähle	285	6.6.3.4	Gusseisen mit Kugelgraphit	333
6.5.8	Warmfeste Stähle	285	6.6.3.5	Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit	336
6.5.8.1	Anforderungen an warmfeste Stähle	285	6.6.3.6	Gusseisen mit Vermiculargraphit	338
6.5.8.2	Werkstoffverhalten und Werkstoff- kennwerte bei erhöhter Temperatur	285	6.6.3.7	Temperguss	338
6.5.8.3	Warmfeste Stahlarten	286	6.6.3.8	Perlitischer Hartguss	344
6.5.9	Kaltzähe Stähle	287	6.6.3.9	Sondergusseisen	345
6.5.9.1	Werkstoffverhalten und Kennwerte bei tiefen Temperaturen	287	<b>7</b>	<b>Nichteisenmetalle</b>	
6.5.9.2	Kaltzähe Stahlarten	287	<b>7.1</b>	<b>Aluminiumwerkstoffe</b>	353
6.5.10	Nichtrostende Stähle	288	7.1.1	Reinaluminium	353
6.5.10.1	Einteilung der nichtrostenden Stähle	289	7.1.2	Aluminium-Knetlegierungen	354
6.5.10.2	Ferritische und halferritische Chromstähle	289	7.1.3	Aluminium-Gusslegierungen	357
6.5.10.3	Martensitische Chromstähle	291	7.1.4	Aluminiumschäume	360
6.5.10.4	Austenitische Chrom-Nickel-Stähle	293	7.1.4.1	Aufschäumprozesse	360
6.5.10.5	Schweißtechnische Verarbeitung nichtrostender Stähle	296	7.1.4.2	Eigenschaften von Aluminiumschäumen	361
6.5.11	Hitze- und zunderbeständige Stähle	297	7.1.5	Aushärten von Aluminiumlegierungen	363
6.5.11.1	Ferritische zunderbeständige Stähle	297	7.1.5.1	Verfahren	363
6.5.11.2	Austenitische zunderbeständige Stähle und Nickel-Chrom-Legierungen	298	7.1.5.2	Innere Vorgänge	364
6.5.12	Druckwasserstoffbeständige Stähle	299	7.1.6	Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen	366
6.5.13	Automatenstähle	300	7.1.6.1	Gießen	366
6.5.14	Höherfeste Stähle für den Automobil-Leichtbau	302	7.1.6.2	Umformen	367
6.5.14.1	Mikrolegierte höherfeste Stähle	303	7.1.6.3	Zerspanen	367
6.5.14.2	Phosphorlegierte Stähle	303	7.1.6.4	Schweißen	368
6.5.14.3	Bake-Hardening-Stähle	303	<b>7.2</b>	<b>Magnesiumwerkstoffe</b>	368
6.5.14.4	IF-Stähle	304	7.2.1	Eigenschaften von Magnesium	368
6.5.14.5	Dualphasen Stähle (DP-Stähle)	304	7.2.2	Magnesiumlegierungen	369
6.5.14.6	Stähle mit Restaustenit	305	7.2.2.1	Magnesium-Gusslegierungen	370
6.5.14.7	Complexphasen-Stähle	305	7.2.2.2	Magnesium-Knetlegierungen	370
6.5.14.8	Martensit-Phasen-Stähle	306	7.2.3	Verarbeitung von Magnesiumlegierungen	372
6.5.14.9	TWIP-Stähle	306	7.2.3.1	Gießen von Magnesiumlegierungen	372
6.5.15	Höchstfeste Stähle	306	7.2.3.2	Umformen von Magnesiumlegierungen	373
6.5.15.1	Höchstfeste Vergütungsstähle	307	7.2.4	Entwicklungstendenzen	373
6.5.15.2	Martensit-aushärtende Stähle (Maraging Steels)	307	<b>7.3</b>	<b>Titan und Titanlegierungen</b>	374
6.5.16	Werkzeugstähle	309	<b>7.4</b>	<b>Silicium</b>	377
6.5.16.1	Anforderungen an Werkzeugstähle	309	<b>7.5</b>	<b>Kupferwerkstoffe</b>	379
6.5.16.2	Erschmelzung von Werkzeugstählen	309	7.5.1	Unlegiertes Kupfer	379
6.5.16.3	Einteilung der Werkzeugstähle	309	7.5.1.1	Sauerstoffhaltiges (zähgepoltes) Kupfer	379
6.5.16.4	Unlegierte Kaltarbeitsstähle	310	7.5.1.2	Desoxidiertes Kupfer	381
			7.5.1.3	Sauerstofffreies Kupfer hoher Leitfähigkeit	381
			7.5.2	Niedriglegierte Kupferwerkstoffe	383
			7.5.3	Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)	385

7.5.4	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber) . . . . .	387	<b>8.2</b>	<b>Normung von Gusseisenwerkstoffen</b> . . . . .	432
7.5.5	Kupfer-Zinn-Legierungen (Bronze) . . . . .	387	8.2.1	Normung durch Kurznamen . . . . .	432
7.5.6	Kupfer-Nickel-Legierungen . . . . .	389	8.2.2	Normung durch Werkstoffnummern . . . . .	433
7.5.7	Kupfer-Aluminium-Legierungen . . . . .	390	<b>8.3</b>	<b>Normung von Nichteisenmetallen (NE-Metalle)</b> . . . . .	433
7.5.8	Kupfer-Mangan-Legierungen . . . . .	391	8.3.1	Normung von Aluminiumwerkstoffen . . . . .	434
7.5.9	Kupfer-Blei-Legierungen (Bleibronze) . . . . .	391	8.3.1.1	Aluminiumknetwerkstoffe . . . . .	435
7.5.10	Kupfer-Silicium-Legierungen . . . . .	391	8.3.1.2	Aluminiumgusswerkstoffe . . . . .	439
<b>7.6</b>	<b>Nickel</b> . . . . .	396	8.3.2	Normung von Magnesiumwerkstoffen . . . . .	440
7.6.1	Eigenschaften von Nickel . . . . .	396	8.3.2.1	Normung von Magnesiumwerkstoffen nach DIN EN 1754 . . . . .	440
7.6.2	Nickel-Legierungen und deren Anwendungen . . . . .	397	8.3.2.2	Normung von Magnesiumwerkstoffen nach ASTM . . . . .	442
<b>7.7</b>	<b>Zinkwerkstoffe</b> . . . . .	401	8.3.3	Normung von Kupferwerkstoffen . . . . .	442
7.7.1	Zink-Knetlegierungen . . . . .	402	8.3.3.1	Unlegiertes Kupfer . . . . .	442
7.7.2	Zink-Gusslegierungen . . . . .	402	8.3.3.2	Kupferlegierungen . . . . .	442
<b>7.8</b>	<b>Zinn</b> . . . . .	402	<b>9</b>	<b>Kunststoffe</b> . . . . .	
7.8.1	Eigenschaften von Zinn . . . . .	402	<b>9.1</b>	<b>Bedeutung der Kunststoffe</b> . . . . .	445
7.8.2	Weichlote . . . . .	403	<b>9.2</b>	<b>Allgemeine Eigenschaften</b> . . . . .	445
7.8.3	Gleitlagerwerkstoffe . . . . .	404	<b>9.3</b>	<b>Geschichtliche Entwicklung</b> . . . . .	446
<b>7.9</b>	<b>Blei</b> . . . . .	404	<b>9.4</b>	<b>Herstellung der Kunststoffe</b> . . . . .	447
7.9.1	Gewinnung und Eigenschaften von Blei . . . . .	404	9.4.1	Ausgangsstoffe zur Kunststoffherstellung . . . . .	447
7.9.2	Bleiwerkstoffe . . . . .	405	9.4.2	Prinzipien der Kunststoffherstellung . . . . .	448
<b>7.10</b>	<b>Technisch weniger bedeutsame Metalle</b> . . . . .	406	9.4.2.1	Polymerisation und Polymerisate . . . . .	448
7.10.1	Alkali- und Erdalkalimetalle . . . . .	406	9.4.2.2	Polykondensation und Polykondensate . . . . .	456
7.10.2	Erdmetalle oder die Bor-/Aluminium-Gruppe . . . . .	408	9.4.2.3	Polyaddition und Polyaddukte . . . . .	461
7.10.3	Kohlenstoff-/Silicium-Gruppe . . . . .	408	9.4.3	Spezialkunststoffe . . . . .	462
7.10.4	Metalle der 5. Hauptgruppe . . . . .	409	9.4.4	Faserverstärkte Kunststoffe . . . . .	463
7.10.5	Metalle der 6. Hauptgruppe . . . . .	410	<b>9.5</b>	<b>Einteilung und struktureller Aufbau der Kunststoffe</b> . . . . .	464
7.10.6	Silber und Gold . . . . .	411	9.5.1	Thermoplaste (Plastomere) . . . . .	465
7.10.7	Metalle der 2. Nebengruppe Scandium, Yttrium und die Seltenerdmetalle . . . . .	412	9.5.1.1	Amorphe Thermoplaste . . . . .	465
7.10.9	Metalle der 4. Nebengruppe . . . . .	413	9.5.1.2	Teilkristalline Thermoplaste . . . . .	465
7.10.10	Metalle der 5. Nebengruppe . . . . .	414	9.5.2	Duroplaste (Duromere) . . . . .	469
7.10.11	Metalle der 6. Nebengruppe . . . . .	414	9.5.3	Elastomere . . . . .	469
7.10.12	Mangan und Cobalt . . . . .	416	9.5.4	Thermoplastische Elastomere . . . . .	469
7.10.13	Platinmetalle . . . . .	417	<b>9.6</b>	<b>Mechanisch-thermisches Verhalten der Kunststoffe</b> . . . . .	470
7.10.14	Thorium und Uran . . . . .	417	9.6.1	Charakterisierung der Zustandsbereiche . . . . .	470
<b>7.11</b>	<b>Verbundwerkstoffe</b> . . . . .	418	9.6.1.1	Energieelastischer Bereich . . . . .	471
7.11.1	Einteilung der Verbundwerkstoffe . . . . .	418	9.6.1.2	Nebenerweichungsbereich (NEB) . . . . .	471
7.11.2	Metal Matrix Composites (MMC) . . . . .	419	9.6.1.3	Haupterweichungsbereich (HEB) . . . . .	471
7.11.2.1	Herstellung von MMC . . . . .	419	9.6.1.4	Entropieelastischer Bereich . . . . .	472
7.11.2.2	Eigenschaften von MMC . . . . .	420	9.6.1.5	Fließbereich . . . . .	472
7.11.3	Werkstoffverbunde . . . . .	421	9.6.2	Amorphe Thermoplaste . . . . .	473
<b>8</b>	<b>Normung und Benennung metallischer Werkstoffe</b> . . . . .		9.6.3	Teilkristalline Thermoplaste . . . . .	473
<b>8.1</b>	<b>Stahlnormung</b> . . . . .	422	9.6.4	Duroplaste . . . . .	474
8.1.1	Stahlnormung durch Kurznamen . . . . .	422	9.6.5	Elastomere . . . . .	474
8.1.1.1	Kennzeichnung der Stähle nach der Verwendung oder den mechanischen oder physikalischen Eigenschaften . . . . .	424	9.6.6	Thermoplastische Elastomere . . . . .	475
8.1.1.2	Kennzeichnung der Stähle nach der chemischen Zusammensetzung . . . . .	424	<b>9.7</b>	<b>Kennwerte, Eigenschaften und Anwendung ausgewählter Kunststoffe</b> . . . . .	475
8.1.2	Stahlnormung durch Werkstoffnummern . . . . .	430	<b>9.8</b>	<b>Normung und Bezeichnung von Kunststoffen</b> . . . . .	486
			9.8.1	Allgemeine Kennzeichnung von Kunststoffen . . . . .	486



