

# 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	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	18
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	31
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	37

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	43
2.8.2.1	Mechanismus der plastischen Verformung	44
2.8.2.2	Gleitebenen und Gleitsysteme	45
2.8.2.3	Schmid'sches 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

<b>3.4 Intermetallische Phasen und Überstrukturen 74</b>	4.4.2.3 Lötmechanismus . . . . .	113
3.4.1 Intermetallische Phasen . . . . .	4.4.2.4 Metallurgische Probleme beim Löten . . .	114
3.4.2 Überstrukturen . . . . .	4.4.2.5 Flussmittel, Lötatmosphären und Vakuum . . . . .	115
<b>3.5 Zustandsdiagramme . . . . . 75</b>	4.4.2.6 Lötwerkstoffe . . . . .	116
3.5.1 Binäre Zustandsdiagramme . . . . .	<b>4.5 Beschichten. . . . . 118</b>	
3.5.1.1 Erstellung binärer Zustandsdiagramme . .	4.5.1 Beschichten aus dem flüssigen Zustand .	119
3.5.1.2 Lesen binärer Zustandsdiagramme . . . .	4.5.1.1 Schmelztauchen . . . . .	119
3.5.1.3 Kristallseigerung und Zonenmischkristalle . . . . .	4.5.1.2 Emaillieren . . . . .	119
3.5.2 Grundtypen binärer Zustandsdiagramme.	4.5.1.3 Anstreichen und Lackieren . . . . .	120
3.5.2.1 Vollkommene Unlöslichkeit im festen und flüssigen Zustand . . . . .	4.5.2 Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand . . . . .	120
3.5.2.2 Vollkommene Löslichkeit im festen und flüssigen Zustand (Linsendiagramm) . . . .	4.5.2.1 Wirbelsintern . . . . .	120
3.5.2.3 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand (eutektisches Legierungssystem) 80	4.5.2.2 Thermisches Spritzen . . . . .	120
3.5.2.4 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und begrenzte Löslichkeit im festen Zustand (eutektisches Legierungssystem mit Mischungslücke) . . . . .	4.5.3 Beschichten durch Schweißen . . . . .	122
3.5.2.5 Peritektisches Zustandsdiagramm . . . .	4.5.4 Beschichten aus dem gas- oder dampf- förmigen Zustand . . . . .	123
3.5.3 Zustandsdiagramme mit Verbindungsbildung . . . . .	4.5.4.1 CVD-Verfahren . . . . .	123
3.5.4 Reale Zustandsdiagramme . . . . .	4.5.4.2 PVD-Verfahren . . . . .	124
3.5.5 Ternäre Zustandsdiagramme . . . . .	4.5.5 Beschichten aus dem ionisierten Zustand	125
	4.5.5.1 Galvanisches Beschichten . . . . .	125
	4.5.5.2 Chemisches Beschichten . . . . .	126
	4.5.6 Weitere Verfahren zur Erzeugung einer Oberflächenschicht . . . . .	126
	4.5.6.1 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
	<b>4.6 Stoffeigenschaften ändern . . . . . 130</b>	
	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
	4.6.2.1 Glühen . . . . .	132
	4.6.2.2 Härten . . . . .	132
	4.6.2.3 Isothermisches Umwandeln . . . . .	132
	4.6.2.4 Anlassen und Auslagern . . . . .	133
	4.6.2.5 Vergüten . . . . .	133
	4.6.2.6 Tiefkühlen . . . . .	133
	4.6.2.7 Thermochemisches Behandeln . . . . .	133
	4.6.2.8 Aushärten . . . . .	134
	4.6.3 Thermomechanisches Behandeln . . . . .	134
	4.6.4 Sintern und Brennen . . . . .	134
	4.6.5 Magnetisieren . . . . .	134
	4.6.6 Bestrahlen . . . . .	135
	4.6.7 Fotochemische Verfahren . . . . .	135
<b>4 Wechselwirkungen zwischen Werk- stoffeigenschaften und Fertigungs- verfahren</b>		
<b>4.1 Urformen . . . . . 87</b>		
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 Werkstoff- eigenschaften beim Gießen . . . . .		92
4.1.5 Herstellung (Züchten) von Einkristallen . .		94
<b>4.2 Umformen . . . . . 95</b>		
4.2.1 Kaltumformung . . . . .		96
4.2.2 Warmumformung . . . . .		97
4.2.3 Neue Umformverfahren . . . . .		98
<b>4.3 Trennen . . . . . 100</b>		
4.3.1 Zerteilen und Zerspanen . . . . .		100
4.3.2 Zerspanbarkeit . . . . .		101
4.3.3 Spanformen . . . . .		101
4.3.4 Automatenlegierungen . . . . .		101
<b>4.4 Fügen . . . . . 102</b>		
4.4.1 Schweißen . . . . .		102
4.4.1.1 Schweißbarkeit . . . . .		102
4.4.1.2 Einteilung der Schweißverfahren . . . . .		103
4.4.1.3 Beeinflussung der Werkstoffeigen- schaften durch das Schweißen . . . . .		104
4.4.2 Löten . . . . .		113
4.4.2.1 Vor- und Nachteile des Lötens . . . . .		113
4.4.2.2 Einteilung der Lötverfahren . . . . .		113
	<b>5 Gewinnung, Formgebung und Recycling metallischer Werkstoffe und Legierungen</b>	
	<b>5.1 Überblick zur Gewinnung metallischer Werkstoffe . . . . . 136</b>	
	5.1.1 Gewinnung metallischer Rohstoffe . . . . .	136
	5.1.2 Verfahren der Metallgewinnung . . . . .	137
	5.1.3 Raffinationsverfahren . . . . .	138
	5.1.4 Metallische Werkstoffe und deren Handelsformen . . . . .	138

