

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	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 (kfv)	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	Gleisbaren und Gleitsysteme	45
2.8.2.3	Schmid'sches Schubspannungsgesetz	46
2.8.2.4	Plastische Verformung von Vierkristallen	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	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	Flüssmittel, Lötatmosphären und Vakuum	115
3.5	Zustandsdiagramme	75	4.4.2.6	Lötwerkstoffe	116
3.5.1	Binäre Zustandsdiagramme	76	4.5	Beschichten	118
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	Schmelzauchen	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 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	92
4.1.5	Herstellung (Züchten) von Einkristallen	94
4.2	Umformen	95
4.2.1	Kaltumformung	96
4.2.2	Warmumformung	97
4.2.3	Neue Umformverfahren	98

4.3	Trennen	100
4.3.1	Zerteilen und Zerspanen	100
4.3.2	Zerspanbarkeit	101
4.3.3	Spanformen	101
4.3.4	Automatenlegierungen	101

4.4	Fügen	102
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
4.4.2	Löten	113
4.4.2.1	Vor- und Nachteile des Löten	113
4.4.2.2	Einteilung der Lötverfahren	113

4.4.2.3	Lötmechanismus	113
4.4.2.4	Metallurgische Probleme beim Löten	114
4.4.2.5	Flüssmittel, Lötatmosphären und Vakuum	115
4.4.2.6	Lötwerkstoffe	116
4.5	Beschichten	118
4.5.1	Beschichten aus dem flüssigen Zustand	119
4.5.1.1	Schmelzauchen	119
4.5.1.2	Emaillieren	119
4.5.1.3	Anstreichen und Lackieren	120
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	123
4.5.4.1	CVD-Verfahren	123
4.5.4.2	PVD-Verfahren	124
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

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
4.6.2.1	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	Aushärteten	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

5 Gewinnung, Formgebung und Recycling metallischer Werkstoffe und Legierungen

5.1	Überblick zur Gewinnung metallischer Werkstoffe	136
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

5.2 Eisen- und Stahlerzeugung	139	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 Legierungselemente im Stahl	211
5.2.3.2 Elektrolichtbogenofen-Verfahren	149		
5.2.3.3 Stahl-Sekundärmetallurgie	150		
5.3 Erzeugung von Nichteisenmetallen	151	6.4 Wärmebehandlung der Stähle	212
5.3.1 Gewinnung von Aluminium	151	6.4.1 Prinzip einer Wärmebehandlung	
5.3.2 Gewinnung weiterer Nichteisenmetalle	153	6.4.2 Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren	214
5.4 Legieren von Metallen	153	6.4.3 Glühen	214
5.5 Formgebungsverfahren für metallische Werkstoffe	155	6.4.3.1 Normalglühen von Stählen	214
5.5.1 Gießen	155	6.4.3.2 Weichglühen von Stählen (Glühen auf kugelige Carbide)	216
5.5.1.1 Formgießen	155	6.4.3.3 Spannungsarmglühen	218
5.5.1.2 Gießen von Knetlegierungen	158	6.4.3.4 Rekristallisationsglühen	219
5.5.2 Umformen	160	6.4.3.5 Diffusionsglühen (Homogenisierungs- glühen)	220
5.5.2.1 Walzen	161	6.4.3.6 Grobkornglühen (Hochglühen)	222
5.5.2.2 Durchdrücken	162	6.4.4 Härtung	222
5.5.2.3 Freiform- und Gesenkschmieden	162	6.4.4.1 Geschichte der Stahlhärtung	222
5.5.2.4 Ziehen	163	6.4.4.2 Ziele der Stahlhärtung	224
5.6 Recycling von metallischen Werkstoffen 164		6.4.4.3 Verfahren	225
5.6.1 Recycling von Stahl und Gusseisen	165	6.4.4.4 Härtetemperatur	225
5.6.2 Recycling von Nichtmetallen	165	6.4.4.5 Abkühlgeschwindigkeit und Gefügeausbildung	225