9.8.1.1	Kurzzeichen für Homopolymere und chemisch modifizierte polymere Naturstoffe	486	10.7.1	Keramische Werkstoffe aus elementaren Stoffen	520
9.8.1.2	Copolymere und Polymergemische	487	10.7.2	Metallische Hartstoffe	520
9.8.1.3	Kennzeichnung besonderer Eigenschaften	487	10.7.2.1	Carbide	521
9.8.1.4	Kennzeichnung von Zusatzstoffen	488	10.7.2.2	Nitride	521
9.8.2	Kennzeichnung thermoplastischer Formmassen	488	10.7.2.3	Boride	521
9.8.3	Kennzeichnung von Duroplasten	489	10.7.2.4	Silicide	522
9.8.4	Kennzeichnung von Elastomeren	490	10.7.3	Nichtmetallische Hartstoffe	522
<b>9.9</b>	<b>Verarbeitung von Kunststoffen</b>	491	10.7.3.1	Siliciumcarbid (SiC)	522
9.9.1	Zuschlagstoffe	491	10.7.3.2	Siliciumnitrid (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	525
9.9.2	Urformen und Umformen	491	10.7.3.3	Bornitrid (BN)	526
9.9.2.1	Formpressen	492	10.7.3.4	Borcarbid (B <sub>4</sub> C)	527
9.9.2.2	Spritzgießen	492	<b>10.8</b>	<b>Elektro- und Magnetkeramik</b>	527
9.9.2.3	Extrudieren	493	10.8.1	Elektrokeramik	528
9.9.2.4	Kalandrieren	493	10.8.1.1	Trägerkörper	528
9.9.2.5	Umformen	494	10.8.1.2	Dielektrische keramische Werkstoffe	528
9.9.3	Mechanische Bearbeitung	494	10.8.1.3	Kaltleiter	529
9.9.4	Verarbeitung aus Lösungen und Dispersionen	496	10.8.1.4	Heißleiter	529
9.9.4.1	Lacke	497	10.8.1.5	Piezokeramik	529
9.9.4.2	Klebstoffe	497	10.8.1.6	Keramische Supraleiter	530
<b>9.10</b>	<b>Kunststoffe und Umwelt</b>	498	10.8.2	Magnetkeramik	531
			10.8.2.1	Dauermagnetische Ferrite (Hartferrite)	531
			10.8.2.2	Weichmagnetische Ferrite	532
			<b>10.9</b>	<b>Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren für keramische Werkstoffe</b>	534
			10.9.1	Rohstoffgewinnung	535
			10.9.2	Massenaufbereitung	535
			10.9.3	Formgebung	535
			10.9.4	Trocknen und Ausheizen	538
			10.9.5	Grün- und Weißbearbeitung, Vorbrand	538
			10.9.6	Sintern (Brennen)	539
			10.9.7	Endbearbeitung (Hartbearbeitung)	540
			<b>10.10</b>	<b>Künftige Entwicklungen</b>	540
<b>10</b>	<b>Keramische Werkstoffe</b>		<b>11</b>	<b>Korrosion und Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe</b>	
<b>10.1</b>	<b>Einordnung keramischer Werkstoffe</b>	500	<b>11.1</b>	<b>Einleitung und Übersicht</b>	541
<b>10.2</b>	<b>Eigenschaften keramischer Werkstoffe</b>	501	<b>11.2</b>	<b>Elektrochemische Korrosion</b>	541
10.2.1	Allgemeine Eigenschaften	501	11.2.1	Lösungstension	542
10.2.2	Physikalische Eigenschaften	502	11.2.2	Elektrochemische Spannungsreihe	542
10.2.3	Mechanische Eigenschaften	502	11.2.3	Stromdichte-Potential-Kurven	544
10.2.3.1	Festigkeit und Hochtemperaturfestigkeit	502	11.2.4	Wasserstoffkorrosion	545
10.2.3.2	Härte	503	11.2.5	Sauerstoffkorrosion	545
10.2.3.3	Verformbarkeit und Zähigkeit	504	<b>11.3</b>	<b>Rost</b>	546
10.2.4	Thermische Eigenschaften	504	<b>11.4</b>	<b>Erscheinungsformen der Korrosion</b>	547
10.2.4.1	Wärmeausdehnung und Temperaturwechselbeständigkeit	504	<b>11.5</b>	<b>Korrosionsschutz</b>	548
10.2.4.2	Wärmeleitfähigkeit	505	11.5.1	Passiver Korrosionsschutz	548
10.2.5	Elektrische und magnetische Eigenschaften	505	11.5.1.1	Überzüge mit Metalloxiden	549
10.2.5.1	Elektrische Leitfähigkeit	506	11.5.1.2	Überzüge mit edleren Metallen	550
10.2.5.2	Dielektrisches Verhalten	506	11.5.1.3	Überzüge mit unedleren Metallen	551
10.2.6	Chemische Eigenschaften	506	11.5.1.4	Überzüge mit Nichtmetallen	551
<b>10.3</b>	<b>Einteilung keramischer Werkstoffe</b>	507	11.5.2	Aktiver Korrosionsschutz	551
<b>10.4</b>	<b>Innere Struktur und Gefüge keramischer Werkstoffe</b>	508	11.5.3	Konstruktive Maßnahmen	553
<b>10.5</b>	<b>Silicatkeramische Werkstoffe</b>	509	<b>12</b>	<b>Tribologie</b>	
10.5.1	Porzellan	510	<b>12.1</b>	<b>Tribosysteme</b>	555
10.5.2	Steatit	511	12.1.1	Aufbau eines Tribosystems	555
10.5.3	Cordieritkeramik	511	12.1.2	Funktion eines Tribosystems	556
<b>10.6</b>	<b>Oxidkeramische Werkstoffe</b>	512			
10.6.1	Aluminiumoxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	512			
10.6.2	Zirkoniumoxid (ZrO <sub>2</sub> )	514			
10.6.3	Aluminiumtitanat (Al <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub> )	516			
10.6.4	Magnesiumoxid (MgO)	517			
10.6.5	Weitere oxidkeramische Werkstoffe	517			
<b>10.7</b>	<b>Nichtoxidkeramische Werkstoffe</b>	518			