<b>5.2 Eisen- und Stahlerzeugung</b> . . . . .	<b>139</b>	6.3.1.6 Sauerstoff (O) . . . . .	190
5.2.1 Hochofenprozess . . . . .	139	6.3.1.7 Wasserstoff (H) . . . . .	191
5.2.1.1 Hochofen . . . . .	141	6.3.1.8 Zusammenfassung der Wirkungsweisen von Begleitelementen in Stählen . . . . .	193
5.2.1.2 Reduktionsvorgang . . . . .	141	6.3.1.9 Nichtmetallische Einschlüsse . . . . .	193
5.2.1.3 Produkte des Hochofenprozesses . . . . .	144	6.3.2 Legierungselemente . . . . .	196
5.2.2 Direktreduktionsverfahren . . . . .	145	6.3.2.1 Allgemeine Wirkungsweisen von Legierungselementen in Stählen . . . . .	196
5.2.3 Stahlerzeugung . . . . .	146	6.3.2.2 Wirkungsweisen ausgewählter Legierungselemente . . . . .	203
5.2.3.1 Sauerstoffblasverfahren . . . . .	147	6.3.2.3 Wirkungsweise mehrerer Legie- rungselemente im Stahl . . . . .	211
5.2.3.2 Elektrolichtbogenofen-Verfahren . . . . .	149	<b>6.4 Wärmebehandlung der Stähle</b> . . . . .	<b>212</b>
5.2.3.3 Stahl-Sekundärmetallurgie . . . . .	150	6.4.1 Prinzip einer Wärmebehandlung	
<b>5.3 Erzeugung von Nichteisenmetallen</b> . . . . .	<b>151</b>	6.4.2 Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren . . . . .	214
5.3.1 Gewinnung von Aluminium . . . . .	151	6.4.3 Glühen . . . . .	214
5.3.2 Gewinnung weiterer Nichteisenmetalle . . . . .	153	6.4.3.1 Normalglühen von Stählen . . . . .	214
<b>5.4 Legieren von Metallen</b> . . . . .	<b>153</b>	6.4.3.2 Weichglühen von Stählen (Glühen auf kugelige Carbide) . . . . .	216
<b>5.5 Formgebungsverfahren für metallische Werkstoffe</b> . . . . .	<b>155</b>	6.4.3.3 Spannungsarmglühen . . . . .	218
5.5.1 Gießen . . . . .	155	6.4.3.4 Rekristallisationsglühen . . . . .	219
5.5.1.1 Formgießen . . . . .	155	6.4.3.5 Diffusionsglühen (Homogenisierungs- glühen) . . . . .	220
5.5.1.2 Gießen von Knetlegierungen . . . . .	158	6.4.3.6 Grobkornglühen (Hochglühen) . . . . .	222
5.5.2 Umformen . . . . .	160	6.4.4 Härten . . . . .	222
5.5.2.1 Walzen . . . . .	161	6.4.4.1 Geschichte der Stahlhärtung . . . . .	222
5.5.2.2 Durchdrücken . . . . .	162	6.4.4.2 Ziele der Stahlhärtung . . . . .	224
5.5.2.3 Freiform- und Gesenkschmieden . . . . .	162	6.4.4.3 Verfahren . . . . .	225
5.5.2.4 Ziehen . . . . .	163	6.4.4.4 Härtetemperatur . . . . .	225
<b>5.6 Recycling von metallischen Werkstoffen</b> <b>164</b>		6.4.4.5 Abkühlgeschwindigkeit und Gefügeausbildung . . . . .	225
5.6.1 Recycling von Stahl und Gusseisen . . . . .	165	6.4.4.6 Kritische Abkühlgeschwindigkeit . . . . .	232
5.6.2 Recycling von Nichtmetallen . . . . .	165	6.4.4.7 Kohlenstofflöslichkeit des Austenits . . . . .	233
		6.4.4.8 Temperaturbereich der Martensit- bildung . . . . .	233
		6.4.4.9 Restaustenit und Tiefkühlung . . . . .	234
		6.4.4.10 Abschreckhärte . . . . .	234
		6.4.4.11 Härtespannungen . . . . .	235
		6.4.4.12 Abschrecken und Abschreckmittel . . . . .	237
		6.4.4.13 Zeit-Temperatur-Umwandlungs- diagramme (ZTU-Diagramme) . . . . .	238
		6.4.4.14 Zeit-Temperatur-Austenitisierungs- diagramme (ZTA-Diagramme) . . . . .	242
		6.4.5 Anlassen und Vergüten . . . . .	245
		6.4.5.1 Innere Vorgänge beim Anlassen . . . . .	246
		6.4.5.2 Anlassen der legierten Stähle . . . . .	247
		6.4.5.3 Versprödungserscheinungen beim Anlassen von Stählen . . . . .	248
		6.4.5.4 Vergüten . . . . .	249
		6.4.6 Verfahren des Oberflächenhärtens . . . . .	254
		6.4.6.1 Einteilung der Oberflächenhärte- verfahren . . . . .	255
		6.4.6.2 Randschichthärteverfahren . . . . .	255
		6.4.6.3 Thermochemisches Behandeln . . . . .	260
		<b>6.5 Eigenschaften und Verwendung von Stählen</b> . . . . .	<b>272</b>
		6.5.1 Einteilung der Stähle . . . . .	272
		6.5.1.1 Einteilung der Stähle nach Hauptgüteklassen . . . . .	272