6 Eisenwerkstoffe

6.1 Reines Eisen	166	6.4.4.6 Kritische Abkühlgeschwindigkeit	232
6.2 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	168	6.4.4.7 Kohlenstofflöslichkeit des Austenits	233
6.2.1 Phasenausbildungen in Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	168	6.4.4.8 Temperaturbereich der Martensbildung	233
6.2.1.1 Mischkristalle (Ferrit, Austenit und δ -Ferrit)	168	6.4.4.9 Restaustenit und Tiefkühlung	234
6.2.1.2 Verbindungsphasen (Zementit und ϵ -Carbid)	170	6.4.4.10 Abschreckhärte	234
6.2.1.3 Stabile Phase (Graphit)	171	6.4.4.11 Härtespannungen	235
6.2.2 Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm	171	6.4.4.12 Abschrecken und Abschreckmittel	237
6.2.2.1 Erstarrungsformen von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	172	6.4.4.13 Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramme (ZTU-Diagramme)	238
6.2.2.2 Aufbau des metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramms	173	6.4.4.14 Zeit-Temperatur-Austenitisierungsdiagramme (ZTA-Diagramme)	242
6.2.2.3 Bezeichnungen im metastabilen System	174	6.4.5 Anlassen und Vergüten	245
6.2.2.4 Erstarrungsvorgänge im metastabilen System	174	6.4.5.1 Innere Vorgänge beim Anlassen	246
6.2.2.5 Stahlecke des metastabilen Systems	178	6.4.5.2 Anlassen der legierten Stähle	247
6.3 Eisenbegleiter und Legierungselemente	181	6.4.5.3 Versprödungserscheinungen beim Anlassen von Stählen	248
6.3.1 Begleitelemente und nicht-metallische Einschlüsse	182	6.4.5.4 Vergüten	249
6.3.1.1 Mangan (Mn)	182	6.4.6 Verfahren des Oberflächenhärtens	254
6.3.1.2 Silicium (Si)	183	6.4.6.1 Einteilung der Oberflächenhärteverfahren	255
6.3.1.3 Phosphor (P)	185	6.4.6.2 Randschichthärteverfahren	255
6.3.1.4 Schwefel (S)	187	6.4.6.3 Thermochemisches Behandeln	260
6.3.1.5 Stickstoff (N)	188		
6.5 Eigenschaften und Verwendung von Stählen	272		
6.5.1 Einteilung der Stähle	272		
6.5.1.1 Einteilung der Stähle nach Hauptgüteklassen	272		

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	6.6	Eisengusswerkstoffe	320
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	Stahlgusssorten	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	Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit	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			
6.5.10	Nichtrostende Stähle	288			
6.5.10.1	Einteilung der nichtrostenden Stähle	289			
6.5.10.2	Ferritische und halbferritische 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	Martensitaushärtende 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			

