



Bibliothek des technischen Wissens

Werkstofftechnik Maschinenbau

Theoretische Grundlagen
und praktische Anwendungen

7. aktualisierte Auflage

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

Europa-Nr.: 52611

Autoren:

Kammer, Catrin	Dr.-Ing.	Goslar
Kammer, Ulrich	Dr.-Ing.	Goslar
Scheil, Karl-Heinz	Dipl.-Ing., OStR a. D.	Lautertal
Steuernagel, Leif	Dr. sc. nat.	Clausthal-Zellerfeld

Lektor und Autor der 1. bis 6. Auflage:

Prof. Dr.-Ing. Volker Läßle, Schorndorf

Verlagslektorat: Dr. Astrid Grote-Wolff

Bildbearbeitung:

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern

Alle Bilder ohne Quellenangaben stammen vom 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.

7. Auflage 2023

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern identisch sind.

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

ISBN 978-3-8085-5267-4

© 2023 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, Radevormwald,
unter Verwendung eines Bildes von Jakachai, stock.adobe.com
Satz: Punkt für Punkt GmbH · Mediendesign, 40549 Düsseldorf
Druck: UAB BALTO print, Vilnius LT-08217, Litauen

Vorwort

„**Werkstofftechnik Maschinenbau – Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen**“ vermittelt einen umfassenden Überblick über die wichtigsten metallischen und nichtmetallischen Werkstoffe, wie Stähle und Eisengusswerkstoffe, Nichteisenmetalle und deren Legierungen, Kunststoffe, keramische Werkstoffe sowie Verbundwerkstoffe.

Das Lehrwerk richtet sich an **Technikerinnen** und **Techniker** mit Schwerpunkt Maschinenteknik sowie an **Studierende** des Maschinenbaus, der Materialwissenschaften und Werkstofftechnik sowie des Wirtschaftsingenieurwesens mit ingenieurwissenschaftlichem Schwerpunkt. Aufgrund der anschaulichen Vermittlung auch komplexer Zusammenhänge des breiten Spektrums der Werkstofftechnik dient es auch **Technikern und Ingenieuren in der beruflichen Praxis** als wertvolles Nachschlagewerk.

Das Lehrwerk 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. Die Fertigungsverfahren müssen optimal auf die eingesetzten Werkstoffe abgestimmt werden. Im Lehrwerk 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.

Didaktische Besonderheiten:

Die sachlogische Darstellung der Fachinhalte ermöglicht einen systematischen Wissensaufbau. Das Lehrwerk kann eine Lehrveranstaltung begleitend, aber auch im Selbststudium eingesetzt werden. Eine Vielzahl technischer Illustrationen, Fotos und Tabellen stellt den engen Bezug zur beruflichen Praxis her und sichert den Lernerfolg.

Neu in der 7. Auflage:

Das gesamte Lehrwerk wurde gründlich überarbeitet, um aktuelle Themen erweitert und **auf den neuesten Stand der europäischen und internationalen Normung** abgestimmt.

Digitales Zusatzmaterial:

Alle Bilder und Tabellen des Lehrwerks sind für die Übernahme in eigenes Material digital zugänglich (s. Informationen zur EUROPATHEK auf der vorderen Umschlaginnenseite).

Ihr Feedback ist uns wichtig!

Wenn Sie mithelfen möchten, dieses Lehrwerk in den kommenden Auflagen weiterzuentwickeln, schreiben Sie uns unter lektorat@europa-lehrmittel.de. Wir freuen uns auf Ihre Anregungen und Unterstützung durch Kritik und wünschen Ihnen viel Erfolg mit „Werkstofftechnik Maschinenbau“

Inhaltsverzeichnis

1 Werkstofftechnologie in Industrie und Wirtschaft

1.1	Werkstoffe und Werkstofftechnik	11
1.2	Bedeutung der Werkstofftechnik	11
1.3	Wirtschaftliche Aspekte der Werkstofftechnik	12
1.4	Werkstoffbegriff und Werkstoffteilung	12
1.4.1	Stoffe und Werkstoffe	12
1.4.2	Einteilung der Werkstoffe	14
1.4.3	Entwicklung der Werkstofftechnik	15
1.4.4	Werkstoffprüfung	15
1.5	Eigenschaften der Werkstoffe	16
1.6	Werkstoffauswahl	17

2 Grundlagen der Metallkunde

2.1	Aufbau der Metalle	19
2.2	Atombau und Periodensystem der Elemente	19
2.2.1	Bau der Atome	19
2.2.2	Periodensystem der Elemente (PSE)	21
2.3	Chemische Bindungen	23
2.3.1	Primäre chemische Bindungen	23
2.3.1.1	Ionenbindung	23
2.3.1.2	Atombindung	24
2.3.1.3	Metallbindung	25
2.3.2	Sekundäre chemische Bindungen	26
2.3.2.1	Dispersionswechselwirkungen	26
2.3.2.2	Dipol-Dipol-Wechselwirkungen	27
2.3.2.3	Dipol-Ion-Wechselwirkungen	27
2.3.2.4	Induktionsbindungen	27
2.3.2.5	Wasserstoffbrückenbindungen	27
2.4	Gitteraufbau der Metalle	28
2.4.1	Kristallgittermodelle	28
2.4.2	Kristallgitter von Metallen	29
2.5	Realkristalle und Gitterbaufehler	31
2.5.1	Realkristalle	32
2.5.2	Gitterbaufehler	32
2.5.2.1	Nulldimensionale Gitterbaufehler	32
2.5.2.2	Eindimensionale Gitterbaufehler	33
2.5.2.3	Zweidimensionale Gitterbaufehler	36
2.6	Gefüge	39
2.7	Anisotropie und Textur	41
2.8	Elastische und plastische Verformung	42
2.8.1	Elastische Verformung	42
2.8.2	Plastische Verformung	43
2.8.2.1	Versetzungsgleitung	43
2.8.2.2	Gleitebenen und Gleitsysteme	44
2.8.2.3	Zwillingsbildung und Korngrenzen- gleitung	45

2.8.2.4	Plastische Verformung von Vielkristallen	46
2.9	Verfestigungsmechanismen	47
2.9.1	Korngrenzenverfestigung (Feinkornhärtung)	47
2.9.2	Mischkristallverfestigung	47
2.9.3	Teilchenverfestigung	48
2.9.4	Verformungsverfestigung (Kaltverfestigung)	50
2.9.5	Überlagerung der Verfestigungs- mechanismen	51
2.10	Thermisch aktivierte Prozesse	52
2.10.1	Diffusion	52
2.10.2	Erholung und Rekristallisation	55
2.10.2.1	Verformungsstrukturen	55
2.10.2.2	Erholung	56
2.10.2.3	Rekristallisation	58
2.10.2.4	Kornvergrößerung und sekundäre Rekristallisation	62
2.10.2.5	Kalt- und Warmverformung	62
2.10.2.6	Teilentfestigte Zustände	63
2.10.3	Kriechen	63
2.10.3.1	Kriechen und Werkstoffschädigung	64
2.10.3.2	Primäres Kriechen (Übergangskriechen)	65
2.10.3.3	Sekundäres Kriechen (stationäres Kriechen)	65
2.10.3.4	Tertiäres Kriechen (beschleunigtes Kriechen)	65
2.10.3.5	Warmfeste und hochwarmfeste Stähle und Legierungen	66
2.10.4	Sintern	66
2.10.4.1	Festphasensintern einphasiger Pulver	67
2.10.4.2	Festphasensintern zwei- bzw. mehrphasiger Pulver	67
2.10.4.3	Flüssigphasensintern	68
2.10.4.4	Reaktionssintern	69