## 6 Eisenwerkstoffe

<b>6.1 Reines Eisen</b> . . . . .	<b>166</b>
<b>6.2 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen</b> . . . . .	<b>168</b>
6.2.1 Phasenausbildungen in Eisen- Kohlenstoff-Legierungen . . . . .	168
6.2.1.1 Mischkristalle (Ferrit, Austenit und $\delta$ -Ferrit) . . . . .	168
6.2.1.2 Verbindungsphasen (Zementit und $\epsilon$ -Carbid) . . . . .	170
6.2.1.3 Stabile Phase (Graphit) . . . . .	171
6.2.2 Eisen-Kohlenstoff-Zustands- diagramm . . . . .	171
6.2.2.1 Erstarrungsformen von Eisen- Kohlenstoff-Legierungen . . . . .	172
6.2.2.2 Aufbau des metastabilen Eisen- Kohlenstoff-Zustandsdiagramms . . . . .	173
6.2.2.3 Bezeichnungen im metastabilen System . . . . .	174
6.2.2.4 Erstarrungsvorgänge im metastabilen System . . . . .	174
6.2.2.5 Stahlecke des metastabilen Systems . . . . .	178
<b>6.3 Eisenbegleiter und Legierungs- elemente</b> . . . . .	<b>181</b>
6.3.1 Begleitelemente und nicht- metallische Einschlüsse . . . . .	182
6.3.1.1 Mangan (Mn) . . . . .	182
6.3.1.2 Silicium (Si) . . . . .	183
6.3.1.3 Phosphor (P) . . . . .	185
6.3.1.4 Schwefel (S) . . . . .	187
6.3.1.5 Stickstoff (N) . . . . .	188

6.5.1.2	Einteilung der Stähle nach dem Verwendungszweck	274
6.5.2	Unlegierte Baustähle	274
6.5.2.1	Anwendung unlegierter Baustähle	275
6.5.2.2	Normung und Gütegruppen unlegierter Baustähle	275
6.5.2.3	Technologische Eigenschaften unlegierter Baustähle	276
6.5.2.4	Werkstoffkundliche Besonderheiten unlegierter Baustähle	277
6.5.3	Schweißgeeignete Feinkornbaustähle	277
6.5.3.1	Werkstoffkundliche Grundlagen schweißgeeigneter Feinkornbaustähle	278
6.5.3.2	Stahlsorten und Gütegruppen	279
6.5.4	Federstähle	282
6.5.4.1	Anforderungen an metallische Federwerkstoffe	283
6.5.4.2	Federstahlsorten	283
6.5.5	Vergütungsstähle	284
6.5.6	Einsatzstähle	285
6.5.7	Nitrierstähle	285
6.5.8	Warmfeste Stähle	285
6.5.8.1	Anforderungen an warmfeste Stähle	285
6.5.8.2	Werkstoffverhalten und Werkstoffkennwerte bei erhöhter Temperatur	285
6.5.8.3	Warmfeste Stahlsorten	286
6.5.9	Kaltzähe Stähle	287
6.5.9.1	Werkstoffverhalten und Kennwerte bei tiefen Temperaturen	287
6.5.9.2	Kaltzähe Stahlsorten	287
6.5.10	Nichtrostende Stähle	288
6.5.10.1	Einteilung der nichtrostenden Stähle	289
6.5.10.2	Ferritische und halferritische Chromstähle	289
6.5.10.3	Martensitische Chromstähle	291
6.5.10.4	Austenitische Chrom-Nickel-Stähle	293
6.5.10.5	Schweißtechnische Verarbeitung nichtrostender Stähle	296
6.5.11	Hitze- und zunderbeständige Stähle	297
6.5.11.1	Ferritische zunderbeständige Stähle	297
6.5.11.2	Austenitische zunderbeständige Stähle und Nickel-Chrom-Legierungen	298
6.5.12	Druckwasserstoffbeständige Stähle	299
6.5.13	Automatenstähle	300
6.5.14	Höherfeste Stähle für den Automobil-Leichtbau	302
6.5.14.1	Mikrolegierte höherfeste Stähle	303
6.5.14.2	Phosphorlegierte Stähle	303
6.5.14.3	Bake-Hardening-Stähle	303
6.5.14.4	IF-Stähle	304
6.5.14.5	Dualphasen Stähle (DP-Stähle)	304
6.5.14.6	Stähle mit Restaustenit	305
6.5.14.7	Complexphasen-Stähle	305
6.5.14.8	Martensit-Phasen-Stähle	306
6.5.14.9	TWIP-Stähle	306
6.5.15	Höchstfeste Stähle	306
6.5.15.1	Höchstfeste Vergütungsstähle	307
6.5.15.2	Martensitahärtende Stähle (Maraging Steels)	307
6.5.16	Werkzeugstähle	309
6.5.16.1	Anforderungen an Werkzeugstähle	309
6.5.16.2	Erschmelzung von Werkzeugstählen	309