<b>12.2 Hauptgebiete der Tribologie</b> . . . . .	556	13.5.6.1 Einteilung der Härteprüfverfahren	611
12.2.1 Reibung . . . . .	556	13.5.6.2 Statische Härteprüfverfahren	612
12.2.1.1 Reibungsarten . . . . .	557	13.5.6.3 Dynamische Härteprüfverfahren	622
12.2.1.2 Reibungsmechanismen bei Festkörperreibung . . . . .	557	13.5.7 Zähigkeitsprüfverfahren	624
12.2.1.3 Reibungszustände in geschmierten Gleitpaarungen . . . . .	558	13.5.7.1 Zähigkeitsbegriff . . . . .	624
12.2.2 Schmierung und Schmierstoffe . . . . .	559	13.5.7.2 Sicherheitsrelevanz der Zähigkeit . . . . .	625
12.2.2.1 Schmieröle . . . . .	559	13.5.7.3 Spröder und zäher Gewaltbruch . . . . .	625
12.2.2.2 Schmierfette . . . . .	561	13.5.7.4 Einflussfaktoren auf die Zähigkeit . . . . .	626
12.2.2.3 Festschmierstoffe . . . . .	562	13.5.7.5 Verfahren der Zähigkeitsprüfung . . . . .	627
12.2.3 Verschleiß . . . . .	563	13.5.8 Schwingfestigkeitsversuche . . . . .	632
12.2.3.1 Verschleißmechanismen . . . . .	563	13.5.8.1 Entstehung von Schwingrissen . . . . .	634
12.2.3.2 Verschleißarten . . . . .	568	13.5.8.2 Ermüdungbruchflächen . . . . .	635
<b>12.3 Verschleißbeständige (tribotechnische) Werkstoffe</b> . . . . .	568	13.5.8.3 Versuche zum Ermüdungsverhalten . . . . .	635
12.3.1 Verwendung von Stählen bzw. Stahlguss mit hoher Verschleißbeständigkeit . . . . .	568	13.5.8.4 Einstufige Schwingfestigkeitsversuche (Wöhlerversuche) . . . . .	636
12.3.2 Oberflächenschutzschichten . . . . .	569	13.5.8.5 Betriebsfestigkeitsversuche . . . . .	639
12.3.3 Verwendung verschleißbeständiger Werkstoffe . . . . .	571	13.5.8.6 Schwingprüfmaschinen . . . . .	641
<b>13 Werkstoffprüfung</b>		13.5.9 Zeitstandversuch . . . . .	642
<b>13.1 Einführung</b> . . . . .	572	13.5.9.1 Durchführung von Zeitstandversuchen . . . . .	643
<b>13.2 Aufgaben der Werkstoffprüfung</b> . . . . .	572	13.5.9.2 Werkstoffkennwerte . . . . .	644
<b>13.3 Einteilung der Werkstoffprüfverfahren</b> . . . . .	573	13.5.9.3 Spannungsrelaxation . . . . .	45
<b>13.4 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren</b> 574		<b>13.6 Technologische Prüfungen</b> . . . . .	645
13.4.1 Eindringprüfung . . . . .	574	13.6.1 Tiefungsversuch nach Erichsen . . . . .	646
13.4.2 Magnetische und induktive Prüfverfahren . . . . .	576	13.6.2 Näpfchen-Tiefziehprüfung (nach Swift) . . . . .	647
13.4.2.1 Magnetische Streuflussverfahren . . . . .	576	13.6.3 Technologischer Biegeversuch . . . . .	648
13.4.2.2 Wirbelstromprüfung . . . . .	577	13.6.4 Stirnabschreckversuch nach Jominy . . . . .	648
13.4.3 Ultraschallprüfung . . . . .	578	<b>13.7 Mechanische Prüfverfahren für Kunststoffe</b> . . . . .	650
13.4.4 Durchstrahlungsverfahren . . . . .	585	13.7.1 Zugversuch an Kunststoffen . . . . .	652
13.4.4.1 Werkstoffprüfung mit Röntgenstrahlen . . . . .	585	13.7.1.1 Probengeometrie . . . . .	652
13.4.4.2 Werkstoffprüfung mit Gammastrahlen . . . . .	587	13.7.1.2 Versuchsdurchführung . . . . .	652
13.4.4.3 Nachweis von Röntgen- und Gammastrahlen . . . . .	589	13.7.1.3 Kennwerte . . . . .	653
13.4.4.4 Prüfbare Probendicken . . . . .	590	13.7.2 Härteprüfung an Kunststoffen . . . . .	654
13.4.4.5 Vergleich zwischen Röntgen- und Gammastrahlen . . . . .	591	13.7.2.1 Kugeleindruckversuch . . . . .	656
13.4.5 Vergleich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfverfahren . . . . .	591	13.7.2.2 Härteprüfung nach Shore an Kunststoffen . . . . .	656
<b>13.5 Mechanische Werkstoffprüfverfahren</b> . . . . .	593	13.7.2.3 Internationaler Gummihärtegrad (IRHD) . . . . .	658
13.5.1 Zugversuch . . . . .	593	13.7.3 Charpy-Schlagversuch nach ISO . . . . .	658
13.5.1.1 Historisches . . . . .	593	<b>Englische Fachausdrücke</b> . . . . .	660
13.5.1.2 Versuchsdurchführung . . . . .	594	<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	676
13.5.1.3 Probengeometrie . . . . .	594	<b>Bildquellennachweis</b> . . . . .	697
13.5.1.4 Spannungs-Dehnungs-Diagramme . . . . .	595	<b>Anhang</b> . . . . .	699
13.5.1.5 Ermittlung von Werkstoffkennwerten im Zugversuch . . . . .	599		
13.5.1.6 Bruchvorgänge, Bruchformen und Bruchflächen . . . . .	603		
13.5.2 Druckversuch . . . . .	606		
13.5.3 Biegeversuch . . . . .	608		
13.5.4 Torsions- oder Verdrehversuch . . . . .	609		
13.5.5 Scherversuch . . . . .	610		
13.5.6 Härteprüfung . . . . .	611		

# 1 Werkstofftechnologie in Industrie und Wirtschaft

## 1.1 Werkstoffe und Werkstofftechnik

**Werkstoffe** haben zu allen Zeiten eine sehr wichtige Bedeutung für den Menschen gehabt. Dies zeigt sich daran, dass ganze Zeitepochen nach Werkstoffen benannt werden, wie die Stein-, Kupfer-, Bronze- oder die Eisenzeit (Bild 1).

Werkstoffe müssen aus Rohstoffen gewonnen und zu Werkstücken oder Bauteilen verarbeitet werden. Einsatz und Anwendung von Werkstoffen sind vor allem von deren technologischen Eigenschaften sowie vom Preis und der Verfügbarkeit abhängig. Dabei ist es wichtig, dass mehrere Eigenschaften günstig oder optimal sind. Ein typisches Beispiel ist das Aluminium: Dieser Werkstoff hat eine niedrige Dichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit. Daher ist er im Fahr- und Flugzeugbau sowie in der Raumfahrt-technik unverzichtbar.

**Werkstofftechnik** ist derjenige Zweig der technischen Wissenschaften, der sich mit der Gewinnung, den Eigenschaften und der Verwendung der Werkstoffe befasst. Nach dieser Definition ist die Werkstofftechnik eine sehr alte Disziplin. Die moderne Werkstofftechnik bedient sich heute wissenschaftlicher Methoden, um die Eigenschaften der Werkstoffe zu bestimmen und zu deuten, neue Werkstoffe zu entwickeln oder bestehende zu verbessern. Die Werkstofftechnik ist eine wichtige Basistechnik unserer Zeit. Wissenschaftliche Untersuchungen der Werkstoffe haben erheblich zum Verständnis des Werkstoffverhaltens, d. h. der Werkstoffeigenschaften beigetragen. Theoretische Erkenntnisse werden in die Praxis umgesetzt, wodurch die Werkstoffe wesentliche Verbesserungen erfahren.

Auch künftige technische Entwicklungen sind abhängig von der Schaffung neuer und der Verbesserung bestehender Werkstoffe. Die Werkstofftechnik gehört daher zur Hochtechnologie. Werkstofftechnik und -wissenschaft gehören zu den Schlüsseltechnologien für andere technische Bereiche, wie Verkehrs-, Energie- und Kommunikationstechnik. Die Umsetzung technischer Entwicklungen ist oft nur mit geeigneten Werkstoffen möglich. Manchmal müssen vorhandene Werkstoffe den Anforderungen angepasst oder sogar neue entwickelt werden. Man spricht dann von maßgeschneiderten Werkstoffen.

## 1.2 Bedeutung der Werkstofftechnik

Bild 2 zeigt, dass der Verbrauch wichtiger Werkstoffe ständig zunimmt. Verfügbarkeit und Kenntnis geeigneter Werkstoffe hat die Entwicklung der Technik erst ermöglicht, dies gilt genauso für die Erfindung der Dampfmaschine wie für die Luft- und Raumfahrt oder die Computertechnik. Andererseits gehen von technischen Fragestellungen Impulse aus, welche die Werkstoffentwicklung stark beeinflussen.

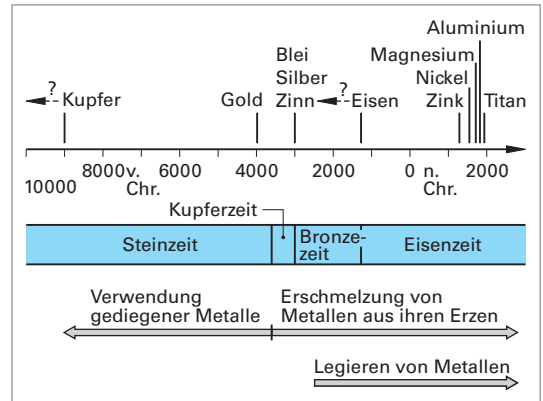


Bild 1: Nutzung wichtiger metallischer Werkstoffe

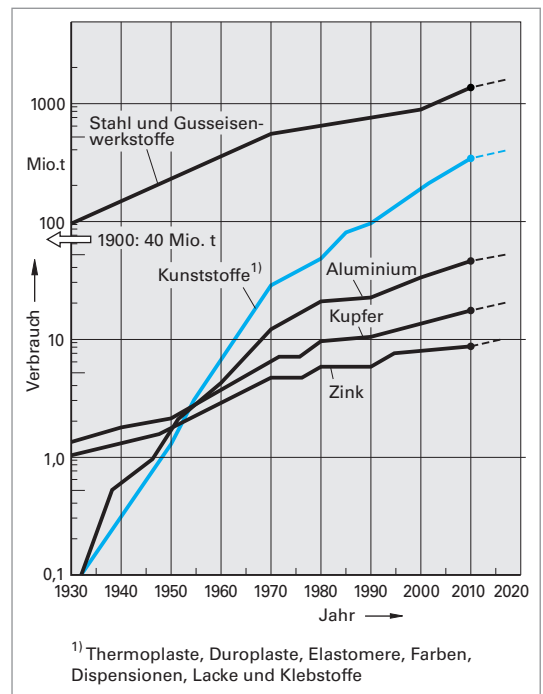


Bild 2: Weltverbrauch wichtiger Werkstoffe

Es gibt Wechselbeziehungen mit der Praxis und mit anderen technischen Disziplinen. Der Konstrukteur muss für sein Bauteil einen aufgrund seiner Eigenschaften geeigneten Werkstoff auswählen und ein geeignetes wirtschaftliches Fertigungsverfahren finden.