3 Grundlagen der Legierungskunde

3.1	Aggregatzustände und Phasen	70
3.2	Phasenumwandlungen	71
3.3	Kristallstrukturen von Legierungen	71
3.3.1	Mischkristalle	71
3.3.2	Kristallgemische	72
3.4	Intermetallische Phasen	73
3.5	Überstrukturen	74
3.6	Zustandsdiagramme	75
3.6.1	Binäre Zustandsdiagramme	76
3.6.1.1	Erstellung binärer Zustandsdiagramme	76
3.6.1.2	Lesen binärer Zustandsdiagramme	77
3.6.1.3	Kristallseigerung und Zonenmisch- kristall	77
3.6.2	Grundtypen binärer Zustandsdiagramme	79

3.6.2.1	Vollkommene Unlöslichkeit im festen und flüssigen Zustand	79
3.6.2.2	Vollkommene Löslichkeit im festen und flüssigen Zustand (Linsendiagramm)	79
3.6.2.3	Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand (eutektisches Legierungssystem)	80
3.6.2.4	Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und begrenzte Löslichkeit im festen Zustand (eutektisches Legierungssystem mit Mischungslücke)	81
3.6.2.5	Peritektisches Zustandsdiagramm	81
3.6.3	Zustandsdiagramme mit Verbindungsbildung	82
3.6.4	Reale Zustandsdiagramme	83
3.6.5	Ternäre Zustandsdiagramme	84

4 Wechselwirkungen zwischen Werkstoffeigenschaften und Fertigungsverfahren

4.1	Urformen	87
4.1.1	Kristallisation und Gefüge	87
4.1.2	Gussfehler	89
4.1.3	Gießbarkeit metallischer Werkstoffe	91
4.1.3.1	Fließ- und Formfüllungsvermögen	91
4.1.3.2	Schwindung	92
4.1.3.3	Schmelzverhalten von Gusswerkstoffen	92
4.1.4	Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften beim Gießen	93
4.1.5	Züchten von Einkristallen	94
4.2	Umformen	95
4.2.1	Kaltumformung	95
4.2.2	Warmumformung	96
4.2.3	Neue Umformverfahren	97
4.3	Trennen	99
4.3.1	Zerteilen und Zerspanen	99
4.3.2	Zerspanbarkeit	99
4.3.3	Spanformen	100
4.3.4	Automatenlegierungen	100
4.4	Fügen	101
4.4.1	Schweißen	101
4.4.1.1	Schweißbarkeit	101
4.4.1.2	Einteilung der Schweißverfahren	102
4.4.1.3	Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften durch das Schweißen	103
4.4.2	Löten	112
4.4.2.1	Vor- und Nachteile des Lötens	112
4.4.2.2	Einteilung der Lötverfahren	112
4.4.2.3	Lötmechanismus	112
4.4.2.4	Metallurgische Probleme beim Löten	113
4.4.2.5	Flussmittel, Lötatmosphären und Vakuum	114
4.4.2.6	Lotwerkstoffe	115
4.5	Beschichten	118
4.5.1	Beschichten aus dem flüssigen Zustand	118
4.5.1.1	Schmelztauchen	118

4.5.1.2	Emaillieren	119
4.5.1.3	Anstreichen und Lackieren	119
4.5.2	Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand	120
4.5.2.1	Wirbelsintern	120
4.5.2.2	Thermisches Spritzen	120
4.5.3	Beschichten durch Schweißen	122
4.5.4	Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand	122
4.5.4.1	CVD-Verfahren	122
4.5.4.2	PVD-Verfahren	123
4.5.5	Beschichten aus dem ionisierten Zustand	125
4.5.5.1	Galvanisches Beschichten	125
4.5.5.2	Chemisches Beschichten	125
4.5.6	Weitere Verfahren zur Erzeugung einer Oberflächenschicht	126
4.5.6.1	Plattieren	126
4.5.6.2	Anodische Oxidation (Eloxieren)	127
4.5.6.3	Phosphatieren	128
4.5.6.4	Chromatieren	129
4.5.6.5	Brünieren	130
4.6	Stoffeigenschaften ändern	130
4.6.1	Verfestigen durch Umformen	130
4.6.1.1	Verfestigen durch Walzen	130
4.6.1.2	Verfestigen durch Ziehen	131
4.6.1.3	Verfestigen durch Schmieden	132
4.6.2	Wärmebehandeln	132
4.6.3	Thermomechanisches Behandeln	134
4.6.4	Sintern und Brennen	134
4.6.5	Magnetisieren	134
4.6.6	Bestrahlen	134
4.6.7	Fotochemische Verfahren	134

5 Gewinnung, Formgebung und Recycling metallischer Werkstoffe und Legierungen

5.1	Überblick zur Gewinnung metallischer Werkstoffe	135
5.1.1	Gewinnung metallischer Rohstoffe	135
5.1.2	Verfahren der Metallgewinnung	136
5.1.3	Raffinationsverfahren	137
5.1.4	Metallische Werkstoffe und deren Handelsformen	137
5.2	Eisen- und Stahlerzeugung	137
5.2.1	Hochofenprozess	138
5.2.1.1	Hochofen	139
5.2.1.2	Reduktionsvorgang	140
5.2.1.3	Produkte des Hochofenprozesses	142
5.2.2	Direktreduktionsverfahren	143
5.2.3	Stahlerzeugung	144
5.2.3.1	Sauerstoffblasverfahren	144
5.2.3.2	Elektrolichtbogenofen-Verfahren	147
5.2.3.3	Stahl-Sekundärmetallurgie	147
5.3	Erzeugung von Nichteisenmetallen	149
5.3.1	Gewinnung von Aluminium	149
5.3.2	Gewinnung weiterer Nichteisenmetalle	151
5.4	Legieren von Metallen	152