6.5.16.3	Einteilung der Werkzeugstähle	309
6.5.16.4	Unlegierte Kaltarbeitsstähle	310
6.5.16.5	Legierte Kaltarbeitsstähle	311
6.5.16.6	Warmarbeitsstähle	312
6.5.16.7	Schnellarbeitsstähle	314
<b>6.6</b>	<b>Eisengusswerkstoffe</b>	<b>320</b>
6.6.1	Einteilung der Eisengusswerkstoffe	320
6.6.2	Stahlguss	321
6.6.2.1	Gießbarkeit von Stahlguss	322
6.6.2.2	Wärmebehandlung von Stahlguss	322
6.6.2.3	Stahlgussorten	322
6.6.3	Gusseisenwerkstoffe	326
6.6.3.1	Erschmelzung von Gusseisenwerkstoffen	326
6.6.3.2	Gusseisendiagramme	326
6.6.3.3	Gusseisen mit Lamellengraphit	327
6.6.3.4	Gusseisen mit Kugelgraphit	333
6.6.3.5	Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit	336
6.6.3.6	Gusseisen mit Vermiculargraphit	337
6.6.3.7	Temperguss	338
6.6.3.8	Perlitischer Hartguss	344
6.6.3.9	Sondergusseisen	345

## 7 Nichteisenmetalle

<b>7.1</b>	<b>Aluminiumwerkstoffe</b>	<b>353</b>
7.1.1	Reinaluminium	353
7.1.2	Aluminium-Knetlegierungen	354
7.1.3	Aluminium-Gusslegierungen	357
7.1.4	Aluminiumschäume	360
7.1.4.1	Aufschäumprozesse	360
7.1.4.2	Eigenschaften von Aluminiumschäumen	361
7.1.5	Aushärten von Aluminiumlegierungen	363
7.1.5.1	Verfahren	363
7.1.5.2	Innere Vorgänge	364
7.1.6	Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen	366
7.1.6.1	Gießen	366
7.1.6.2	Umformen	367
7.1.6.3	Zerspanen	367
7.1.6.4	Schweißen	368
<b>7.2</b>	<b>Magnesiumwerkstoffe</b>	<b>368</b>
7.2.1	Eigenschaften von Magnesium	368
7.2.2	Magnesiumlegierungen	369
7.2.2.1	Magnesium-Gusslegierungen	370
7.2.2.2	Magnesium-Knetlegierungen	370
7.2.3	Verarbeitung von Magnesiumlegierungen	372
7.2.3.1	Gießen von Magnesiumlegierungen	372
7.2.3.2	Umformen von Magnesiumlegierungen	374
7.2.4	Entwicklungstendenzen	374
<b>7.3</b>	<b>Titan und Titanlegierungen</b>	<b>374</b>
<b>7.4</b>	<b>Silicium</b>	<b>377</b>
7.4.1	Weitere bedeutsame Leichtmetalle	378
<b>7.5</b>	<b>Kupferwerkstoffe</b>	<b>379</b>
7.5.1	Unlegiertes Kupfer	379
7.5.1.1	Sauerstoffhaltiges (zähgepoltes) Kupfer	379
7.5.1.2	Desoxidiertes Kupfer	381
7.5.1.3	Sauerstoffreies Kupfer hoher Leitfähigkeit	381