Die Entdeckung von technisch bedeutsamen Eigenschaften, wie z.B. die **Hochtemperatursupraleitung (HTSL)** bei einigen keramischen Stoffen, führt nicht unmittelbar zu neuen Werkstoffen. Es ist vielmehr notwendig, weitere Eigenschaften, insbesondere die Verarbeitbarkeit, so zu verbessern, dass **HTSL-Werkstoffe** entstehen. Die technische und wirtschaftliche Bedeutung solcher Werkstoffe wird so hoch eingeschätzt, dass Firmen zur Entwicklung von Hochtemperatursupraleitern gegründet wurden. Die Entwicklung der Werkstoffe ist so schwierig, dass zu Beginn des neuen Jahrtausends nur sehr wenige Anwendungen von Hochtemperatursupraleitern bekannt sind, wie z. B. ein 120 m langes Kabel zur Stromversorgung oder ein Elektromotor (380 kW) mit einer HTSL-Wicklung. Aber auch altbekannte Werkstoffe werden ständig weiterentwickelt und verbessert, um die Verwendungsmöglichkeiten zu erweitern und die Sicherheit und Verfügbarkeit technischer Systeme zu erhöhen.

### Information

#### Supraleitung und Supraleiter

Der Stromtransport ist in einem elektrischen leitenden Festkörper (z. B. Metall) überwiegend an die Bewegung von Elektronen gebunden. Die Wechselwirkung der Elektronen mit den Atomrümpfen des Kristallgitters (Kollisionen) äußert sich dabei insgesamt als elektrischer Widerstand. Bei tiefen Temperaturen beobachtet man jedoch eine verlustfreie Leitung des elektrischen Stromes, die **Supraleitung**. Supraleitung findet erst unterhalb einer für den jeweiligen Stoff charakteristischen Temperatur, der **Sprungtemperatur**, statt.

Die Sprungtemperaturen der metallischen Supraleiter (MSL) wie Nb oder Nb<sub>3</sub>Sn liegen im Bereich des flüssigen Heliums (Siedetemperatur 4,2 K). Die Erzeugung und Aufrechterhaltung derart niedriger Temperaturen erfordert einen hohen technischen Aufwand und hohe Kosten. Die Materialforschung bemüht sich daher bereits seit längerem um die Entwicklung von Werkstoffen mit höheren Sprungtemperaturen, den **Hochtemperatursupraleitern (HTSL)**. Erst dadurch kann die Supraleitung auf breitem Gebiet wirtschaftlich eingesetzt werden. Heute kennt man über 100 HTSL-Verbindungen (Kapitel 10.8.1.6).

Der Einsatz von HTSL-Werkstoffen führt zu einer starken Verringerung von Baugrößen, Gewichten und Verlusten bei elektrischen Betriebsmitteln (z. B. Kabel, Elektromotoren, Generatoren, Transformatoren usw.).

## 1.3 Wirtschaftliche Aspekte der Werkstofftechnik

Der Preis eines Werkstoffes entscheidet maßgeblich über seinen Einsatz und mögliche Anwendungen. So werden für Massenanwendungen meist preiswertere Werkstoffe den technisch überlegenen aber teureren vorgezogen. Beispielsweise kann eine elektrische Leitung aus Silber nicht mit einer aus Aluminium konkurrieren. Der hohe Preis des Silbers liegt vor allem in seiner begrenzten Verfügbarkeit begründet. Dagegen ist der Rohstoff für Silicium günstiger Quarz. Die Herstellung von hochreinem Silicium ist jedoch sehr aufwändig. Insbesondere sind die Reinigungsverfahren relativ kosten- und energieintensiv, sodass der Halbleiterwerkstoff Silicium relativ teuer ist.

Der Preis eines Werkstoffes muss immer im Zusammenhang mit seinem Nutzen gesehen werden. Für die Entscheidung über den Einsatz eines Werkstoffes sind in zunehmendem Maße dessen Umweltverträglichkeit und damit die Kosten für seine Entsorgung von Bedeutung. Obwohl die bereits erwähnten supraleitenden Stoffe als künftige Werkstoffe erheblich teurer sein werden als Kupfer, könnten sie trotzdem Kupfer in Generatoren ersetzen. Denn dieser Mehrpreis wird in kurzer Zeit durch die erheblich höhere Stromausbeute wettgemacht. Neu- oder Weiterentwicklungen von Werkstoffen bleiben häufig nicht begrenzt auf das Einsatzgebiet, für das sie einmal entwickelt wurden. So werden einige Werkstoffe, die für die Raumfahrt entwickelt wurden, inzwischen auch im Alltag eingesetzt. Ein typisches Beispiel dafür ist die Kunststoffsorte Polytetrafluorethylen, die auch unter dem Handelsnamen Teflon® bekannt wurde.

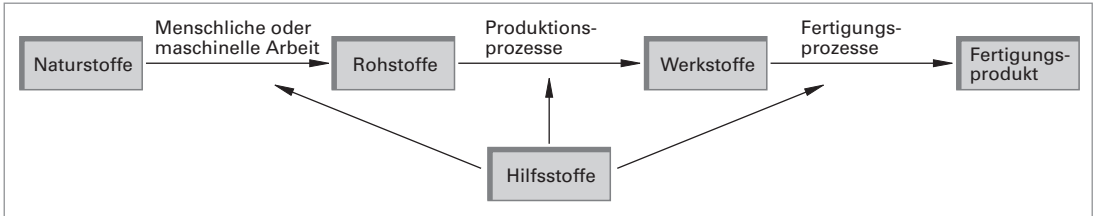
## 1.4 Werkstoffbegriff und Werkstoffeinteilung

Der Begriff Stoff wird mitunter auch synonym gebraucht für Werkstoffe, sodass eine Unterscheidung der beiden Begriffe erforderlich ist.

### 1.4.1 Stoffe und Werkstoffe

Der Zusammenhang zwischen verschiedenen Stoffen wird durch menschliche und maschinelle Arbeit und durch verschiedene Produktions- und Fertigungsverfahren hergestellt und ist in Bild 1, Seite 13, dargestellt.

Am Anfang stehen die **Naturstoffe**, die durch den Menschen genutzt und dabei verändert werden. Aus den Naturstoffen werden **Rohstoffe** gewonnen, die zu **Werkstoffen** weiterverarbeitet werden. Werkstoffe sind die Basis für die Herstellung von Fertigprodukten und Gebrauchsgütern. Die Mehrzahl der Produktionsprozesse erfordert den Einsatz von **Hilfsstoffen**, die im Fertigprodukt jedoch nicht mehr enthalten sind. In Tabelle 1 werden die Begriffe erläutert und einige Beispiele genannt.



**Bild 1: Zusammenhang zwischen den Begriffen „Naturstoff“, „Rohstoff“, „Werkstoff“ und „Hilfsstoff“**

**Tabelle 1: Stoffe in Industrie und Technik**

Stoffe	Erklärung	Beispiele
Naturstoffe	In der Natur vorkommende Stoffe	Holz, Erdöl, Kohle, Wolle, gediegene Metalle, wie Gold, Silber, Kupfer
Rohstoffe	Ausgangsstoffe für den Herstellungsprozess von Werkstoffen	Geschlagenes Holz, abgebaute Kohle, geförderttes Erdöl, abgebaute gediegene Metalle und Erze, Altstoffe (Schrott)
Werkstoffe	Stoffe zur Herstellung von Werkstücken, Werkzeugen und Halbzeugen	Metalle, Nichtmetalle, Verbundwerkstoffe, Kunststoffe, keramische Werkstoffe
Fertigprodukte	Werkstücke, Werkzeuge, Halbzeuge	Motorblock, Hammer, Rohr, Blech
Hilfsstoffe	Stoffe, die den Prozess vom Naturstoff zum Fertigprodukt aufrecht erhalten, aber nicht in das Fertigprodukt eingehen	Schmierstoffe, Schleifmittel, Schneidöle und Kühlmittel, Treib- und Brennstoffe, Härtemittel, Reinigungsmittel

Werkstoffe sind für die Konstruktion nützliche, feste Stoffe. In manchen Fällen macht eine besondere physikalische Eigenschaft, einen Feststoff, zum Werkstoff. So ist beispielsweise die hohe elektrische Leitfähigkeit des Kupfers die Ursache für seine bevorzugte Verwendung als Leiterwerkstoff. Für Konstruktionen, die auf dem Erdboden ruhen, ist aufgrund seiner Druckfestigkeit Beton der günstigste Werkstoff. Treten Zugspannungen auf, dann ist Stahl wegen seiner hohen Zugfestigkeit besonders geeignet.

Ein Stoff muss verschiedene Voraussetzungen erfüllen, um als Werkstoff Verwendung zu finden:

- 1. Günstige Kombination physikalischer bzw. mechanischer Eigenschaften.** So ist beispielsweise bei der Konstruktion von Fahrzeug- oder Flugzeugteilen das Verhältnis von Festigkeit zu Dichte (spezifisches Gewicht) die bestimmende Werkstoffeigenschaft.
- 2. Gute Verarbeitbarkeit.** Es muss auf einfache Weise möglich sein, den Stoff durch plastisches Umformen, Gießen, Sintern oder Zerspanen in die gewünschte Form zu bringen. Darüber hinaus ist es oft erforderlich, einzelne Teile durch geeignete Fügeverfahren wie Schweißen, Löten oder Kleben miteinander zu verbinden.
- 3. Wirtschaftlichkeit.** Ein Stoff kann trotz guter physikalischer oder mechanischer Eigenschaften als Werkstoff nicht in Frage kommen, wenn er zu teuer ist. Dabei müssen die eigentlichen Werkstoffkosten von den Kosten der Verarbeitung und – in zunehmendem Maße – auch der Entsorgung bzw. Wiederverwertung unterschieden werden. Ein preiswerter Stoff, der nur durch teure Formgebungsverfahren (z. B. Schleifen) in die endgültige Form gebracht werden kann oder der nicht schweißbar ist, muss gegebenenfalls durch einen teureren Stoff ersetzt werden, der sich jedoch preiswerter (z. B. durch Gießen) in die gewünschte Form bringen lässt.