5.5 Formgebungsverfahren für metallische Werkstoffe	153	6.4.3 Glühen	208
5.5.1 Gießen	153	6.4.3.1 Normalglühen von Stählen	208
5.5.1.1 Formgießen	153	6.4.3.2 Weichglühen von Stählen (Glühen auf kugelige Carbide)	210
5.5.1.2 Formatgießen (Halbzeuggießen)	156	6.4.3.3 Spannungsarmglühen	211
5.5.2 Umformen	158	6.4.3.4 Rekristallisationsglühen	212
5.5.2.1 Walzen	159	6.4.3.5 Diffusionsglühen (Homogenisierungs-glühen)	214
5.5.2.2 Durchdrücken	160	6.4.3.6 Grobkornglühen (Hochglühen)	215
5.5.2.3 Freiform- und Gesenkschmieden	160	6.4.4 Härten	217
5.5.2.4 Ziehen	161	6.4.4.1 Ziele der Stahlhärtung	217
5.6 Recycling von metallischen Werkstoffen	162	6.4.4.2 Verfahren	217
5.6.1 Recycling von Stahl und Gusseisen	163	6.4.4.3 Härtetemperatur	217
5.6.2 Recycling von Nichteisenmetallen	163	6.4.4.4 Abkühlgeschwindigkeit und Gefügeausbildung	218
6 Eisenwerkstoffe		6.4.4.5 Kritische Abkühlgeschwindigkeit	223
6.1 Reines Eisen	164	6.4.4.6 Kohlenstofflöslichkeit des Austenits	225
6.2 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	166	6.4.4.7 Temperaturbereich der Martensitbildung	225
6.2.1 Phasenausbildungen in Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	166	6.4.4.8 Restaustenit und Tiefkühlung	225
6.2.1.1 Mischkristalle (Ferrit, Austenit und δ -Ferrit)	166	6.4.4.9 Abschreckhärte	226
6.2.1.2 Verbindungsphasen (Zementit und ϵ -Carbid)	168	6.4.4.10 Härtespannungen	227
6.2.1.3 Stabile Phase (Grafit)	168	6.4.4.11 Abschrecken und Abschreckmittel	229
6.2.2 Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm	169	6.4.4.12 Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramme (ZTU-Diagramme)	230
6.2.2.1 Erstarrungsformen von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	169	6.4.4.13 Zeit-Temperatur-Austenitisierungsdiagramme (ZTA-Diagramme)	234
6.2.2.2 Aufbau des metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramms	170	6.4.5 Anlassen und Vergüten	237
6.2.2.3 Bezeichnungen im metastabilen System	171	6.4.5.1 Innere Vorgänge beim Anlassen	238
6.2.2.4 Erstarrungsvorgänge im metastabilen System	171	6.4.5.2 Anlassen der legierten Stähle	239
6.2.2.5 Stahlecke des metastabilen Systems	174	6.4.5.3 Versprödungserscheinungen beim Anlassen von Stählen	240
6.3 Eisenbegleiter und Legierungselemente	177	6.4.5.4 Vergüten	242
6.3.1 Begleitelemente und nichtmetallische Einschlüsse	177	6.4.6 Verfahren des Oberflächenhärtens	247
6.3.1.1 Mangan (Mn)	178	6.4.6.1 Einteilung der Oberflächenhärtungsverfahren	247
6.3.1.2 Silicium (Si)	179	6.4.6.2 Randschichthärteverfahren	248
6.3.1.3 Phosphor (P)	180	6.4.6.3 Thermochemisches Behandeln	253
6.3.1.4 Schwefel (S)	181	6.5 Eigenschaften und Verwendung von Stählen	265
6.3.1.5 Stickstoff (N)	183	6.5.1 Einteilung der Stähle	265
6.3.1.6 Sauerstoff (O)	184	6.5.1.1 Einteilung der Stähle nach Hauptgüteklassen	265
6.3.1.7 Wasserstoff (H)	185	6.5.1.2 Einteilung der Stähle nach dem Verwendungszweck	267
6.3.1.8 Zusammenfassung der Wirkungsweisen von Begleitelementen in Stählen	187	6.5.2 Unlegierte Baustähle	268
6.3.1.9 Nichtmetallische Einschlüsse	187	6.5.2.1 Anwendung unlegierter Baustähle	268
6.3.2 Legierungselemente	190	6.5.2.2 Normung und Gütegruppen unlegierter Baustähle	268
6.3.2.1 Allgemeine Wirkungsweisen von Legierungselementen in Stählen	190	6.5.2.3 Technologische Eigenschaften unlegierter Baustähle	269
6.3.2.2 Wirkungsweisen ausgewählter Legierungselemente	197	6.5.2.4 Werkstoffkundliche Besonderheiten unlegierter Baustähle	270
6.3.2.3 Wirkungsweise mehrerer Legierungselemente im Stahl	205	6.5.3 Schweißgeeignete Feinkornbaustähle	270
6.4 Wärmebehandlung der Stähle	206	6.5.3.1 Werkstoffkundliche Grundlagen schweißgeeigneter Feinkornbaustähle	271
6.4.1 Prinzip einer Wärmebehandlung	206	6.5.3.2 Stahlsorten und Gütegruppen	272
6.4.2 Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren	208	6.5.4 Federstähle	276
		6.5.4.1 Anforderungen an metallische Federwerkstoffe	276

6.5.4.2	Federstahlsorten	277	6.6.3.3	Gusseisen mit Lamellengrafit	320
6.5.5	Vergütungsstähle	278	6.6.3.4	Gusseisen mit Kugelgrafit	326
6.5.6	Einsatzstähle	278	6.6.3.5	Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgrafit	329
6.5.7	Nitrierstähle	278	6.6.3.6	Gusseisen mit Vermiculargrafit	331
6.5.8	Warmfeste Stähle	278	6.6.3.7	Temperguss	331
6.5.8.1	Anforderungen an warmfeste Stähle	278	6.6.3.8	Perlitischer Hartguss	337
6.5.8.2	Werkstoffverhalten und Werkstoffkennwerte bei erhöhter Temperatur	279	6.6.3.9	Sondergusseisen	338
6.5.8.3	Warmfeste Stahlsorten	279			
6.5.9	Kaltzähe Stähle	280	7 Nichtisenmetalle		
6.5.9.1	Werkstoffverhalten und Kennwerte bei tiefen Temperaturen	280	7.1 Aluminiumwerkstoffe		346
6.5.9.2	Kaltzähe Stahlsorten	280	7.1.1	Reinaluminium	346
6.5.10	Nichtrostende Stähle	281	7.1.2	Aluminium-Knetlegierungen	348
6.5.10.1	Einteilung der nichtrostenden Stähle	282	7.1.3	Aluminium-Gusslegierungen	350
6.5.10.2	Ferritische und halbferritische Chromstähle	282	7.1.4	Aluminiumschäume	353
6.5.10.3	Martensitische Chromstähle	285	7.1.4.1	Aufschäumprozesse	353
6.5.10.4	Austenitische Chrom-Nickel-Stähle	286	7.1.4.2	Eigenschaften von Aluminiumschäumen	354
6.5.10.5	Schweißtechnische Verarbeitung nichtrostender Stähle	289	7.1.5	Aushärten von Aluminiumlegierungen	355
6.5.11	Hitze- und zunderbeständige Stähle	290	7.1.5.1	Verfahren	356
6.5.11.1	Ferritische zunderbeständige Stähle	290	7.1.5.2	Innere Vorgänge	357
6.5.11.2	Austenitische zunderbeständige Stähle und Nickel-Chrom-Legierungen	291	7.1.6	Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen	359
6.5.12	Druckwasserstoffbeständige Stähle	292	7.1.6.1	Gießen	359
6.5.13	Automatenstähle	293	7.1.6.2	Umformen	359
6.5.14	Höherfeste Stähle für den Automobil-Leichtbau	295	7.1.6.3	Zerspanen	360
6.5.14.1	Mikrolegierte höherfeste Stähle	296	7.1.6.4	Schweißen	360
6.5.14.2	Phosphorlegierte Stähle	296	7.2 Magnesiumwerkstoffe		361
6.5.14.3	Bake-Hardening-Stähle	297	7.2.1	Eigenschaften des Magnesiums	361
6.5.14.4	IF-Stähle	297	7.2.2	Magnesiumlegierungen	361
6.5.14.5	Dualphasen-Stähle (DP-Stähle)	297	7.2.2.1	Magnesium-Gusslegierungen	362
6.5.14.6	Stähle mit Restaustenit	298	7.2.2.2	Magnesium-Knetlegierungen	363
6.5.14.7	Complexphasen-Stähle	299	7.2.3	Verarbeitung von Magnesiumlegierungen	365
6.5.14.8	Martensit-Phasen-Stähle	299	7.2.3.1	Gießen von Magnesiumlegierungen	365
6.5.14.9	TWIP-Stähle	299	7.2.3.2	Umformen von Magnesiumlegierungen	365
6.5.15	Höchstfeste Stähle	300	7.2.4	Entwicklungstendenzen	366
6.5.15.1	Höchstfeste Vergütungsstähle	300	7.3 Titan und Titanlegierungen		366
6.5.15.2	Martensitaushärtende Stähle (Maraging Steels)	301	7.4 Silicium		369
6.5.16	Werkzeugstähle	302	7.5 Kupferwerkstoffe		371
6.5.16.1	Anforderungen an Werkzeugstähle	302	7.5.1	Unlegiertes Kupfer	371
6.5.16.2	Erschmelzung von Werkzeugstählen	303	7.5.1.1	Sauerstoffhaltiges (zähgepoltes) Kupfer	372
6.5.16.3	Einteilung der Werkzeugstähle	303	7.5.1.2	Desoxidiertes Kupfer	374
6.5.16.4	Unlegierte Kaltarbeitsstähle	303	7.5.1.3	Sauerstofffreies Kupfer hoher Leitfähigkeit	374
6.5.16.5	Legierte Kaltarbeitsstähle	304	7.5.2	Niedriglegierte Kupferwerkstoffe	380
6.5.16.6	Warmarbeitsstähle	305	7.5.3	Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)	382
6.5.16.7	Schnellarbeitsstähle	307	7.5.4	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber)	384
6.6 Eisengusswerkstoffe		313	7.5.5	Kupfer-Zinn-Legierungen (Bronzen)	384
6.6.1	Einteilung der Eisengusswerkstoffe	313	7.5.6	Kupfer-Nickel-Legierungen	386
6.6.2	Stahlguss	314	7.5.7	Kupfer-Aluminium-Legierungen	387
6.6.2.1	Gießbarkeit von Stahlguss	315	7.5.8	Kupfer-Mangan-Legierungen (Manganbronzen)	388
6.6.2.2	Wärmebehandlung von Stahlguss	315	7.5.9	Kupfer-Blei-Legierungen (Bleibronzen)	388
6.6.2.3	Stahlgussorten	315	7.5.10	Kupfer-Silicium-Legierungen	388
6.6.3	Gusseisenwerkstoffe	319	7.6 Nickel		389
6.6.3.1	Erschmelzung von Gusseisenwerkstoffen	319	7.6.1	Eigenschaften von Nickel	389
6.6.3.2	Gusseisendiagramme	319	7.6.2	Nickel-Legierungen und deren Anwendungen	390

