

# 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	Reaktionsintern. . . . .	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</b>	<b>74</b>	4.4.2.3 Lötmechanismus	113
3.4.1 Intermetallische Phasen	74	4.4.2.4 Metallurgische Probleme beim Löten	114
3.4.2 Überstrukturen	74	4.4.2.5 Flussmittel, Lötatmosphären und Vakuum	115
<b>3.5 Zustandsdiagramme</b>	<b>75</b>	4.4.2.6 Lötwerkstoffe	116
3.5.1 Binäre Zustandsdiagramme	76	<b>4.5 Beschichten</b>	<b>118</b>
3.5.1.1 Erstellung binärer Zustandsdiagramme	76	4.5.1 Beschichten aus dem flüssigen Zustand	119
3.5.1.2 Lesen binärer Zustandsdiagramme	77	4.5.1.1 Schmelztauchen	119
3.5.1.3 Kristallseigerung und Zonenmischkristalle	78	4.5.1.2 Emaillieren	119
3.5.2 Grundtypen binärer Zustandsdiagramme	79	4.5.1.3 Anstreichen und Lackieren	120
3.5.2.1 Vollkommene Unlöslichkeit im festen und flüssigen Zustand	79	4.5.2 Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand	120
3.5.2.2 Vollkommene Löslichkeit im festen und flüssigen Zustand (Linsendiagramm)	79	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)	81	4.5.3 Beschichten durch Schweißen	122
3.5.2.5 Peritektisches Zustandsdiagramm	82	4.5.4 Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand	123
3.5.3 Zustandsdiagramme mit Verbindungsbildung	83	4.5.4.1 CVD-Verfahren	123
3.5.4 Reale Zustandsdiagramme	83	4.5.4.2 PVD-Verfahren	124
3.5.5 Ternäre Zustandsdiagramme	84	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</b>	<b>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 Werkstoffeigenschaften und Fertigungsverfahren</b>		<b>5 Gewinnung, Formgebung und Recycling metallischer Werkstoffe und Legierungen</b>	
4.1 <b>Urformen</b>	<b>87</b>	<b>5.1 Überblick zur Gewinnung metallischer Werkstoffe</b>	<b>136</b>
4.1.1 Kristallisation und Gefüge	87	5.1.1 Gewinnung metallischer Rohstoffe	136
4.1.2 Gussfehler	89	5.1.2 Verfahren der Metallgewinnung	137
4.1.3 Gießbarkeit metallischer Werkstoffe	91	5.1.3 Raffinationsverfahren	138
4.1.3.1 Fließ- und Formfüllungsvermögen	91	5.1.4 Metallische Werkstoffe und deren Handelsformen	138
4.1.3.2 Schwindung	92		
4.1.3.3 Schmelzverhalten von Gusswerkstoffen	92		
4.1.4 Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften beim Gießen	92		
4.1.5 Herstellung (Züchten) von Einkristallen	94		
<b>4.2 Umformen</b>	<b>95</b>		
4.2.1 Kaltumformung	96		
4.2.2 Warmumformung	97		
4.2.3 Neue Umformverfahren	98		
<b>4.3 Trennen</b>	<b>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</b>	<b>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 Werkstoffeigenschaften durch das Schweißen	104		
<b>4.4.2 Löten</b>	<b>113</b>		
4.4.2.1 Vor- und Nachteile des Lötens	113		
4.4.2.2 Einteilung der Lötverfahren	113		