### 1.4.2 Einteilung der Werkstoffe

In der Natur kommen Stoffe vor, die aufgrund ihrer Eigenschaften von Menschen schon immer benutzt wurden, wodurch sie zu Werkstoffen wurden.

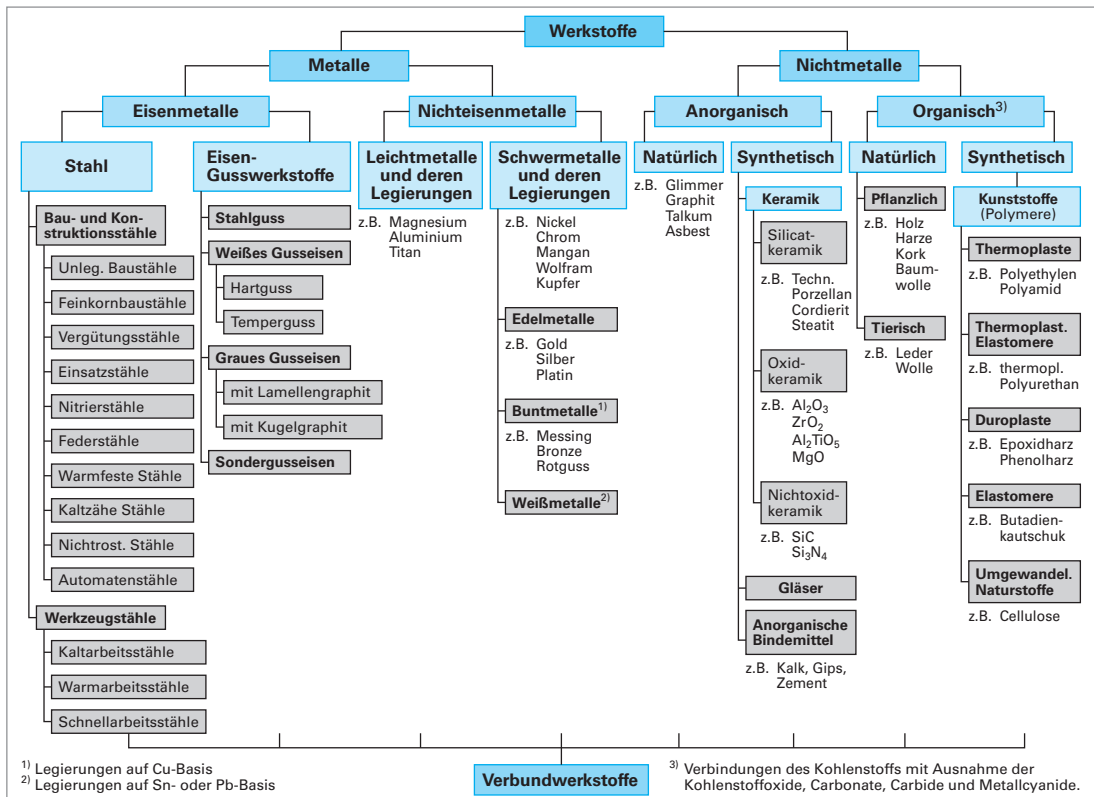
Zu diesen **natürlichen Werkstoffen** gehören Steine, Hölzer und Wolle sowie im weiteren Sinne auch die gediegen (d. h. elementar) vorkommenden Metalle Gold, Silber und Kupfer. Durch den Umgang mit diesen Stoffen wurden Erfahrungen gesammelt über deren Eigenschaften und die sich daraus ergebenden Verwendungsmöglichkeiten. Außerdem gelang es, diese Stoffe und ihre Eigenschaften zu verändern und zu verbessern. Diese Entwicklung führte schließlich zu neuen Werkstoffen. Dazu gehörten zunächst aus Erzen gewonnene Metalle wie Kupfer und Eisen sowie die als Bronze bezeichneten Kupfer-Zinn-Legierungen.

Die Anzahl der verfügbaren Werkstoffe nimmt ständig zu. Daraus erwächst die Notwendigkeit einer ordnenden und systematischen Betrachtung. Die Werkstoffe werden daher üblicherweise in drei Gruppen eingeteilt: metallische Werkstoffe, nichtmetallische Werkstoffe und Verbundwerkstoffe.

### Information

#### Werkstoffe

Werkstoffe sind für die Konstruktion nützliche feste Stoffe. Damit ein Stoff als Werkstoff verwendet wird, muss er eine günstige Kombination physikalischer Eigenschaften aufweisen, gut zu verarbeiten und wirtschaftlich zu beschaffen, sowie gut zu entsorgen sein.



<sup>1)</sup> Legierungen auf Cu-Basis

<sup>2)</sup> Legierungen auf Sn- oder Pb-Basis

#### Verbundwerkstoffe

<sup>3)</sup> Verbindungen des Kohlenstoffs mit Ausnahme der Kohlenstoffoxide, Carbonate, Carbide und Metallcyanide.

**Bild 1: Einteilung der Werkstoffe**

In Bild 1 ist eine umfassende Einteilung der Werkstoffe dargestellt. Die größte technische Bedeutung besitzen die **Metalle**, insbesondere aufgrund ihrer in der Regel hohen Festigkeit und ihres plastischen Verformungsvermögens. Wie Bild 2, Seite 11 zeigt, sind Stahl und Eisen, hier als Eisenmetalle oder häufig auch als Eisenwerkstoffe bezeichnet, wiederum die am häufigsten eingesetzten metallischen Werkstoffe. Üblicherweise unterteilt man die Metalle in die **Eisen-** und **Nichteisenmetalle**. Mitunter wird auch eine Einteilung in Reismetalle und Legierungen oder in Guss- und Knetlegierungen vorgenommen. Die Nichteisenmetalle werden üblicherweise in die Leichtmetalle (Dichte  $\leq 4,5 \text{ g/cm}^3$ ) und Schwermetalle (Dichte  $> 4,5 \text{ g/cm}^3$ ) unterteilt.

Die **nichtmetallischen Werkstoffe** werden eingeteilt in die organisch-nichtmetallische und die anorganisch-nichtmetallische Werkstoffgruppe. Die wichtigste Gruppe innerhalb der organisch-nichtmetallischen Werkstoffe sind die **Kunststoffe**. Von den anorganisch-nichtmetallischen Werkstoffen haben die **Keramiken** die

größte Bedeutung. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hat der Einsatz von Kunststoffen stark zugenommen und derzeit ist diese Tendenz bei den Keramiken und Verbundwerkstoffen festzustellen.

**Verbundwerkstoffe** entstehen durch eine Kombination von mindestens zwei Werkstoffen aus gleichen oder unterschiedlichen Gruppen. Dadurch sollen Eigenschaften erreicht werden, die ein Werkstoff alleine nicht oder nur nach einem wesentlich höheren Verarbeitungsaufwand aufweist. Ein Beispiel für einen Verbundwerkstoff ist Stahlbeton, der durch die Kombination von Stahl (gute Zugfestigkeit) und Beton (gute Druckfestigkeit) entsteht. Weitere Beispiele für Verbundwerkstoffe sind faserverstärkte Kunststoffe, Hartmetalle bzw. Cermets oder metalldrahtverstärktes Glas. Die Kombinationsmöglichkeiten für Verbundwerkstoffe sind überaus vielfältig.

### 1.4.3 Entwicklung der Werkstofftechnik

Die **Werkstofftechnik** hat sich in vielen Jahrtausenden entwickelt. Zunächst wurde das Wissen über die Werkstoffe, ihre Herstellung, Verarbeitung und ihren Gebrauch nur mündlich weitergegeben. Es ist jedoch erstaunlich, dass Bronzegeräte bereits im 3. Jahrtausend v. Chr. in Ägypten oder Mesopotamien erzeugt wurden. Mit der Niederschrift dieses Wissens entwickelte sich die Werkstofftechnik zu einer Wissenschaft. 1556 erschien das erste bedeutende Buch über metallische Werkstoffe von **Georgius Agricola** (1474 ... 1555) **De re metallica**.

Die Beschreibung der Werkstoffe und deren Klassifizierung wurde ergänzt durch Messgrößen, wie beispielsweise die Festigkeit. Diese quantitativen Größen ermöglichen direkte Vergleiche verschiedener Werkstoffe, sodass die Auswahl eines geeigneten Werkstoffes erleichtert wird. Aus den Messgrößen werden Belastungsgrenzen für den jeweiligen Werkstoff abgeleitet, der Werkstoff wird berechenbar. Die Ermittlung der Messgrößen ist Aufgabe der **Werkstoffprüfung**.