7.7	Zinkwerkstoffe	394	8.3.2.2	Normung von Magnesiumwerkstoffen nach ASTM	437
7.7.1	Zink-Knetlegierungen	395	8.3.3	Normung von Kupferwerkstoffen	437
7.7.2	Zink-Gusslegierungen	395	8.3.3.1	Unlegiertes Kupfer	437
7.8	Zinn	396	8.3.3.2	Kupferlegierungen	437
7.8.1	Eigenschaften von Zinn	396			
7.8.2	Weichlote	396			
7.8.3	Gleitlagerwerkstoffe	397			
7.9	Blei	398			
7.9.1	Gewinnung und Eigenschaften von Blei	398			
7.9.2	Bleiwerkstoffe	398			
7.10	Technisch weniger bedeutsame Metalle	399			
7.10.1	Alkali- und Erdalkalimetalle	399			
7.10.2	Erdmetalle bzw. die Bor-Gruppe	401			
7.10.3	Kohlenstoff-Gruppe	402			
7.10.4	Metalle der Stickstoff-Gruppe	403			
7.10.5	Metalle der Sauerstoff-Gruppe	404			
7.10.6	Silber und Gold	405			
7.10.7	Metalle der 2. Nebengruppe	406			
7.10.8	Scandium, Yttrium und die Seltenerdmetalle	406			
7.10.9	Metalle der 4. Nebengruppe	407			
7.10.10	Metalle der 5. Nebengruppe	408			
7.10.11	Metalle der 6. Nebengruppe	409			
7.10.12	Mangan und Cobalt	410			
7.10.13	Platinmetalle	411			
7.10.14	Thorium und Uran	412			
7.11	Verbundwerkstoffe	412			
7.11.1	Einteilung der Verbundwerkstoffe	412			
7.11.2	Metal Matrix Composites (MMC)	413			
7.11.2.1	Herstellung von MMC	414			
7.11.2.2	Eigenschaften von MMC	414			
7.11.3	Werkstoffverbunde	415			
8	Normung und Benennung metallischer Werkstoffe				
8.1	Stahlnormung	417			
8.1.1	Stahlnormung durch Kurznamen	417			
8.1.1.1	Kennzeichnung der Stähle nach der Verwendung oder den mechanischen sowie physikalischen Eigenschaften	419			
8.1.1.2	Kennzeichnung der Stähle nach der chemischen Zusammensetzung	419			
8.1.2	Stahlnormung durch Werkstoffnummern	425			
8.2	Normung von Gusseisenwerkstoffen ..	427			
8.2.1	Normung durch Kurzzeichen	427			
8.2.2	Normung durch Werkstoffnummern ..	428			
8.3	Normung von Nichteisenmetallen (NE-Metalle)	429			
8.3.1	Normung von Aluminiumwerkstoffen ..	429			
8.3.1.1	Aluminium-Knetwerkstoffe	430			
8.3.1.2	Aluminium-Gusswerkstoffe	434			
8.3.2	Normung von Magnesiumwerkstoffen ..	435			
8.3.2.1	Normung von Magnesiumwerkstoffen nach DIN EN 1754	435			
9	Kunststoffe				
9.1	Eigenschaften der Kunststoffe	440			
9.2	Geschichtliche Entwicklung	441			
9.3	Herstellung der Kunststoffe	442			
9.3.1	Ausgangsstoffe zur Kunststoffherstellung	443			
9.3.2	Prinzipien der Kunststoffherstellung ..	444			
9.3.2.1	Polymerisation und Polymerisate	444			
9.3.2.2	Polykondensation und Polykondensate ..	452			
9.3.2.3	Polyaddition und Polyaddukte	457			
9.3.3	Spezialkunststoffe	458			
9.3.4	Faserverstärkte Kunststoffe	459			
9.4	Einteilung und struktureller Aufbau der Kunststoffe	461			
9.4.1	Thermoplaste (Plastomere)	462			
9.4.1.1	Amorphe Thermoplaste	462			
9.4.1.2	Teilkristalline Thermoplaste	462			
9.4.2	Duroplaste (Duromere)	466			
9.4.3	Elastomere	466			
9.4.4	Thermoplastische Elastomere	467			
9.5	Mechanisch-thermisches Verhalten der Kunststoffe	467			
9.5.1	Charakterisierung der Zustandsbereiche ..	468			
9.5.1.1	Energieelastischer Bereich	469			
9.5.1.2	Nebenerweichungsbereich (NEB)	469			
9.5.1.3	Haupterweichungsbereich (HEB)	469			
9.5.1.4	Entropieelastischer Bereich	470			
9.5.1.5	Fließbereich	470			
9.5.2	Amorphe Thermoplaste	471			
9.5.3	Teilkristalline Thermoplaste	471			
9.5.4	Duroplaste	472			
9.5.5	Elastomere	472			
9.5.6	Thermoplastische Elastomere	473			
9.6	Normung und Bezeichnung von Kunststoffen	474			
9.6.1	Allgemeine Kennzeichnung von Kunststoffen	474			
9.6.1.1	Kurzzeichen für Homopolymere und chemisch modifizierte polymere Naturstoffe	474			
9.6.1.2	Copolymere und Polymergemische	475			
9.6.1.3	Kennzeichnung besonderer Eigenschaften	475			
9.6.1.4	Kennzeichnung von Zusatzstoffen	476			
9.6.2	Kennzeichnung thermoplastischer Formmassen	476			
9.6.3	Kennzeichnung von Duroplasten	477			
9.6.4	Kennzeichnung von Elastomeren	478			
9.7	Verarbeitung von Kunststoffen	479			
9.7.1	Zuschlagstoffe	479			
9.7.2	Urformen und Umformen	479			

