

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

3.4	Intermetallische Phasen und Überstrukturen	74
3.4.1	Intermetallische Phasen	74
3.4.2	Überstrukturen	74
3.5	Zustandsdiagramme	75
3.5.1	Binäre Zustandsdiagramme	76
3.5.1.1	Erstellung binärer Zustandsdiagramme	76
3.5.1.2	Lesen binärer Zustandsdiagramme	77
3.5.1.3	Kristallseigerung und Zonenmischkristalle	78
3.5.2	Grundtypen binärer Zustandsdiagramme	79
3.5.2.1	Vollkommene Unlöslichkeit im festen und flüssigen Zustand	79
3.5.2.2	Vollkommene Löslichkeit im festen und flüssigen Zustand (Linsendiagramm)	79
3.5.2.3	Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand (eutektisches Legierungssystem)	80
3.5.2.4	Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und begrenzte Löslichkeit im festen Zustand (eutektisches Legierungssystem mit Mischungslücke)	81
3.5.2.5	Peritektisches Zustandsdiagramm	82
3.5.3	Zustandsdiagramme mit Verbindungsbildung	83
3.5.4	Reale Zustandsdiagramme	83
3.5.5	Ternäre Zustandsdiagramme	84

4 Wechselwirkungen zwischen Werkstoffeigenschaften und Fertigungsverfahren

4.1	Urformen	87
4.1.1	Kristallisation und Gefüge	87
4.1.2	Gussfehler	89
4.1.3	Gießbarkeit metallischer Werkstoffe	91
4.1.3.1	Fließ- und Formfüllungsvermögen	91
4.1.3.2	Schwindung	92
4.1.3.3	Schmelzverhalten von Gusswerkstoffen	92
4.1.4	Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften beim Gießen	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 Lötens	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	Flussmittel, 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	Schmelztauchen	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	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

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 Legie- rungselemente im Stahl	211
5.2.3.2 Elektrolichtbogenofen-Verfahren	149	6.4 Wärmebehandlung der Stähle	212
5.2.3.3 Stahl-Sekundärmetallurgie	150	6.4.1 Prinzip einer Wärmebehandlung	
5.3 Erzeugung von Nichteisenmetallen	151	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
5.4 Legieren von Metallen	153	6.4.3.2 Weichglühen von Stählen (Glühen auf kugelige Carbide)	216
5.5 Formgebungsverfahren für metallische Werkstoffe	155	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
5.6 Recycling von metallischen Werkstoffen 164		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 Eisenwerkstoffe		6.4.4.8 Temperaturbereich der Martensit- bildung	233
6.1 Reines Eisen	166	6.4.4.9 Restaustenit und Tiefkühlung	234
6.2 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	168	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 δ -Ferrit)	168	6.4.4.12 Abschrecken und Abschreckmittel	237
6.2.1.2 Verbindungsphasen (Zementit und ϵ -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
6.3 Eisenbegleiter und Legierungs- elemente	181	6.4.6.1 Einteilung der Oberflächenhärte- verfahren	255
6.3.1 Begleitelemente und nicht- metallische Einschlüsse	182	6.4.6.2 Randschichthärteverfahren	255
6.3.1.1 Mangan (Mn)	182	6.4.6.3 Thermochemisches Behandeln	260
6.3.1.2 Silicium (Si)	183	6.5 Eigenschaften und Verwendung von Stählen	272
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
6.5.2	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
6.6	Eisengusswerkstoffe	320
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

7.1	Aluminiumwerkstoffe	353
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
7.2	Magnesiumwerkstoffe	368
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
7.3	Titan und Titanlegierungen	374
7.4	Silicium	377
7.4.1	Weitere bedeutsame Leichtmetalle	378
7.5	Kupferwerkstoffe	379
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	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 ₂ O 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 ₂ TiO ₅)	516
9.8.1.2	Copolymerer 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 ₃ N 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 ₄ C)	527
9.9.3	Mechanische Bearbeitung	494	10.8	Elektro- und Magnetokeramik	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
			10.8.1.4	Heißeleiter	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	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
			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
10	Keramische Werkstoffe				
10.1	Einordnung keramischer Werkstoffe ..	500			
10.2	Eigenschaften keramischer Werkstoffe ..	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	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			

11.5.2	Aktiver Korrosionsschutz	551
11.5.3	Konstruktive Maßnahmen	553

12 Tribologie

12.1	Tribosysteme	555
12.1.1	Aufbau eines Tribosystems	555
12.1.2	Funktion eines Tribosystems	556
12.2	Hauptgebiete der Tribologie	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	Verschleißbeständige (tribotechnische) Werkstoffe	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	Einführung	572
13.2	Aufgaben der Werkstoffprüfung	572
13.3	Einteilung der Werkstoffprüfverfahren ..	573
13.4	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren	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	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
13.5	Mechanische Werkstoffprüfverfahren ...	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	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
13.6	Technologische Prüfungen	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	Stirnabschreckversuch nach Jominy	648
13.7	Mechanische Prüfverfahren für Kunststoffe	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
Englische Fachausdrücke		660
Sachwortverzeichnis		676
Bildquellennachweis		697
Anhang		699