7.5.2	Niedriglegierte Kupferwerkstoffe . . . . .	383	8.1.1.2	Kennzeichnung der Stähle nach der chemischen Zusammensetzung . . . . .	424
7.5.3	Kupfer-Zink-Legierungen (Messing). . . . .	385	8.1.2	Stahlnormung durch Werkstoffnummern . . . . .	430
7.5.4	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber). . . . .	387	<b>8.2</b>	<b>Normung von Gusseisenwerkstoffen . . . . .</b>	<b>432</b>
7.5.5	Kupfer-Zinn-Legierungen (Bronze). . . . .	387	8.2.1	Normung durch Kurznamen . . . . .	432
7.5.6	Kupfer-Nickel-Legierungen . . . . .	389	8.2.2	Normung durch Werkstoffnummern . . . . .	433
7.5.7	Kupfer-Aluminium-Legierungen . . . . .	390	<b>8.3</b>	<b>Normung von Nichteisenmetallen (NE-Metalle) . . . . .</b>	<b>433</b>
7.5.8	Kupfer-Mangan-Legierungen . . . . .	391	8.3.1	Normung von Aluminiumwerkstoffen . . . . .	434
7.5.9	Kupfer-Blei-Legierungen (Bleibronze) . . . . .	391	8.3.1.1	Aluminiumknetwerkstoffe . . . . .	435
7.5.10	Kupfer-Silicium-Legierungen . . . . .	391	8.3.1.2	Aluminiumgusswerkstoffe . . . . .	439
<b>7.6</b>	<b>Nickel . . . . .</b>	<b>396</b>	8.3.2	Normung von Magnesiumwerkstoffen . . . . .	440
7.6.1	Eigenschaften von Nickel . . . . .	396	8.3.2.1	Normung von Magnesiumwerkstoffen nach DIN EN 1754. . . . .	440
7.6.2	Nickel-Legierungen und deren Anwendungen . . . . .	397	8.3.2.2	Normung von Magnesiumwerkstoffen nach ASTM . . . . .	442
<b>7.7</b>	<b>Zinkwerkstoffe . . . . .</b>	<b>400</b>	8.3.3	Normung von Kupferwerkstoffen . . . . .	442
7.7.1	Zink-Knetlegierungen . . . . .	402	8.3.3.1	Unlegiertes Kupfer . . . . .	442
7.7.2	Zink-Gusslegierungen . . . . .	402	8.3.3.2	Kupferlegierungen . . . . .	442
<b>7.8</b>	<b>Zinn . . . . .</b>	<b>402</b>	<b>9 Kunststoffe</b>		
7.8.1	Eigenschaften von Zinn . . . . .	402	<b>9.1</b>	<b>Bedeutung der Kunststoffe . . . . .</b>	<b>445</b>
7.8.2	Weichlote . . . . .	403	<b>9.2</b>	<b>Allgemeine Eigenschaften . . . . .</b>	<b>445</b>
7.8.3	Gleitlagerwerkstoffe . . . . .	404	<b>9.3</b>	<b>Geschichtliche Entwicklung . . . . .</b>	<b>446</b>
<b>7.9</b>	<b>Blei . . . . .</b>	<b>404</b>	<b>9.4</b>	<b>Herstellung der Kunststoffe . . . . .</b>	<b>447</b>
7.9.1	Gewinnung und Eigenschaften von Blei . . . . .	404	9.4.1	Ausgangsstoffe zur Kunststoffherstellung . . . . .	447
7.9.2	Bleiwerkstoffe . . . . .	404	9.4.2	Prinzipien der Kunststoffherstellung . . . . .	448
<b>7.10</b>	<b>Technisch weniger bedeutsame Metalle. 406</b>		9.4.2.1	Polymerisation und Polymerisate . . . . .	448
7.10.1	Alkali- und Erdalkalimetalle. . . . .	406	9.4.2.2	Polykondensation und Polykondensate . . . . .	456
7.10.2	Erdmetalle oder die Bor-/Aluminium-Gruppe . . . . .	408	9.4.2.3	Polyaddition und Polyaddukte . . . . .	461
7.10.3	Kohlenstoff-/Silicium-Gruppe . . . . .	408	9.4.3	Spezialkunststoffe . . . . .	462
7.10.4	Metalle der 5. Hauptgruppe . . . . .	409	9.4.4	Faserverstärkte Kunststoffe . . . . .	463
7.10.5	Metalle der 6. Hauptgruppe . . . . .	410	<b>9.5</b>	<b>Einteilung und struktureller Aufbau der Kunststoffe . . . . .</b>	<b>464</b>
7.10.6	Silber und Gold . . . . .	411	9.5.1	Thermoplaste (Plastomere) . . . . .	465
7.10.7	Metalle der 2. Nebengruppe . . . . .	412	9.5.1.1	Amorphe Thermoplaste . . . . .	465
7.10.8	Scandium, Yttrium und die Selten-erdmetalle . . . . .	412	9.5.1.2	Teilkristalline Thermoplaste . . . . .	465
7.10.9	Metalle der 4. Nebengruppe . . . . .	413	9.5.2	Duroplaste (Duromere) . . . . .	469
7.10.10	Metalle der 5. Nebengruppe . . . . .	414	9.5.3	Elastomere . . . . .	469
7.10.11	Metalle der 6. Nebengruppe . . . . .	414	9.5.4	Thermoplastische Elastomere . . . . .	469
7.10.12	Mangan und Cobalt . . . . .	416	<b>9.6</b>	<b>Mechanisch-thermisches Verhalten der Kunststoffe . . . . .</b>	<b>470</b>
7.10.13	Platinmetalle . . . . .	417	9.6.1	Charakterisierung der Zustandsbereiche . . . . .	470
7.10.14	Thorium und Uran . . . . .	417	9.6.1.1	Energieelastischer Bereich . . . . .	471
<b>7.11</b>	<b>Verbundwerkstoffe . . . . .</b>	<b>418</b>	9.6.1.2	Nebenerweichungsbereich (NEB) . . . . .	471
7.11.1	Einteilung der Verbundwerkstoffe . . . . .	418	9.6.1.3	Haupterweichungsbereich (HEB) . . . . .	471
7.11.2	Metal Matrix Composites (MMC) . . . . .	419	9.6.1.4	Entropieelastischer Bereich . . . . .	472
7.11.2.1	Herstellung von MMC . . . . .	419	9.6.1.5	Fließbereich . . . . .	472
7.11.2.2	Eigenschaften von MMC . . . . .	420	9.6.2	Amorphe Thermoplaste . . . . .	473
7.11.3	Werkstoffverbunde . . . . .	421	9.6.3	Teilkristalline Thermoplaste . . . . .	473
<b>8 Normung und Benennung metallischer Werkstoffe</b>			9.6.4	Duroplaste . . . . .	474
<b>8.1</b>	<b>Stahlnormung . . . . .</b>	<b>422</b>	9.6.5	Elastomere . . . . .	474
8.1.1	Stahlnormung durch Kurznamen . . . . .	422	9.6.6	Thermoplastische Elastomere . . . . .	475
8.1.1.1	Kennzeichnung der Stähle nach der Verwendung oder den mechanischen oder physikalischen Eigenschaften . . . . .	424			