9.7.2.1	Formpressen	480	10.8	Elektro- und Magnetkeramik	517
9.7.2.2	Spritzgießen	480	10.8.1	Elektrokeramik	517
9.7.2.3	Extrudieren	481	10.8.1.1	Trägerkörper	517
9.7.2.4	Kalandrieren	481	10.8.1.2	Dielektrische keramische Werkstoffe	518
9.7.2.5	Umformen	482	10.8.1.3	Kaltleiter	518
9.7.3	Mechanische Bearbeitung	482	10.8.1.4	Heißeleiter	518
9.7.4	Verarbeitung aus Lösungen und Dispersionen	484	10.8.1.5	Piezokeramik	519
9.7.4.1	Lacke	485	10.8.1.6	Keramische Supraleiter	520
9.7.4.2	Klebstoffe	485	10.8.2	Magnetkeramik	521
9.7.5	Additive Fertigung	486	10.8.2.1	Dauermagnetische Ferrite (Hartferrite)	521
9.8	Kunststoffe und Umwelt	488	10.8.2.2	Weichmagnetische Ferrite	522
10	Keramische Werkstoffe		10.9	Herstellungs- und Bearbeitungs- verfahren für keramische Werkstoffe	523
10.1	Einordnung keramischer Werkstoffe	490	10.9.1	Rohstoffgewinnung	525
10.2	Eigenschaften keramischer Werkstoffe	490	10.9.2	Massenaufbereitung	525
10.2.1	Allgemeine Eigenschaften	490	10.9.3	Formgebung	525
10.2.2	Physikalische Eigenschaften	491	10.9.4	Trocknen und Ausheizen	528
10.2.3	Mechanische Eigenschaften	492	10.9.5	Grün- und Weißbearbeitung, Vorbrand	528
10.2.3.1	Festigkeit und Hochtemperaturfestigkeit	492	10.9.7	Endbearbeitung (Hartbearbeitung)	530
10.2.3.2	Härte	493	10.10	Nanokeramik	530
10.2.3.3	Verformbarkeit und Zähigkeit	493	11	Korrosion und Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe	
10.2.4	Thermische Eigenschaften	494	11.1	Einteilung und Übersicht	531
10.2.4.1	Wärmeausdehnung und Temperatur- wechselbeständigkeit	494	11.2	Elektrochemische Korrosion	531
10.2.4.2	Wärmeleitfähigkeit	494	11.2.1	Lösungstension	532
10.2.5	Elektrische und magnetische Eigenschaften	495	11.2.2	Elektrochemische Spannungsreihe	532
10.2.5.1	Elektrische Leitfähigkeit	495	11.2.3	Stromdichte-Potenzial-Kurven	534
10.2.5.2	Dielektrisches Verhalten	495	11.2.4	Wasserstoffkorrosion	535
10.2.6	Chemische Eigenschaften	496	11.2.5	Sauerstoffkorrosion	535
10.3	Einteilung keramischer Werkstoffe	496	11.3	Rost	536
10.4	Innere Struktur und Gefüge keramischer Werkstoffe	497	11.4	Erscheinungsformen der Korrosion	537
10.5	Silicatkeramische Werkstoffe	498	11.5	Korrosionsschutz	538
10.5.1	Technisches Porzellan	499	11.5.1	Passiver Korrosionsschutz	539
10.5.2	Steatit	500	11.5.1.1	Überzüge mit Metalloxiden	539
10.5.3	Cordieritkeramik	500	11.5.1.2	Überzüge mit edleren Metallen	540
10.6	Oxidkeramische Werkstoffe	501	11.5.1.3	Überzüge mit unedleren Metallen	541
10.6.1	Aluminiumoxid (Al_2O_3)	501	11.5.1.4	Überzüge mit Nichtmetallen	541
10.6.2	Zirconiumdioxid (ZrO_2)	503	11.5.2	Aktiver Korrosionsschutz	542
10.6.3	Aluminiumtitanat (Al_2TiO_5)	505	11.5.3	Konstruktive Maßnahmen	543
10.6.4	Magnesiumoxid (MgO)	507	12	Tribologie	
10.6.5	Weitere oxidkeramische Werkstoffe	507	12.1	Tribosysteme	545
10.7	Nichtoxidkeramische Werkstoffe	507	12.1.1	Aufbau eines Tribosystems	545
10.7.1	Keramische Werkstoffe aus elementaren Stoffen	509	12.1.2	Funktion eines Tribosystems	546
10.7.2	Metallische Hartstoffe	510	12.2	Hauptgebiete der Tribologie	546
10.7.2.1	Carbide	510	12.2.1	Reibung	546
10.7.2.2	Nitride	510	12.2.1.1	Reibungsarten	547
10.7.2.3	Boride	511	12.2.1.2	Reibungsmechanismen bei Festkörperreibung	547
10.7.2.4	Silicide	511	12.2.1.3	Reibungszustände in geschmierten Gleitpaarungen	548
10.7.3	Nichtmetallische Hartstoffe	511	12.2.2	Schmierung und Schmierstoffe	549
10.7.3.1	Siliciumcarbid (SiC)	511	12.2.2.1	Schmieröle	550
10.7.3.2	Siliciumnitrid (Si_3N_4)	514	12.2.2.2	Schmierfette	552
10.7.3.3	Bornitrid (BN)	516	12.2.2.3	Festschmierstoffe	553
10.7.3.4	Borcarbid (B_4C)	517			

12.2.3	Verschleiß	553	13.4.4	Torsions- oder Verdrehversuch	600
12.2.3.1	Verschleißmechanismen	553	13.4.5	Scherversuch	601
12.2.3.2	Verschleißarten	557	13.4.6	Härteprüfungen	602
12.3	Verschleißbeständige (tribotechnische) Werkstoffe	559	13.4.6.1	Einteilung der Härteprüfverfahren	602
12.3.1	Verwendung von Stählen bzw. Stahlguss mit hoher Verschleißbeständigkeit	559	13.4.6.2	Statische Härteprüfverfahren	603
12.3.2	Oberflächenschutzschichten	559	13.4.6.3	Dynamische Härteprüfverfahren	613
12.3.3	Verwendung verschleißbeständiger Werkstoffe	562	13.4.7	Zähigkeitsprüfverfahren	615
13	Werkstoffprüfung		13.4.7.1	Zähigkeit	615
13.1	Aufgaben der Werkstoffprüfung	563	13.4.7.2	Sicherheitsrelevanz der Zähigkeit	616
13.2	Einteilung der Werkstoffprüfverfahren	564	13.4.7.3	Spröder und zäher Gewaltbruch	616
13.3	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren	565	13.4.7.4	Einflussfaktoren auf die Zähigkeit	617
13.3.1	Eindringprüfung	565	13.4.7.5	Verfahren der Zähigkeitsprüfung	618
13.3.2	Magnetische und induktive Prüfverfahren	566	13.4.8	Schwingfestigkeitsversuche	623
13.3.2.1	Magnetische Streuflussverfahren	567	13.4.8.1	Entstehung von Schwingrissen	625
13.3.2.2	Wirbelstromprüfung	568	13.4.8.2	Ermüdungsbruchflächen	626
13.3.3	Ultraschallprüfungen	569	13.4.8.3	Versuche zum Ermüdungsverhalten	626
13.3.4	Durchstrahlungsverfahren	576	13.4.8.4	Einstufige Schwingfestigkeitsversuche (Wöhlerversuche)	627
13.3.4.1	Werkstoffprüfung mit Röntgenstrahlen	576	13.4.8.5	Betriebsfestigkeitsversuche	630
13.3.4.2	Werkstoffprüfung mit Gammastrahlen	579	13.4.8.6	Schwingprüfmaschinen	632
13.3.4.3	Nachweis von Röntgen- und Gammastrahlung	580	13.4.9	Zeitstandversuch	633
13.3.4.4	Prüfbare Probendicken	581	13.4.9.1	Durchführung von Zeitstandversuchen	633
13.3.4.5	Vergleich zwischen Röntgen- und Gammastrahlen	581	13.4.9.2	Werkstoffkennwerte	634
13.3.5	Vergleich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfverfahren	581	13.4.9.3	Spannungsrelaxation	635
13.4	Mechanische Werkstoffprüfverfahren	583	13.5	Technologische Prüfungen	636
13.4.1	Zugversuch	584	13.5.1	Tiefungsversuch nach <i>Ericksen</i>	637
13.4.1.1	Versuchsdurchführung	584	13.5.2	Näpfchen-Tiefziehprüfung nach <i>Swift</i>	637
13.4.1.2	Probengeometrie	585	13.5.3	Technologischer Biegeversuch	638
13.4.1.3	Spannungs-Dehnungs-Diagramme	586	13.5.4	Stirnabschreckversuch nach <i>Jominy</i>	638
13.4.1.4	Ermittlung von Werkstoffkennwerten im Zugversuch	589	13.6	Mechanische Prüfverfahren für Kunststoffe	640
13.4.1.5	Bruchvorgänge, Bruchformen und Bruchflächen	594	13.6.1	Zugversuch an Kunststoffen	642
13.4.2	Druckversuch	597	13.6.1.1	Probengeometrie	642
13.4.3	Biegeversuch	599	13.6.1.2	Versuchsdurchführung	642
			13.6.1.3	Kennwerte	642
			13.6.2	Härteprüfung an Kunststoffen	644
			13.6.2.1	Kugeleindruckversuch	646
			13.6.2.2	Härteprüfung nach <i>Shore</i> an Kunststoffen	648
			13.6.2.3	Internationaler Gummihärtegrad (IRHD)	648
			13.6.3	Charpy-Schlagversuch nach ISO	649
			Sachwortverzeichnis	651	