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	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	400	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	404	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	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	9.6	Mechanisch-thermisches Verhalten der Kunststoffe	470
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
7.11	Verbundwerkstoffe	418	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
8	Normung und Benennung metallischer Werkstoffe		9.6.4	Duroplaste	474
8.1	Stahlnormung	422	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	Kennwerte, Eigenschaften und Anwendung ausgewählter Kunststoffe	475	10.6	Oxidkeramische Werkstoffe	512
9.8	Normung und Bezeichnung von Kunststoffen	486	10.6.1	Aluminiumoxid (Al_2O_3)	512
9.8.1	Allgemeine Kennzeichnung von Kunststoffen	486	10.6.2	Zirkoniumoxid (ZrO_2)	514
9.8.1.1	Kurzzeichen für Homopolymere und chemisch modifizierte polymere Naturstoffe	486	10.6.3	Aluminiumtitanat (Al_2TiO_5)	516
9.8.1.2	Copolymerne und Polymergemische	487	10.6.4	Magnesiumoxid (MgO)	517
9.8.1.3	Kennzeichnung besonderer Eigenschaften	487	10.6.5	Weitere oxidkeramische Werkstoffe	517
9.8.1.4	Kennzeichnung von Zusatzstoffen	488	10.7	Nichtoxidkeramische Werkstoffe	518
9.8.2	Kennzeichnung thermoplastischer Formmassen	488	10.7.1	Keramische Werkstoffe aus elementaren Stoffen	520
9.8.3	Kennzeichnung von Duroplasten	489	10.7.2	Metallische Hartstoffe	520
9.8.4	Kennzeichnung von Elastomeren	490	10.7.2.1	Carbide	521
9.9	Verarbeitung von Kunststoffen	491	10.7.2.2	Nitride	521
9.9.1	Zuschlagstoffe	491	10.7.2.3	Boride	521
9.9.2	Urformen und Umformen	491	10.7.2.4	Silicide	522
9.9.2.1	Formpressen	492	10.7.3	Nichtmetallische Hartstoffe	522
9.9.2.2	Spritzgießen	492	10.7.3.1	Siliciumcarbid (SiC)	522
9.9.2.3	Extrudieren	493	10.7.3.2	Siliciumnitrid (Si_3N_4)	525
9.9.2.4	Kalandrieren	493	10.7.3.3	Bornitrid (BN)	526
9.9.2.5	Umformen	494	10.7.3.4	Borcarbid (B_4C)	527
9.9.3	Mechanische Bearbeitung	494	10.8	Elektro- und Magnetkeramik	527
9.9.4	Verarbeitung aus Lösungen und Dispersionen	496	10.8.1	Elektrokeramik	528
9.9.4.1	Lacke	497	10.8.1.1	Trägerkörper	528
9.9.4.2	Klebstoffe	497	10.8.1.2	Dielektrische keramische Werkstoffe	528
9.10	Kunststoffe und Umwelt	498	10.8.1.3	Kaltleiter	529
10 Keramische Werkstoffe					
10.1	Einordnung keramischer Werkstoffe	500	10.8.1.4	Heißleiter	529
10.2	Eigenschaften keramischer Werkstoffe	501	10.8.1.5	Piezokeramik	529
10.2.1	Allgemeine Eigenschaften	501	10.8.1.6	Keramische Supraleiter	530
10.2.2	Physikalische Eigenschaften	502	10.8.2	Magnetkeramik	531
10.2.3	Mechanische Eigenschaften	502	10.8.2.1	Dauermagnetische Ferrite (Hartferrite)	531
10.2.3.1	Festigkeit und Hochtemperaturfestigkeit	502	10.8.2.2	Weichmagnetische Ferrite	532
10.2.3.2	Härte	503	10.9	Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren für keramische Werkstoffe	534
10.2.3.3	Verformbarkeit und Zähigkeit	504	10.9.1	Rohstoffgewinnung	535
10.2.4	Thermische Eigenschaften	504	10.9.2	Massenaufbereitung	535
10.2.4.1	Wärmeausdehnung und Temperaturwechselbeständigkeit	504	10.9.3	Formgebung	535
10.2.4.2	Wärmeleitfähigkeit	505	10.9.4	Trocknen und Ausheizen	538
10.2.5	Elektrische und magnetische Eigenschaften	505	10.9.5	Grün- und Weißbearbeitung, Vorbrand	538
10.2.5.1	Elektrische Leitfähigkeit	506	10.9.6	Sintern (Brennen)	539
10.2.5.2	Dielektrisches Verhalten	506	10.9.7	Endbearbeitung (Hartbearbeitung)	540
10.2.6	Chemische Eigenschaften	506	10.10	Künftige Entwicklungen	540
10.3	Einteilung keramischer Werkstoffe	507			
10.4	Innere Struktur und Gefüge keramischer Werkstoffe	508			
10.5	Silicatkeramische Werkstoffe	509			
10.5.1	Porzellan	510			
10.5.2	Steatit	511			
10.5.3	Cordieritkeramik	511			
11 Korrosion und Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe					