9.7	<b>Kennwerte, Eigenschaften und Anwendung ausgewählter Kunststoffe</b> .....	475
9.8	<b>Normung und Bezeichnung von Kunststoffen</b> .....	486
9.8.1	Allgemeine Kennzeichnung von Kunststoffen .....	486
9.8.1.1	Kurzzeichen für Homopolymere und chemisch modifizierte polymere Naturstoffe .....	486
9.8.1.2	Copolymerer und Polymergemische .....	487
9.8.1.3	Kennzeichnung besonderer Eigenschaften .....	487
9.8.1.4	Kennzeichnung von Zusatzstoffen .....	488
9.8.2	Kennzeichnung thermoplastischer Formmassen .....	488
9.8.3	Kennzeichnung von Duroplasten .....	489
9.8.4	Kennzeichnung von Elastomeren .....	490
9.9	<b>Verarbeitung von Kunststoffen</b> .....	491
9.9.1	Zuschlagstoffe .....	491
9.9.2	Urformen und Umformen .....	491
9.9.2.1	Formpressen .....	492
9.9.2.2	Spritzgießen .....	492
9.9.2.3	Extrudieren .....	493
9.9.2.4	Kalandrieren .....	493
9.9.2.5	Umformen .....	494
9.9.3	Mechanische Bearbeitung .....	494
9.9.4	Verarbeitung aus Lösungen und Dispersionen .....	496
9.9.4.1	Lacke .....	497
9.9.4.2	Klebstoffe .....	497
9.10	<b>Kunststoffe und Umwelt</b> .....	498

## 10 Keramische Werkstoffe

10.1	<b>Einordnung keramischer Werkstoffe</b> ..	500
10.2	<b>Eigenschaften keramischer Werkstoffe</b> ..	501
10.2.1	Allgemeine Eigenschaften .....	501
10.2.2	Physikalische Eigenschaften .....	502
10.2.3	Mechanische Eigenschaften .....	502
10.2.3.1	Festigkeit und Hochtemperaturfestigkeit ..	502
10.2.3.2	Härte .....	503
10.2.3.3	Verformbarkeit und Zähigkeit .....	504
10.2.4	Thermische Eigenschaften .....	504
10.2.4.1	Wärmeausdehnung und Temperaturwechselbeständigkeit .....	504
10.2.4.2	Wärmeleitfähigkeit .....	505
10.2.5	Elektrische und magnetische Eigenschaften .....	505
10.2.5.1	Elektrische Leitfähigkeit .....	506
10.2.5.2	Dielektrisches Verhalten .....	506
10.2.6	Chemische Eigenschaften .....	506
10.3	<b>Einteilung keramischer Werkstoffe</b> ..	507
10.4	<b>Innere Struktur und Gefüge keramischer Werkstoffe</b> .....	508
10.5	<b>Silicatkeramische Werkstoffe</b> .....	509
10.5.1	Porzellan .....	510
10.5.2	Steatit .....	511
10.5.3	Cordieritkeramik .....	511