1 Werkstofftechnologie in Industrie und Wirtschaft

1.1 Werkstoffe und Werkstofftechnik

Werkstoffe prägen die Entwicklung der Menschheit, denn nur mit ihnen ist es möglich, Werkzeuge zu erschaffen. So ist es verständlich, dass ganze Zeitepochen nach Werkstoffen benannt werden, wie die Stein-, Kupfer-, Bronze- oder die Eisenzeit (Bild 1).

Werkstoffe müssen aus Rohstoffen gewonnen 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 Raumfahrttechnik unverzichtbar.

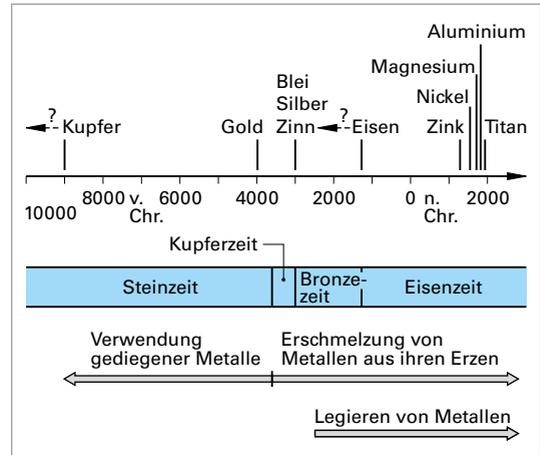


Bild 1: Nutzung wichtiger metallischer Werkstoffe

Die **Werkstofftechnik** ist der 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 wissenschaftlicher Methoden, um die Eigenschaften der Werkstoffe zu bestimmen und zu deuten, neue Werkstoffe zu entwickeln oder bestehende zu verbessern. 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. Werkstofftechnik und -wissenschaft gehören zu den Schlüsseltechnologien für andere technische Bereiche, wie Verkehrs-, Energie- und Kommunikationstechnik. Die Umsetzung technischer Entwicklungen ist nur mit geeigneten Werkstoffen möglich. Manchmal müssen vorhandene Werkstoffe den Anforderungen angepasst oder sogar neue entwickelt werden.

1.2 Bedeutung der Werkstofftechnik

Bild 2 zeigt, dass der Verbrauch wichtiger Werkstoffe ständig zunimmt. Die Verfügbarkeit geeigneter Werkstoffe hat die Entwicklung der Technik erst ermöglicht, dies gilt 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.

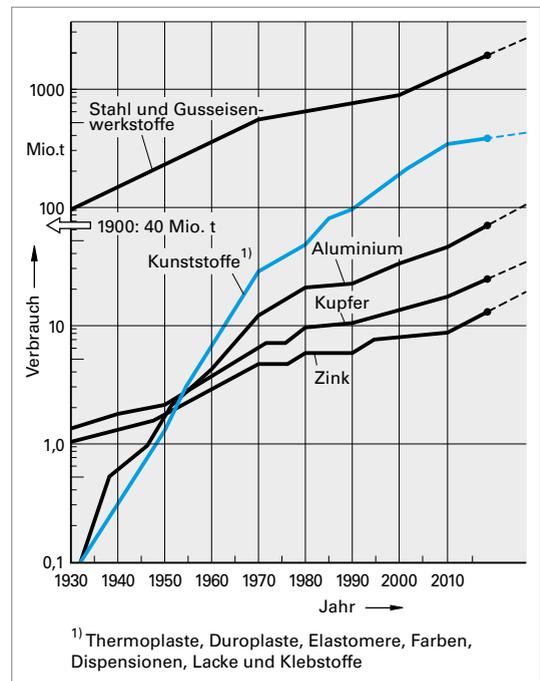


Bild 2: Weltverbrauch wichtiger Werkstoffe

Der Konstrukteur muss für sein Bauteil einen aufgrund seiner Eigenschaften geeigneten Werkstoff auswählen und ein geeignetes wirtschaftliches Fertigungsverfahren finden.

Die Entdeckung technisch bedeutsamer Eigenschaften, wie z. B. die **Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL)** bei einigen keramischen Stoffen, führt nicht unmittelbar zu neuen Werkstoffen. Es ist notwendig, weitere Eigenschaften, insbesondere die Verarbeitbarkeit, so zu verbessern, dass neue, gut nutzbare **Werkstoffe** entstehen. Aber auch altbekannte Werkstoffe, wie das seit 4000 Jahren bekannte Kupfer, werden ständig weiterentwickelt und verbessert, um die Verwendungsmöglichkeiten zu erweitern und die Sicherheit und Verfügbarkeit technischer Systeme zu erhöhen.

1.3 Wirtschaftliche Aspekte der Werkstofftechnik

Der Preis eines Werkstoffes entscheidet maßgeblich über seinen Einsatz und mögliche Anwendungen. So werden für Massenwendungen meist preiswertere Werkstoffe den technisch überlegenen, aber teureren vorgezogen.

Der Preis eines Werkstoffes muss immer im Zusammenhang mit seinem Nutzen gesehen werden. Für die Entscheidung über den Einsatz eines Werkstoffes sind außerdem 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 sind 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.

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 Fertigungsprozesse 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, Seite 13, werden die Begriffe erläutert und einige Beispiele genannt.

i 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 Atomen 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 Nb₃Sn 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.

Im Fokus der Materialforschung steht die Entwicklung von Werkstoffen mit höheren Sprungtemperaturen, den **Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL)**. Erst dadurch kann die Supraleitung auf breitem Gebiet wirtschaftlich eingesetzt werden. Heute kennt man über 100 HTSL-Verbindungen (Kapitel 10.8.1.6, Seite 520).

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.).

