



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 1

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, 42799 Leichlingen

Druck: M.P. Media-Print Informationstechnologie GmbH, 33100 Paderborn

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) dankbar entgegen.

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 Werkstoffeinteilung	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	Eigenschaften der Werkstoffe	16
1.6	Werkstoffauswahl	17

2 Grundlagen der Metallkunde

2.1	Aufbau der Metalle	18
2.2	Atombau und Periodensystem der Elemente	19
2.2.1	Bau der Atome	19
2.2.2	Periodensystem der Elemente (PSE)	20
2.3	Chemische Bindungen	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	Gitteraufbau der Metalle	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	Realkristalle und Gitterbaufehler	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	Gefüge	40
2.7	Anisotropie und Textur	42
2.8	Elastische und plastische Verformung	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	Verfestigungsmechanismen	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	Thermische aktivierte Prozesse	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	Grundlagen der Legierungskunde	
3.1	Aggregatzustände und Phasen	71
3.2	Phasenumwandlungen	71
3.3	Mischkristalle und Kristallgemische	72
3.3.1	Mischkristalle	72
3.3.2	Kristallgemische	73
3.4	Intermetallische Phasen und Überstrukturen	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
3.5	Zustandsdiagramme	75	4.5	Beschichten	118
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
4	Wechselwirkungen zwischen Werkstoffeigenschaften und Fertigungsverfahren		4.5.6.1	Plattieren	126
4.1	Urformen	87	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	4.6	Stoffeigenschaften ändern	130
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
4.2	Umformen	95	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
4.3	Trennen	100	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
4.4	Fügen	102	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 Werkstoffeigenschaften durch das Schweißen	104	4.6.7	Fotochemische Verfahren	135
4.4.2	Löten	113	5	Gewinnung, Formgebung und Recycling metallischer Werkstoffe und Legierungen	
4.4.2.1	Vor- und Nachteile des Lötens	113	5.1	Überblick zur Gewinnung metallischer Werkstoffe	136
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