11.1	Einleitung und Übersicht	541			
11.2	Elektrochemische Korrosion	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	Rost	546			
11.4	Erscheinungsformen der Korrosion	547			
11.5	Korrosionsschutz	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	13.5.1.2 Versuchsdurchführung	594
11.5.3 Konstruktive Maßnahmen	553	13.5.1.3 Probengeometrie	594
12 Tribologie		13.5.1.4 Spannungs-Dehnungs-Diagramme	595
12.1 Tribosysteme	555	13.5.1.5 Ermittlung von Werkstoffkennwerten im Zugversuch	599
12.1.1 Aufbau eines Tribosystems	555	13.5.1.6 Bruchvorgänge, Bruchformen und Bruchflächen	603
12.1.2 Funktion eines Tribosystems	556	13.5.2 Druckversuch	606
12.2 Hauptgebiete der Tribologie	556	13.5.3 Biegeversuch	608
12.2.1 Reibung	556	13.5.4 Torsions- oder Verdrehversuch	609
12.2.1.1 Reibungsarten	557	13.5.5 Scherversuch	610
12.2.1.2 Reibungsmechanismen bei Festkörperreibung	557	13.5.6 Härteprüfung	611
12.2.1.3 Reibungszustände in geschmierten Gleitpaarungen	558	13.5.6.1 Einteilung der Härteprüfverfahren	611
12.2.2 Schmierung und Schmierstoffe	559	13.5.6.2 Statische Härteprüfverfahren	612
12.2.2.1 Schmieröle	559	13.5.6.3 Dynamische Härteprüfverfahren	622
12.2.2.2 Schmierfette	561	13.5.7 Zähigkeitsprüfverfahren	624
12.2.2.3 Festschmierstoffe	562	13.5.7.1 Zähigkeitsbegriff	624
12.2.3 Verschleiß	563	13.5.7.2 Sicherheitsrelevanz der Zähigkeit	625
12.2.3.1 Verschleißmechanismen	563	13.5.7.3 Spröder und zäher Gewaltbruch	625
12.2.3.2 Verschleißarten	568	13.5.7.4 Einflussfaktoren auf die Zähigkeit	626
12.3 Verschleißbeständige (tribotechnische) Werkstoffe	568	13.5.7.5 Verfahren der Zähigkeitsprüfung	627
12.3.1 Verwendung von Stählen bzw. Stahlguss mit hoher Verschleißbeständigkeit	568	13.5.8 Schwingfestigkeitsversuche	632
12.3.2 Oberflächenschutzschichten	569	13.5.8.1 Entstehung von SchwingrisSEN	634
12.3.3 Verwendung verschleißbeständiger Werkstoffe	571	13.5.8.2 Ermüdungbruchflächen	635
13 Werkstoffprüfung		13.5.8.3 Versuche zum Ermüdungsverhalten	635
13.1 Einführung	572	13.5.8.4 Einstufige Schwingfestigkeitsversuche (Wöhlerversuche)	636
13.2 Aufgaben der Werkstoffprüfung	572	13.5.8.5 Betriebsfestigkeitsversuche	639
13.3 Einteilung der Werkstoffprüfverfahren	573	13.5.8.6 Schwingprüfmaschinen	641
13.4 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren 574		13.5.9 Zeitstandversuch	642
13.4.1 Eindringprüfung	574	13.5.9.1 Durchführung von Zeitstandversuchen	643
13.4.2 Magnetische und induktive Prüfverfahren	576	13.5.9.2 Werkstoffkennwerte	644
13.4.2.1 Magnetische Streuflussverfahren	576	13.5.9.3 Spannungsrelaxation	645
13.4.2.2 Wirbelstromprüfung	577	13.6 Technologische Prüfungen	645
13.4.3 Ultraschallprüfung	578	13.6.1 Tiefungsversuch nach Erichsen	646
13.4.4 Durchstrahlungsverfahren	585	13.6.2 Näpfchen-Tiefeziehprüfung (nach Swift)	647
13.4.4.1 Werkstoffprüfung mit Röntgenstrahlen	585	13.6.3 Technologischer Biegeversuch	648
13.4.4.2 Werkstoffprüfung mit Gammastrahlen	587	13.6.4 Stirnabschreckversuch nach Jominy	648
13.4.4.3 Nachweis von Röntgen- und Gammastrahlen	589	13.7 Mechanische Prüfverfahren für Kunststoffe	650
13.4.4.4 Prüfbare Probendicken	590	13.7.1 Zugversuch an Kunststoffen	652
13.4.4.5 Vergleich zwischen Röntgen- und Gammastrahlen	591	13.7.1.1 Probengeometrie	652
13.4.5 Vergleich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfverfahren	591	13.7.1.2 Versuchsdurchführung	652
13.5 Mechanische Werkstoffprüfverfahren	593	13.7.1.3 Kennwerte	653
13.5.1 Zugversuch	593	13.7.2 Härteprüfung an Kunststoffen	654
13.5.1.1 Historisches	593	13.7.2.1 Kugelindruckversuch	656
		13.7.2.2 Härteprüfung nach Shore an Kunststoffen	656
		13.7.2.3 Internationaler Gummihärtegrad (IRHD)	658
		13.7.3 Charpy-Schlagversuch nach ISO	658
		Englische Fachausdrücke	660
		Sachwortverzeichnis	676
		Bildquellennachweis	697
		Anhang	699