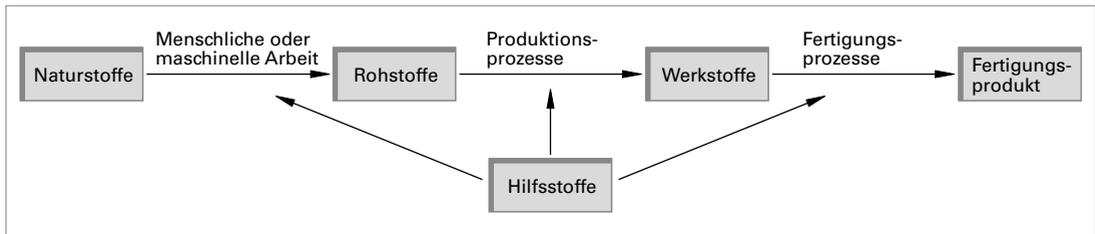


Bild 1: Zusammenhang zwischen den Begriffen Naturstoff, Rohstoff, Werkstoff und Hilfsstoff

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, gefördert 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:

- 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.
- 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.
- 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.
- Recyclbarkeit.** Im Zusammenhang von Ökologie und Nachhaltigkeit ist ein effizienter Einsatz von Rohstoffen notwendig. Angesichts der Forderungen nach dem sinnvollen Einsatz von begrenzt verfügbaren Ressourcen sind stets die Recycleeigenschaften eines Werkstoffes zu beachten. Das Recycling beinhaltet die erneute Nutzung bereits gebrauchter Werkstoffe. Es ist umso leichter durchzuführen, je besser ein Werkstoff aus einer Konstruktion wieder herausgelöst werden kann. Beispiel: Ein Gussteil aus einer Aluminiumlegierung kann leicht demontiert und wieder eingeschmolzen werden. Handelt es sich jedoch um einen Verbundwerkstoff, z. B. eine mit Metall bedampfte Kunststoffolie, erfordert das Recycling deutlich aufwendigere Schritte.

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 vielen neuen Werkstoffen.

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.

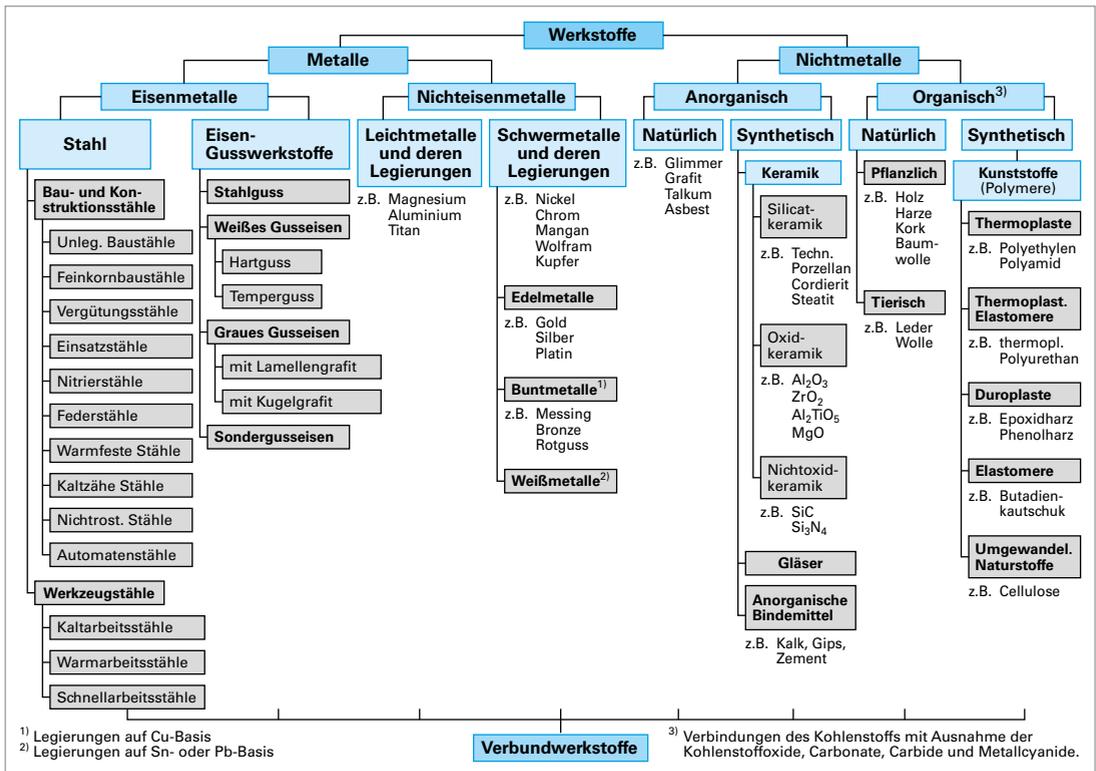


Bild 1: Einteilung der Werkstoffe

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 Reinelemente 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-nichtmetalli-

schen Werkstoffe sind die **Kunststoffe**. Von den anorganisch-nichtmetallischen Werkstoffen haben die **Keramiken** die größte Bedeutung.

Verbundwerkstoffe entstehen durch eine vorteilhafte 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 metalledrahtverstärktes 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.

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. 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 untersucht werden.

Alle gewonnenen Werte bilden heute die Basis für Computersimulationen und Modellierungen, mit deren Hilfe die Werkstoffentwicklung optimiert werden kann. Auf diese Weise ergeben sich bei der Entwicklung maßgeschneiderter Werkstoffe deutliche Zeit- und Kostenvorteile.

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.

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

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.

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, Seite 563) 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 Schliffe), Analysemethoden und mikroskopische Auswerteverfahren 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 durch das Herstellungsverfahren und die Verarbeitung verändert, aber auch gezielt beeinflusst werden kann. Einige wichtige Werkstoffeigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Wichtige Werkstoffeigenschaften

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

Die **mechanischen Eigenschaften** von Werkstoffen werden durch genormte Werkstoffprüfverfahren ermittelt (Kapitel 13.4, Seite 583). 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 ausgeprägte 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 13.4.1, Seite 584) 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 Umformeigenschaften und die Eignung zum Schweißen, Löten oder Härten. Die Ergebnisse dieser technologischen Prüfverfahren können einfache Ja-Nein-Aussagen oder auch Zahlenwerte sein. 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 und häufig die Korrosionsbeständigkeit.

Werden aus Werkstoffen Bauteile konstruiert, so sind die mechanischen Eigenschaften die wichtigsten Kriterien bei der Werkstoffauswahl. Gute mechanische Eigenschaften sind aber meist nur ein Kriterium, fast immer werden weitere Anforderungen gestellt, beispielsweise eine 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 1, Seite 18).

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

Aufgrund der begrenzten Ressourcen und des gestiegenen 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 zu recyceln, was neben dem höheren Preis und der oft schlechteren Bearbeitbarkeit einer der Gründe dafür ist, dass Verbundwerkstoffe seltener eingesetzt werden.

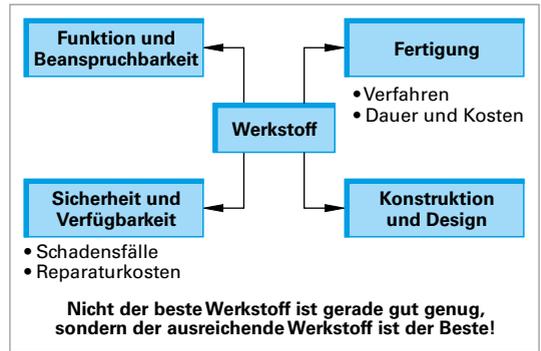


Bild 1: Bedeutung der Werkstoffauswahl

2 Grundlagen der Metallkunde

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

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 existierte bereits eine durchaus hochentwickelte Metalltechnik lang bevor die chemischen und physikalischen Zusammenhänge verstanden wurden.

Die eigentliche wissenschaftliche Erforschung der Metalle begann im 19. Jahrhundert. Die Einführung fundierter Untersuchungsverfahren brachte einen großen Aufschwung. Mittlerweile können, insbesondere 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.