<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
<b>6 Eisenwerkstoffe</b>		6.4.4.8 Temperaturbereich der Martensit- bildung . . . . .	233
<b>6.1 Reines Eisen</b> . . . . .	<b>166</b>	6.4.4.9 Restaustenit und Tiefkühlung . . . . .	234
<b>6.2 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen</b> . . . . .	<b>168</b>	6.4.4.10 Abschreckhärte . . . . .	234
6.2.1 Phasenausbildungen in Eisen- Kohlenstoff-Legierungen . . . . .	168	6.4.4.11 Härtespannungen . . . . .	235
6.2.1.1 Mischkristalle (Ferrit, Austenit und $\delta$ -Ferrit) . . . . .	168	6.4.4.12 Abschrecken und Abschreckmittel . . . . .	237
6.2.1.2 Verbindungsphasen (Zementit und $\epsilon$ -Carbid) . . . . .	170	6.4.4.13 Zeit-Temperatur-Umwandlungs- diagramme (ZTU-Diagramme) . . . . .	238
6.2.1.3 Stabile Phase (Graphit) . . . . .	171	6.4.4.14 Zeit-Temperatur-Austenitisierungs- diagramme (ZTA-Diagramme) . . . . .	242
6.2.2 Eisen-Kohlenstoff-Zustands- diagramm . . . . .	171	6.4.5 Anlassen und Vergüten . . . . .	245
6.2.2.1 Erstarrungsformen von Eisen- Kohlenstoff-Legierungen . . . . .	172	6.4.5.1 Innere Vorgänge beim Anlassen . . . . .	246
6.2.2.2 Aufbau des metastabilen Eisen- Kohlenstoff-Zustandsdiagramms . . . . .	173	6.4.5.2 Anlassen der legierten Stähle . . . . .	247
6.2.2.3 Bezeichnungen im metastabilen System . . . . .	174	6.4.5.3 Versprödungserscheinungen beim Anlassen von Stählen . . . . .	248
6.2.2.4 Erstarrungsvorgänge im metastabilen System . . . . .	174	6.4.5.4 Vergüten . . . . .	249
6.2.2.5 Stahlecke des metastabilen Systems . . . . .	178	6.4.6 Verfahren des Oberflächenhärtens . . . . .	254
<b>6.3 Eisenbegleiter und Legierungs- elemente</b> . . . . .	<b>181</b>	6.4.6.1 Einteilung der Oberflächenhärte- verfahren . . . . .	255
6.3.1 Begleitelemente und nicht- metallische Einschlüsse . . . . .	182	6.4.6.2 Randschichthärtungsverfahren . . . . .	255
6.3.1.1 Mangan (Mn) . . . . .	182	6.4.6.3 Thermochemisches Behandeln . . . . .	260
6.3.1.2 Silicium (Si) . . . . .	183	<b>6.5 Eigenschaften und Verwendung von Stählen</b> . . . . .	<b>272</b>
6.3.1.3 Phosphor (P) . . . . .	185	6.5.1 Einteilung der Stähle . . . . .	272
6.3.1.4 Schwefel (S) . . . . .	187	6.5.1.1 Einteilung der Stähle nach Hauptgüteklassen . . . . .	272
6.3.1.5 Stickstoff (N) . . . . .	188		