10.6	<b>Oxidkeramische Werkstoffe</b> .....	512
10.6.1	Aluminiumoxid ( $Al_2O_3$ ) .....	512
10.6.2	Zirkoniumoxid ( $ZrO_2$ ) .....	514
10.6.3	Aluminiumtitanat ( $Al_2TiO_5$ ) .....	516
10.6.4	Magnesiumoxid ( $MgO$ ) .....	517
10.6.5	Weitere oxidkeramische Werkstoffe .....	517
10.7	<b>Nichtoxidkeramische Werkstoffe</b> .....	518
10.7.1	Keramische Werkstoffe aus elementaren Stoffen .....	520
10.7.2	Metallische Hartstoffe .....	520
10.7.2.1	Carbide .....	521
10.7.2.2	Nitride .....	521
10.7.2.3	Boride .....	521
10.7.2.4	Silicide .....	522
10.7.3	Nichtmetallische Hartstoffe .....	522
10.7.3.1	Siliciumcarbid ( $SiC$ ) .....	522
10.7.3.2	Siliciumnitrid ( $Si_3N_4$ ) .....	525
10.7.3.3	Bornitrid (BN) .....	526
10.7.3.4	Borcarbid ( $B_4C$ ) .....	527
10.8	<b>Elektro- und Magnetokeramik</b> .....	527
10.8.1	Elektrokeramik .....	528
10.8.1.1	Trägerkörper .....	528
10.8.1.2	Dielektrische keramische Werkstoffe .....	528
10.8.1.3	Kaltleiter .....	529
10.8.1.4	Heißeiter .....	529
10.8.1.5	Piezokeramik .....	529
10.8.1.6	Keramische Supraleiter .....	530
10.8.2	Magnetokeramik .....	531
10.8.2.1	Dauermagnetische Ferrite (Hartferrite) ..	531
10.8.2.2	Weichmagnetische Ferrite .....	532
10.9	<b>Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren für keramische Werkstoffe</b> ..	534
10.9.1	Rohstoffgewinnung .....	535
10.9.2	Massenaufbereitung .....	535
10.9.3	Formgebung .....	535
10.9.4	Trocknen und Ausheizen .....	538
10.9.5	Grün- und Weißbearbeitung, Vorbrand ..	538
10.9.6	Sintern (Brennen) .....	539
10.9.7	Endbearbeitung (Hartbearbeitung) .....	540
10.10	<b>Künftige Entwicklungen</b> .....	540

## 11 Korrosion und Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe

11.1	<b>Einleitung und Übersicht</b> .....	541
11.2	<b>Elektrochemische Korrosion</b> .....	541
11.2.1	Lösungstension .....	542
11.2.2	Elektrochemische Spannungsreihe .....	542
11.2.3	Stromdichte-Potential-Kurven .....	544
11.2.4	Wasserstoffkorrosion .....	545
11.2.5	Sauerstoffkorrosion .....	545
11.3	<b>Rost</b> .....	546
11.4	<b>Erscheinungsformen der Korrosion</b> .....	547
11.5	<b>Korrosionsschutz</b> .....	548
11.5.1	Passiver Korrosionsschutz .....	548
11.5.1.1	Überzüge mit Metalloxiden .....	549
11.5.1.2	Überzüge mit edleren Metallen .....	550
11.5.1.3	Überzüge mit unedleren Metallen .....	551
11.5.1.4	Überzüge mit Nichtmetallen .....	551

11.5.2	Aktiver Korrosionsschutz . . . . .	551
11.5.3	Konstruktive Maßnahmen . . . . .	553

## 12 Tribologie

<b>12.1</b>	<b>Tribosysteme . . . . .</b>	<b>555</b>
12.1.1	Aufbau eines Tribosystems . . . . .	555
12.1.2	Funktion eines Tribosystems . . . . .	556
<b>12.2</b>	<b>Hauptgebiete der Tribologie . . . . .</b>	<b>556</b>
12.2.1	Reibung . . . . .	556
12.2.1.1	Reibungsarten . . . . .	557
12.2.1.2	Reibungsmechanismen bei Festkörper- reibung . . . . .	557
12.2.1.3	Reibungszustände in geschmierten Gleitpaarungen . . . . .	558
12.2.2	Schmierung und Schmierstoffe . . . . .	559
12.2.2.1	Schmieröle . . . . .	559
12.2.2.2	Schmierfette . . . . .	561
12.2.2.3	Festschmierstoffe . . . . .	562
12.2.3	Verschleiß . . . . .	563
12.2.3.1	Verschleißmechanismen . . . . .	563
12.2.3.2	Verschleißarten . . . . .	568
<b>12.3</b>	<b>Verschleißbeständige (tribotechnische) Werkstoffe . . . . .</b>	<b>568</b>
12.3.1	Verwendung von Stählen bzw. Stahlguss mit hoher Verschleißbeständigkeit . . . . .	568
12.3.2	Oberflächenschutzschichten . . . . .	569
12.3.3	Verwendung verschleißbeständiger Werkstoffe . . . . .	571