Die moderne Werkstofftechnik geht über das Erfassen von Messwerten hinaus, Werkstoffeigenschaften und -verhalten werden wissenschaftlich untersucht und gedeutet. Aufgrund der dabei gewonnenen Erkenntnisse können gezielt Verbesserungen oder Neuentwicklungen vorgenommen werden. Steigende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Werkstoffe erfordern eine schnelle Werkstoffentwicklung. Die Entwicklung neuer Werkstoffe bis zur Marktreife benötigt heute 10 bis 15 Jahre, da umfangreiche Testreihen, Pilotversuche und Prozessoptimierungen erforderlich sind. Somit müssen die bisher üblichen empirischen Methoden der Werkstoffentwicklung und -verbesserung durch leistungsfähigere ersetzt werden, welche die Entwicklungszeiten erheblich reduzieren. Dafür ist es erforderlich, aussagefähigere Werkstoffmodelle zu entwickeln. Um die Eigenschaften eines herzustellenden Werkstückes möglichst genau vorhersagen zu können, muss der gesamte Produktionsweg über das Gießen und Erstarren, Umformen und Wärmebehandeln sowie die weiteren Fertigungsschritte erfasst werden. Die Vorgänge und deren Einfluss auf die Eigenschaften müssen mikroskopisch exakt beschrieben werden und die aufeinander folgenden Prozessstufen durch eine Modellierung miteinander verknüpft werden, sodass mit Hilfe moderner Computer die Werkstoffentwicklung optimiert werden kann. Das Ergebnis könnten **Virtuelle Werkstoffe** sein, also durch Simulation am Computer verbesserte oder neu entwickelte Werkstoffe. In der modernen Werkstofftechnik werden aus diesem Grund bereits Methoden der Informatik genutzt. Dies wird zu einer kürzeren Entwicklungsdauer für neue Werkstoffe führen.

### 1.4.4 Werkstoffprüfung

Die Qualität eines Werkstoffes muss gewährleistet und Aussagen über seine Leistungsfähigkeit müssen dokumentiert sein. Die Eigenschaften von Werkstoffen werden bereits bei der Gewinnung sowie bei der Be- und Verarbeitung und auch noch beim Gebrauch beeinflusst. Ungünstige Veränderungen müssen vermieden, günstige Einflussmöglichkeiten genutzt werden. Die Eigenschaften der Werkstoffe müssen für den jeweiligen Anwendungsfall durch einen genau gesteuerten Fertigungsprozess optimiert werden.

Da jeder Werkstoff natürliche Belastungsgrenzen besitzt, müssen bei Bedarf neue Werkstoffe entwickelt und die konstruktive Gestaltung der Bauteile optimiert werden. Im Maschinen- und Stahlbau, bei der Neuentwicklung oder Verbesserung von Geräten, Anlagen oder Verfahren, muss für die Auswahl geeigneter Werkstoffe deren Verhalten unter künftigen Betriebsbedingungen vorhersagbar sein.

#### Information

##### **Aufgaben der Werkstoffprüfung**

- Ermittlung von Werkstoffeigenschaften und -kennwerten
- Kontrolle und Überwachung von Bauteilen und Anlagen
- Klärung von Schadensursachen
- Gütekontrolle und Gütesteigerung im Rahmen der Qualitätssicherung

Es muss zum einen bekannt sein, in welcher Weise das Material beansprucht wird und zum anderen welche Beanspruchungsgrenzen das Material aufweist, damit eine sichere und zuverlässige Nutzung gewährleistet ist. Eine wichtige Aufgabe der **Werkstoffprüfung** (Kapitel 13) ist daher die Bereitstellung von Werkstoffkennwerten. Die Hersteller garantieren mithilfe dieser Kennwerte bestimmte Werkstoffeigenschaften und fassen in Werkstoffblättern die Eigenschaften und Anwendungsgebiete für die betreffenden Werkstoffe zusammen. Die technisch wichtigsten Werkstoffe werden außerdem in Normen beschrieben.

Die zweite Aufgabe der Werkstoffprüfung ist die Bereitstellung von Verfahren zur regelmäßigen Überwachung von Bauteilen und Anlagen. Beispielsweise dienen die Eindring- und die Ultraschallprüfung zum Nachweis von Rissen, die durch die Verarbeitung (z. B. Schweißen) oder den Betrieb (z. B. Korrosion) entstehen können.

Eine dritte Aufgabe der Werkstoffprüfung ist es, die Ursachen von Schäden zu finden, damit künftig ähnliche Schäden vermieden werden. Zu diesem Zweck stellt die Werkstoffprüfung Präparationsverfahren (z. B. Herstellung metallographischer Schlitze), Analysemethoden und mikroskopische Auswertverfahren zur Verfügung.

Letztlich wird die Werkstoffprüfung zur Gütekontrolle und Gütesteigerung im Rahmen der Qualitätssicherung angewandt.

## 1.5 Eigenschaften der Werkstoffe

Eigenschaften kennzeichnen einen Werkstoff und entscheiden über seine Einsatz- und seine Verwendungsmöglichkeiten. Daher ist die Kenntnis der **Werkstoffeigenschaften** von fundamentaler Bedeutung. Die Eigenschaften der Werkstoffe hängen vom inneren Aufbau ab. Der innere Aufbau kann durch das Herstellungsverfahren und die Verarbeitung verändert, aber auch gezielt beeinflusst werden. Einige wichtige Werkstoffeigenschaften sind in der folgenden Tabelle 1 zusammengestellt.

**Tabelle 1: Wichtige Werkstoffeigenschaften**

Physikalisch	Mechanisch	Chemisch	Technologisch	Umweltrelevant
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Dichte</li> <li>● Wärmedehnung</li> <li>● Wärmeleitfähigkeit</li> <li>● elektr. Leitfähigkeit</li> <li>● Dielektrizität</li> <li>● Optische Eigenschaften</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Festigkeit               <ul style="list-style-type: none"> <li>– statisch</li> <li>– Warmfestigkeit</li> <li>– Schwingfestigkeit</li> </ul> </li> <li>● Verformbarkeit               <ul style="list-style-type: none"> <li>– elastisch</li> <li>– plastisch</li> </ul> </li> <li>● Härte</li> <li>● Zähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Korrosionsbeständigkeit</li> <li>● Hitzebeständigkeit</li> <li>● Reaktionsfähigkeit</li> <li>● Entflammbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Gießbarkeit</li> <li>● Umformbarkeit</li> <li>● Schweißbarkeit</li> <li>● Härbarkeit</li> <li>● Zerspanbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Recyclbarkeit</li> <li>● Toxizität</li> </ul>

Die **mechanischen Eigenschaften** von Werkstoffen werden durch genormte Werkstoffprüfverfahren ermittelt (Kapitel 13). Bei statischer Beanspruchung und normalen Temperaturen sind als Festigkeitswerte beispielsweise die Zugfestigkeit sowie die Streck- bzw. Dehngrenze von Bedeutung.

Die **Zugfestigkeit** ist die höchste ertragbare Spannung. Mit Überschreiten der Zugfestigkeit tritt der Bruch ein. Die **Streck-** oder **Dehngrenze** ist hingegen derjenige Kennwert, nach dessen Überschreitung die plastische Verformung des Werkstoffs einsetzt.

Bei zeitlich veränderlicher Beanspruchung dient unter anderem die **Dauerfestigkeit** als maßgeblicher Werkstoffkennwert. Die Dauerfestigkeit ist dabei diejenige Spannungsamplitude, die vom Werkstoff beliebig oft ertragen werden kann.

Für den Einsatz von Werkstoffen bei erhöhten Temperaturen ist die **Warmfestigkeit** von Bedeutung. Als Kenngrößen dienen die Zeitstandfestigkeit und die Zeitdehngrenze. Die **Zeitstandfestigkeit** ist diejenige Spannung, die bei vorgegebener Temperatur nach einer bestimmten Zeit zum Bruch führt. Unter der **Zeitdehngrenze** versteht man einen Spannungskennwert, der bei vorgegebener Temperatur und Dauer eine bestimmte bleibende Dehnung im Werkstoff hervorruft.

Bei der Verformbarkeit unterscheidet man zwischen der elastischen Verformbarkeit (**Elastizität**) und der plastischen Verformbarkeit (**Plastizität**). Alle Werkstoffe besitzen eine elastische Verformbarkeit, eine aus-



geprägte plastische Verformbarkeit weisen hingegen nur die Metalle und einige Kunststoffe auf. Sowohl der Kennwert der elastischen Verformbarkeit (Elastizitätsmodul) als auch der der plastischen Verformbarkeit (Bruchdehnung) werden im Zugversuch (Kapitel 13.5.1) ermittelt.

Für den Einsatz eines Werkstoffs bei tiefen Temperaturen und/oder schlagartiger Beanspruchung muss dessen **Zähigkeit** bekannt sein, während das Verschleißverhalten u. a. durch die **Härte** gekennzeichnet wird.

Die **technologischen Eigenschaften** (Tabelle 1, Seite 16) sollen die Eignung von Werkstoffen oder Halbzeugen für die Verarbeitung beschreiben. Untersucht werden unter anderem die Gieß-, die Umform-eigenschaften und die Eignung zum Schweißen, Löten oder Härten. Die Ergebnisse dieser technologischen Prüfverfahren können einfache Ja-Nein-Aussagen oder auch Zahlenwerte sein (Kapitel 13.6). Die **physikalischen** und **chemischen Eigenschaften** werden häufig auch in genormten Versuchen ermittelt; sie werden im Rahmen dieses Lehrbuches jedoch nicht näher erläutert.

## 1.6 Werkstoffauswahl

Bei der **Werkstoffauswahl** sind in der Regel mehrere für den Verwendungszweck günstige Eigenschaften ausschlaggebend. Dabei müssen häufig Kompromisse eingegangen werden. So lässt sich die Festigkeit der reinen Metalle durch Legieren verbessern, dadurch verschlechtern sich jedoch die Verformbarkeit, die elektrische Leitfähigkeit des Stoffes und häufig die Korrosionsbeständigkeit.