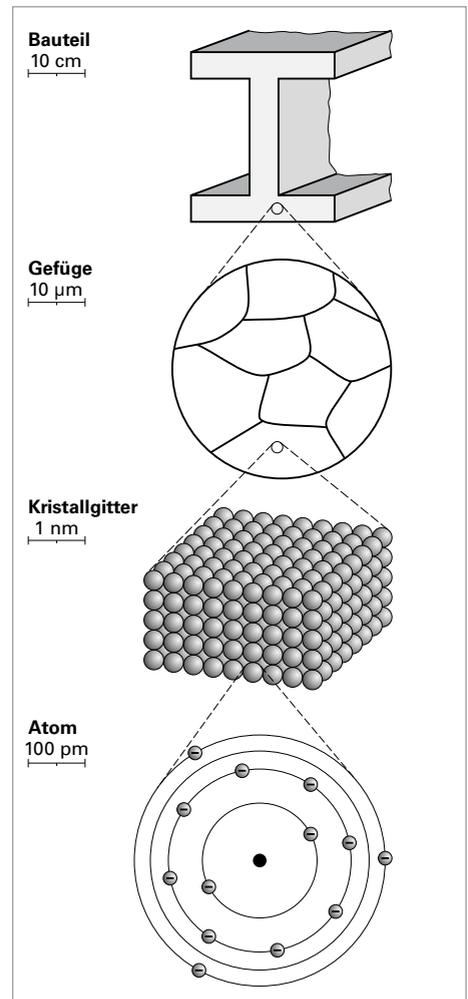


Bild 2: Strukturebenen eines Metalls

2.1 Aufbau der Metalle

Um die Eigenschaften eines Werkstoffes zu verstehen, ist es notwendig, seinen 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, d. h. bleibend verformbar. Aber allein aus der Betrachtung eines Bauteils, wie z. B. eines Aluminiumstrangpressteils (Bild 2, Seite 18), können keine Rückschlüsse über seinen inneren Aufbau erfolgen. Mikroskopische Aufnahmen 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. Der kristalline Aufbau eines metallischen Werkstoffes kann z. B. durch Röntgenfeinstrukturuntersuchungen ermittelt werden.

Zwischen den einzelnen Körnern befinden sich die **Korngrenzen**. Sie erscheinen aufgrund der Größenverhältnisse als unregelmäßige Linien, da die Korndurchmesser etwa 10 000 Atomdurchmessern entsprechen und daher die atomaren Begrenzungen der Körner nicht zu sehen sind.

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

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).

Die Atome wurden bis zum Ende des 19. Jahrhunderts als unteilbar angesehen. Als aber noch kleinere Teilchen entdeckt wurden, die offensichtlich Bestandteile der Atome sind, entstanden neue, verfeinerte Atommodelle. Doch das einfache Kugelmodell kann auch heute zur Veranschaulichung der Kristallstruktur von Metallen benutzt werden. Die Erklärung anderer Erscheinungen und chemischer Reaktionen erfordert jedoch detailliertere Atommodelle.

Das **Rutherford'sche Atommodell (Sir Ernest Rutherford, 1871–1957)** ermöglicht die Erklärung der Bindungsverhältnisse zwischen Atomen. Atome bestehen danach aus den Elementarteilchen **Protonen, Neutronen** und **Elektronen**. Die elektrisch positiv geladenen Protonen und die neutralen Neutronen bilden den **Atomkern**, die negativ geladenen Elektronen die **Atomhülle**. Im

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
- Orbitalmodell: elektrische Leitfähigkeit

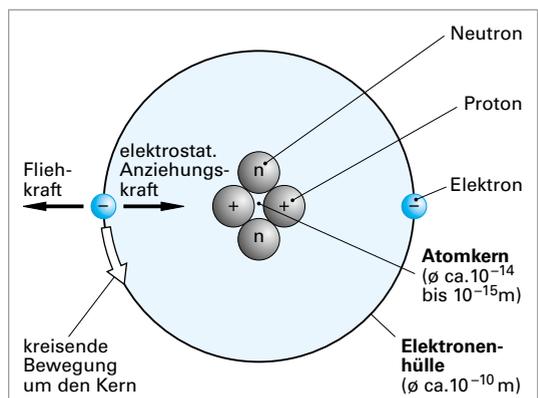


Bild 1: Atommodell nach Rutherford für Helium (zwei Protonen)

Kern ist nahezu die gesamte Masse des Atoms konzentriert (Bild 1, Seite 19). 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 bestimmte Anzahl von Protonen, die bei neutralen Atomen gleich der Anzahl der Elektronen ist. Bei positiv geladenen Atomen, den **Kationen**, ist die Elektronenzahl kleiner als die Protonenzahl. Bei negativ geladenen Atomen, den **Anionen**, ist sie größer. Alle Atome eines Elements haben die gleiche **Protonenzahl**, die auch als **Kernladungszahl** oder **Ordnungszahl** bezeichnet wird (Kapitel 2.2.2, Seite 21, Periodensystem der Elemente).

Die Anzahl der Neutronen der Atome eines Elements kann unterschiedlich sein. Die Atome eines Elements mit gleicher Protonenzahl, aber unterschiedlicher Neutronenzahl, werden **Isotope** genannt.

Eine übliche Schreibweise für Isotope besteht aus dem chemischen Symbol, d. h. der Abkürzung des Elementnamens und der **Massenzahl**, z. B. ^{60}Co . Die Anzahl der Neutronen lässt sich bei Kenntnis der Ordnungszahl (Protonenzahl) berechnen, z. B. für Cobalt: $60 - 27$ (Protonen) = 33 (Neutronen)

Die **Atommasse** eines Elements ergibt sich aus der Summe der Massenanteile der Isotope.

Bei **chemischen Reaktionen** kommt es nur zu Veränderungen in der Elektronenhülle der Atome. Die Elektronenhülle ist daher für die Chemie und die Werkstoffkunde von besonderer Bedeutung. Der Aufbau der Elektronenhülle kann sowohl durch das **Bohrsche Atommodell** als auch durch das leistungsfähigere **Orbitalmodell** beschrieben werden.

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

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

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

Ein besonders stabiler Zustand wird erreicht, wenn die äußere Schale mit acht Elektronen besetzt ist (**Oktettregel**). Dies ist der Fall bei den Edelgasen Neon, Argon, Krypton, Xenon und Radon, die sehr reaktionsträge sind. Auch Helium ist chemisch inert, denn seine äußere Schale $n = 1$ ist mit 2 Elektronen vollständig besetzt.

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
Ruheru- masse ¹⁾	$9,11 \cdot 10^{-31}$ kg = 0,00055 u	$1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg = 1,00728 u	$1,6748 \cdot 10^{-27}$ kg = 1,00867 u
¹⁾ 1 u = atomare Masseneinheit. Sie ist festgelegt als $1/12$ der absoluten Masse des Kohlenstoffisotops ^{12}C ($1 \text{ u} = 1,6606 \cdot 10^{-27}$ kg).			

Information

Atombau

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

Protonen sind positiv und Elektronen negativ geladen. Im elektroneutralen Atom kompensieren sich die Ladungen.

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

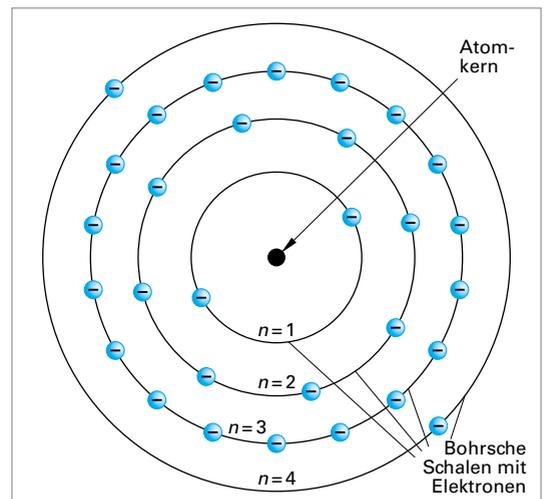


Bild 1: Bohrsches Atommodell von Zink