## 13 Werkstoffprüfung

<b>13.1</b>	<b>Einführung . . . . .</b>	<b>572</b>
<b>13.2</b>	<b>Aufgaben der Werkstoffprüfung . . . . .</b>	<b>572</b>
<b>13.3</b>	<b>Einteilung der Werkstoffprüfverfahren . . . . .</b>	<b>573</b>
<b>13.4</b>	<b>Zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren . . . . .</b>	<b>574</b>
13.4.1	Eindringprüfung . . . . .	574
13.4.2	Magnetische und induktive Prüf- verfahren . . . . .	576
13.4.2.1	Magnetische Streuflussverfahren . . . . .	576
13.4.2.2	Wirbelstromprüfung . . . . .	577
13.4.3	Ultraschallprüfung . . . . .	578
13.4.4	Durchstrahlungsverfahren . . . . .	585
13.4.4.1	Werkstoffprüfung mit Röntgenstrahlen . . . . .	585
13.4.4.2	Werkstoffprüfung mit Gammastrahlen . . . . .	587
13.4.4.3	Nachweis von Röntgen- und Gammastrahlen . . . . .	589
13.4.4.4	Prüfbare Probendicken . . . . .	590
13.4.4.5	Vergleich zwischen Röntgen- und Gammastrahlen . . . . .	591
13.4.5	Vergleich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfverfahren . . . . .	591
<b>13.5</b>	<b>Mechanische Werkstoffprüfverfahren . . . . .</b>	<b>593</b>
13.5.1	Zugversuch . . . . .	593
13.5.1.1	Historisches . . . . .	593

13.5.1.2	Versuchsdurchführung . . . . .	594
13.5.1.3	Probengeometrie . . . . .	594
13.5.1.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramme . . . . .	595
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
13.5.6.1	Einteilung der Härteprüfverfahren . . . . .	611
13.5.6.2	Statische Härteprüfverfahren . . . . .	612
13.5.6.3	Dynamische Härteprüfverfahren . . . . .	622
13.5.7	Zähigkeitsprüfverfahren . . . . .	624
13.5.7.1	Zähigkeitsbegriff . . . . .	624
13.5.7.2	Sicherheitsrelevanz der Zähigkeit . . . . .	625
13.5.7.3	Spröder und zäher Gewaltbruch . . . . .	625
13.5.7.4	Einflussfaktoren auf die Zähigkeit . . . . .	626
13.5.7.5	Verfahren der Zähigkeitsprüfung . . . . .	627
13.5.8	Schwingfestigkeitsversuche . . . . .	632
13.5.8.1	Entstehung von Schwingrissen . . . . .	634
13.5.8.2	Ermüdungbruchflächen . . . . .	635
13.5.8.3	Versuche zum Ermüdungsverhalten . . . . .	635
13.5.8.4	Einstufige Schwingfestigkeitsversuche (Wöhlerversuche) . . . . .	636
13.5.8.5	Betriebsfestigkeitsversuche . . . . .	639
13.5.8.6	Schwingprüfmaschinen . . . . .	641
13.5.9	Zeitstandversuch . . . . .	642
13.5.9.1	Durchführung von Zeitstandversuchen . . . . .	643
13.5.9.2	Werkstoffkennwerte . . . . .	644
13.5.9.3	Spannungsrelaxation . . . . .	645
<b>13.6</b>	<b>Technologische Prüfungen . . . . .</b>	<b>645</b>
13.6.1	Tiefungsversuch nach Erichsen . . . . .	646
13.6.2	Näpfchen-Tiefziehprüfung (nach Swift) . . . . .	647
13.6.3	Technologischer Biegeversuch . . . . .	648
13.6.4	Stirnschreckversuch nach Jominy . . . . .	648
<b>13.7</b>	<b>Mechanische Prüfverfahren für Kunststoffe . . . . .</b>	<b>650</b>
13.7.1	Zugversuch an Kunststoffen . . . . .	652
13.7.1.1	Probengeometrie . . . . .	652
13.7.1.2	Versuchsdurchführung . . . . .	652
13.7.1.3	Kennwerte . . . . .	653
13.7.2	Härteprüfung an Kunststoffen . . . . .	654
13.7.2.1	Kugeleindruckversuch . . . . .	656
13.7.2.2	Härteprüfung nach Shore an Kunst- stoffen . . . . .	656
13.7.2.3	Internationaler Gummihärtegrad (IRHD) . . . . .	658
13.7.3	Charpy-Schlagversuch nach ISO . . . . .	658
<b>Englische Fachausdrücke . . . . .</b>		<b>660</b>
<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>		<b>676</b>
<b>Bildquellennachweis . . . . .</b>		<b>697</b>
<b>Anhang . . . . .</b>		<b>699</b>