Werden aus Werkstoffen Bauteile konstruiert, so sind die mechanischen Eigenschaften die wichtigsten Kriterien bei der Werkstoffauswahl, da die Werkstücke vor allem den mechanischen Beanspruchungen standhalten müssen. Gute mechanische Eigenschaften sind aber meist nur ein Kriterium, fast immer werden weitere Anforderungen gestellt, beispielsweise gute Verarbeitbarkeit und häufig auch ein günstiger Preis. Auch die Lebensdauer des Bauteils wird bei der Auswahl eines geeigneten Werkstoffes berücksichtigt (Bild 1).

Von der richtigen Werkstoffwahl hängen nicht nur die Funktion und Beanspruchbarkeit des späteren Bauteils sondern auch die zu verwendenden Fertigungsverfahren, die Dauer und Kosten der Fertigung, die Konstruktion und das Design (werkstoffgerechtes Konstruieren) sowie nicht zuletzt die Sicherheit und Verfügbarkeit des Bauteils ab (Bild 2).

Aufgrund der begrenzten Ressourcen und des zunehmenden Umweltbewusstseins erlangt das **Recycling von Werkstoffen** eine wachsende Bedeutung. Metallische Werkstoffe wurden schon immer wieder verwertet und sind daher meistens unproblematisch zu recyceln. Kunststoffe bereiten schon größere Schwierigkeiten, besonders wenn diese mit anderen Stoffen oder untereinander vermischt sind. Am schwierigsten sind Verbundwerkstoffe wieder zu verwerten, sodass diese bisher seltener eingesetzt werden.

**Information**

**Anforderungen an Werkstoffe**

- Die besonderen Eigenschaften von Werkstoffen müssen für eine vorgegebene oder vereinbarte Zeit eingehalten werden.
- Werkstoffe müssen preiswert sein.
- Werkstoffe müssen gut und ökonomisch bearbeitbar sein.
- Werkstoffe müssen recycelbar sein.

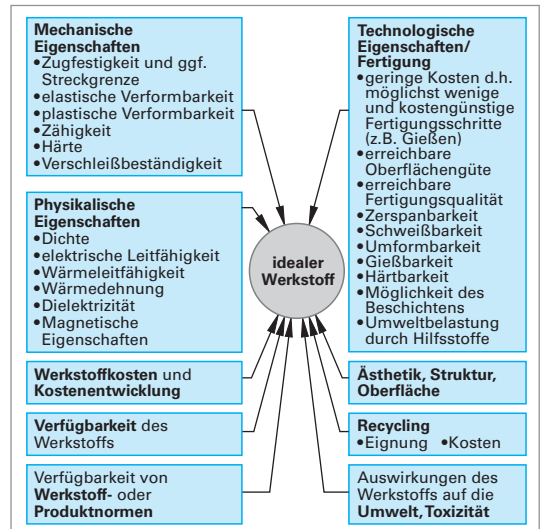


Bild 1: Kriterien zur Werkstoffauswahl

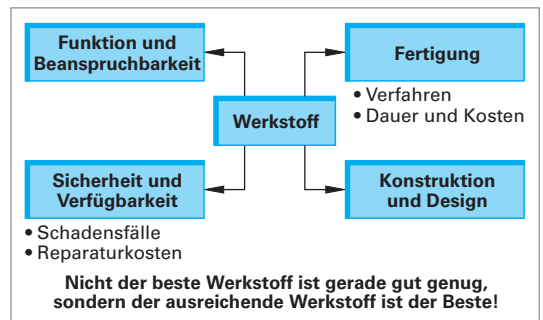


Bild 2: Bedeutung der Werkstoffauswahl

## 2 Grundlagen der Metallkunde

Metalle haben eine sehr große technische und wirtschaftliche Bedeutung, z. B. als Konstruktionswerkstoff (Stahl), Leitwerkstoff (Kupfer), Verpackungswerkstoff (Aluminium) oder auch als Zahlungsmittel (z. B. Gold, Nickel).

Auch in früheren Zeiten waren Metalle unverzichtbar, wie die Benennung ganzer Zeiträume zeigt: Kupfersteinzeit, Bronzezeit, Eisenzeit. Grund für die Anwendungsbreite der Metalle sind ihre typischen Eigenschaften, insbesondere die Festigkeit, die Verformbarkeit und der metallische Glanz. Daher wurden seit Anbeginn der Metallnutzung vor ca. 4000 Jahren praktische Erfahrungen mit Metallen gewonnen, zunächst eher zufällig, später auch durch systematische Untersuchungen. Hüttenleute und Schmiede gaben ihre Erkenntnisse rund um die Gewinnung, Ver- und Bearbeitung von Metallen von Generation zu Generation weiter.

So gab es bereits eine durchaus hochentwickelte Metalltechnik lang bevor die chemischen und physikalischen Zusammenhänge verstanden wurden.

Die eigentliche wissenschaftliche Erforschung der Metalle begann im 19. Jahrhundert und erlebte mit der Einführung fundierter Untersuchungsverfahren einen großen Aufschwung. Mittlerweile können, auch dank moderner Computersimulationsverfahren, metallische Werkstoffe gezielt für einen spezifischen Einsatzfall entwickelt bzw. modifiziert werden.

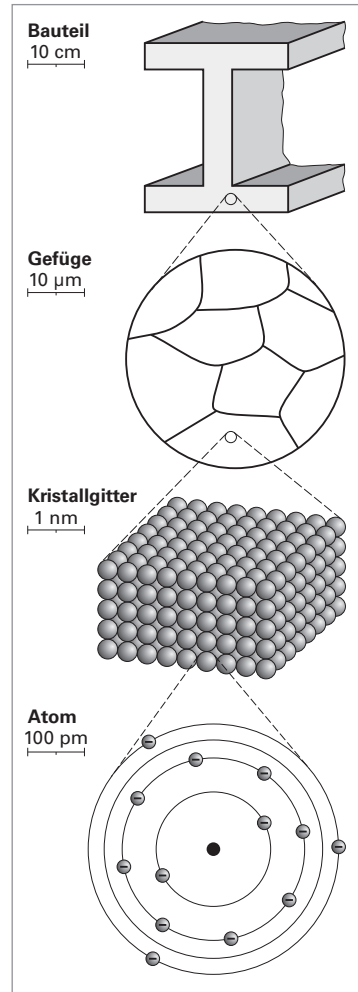
Die Metalltechnik wird unterteilt in **Metallurgie** und **Metallkunde**. Die Metallurgie befasst sich mit der Gewinnung der Metalle, die Metallkunde hingegen mit den Eigenschaften der Metalle und ihrer Veränderung bei der Fertigung und Anwendung von Produkten. Beide Gebiete bauen auf Grundlagen aus Chemie und Physik auf.

### 2.1 Aufbau der Metalle

Um die Eigenschaften eines Werkstoffes zu verstehen, ist es notwendig, den inneren Aufbau zu kennen. Bereits bei makroskopischer Betrachtung werden wesentliche Unterschiede zwischen Metallen und anderen Stoffen deutlich: Metalle weisen einen typischen Glanz auf, haben eine gute elektrische Leitfähigkeit und sind plastisch verformbar. Aber allein aus der Betrachtung eines Bauteils, wie z. B. eines Aluminiumstrangpressteils, (Bild 1, oben) können keine Rückschlüsse über seinen inneren Aufbau erfolgen. Mikroskopische Aufnahmen (Bild 1, Mitte) zeigen das **Gefüge** eines Metalls, das aus vielen kleinen Bereichen, den **Körnern (Kristalliten)**, besteht. Das Gefüge beeinflusst die Metalleigenschaften in wesentlicher Weise. Die Körner sind aus Atomen aufgebaut, die in Form eines **Kristallgitters** regelmäßig angeordnet sind (Bild 1, unten). Der kristalline Aufbau eines metallischen Werkstoffes kann z. B. durch Röntgenfeinstrukturuntersuchungen untersucht werden.

Zwischen den einzelnen Körnern befinden sich die **Korngrenzen**. Sie erscheinen aufgrund der Größenverhältnisse als unregelmäßige Linien, da die Korndurchmesser etwa 10000 Atomdurchmessern entsprechen und daher die atomaren Begrenzungen der Körner nicht zu sehen sind.

Metalle sind **polykristallin**, d. h. sie bestehen aus vielen Körnern (poly: viel, daher auch Vielkristalle). Nur unter bestimmten Erstarrungsbedingungen können Einkristalle, also Werkstücke ohne Korngrenzen, hergestellt werden, wie z. B. Silicium-Einkristalle für die Halbleitertechnik.



**Bild 1: Strukturebenen eines Metalls**

## 2.2 Atombau und Periodensystem der Elemente

Zur Erklärung und zum Verständnis der Werkstoffe ist es notwendig, einige chemische Grundlagen zu betrachten.

### 2.2.1 Bau der Atome

Die ersten Überlegungen zum Aufbau der Materie stellten griechische Philosophen bereits im Altertum an. **Demokrit** (460 bis 371 v. Chr.) entwickelte die Vorstellung, Materie ist nicht beliebig teilbar. Materie besteht danach aus nicht mehr zerlegbaren Urbestandteilen, den **Atomen** (griech.: atomos, unteilbar).

Diese Vorstellungen wurden zu Beginn der Neuzeit zur Erklärung physikalischer und chemischer Vorgänge und Reaktionen zuerst von **John Dalton** (1766 bis 1844) wieder herangezogen. Dalton stellte fest, dass sich bei einer chemischen Reaktion zwei Stoffe immer in einem bestimmten konstanten Massenverhältnis verbinden (z. B. 2 g Wasserstoff + 16 g Sauerstoff zu 18 g Wasser). Dieses **Gesetz der konstanten Proportionen** erklärte er mit Hilfe seiner Atomhypothese. Zum besseren Verständnis und zur Beschreibung dieser Hypothese entwickelte er ein Atommodell. Danach entsprachen die Atome Kugeln mit einem für jedes Element bestimmten, konstanten Durchmesser und spezifischer Masse (**Daltonsches Atommodell**).