5.2 Eisen- und Stahlerzeugung	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	6.4 Wärmebehandlung der Stähle	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
5.3 Erzeugung von Nichteisenmetallen	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
5.4 Legieren von Metallen	153	6.4.3.4 Rekristallisationsglühen	219
5.5 Formgebungsverfahren für metallische Werkstoffe	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
5.6 Recycling von metallischen Werkstoffen	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
6 Eisenwerkstoffe		6.4.4.10 Abschreckhärte	234
6.1 Reines Eisen	166	6.4.4.11 Härtespannungen	235
6.2 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	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 δ -Ferrit)	168	6.4.4.14 Zeit-Temperatur-Austenitisierungsdiagramme (ZTA-Diagramme)	242
6.2.1.2 Verbindungsphasen (Zementit und ϵ -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
6.3 Eisenbegleiter und Legierungselemente	181	6.4.6.3 Thermochemisches Behandeln	60
6.3.1 Begleitelemente und nichtmetallische Einschlüsse	182	6.5 Eigenschaften und Verwendung von Stählen	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	6.6	Eisengusswerkstoffe	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	Stahlgussarten	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	7	Nichteisenmetalle	
6.5.9.2	Kaltzähe Stahlarten	287	7.1	Aluminiumwerkstoffe	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	7.2	Magnesiumwerkstoffe	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	7.3	Titan und Titanlegierungen	374
6.5.16	Werkzeugstähle	309	7.4	Silicium	377
6.5.16.1	Anforderungen an Werkzeugstähle	309	7.5	Kupferwerkstoffe	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	8.2	Normung von Gusseisenwerkstoffen	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	8.3	Normung von Nichteisenmetallen (NE-Metalle)	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
7.6	Nickel	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
7.7	Zinkwerkstoffe	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
7.8	Zinn	402	9	Kunststoffe	
7.8.1	Eigenschaften von Zinn	402	9.1	Bedeutung der Kunststoffe	445
7.8.2	Weichlote	403	9.2	Allgemeine Eigenschaften	445
7.8.3	Gleitlagerwerkstoffe	404	9.3	Geschichtliche Entwicklung	446
7.9	Blei	404	9.4	Herstellung der Kunststoffe	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
7.10	Technisch weniger bedeutsame Metalle	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	9.5	Einteilung und struktureller Aufbau der Kunststoffe	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	9.6	Mechanisch-thermisches Verhalten der Kunststoffe	470
7.10.14	Thorium und Uran	417	9.6.1	Charakterisierung der Zustandsbereiche	470
7.11	Verbundwerkstoffe	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
8	Normung und Benennung metallischer Werkstoffe		9.6.3	Teilkristalline Thermoplaste	473
8.1	Stahlnormung	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	9.7	Kennwerte, Eigenschaften und Anwendung ausgewählter Kunststoffe	475
8.1.2	Stahlnormung durch Werkstoffnummern	430	9.8	Normung und Bezeichnung von Kunststoffen	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
9.9	Verarbeitung von Kunststoffen	491	10.7.3.1	Siliciumcarbid (SiC)	522
9.9.1	Zuschlagstoffe	491	10.7.3.2	Siliciumnitrid (Si ₃ N ₄)	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 ₄ C)	527
9.9.2.2	Spritzgießen	492	10.8	Elektro- und Magnetkeramik	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
9.10	Kunststoffe und Umwelt	498	10.8.2	Magnetkeramik	531
			10.8.2.1	Dauermagnetische Ferrite (Hartferrite)	531
			10.8.2.2	Weichmagnetische Ferrite	532
			10.9	Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren für keramische Werkstoffe	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
			10.10	Künftige Entwicklungen	540
10	Keramische Werkstoffe		11	Korrosion und Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe	
10.1	Einordnung keramischer Werkstoffe	500	11.1	Einleitung und Übersicht	541
10.2	Eigenschaften keramischer Werkstoffe	501	11.2	Elektrochemische Korrosion	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	11.3	Rost	546
10.2.4	Thermische Eigenschaften	504	11.4	Erscheinungsformen der Korrosion	547
10.2.4.1	Wärmeausdehnung und Temperaturwechselbeständigkeit	504	11.5	Korrosionsschutz	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
10.3	Einteilung keramischer Werkstoffe	507	11.5.2	Aktiver Korrosionsschutz	551
10.4	Innere Struktur und Gefüge keramischer Werkstoffe	508	11.5.3	Konstruktive Maßnahmen	553
10.5	Silicatkeramische Werkstoffe	509	12	Tribologie	
10.5.1	Porzellan	510	12.1	Tribosysteme	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
10.6	Oxidkeramische Werkstoffe	512			
10.6.1	Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃)	512			
10.6.2	Zirkoniumoxid (ZrO ₂)	514			
10.6.3	Aluminiumtitanat (Al ₂ TiO ₅)	516			
10.6.4	Magnesiumoxid (MgO)	517			
10.6.5	Weitere oxidkeramische Werkstoffe	517			
10.7	Nichtoxidkeramische Werkstoffe	518			

12.2 Hauptgebiete der Tribologie	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
12.3 Verschleißbeständige (tribotechnische) Werkstoffe	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
13 Werkstoffprüfung		13.5.9 Zeitstandversuch	642
13.1 Einführung	572	13.5.9.1 Durchführung von Zeitstandversuchen	643
13.2 Aufgaben der Werkstoffprüfung	572	13.5.9.2 Werkstoffkennwerte	644
13.3 Einteilung der Werkstoffprüfverfahren	573	13.5.9.3 Spannungsrelaxation	45
13.4 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren 574		13.6 Technologische Prüfungen	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	13.7 Mechanische Prüfverfahren für Kunststoffe	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
13.5 Mechanische Werkstoffprüfverfahren	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	Englische Fachausdrücke	660
13.5.1.2 Versuchsdurchführung	594	Sachwortverzeichnis	676
13.5.1.3 Probengeometrie	594	Bildquellennachweis	697
13.5.1.4 Spannungs-Dehnungs-Diagramme	595	Anhang	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		