6.5.1.2	Einteilung der Stähle nach dem Verwendungszweck	274	6.5.16.3	Einteilung der Werkzeugstähle	309
6.5.2	Unlegierte Baustähle	274	6.5.16.4	Unlegierte Kaltarbeitsstähle	310
6.5.2.1	Anwendung unlegierter Baustähle	275	6.5.16.5	Legierte Kaltarbeitsstähle	311
6.5.2.2	Normung und Gütegruppen unlegierter Baustähle	275	6.5.16.6	Warmarbeitsstähle	312
6.5.2.3	Technologische Eigenschaften unlegierter Baustähle	276	6.5.16.7	Schnellarbeitsstähle	314
6.5.2.4	Werkstoffkundliche Besonderheiten unlegierter Baustähle	277	<b>6.6</b>	<b>Eisengusswerkstoffe</b>	<b>320</b>
6.5.3	Schweißgeeignete Feinkornbaustähle	277	6.6.1	Einteilung der Eisengusswerkstoffe	320
6.5.3.1	Werkstoffkundliche Grundlagen schweißgeeigneter Feinkornbaustähle	278	6.6.2	Stahlguss	321
6.5.3.2	Stahlsorten und Gütegruppen	279	6.6.2.1	Gießbarkeit von Stahlguss	322
6.5.4	Federstähle	282	6.6.2.2	Wärmebehandlung von Stahlguss	322
6.5.4.1	Anforderungen an metallische Federwerkstoffe	283	6.6.2.3	Stahlgussorten	322
6.5.4.2	Federstahlsorten	283	6.6.3	Gusseisenwerkstoffe	326
6.5.5	Vergütungsstähle	284	6.6.3.1	Erschmelzung von Gusseisenwerkstoffen	326
6.5.6	Einsatzstähle	285	6.6.3.2	Gusseisendiagramme	326
6.5.7	Nitrierstähle	285	6.6.3.3	Gusseisen mit Lamellengraphit	327
6.5.8	Warmfeste Stähle	285	6.6.3.4	Gusseisen mit Kugelgraphit	333
6.5.8.1	Anforderungen an warmfeste Stähle	285	6.6.3.5	Bainitisches Gusseisen	336
6.5.8.2	Werkstoffverhalten und Werkstoffkennwerte bei erhöhter Temperatur	285	6.6.3.6	Gusseisen mit Vermiculargraphit	337
6.5.8.3	Warmfeste Stahlsorten	286	6.6.3.7	Temperguss	338
6.5.9	Kaltzähe Stähle	287	6.6.3.8	Perlitischer Hartguss	344
6.5.9.1	Werkstoffverhalten und Kennwerte bei tiefen Temperaturen	287	6.6.3.9	Sondergusseisen	345
6.5.9.2	Kaltzähe Stahlsorten	287	<b>7</b>	<b>Nichteisenmetalle</b>	
6.5.10	Nichtrostende Stähle	288	<b>7.1</b>	<b>Aluminiumwerkstoffe</b>	<b>353</b>
6.5.10.1	Einteilung der nichtrostenden Stähle	289	7.1.1	Reinaluminium	353
6.5.10.2	Ferritische und halberritische Chromstähle	289	7.1.2	Aluminium-Knetlegierungen	354
6.5.10.3	Martensitische Chromstähle	291	7.1.3	Aluminium-Gusslegierungen	357
6.5.10.4	Austenitische Chrom-Nickel-Stähle	293	7.1.4	Aluminiumschäume	360
6.5.10.5	Schweißtechnische Verarbeitung nichtrostender Stähle	296	7.1.4.1	Aufschäumprozesse	360
6.5.11	Hitze- und zunderbeständige Stähle	297	7.1.4.2	Eigenschaften von Aluminiumschäumen	361
6.5.11.1	Ferritische zunderbeständige Stähle	297	7.1.5	Aushärten von Aluminiumlegierungen	363
6.5.11.2	Austenitische zunderbeständige Stähle und Nickel-Chrom-Legierungen	298	7.1.5.1	Verfahren	363
6.5.12	Druckwasserstoffbeständige Stähle	299	7.1.5.2	Innere Vorgänge	364
6.5.13	Automatenstähle	300	7.1.6	Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen	366
6.5.14	Höherfeste Stähle für den Automobil-Leichtbau	302	7.1.6.1	Gießen	366
6.5.14.1	Mikrolegierte höherfeste Stähle	303	7.1.6.2	Umformen	367
6.5.14.2	Phosphorlegierte Stähle	303	7.1.6.3	Zerspanen	367
6.5.14.3	Bake-Hardening-Stähle	303	7.1.6.4	Schweißen	368
6.5.14.4	IF-Stähle	304	<b>7.2</b>	<b>Magnesiumwerkstoffe</b>	<b>368</b>
6.5.14.5	Dualphasen Stähle (DP-Stähle)	304	7.2.1	Eigenschaften von Magnesium	368
6.5.14.6	Stähle mit Restaustenit	305	7.2.2	Magnesiumlegierungen	369
6.5.14.7	Complexphasen-Stähle	305	7.2.2.1	Magnesium-Gusslegierungen	370
6.5.14.8	Martensit-Phasen-Stähle	306	7.2.2.2	Magnesium-Knetlegierungen	370
6.5.14.9	TWIP-Stähle	306	7.2.3	Verarbeitung von Magnesiumlegierungen	372
6.5.15	Höchstfeste Stähle	306	7.2.3.1	Gießen von Magnesiumlegierungen	372
6.5.15.1	Höchstfeste Vergütungsstähle	307	7.2.3.2	Umformen von Magnesiumlegierungen	374
6.5.15.2	Martensitaushärtende Stähle (Maraging Steels)	307	7.2.4	Entwicklungstendenzen	374
6.5.16	Werkzeugstähle	309	<b>7.3</b>	<b>Titan und Titanlegierungen</b>	<b>374</b>
6.5.16.1	Anforderungen an Werkzeugstähle	309	<b>7.4</b>	<b>Silicium</b>	<b>377</b>
6.5.16.2	Erschmelzung von Werkzeugstählen	309	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 . . . . .</b>	<b>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			



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

## 12 Tribologie

12.1	<b>Tribosysteme</b> .....	555
12.1.1	Aufbau eines Tribosystems.....	555
12.1.2	Funktion eines Tribosystems.....	556
12.2	<b>Hauptgebiete der Tribologie</b> .....	556
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
12.3	<b>Verschleißbeständige (tribotechnische) Werkstoffe</b> .....	568
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

13.1	<b>Einführung</b> .....	572
13.2	<b>Aufgaben der Werkstoffprüfung</b> .....	572
13.3	<b>Einteilung der Werkstoffprüfverfahren</b> ..	573
13.4	<b>Zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren</b>	574
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	Wirbelstromverfahren .....	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 Probedicken .....	590
13.4.4.5	Vergleich zwischen Röntgen- und Gammastrahlen .....	591
13.4.5	Vergleich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfverfahren .....	591
13.5	<b>Mechanische Werkstoffprüfverfahren</b> ...	593
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	Ermüdungsbruchflächen.....	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
13.6	<b>Technologische Prüfungen</b> .....	645
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
13.7	<b>Mechanische Prüfverfahren für Kunststoffe</b> .....	650
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> .....		660
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....		676
<b>Bildquellennachweis</b> .....		697
<b>Anhang</b> .....		699