Die Atome wurden bis zum Ende des 19. Jahrhunderts als unteilbar angesehen. Als aber Teilchen entdeckt wurden, die offensichtlich Bestandteile der Atome sind, entstanden die Atommodelle von Rutherford, Bohr und Sommerfeld (Orbitalmodell). Aber das einfache Kugelmodell kann auch heute zur Veranschaulichung einiger atomarer Phänomene, wie beispielsweise der Kristallstruktur von Metallen, benutzt werden. Die Erklärung anderer Erscheinungen erfordert modernere Atommodelle.

Das **Rutherfordsche Atommodell** (**Sir Ernest Rutherford**, 1871 bis 1957) gestattet es, die Werkstoffeigenschaften und die Bindungsverhältnisse zwischen Atomen zu erklären. Atome bestehen danach aus Elementarteilchen: den **Protonen**, **Neutronen** und **Elektronen**. Die elektrisch positiv geladenen Protonen und die neutralen Neutronen bilden den **Atomkern**, die negativ geladenen Elektronen die **Atomhülle**. Im Kern ist nahezu die gesamte Masse des Atoms konzentriert (**Bild 1**). Protonen und Neutronen haben fast die gleiche Masse, die Elektronen hingegen haben nur 1/1836 der Masse eines Protons (Tabelle 1).

Nach dem Atommodell von Rutherford bewegen sich die Elektronen auf Kreisbahnen um den Atomkern. Jedes Element hat eine spezifische Atommasse und eine bestimmte Anzahl von Elektronen, die bei neutralen Atomen gleich der Anzahl der Protonen ist. Bei positiv geladenen Atomen, den **Kationen**, ist die Elektronenzahl kleiner als die Protonenzahl. Bei negativ geladenen Atomen, den **Anionen**, ist sie größer. Die Protonenzahl oder Kernladungszahl bestimmt, um welches Element es sich handelt. Sie wird auch als **Ordnungszahl** bezeichnet (Kapitel 2.2.2. Periodensystem der Elemente).

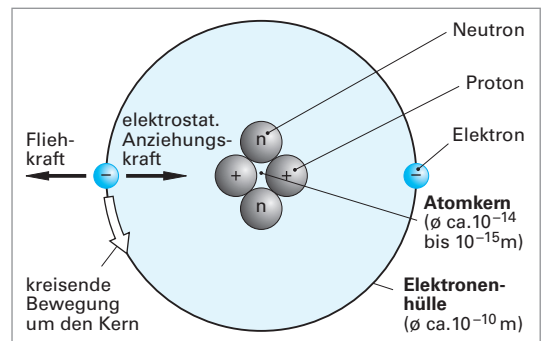
Die Zahl der Neutronen eines Atoms kann unterschiedlich sein. Atome eines Elementes mit unterschiedlicher Neutronenzahl werden **Isotope** genannt.

#### **i** Information

##### Verschiedene Atommodelle

Im Bereich der Werkstofftechnik können zur Deutung von verschiedenen Phänomenen unterschiedliche Atommodelle eingesetzt werden:

- Atommodell von Dalton: Kristallstruktur
- Atommodell von Bohr: Bindungsarten (Kapitel 2.3)
- Atommodell von Sommerfeld: elektrische Leitfähigkeit



**Bild 1:** Atommodell nach Rutherford für Helium (zwei Protonen)

**Tabelle 1:** Eigenschaften der Elementarteilchen

	Elektron (e)	Proton (p)	Neutron (n)
Ladung	negativ (-e) $-1,602 \cdot 10^{-19}$ As	positiv (+e) $+1,602 \cdot 10^{-19}$ As	neutral 0 As
Ruhe-masse <sup>1)</sup>	$9,11 \cdot 10^{-31}$ kg = 0,00055 u	$1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg = 1,00728 u	$1,6748 \cdot 10^{-27}$ kg = 1,00867 u

<sup>1)</sup> 1 u = atomare Masseneinheit. Sie ist festgelegt als  $\frac{1}{12}$  der absoluten Masse des Kohlenstoffisotops  $^{12}\text{C}$  ( $1 \text{ u} = 1,6606 \cdot 10^{-27}$  kg).

Eine übliche Schreibweise für Isotope besteht aus dem chemischen Zeichen (oder Elementnamen) und der **Massenzahl** d. h. der Zahl der Protonen und Neutronen im Atomkern), die vor- und hochgestellt wird, wie z. B.  $^{60}\text{Co}$ .

Die **Atommasse** eines Elements ergibt sich aus der Summe der prozentualen (konstanten) Anteile der Isotopen als Dezimalzahlen. So beträgt beispielsweise die Atommasse von Kohlenstoff 12,011 u, da Kohlenstoff immer die gleichen Anteile der Isotope  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  und  $^{14}\text{C}$  enthält.

Bei chemischen Vorgängen treten stets nur Veränderungen in der Elektronenhülle der Atome ein, während die Atomkerne völlig unverändert bleiben. Der Bau und das Verhalten der Elektronenhülle ist daher für die Chemie und somit auch für die Werkstoffkunde von besonderer Bedeutung. Der Aufbau der Elektronenhülle kann sowohl durch das einfache **Bohrsche Atommodell** als auch durch das moderne und leistungsfähigere **Orbitalmodell** beschrieben werden.

1913 entwickelte der dänische Physiker **Nils Bohr** (1885 bis 1962) das nach ihm benannte „Bohrsche Atommodell“. Danach bewegen sich die Elektronen auf räumlichen **Schalen** um den Atomkern (Bild 1).

Die unterschiedlich großen Bahnen sind ein Maß für die Energie des umlaufenden Elektrons. Dabei heißt höhere Bahn: Die Energie des betreffenden Elektrons ist höher, der Energiezustand größer. Die Bahnen oder Schalen werden daher auch als **Energieniveaus** bezeichnet.

Jede Schale kann nur eine bestimmte Zahl von Elektronen aufnehmen. Die maximal mögliche Anzahl der Elektronen  $e_{\max}$  auf der  $n$ . Schale ( $n$  = Schalennummer vom Atomkern aus gezählt, s. Bild 1) lässt sich nach der Formel:  $e_{\max} = 2 \cdot n^2$  berechnen.

Die 1. Schale ( $n = 1$ ) kann maximal  $2 \cdot 1^2 = 2$  Elektronen aufnehmen, die 2. Schale  $2 \cdot 2^2 = 8$  Elektronen, die 3. Schale  $2 \cdot 3^2 = 18$  Elektronen usw.

Ein besonders stabiler Zustand wird erreicht, wenn die äußere Schale mit acht Elektronen besetzt ist. Dies ist der Fall bei den Edelgasen, wie Neon, Argon, Krypton, Xenon und Radon, die nahezu nie chemische Verbindungen bilden.

Zur Klärung komplexer Bindungsverhältnisse reicht jedoch das Bohrsche Atommodell nicht aus; Stattdessen kommt das weniger anschauliche Orbitalmodell zur Anwendung.

## 2.2.2 Periodensystem der Elemente (PSE)

Die Ähnlichkeiten zwischen einzelnen Elementen und die Kenntnisse über den Atomaufbau sind Grundlage für ein Ordnungssystem der Elemente, das **Periodensystem der Elemente**, abgekürzt als PSE (Bild 1, Seite 21). Im Periodensystem werden alle bekannten Elemente nach steigender Ordnungszahl angeordnet.

### Information

#### Atombau

Atome bestehen aus Protonen (p), Neutronen (n) und Elektronen (e). Protonen und Neutronen bilden den Atomkern, die Elektronen die Atomhülle.

Protonen sind positiv und Elektronen negativ geladen. Im elektroneutralen Atom kompensieren sich die Ladungen. Neutronen besitzen keine Ladung.

Atome werden zu Ionen, wenn sie Elektronen abgeben (Kationen, positiv geladen) oder aufnehmen (Anionen, negativ geladen).

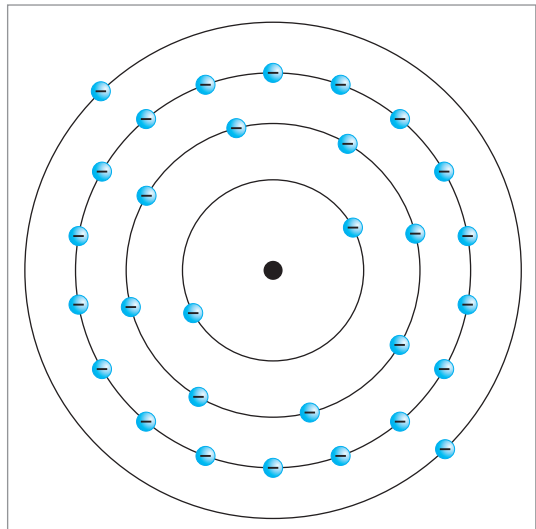


Bild 1: Bohrsches Modell der Elektronenhülle von Zink

### Information

#### Ordnungszahl, Massenzahl, Isotop

Die **Ordnungszahl** gibt die Anzahl der Protonen im Atomkern an.

Die **Massenzahl** ( $m$ ) ist die Summe der Protonen ( $p$ ) und Neutronen ( $n$ ) im Atomkern:  $m = p + n$

**Isotope** sind Atome des gleichen Elementes mit unterschiedlicher Neutronenzahl bzw. Massenzahl, wie z. B.:

$^{12}\text{C}$   $^{13}\text{C}$   $^{14}\text{C}$  oder  $^{235}\text{U}$   $^{238}\text{U}$ .