

Hans-Jürgen Bargel · Günter Schulze (Hrsg.)

Werkstoffkunde

10., bearbeitete Auflage

Unter Mitarbeit von
Hermann Hilbrans, Karl-Heinz Hübner, Oswald Krüger

Inhalt

Abkürzungen	XXI
Häufig benutzte Symbole	XXI
1 Grundlagen der Metall- und Legierungskunde	1
1.1 Aufbau kristalliner Stoffe	1
1.1.1 Bindungsformen anorganischer Stoffe	1
1.1.2 Gitteraufbau des Idealkristalls	2
1.1.3 Realkristalle, Gitterbaufehler, Energie von Fehlstellen	4
1.1.3.1 Punktförmige Gitterbaufehler	5
1.1.3.2 Versetzungen	6
1.1.3.3 Zweidimensionale Gitterfehler	7
1.1.4 Einkristall, Vielkristall	8
1.1.4.1 Korngröße	9
1.1.4.2 Kornformen	9
1.2 Eigenschaften der Metalle	10
1.2.1 Elektrische und thermische Eigenschaften	10
1.2.1.1 Elektrische Leitfähigkeit	10
1.2.1.2 Wärmeleitfähigkeit	11
1.2.1.3 Magnetismus	12
1.2.2 Mechanische Eigenschaften	13
1.2.2.1 Elastische und plastische Verformung	13
1.2.2.2 Mechanismen der plastischen Verformung	14
1.2.2.3 Verformbarkeit, Gleitsysteme	15
1.2.2.4 Verfestigung	16
1.2.2.5 Fließkurve	18
1.3 Phasenumwandlungen	18
1.3.1 Primärkristallisation bei reinen Metallen	19
1.3.1.1 Keimbildung	19
1.3.1.2 Kristallwachstum	20
1.3.2 Primärkristallisation bei Legierungen	21
1.3.3 Einfluss der Korngrenzen	21
1.3.4 Umwandlungen im festen Zustand	23
1.3.4.1 Martensitbildung	24
1.3.4.1.1 Martensit in Fe-C-Legierungen	24
1.3.4.1.2 Formgedächtnislegierungen	25
1.4 Thermisch aktivierte Vorgänge	26
1.4.1 Diffusion	27
1.4.1.1 1. Ficksches Gesetz, Diffusionskoeffizient	27
1.4.1.2 Platzwechselmechanismen	28
1.4.1.3 Technische Anwendungen	28
1.4.2 Erholung und Rekristallisation	29
1.4.3 Kriechvorgänge und Spannungsrelaxation	32

1.5 Grundlagen der Legierungsbildung	34
1.5.1 Mischkristalle	34
1.5.1.1 Substitutionsmischkristalle (SMK)	35
1.5.1.2 Einlagerungsmischkristalle (EMK)	35
1.5.2 Intermediäre Kristalle	36
1.6 Zustandsschaubilder	36
1.6.1 Grundlagen. Begriffe, Definitionen	36
1.6.2 Phasengesetz	37
1.6.3 Aufstellen der Zustandsschaubilder	37
1.6.4 Zustandsschaubilder von Zweistofflegierungen	39
1.6.4.1 Vollkommene Unlöslichkeit im flüssigen und festen Zustand	39
1.6.4.2 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand	40
1.6.4.3 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand, vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand	41
1.6.4.4 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand, begrenzte Löslichkeit im festen Zustand	42
1.6.4.4.1 Eutektische Systeme	43
1.6.4.4.2 Peritektische Systeme	45
1.6.5 Zustandsschaubilder mit intermediären Phasen	46
1.6.6 Zustandsschaubilder mit Umwandlungen im festen Zustand	46
1.6.7 Nichtgleichgewichtszustände	48
1.6.7.1 Kristallseigerung	48
1.6.7.2 Unterkühlungserscheinungen in eutektischen Systemen	49
1.6.7.3 Entartetes Eutektikum	49
1.7 Eigenschaften technischer Legierungen – Anwendungen der Zustandsschaubilder	50
1.7.1 Eigenschaften von Legierungen aus Kristallgemengen	50
1.7.2 Eigenschaften von Legierungen aus Mischkristallen	51
1.7.3 Eigenschaften von Legierungen mit Umwandlungen im festen Zustand	51
1.7.3.1 Legierungen mit Überstrukturen und intermediären Phasen	51
1.7.3.2 Legierungen, die Segregate bilden – Aushärten	52
1.8 Korrosion	55
1.8.1 Elektrochemische Grundlagen	56
1.8.1.1 Elektrolyt	56
1.8.1.2 Lösungstension, elektrochemische Spannungsreihe	56
1.8.1.3 Korrosionselement	58
1.8.1.4 Wasserstoffkorrosion	58
1.8.1.5 Sauerstoffkorrosion	59
1.8.2 Korrosionsformen	60
1.8.3 Korrosionsarten	61
1.8.3.1 Korrosion ohne mechanische Beanspruchung	61
1.8.3.2 Korrosion mit zusätzlicher mechanischer Beanspruchung	62
1.8.4 Korrosionsverhalten der Werkstoffe	63
1.8.5 Korrosionsschutz	64
1.8.6 Korrosionsprüfungen	65
Ergänzende und weiterführende Literatur	66

2	Einwirkung von Herstellung und Weiterverarbeitung auf die Eigenschaften von Metallen	67
2.1	Metallgewinnung, Verhüttung	67
2.1.1	Erze, Anreicherungsverfahren	67
2.1.2	Verhüttung, Reduktion	67
2.1.3	Raffination	68
2.1.4	Nichtmetallische Verunreinigungen	69
2.1.5	Gase im Metall	69
2.2	Schmelzen und Erstarren	71
2.2.1	Ausgewählte Erstarrungsvorgänge	71
	Erstarrung in der Kokille	71
	Erstarrung in Gusskonstruktionen	71
	Kristallisation in Schweißverbindungen	71
	Gerichtete Erstarrung	72
2.2.2	Seigerungen	72
2.2.3	Lunker	73
2.2.4	Einfluss des Gießverfahrens	74
2.3	Umformen	75
2.3.1	Warmformgebung	76
2.3.1.1	Umformtemperatur	76
2.3.1.2	Einfluss des Gefüges	76
2.3.1.3	Warmformgebungsverfahren	77
2.3.2	Kaltformgebung	78
2.3.2.1	Einfluss des Gefüges	78
2.3.2.2	Kaltformgebungsverfahren	79
2.4	Sintern (Pulvermetallurgie)	79
2.4.1	Pulverherstellung, Sintervorgang	79
2.4.2	Möglichkeiten und Eigenschaften von Sinterwerkstoffen	80
2.5	Schweißen und Löten	81
2.5.1	Thermische Wirkung	81
2.5.2	Schweißelastizitäten	82
2.5.3	Aufbau und Eigenschaften der thermisch beeinflussten Bereiche	83
2.5.4	Werkstoffbedingte Besonderheiten und Schwierigkeiten beim Schweißen	86
2.5.4.1	Probleme während des Erwärmens	86
2.5.4.2	Probleme während des Erstarrens	86
2.5.4.3	Verbindungsschweißen unterschiedlicher Werkstoffe	87
2.5.5	Werkstoffbedingte Probleme beim Löten	88
2.6	Eigenspannungen	94
2.6.1	Eigenspannungen infolge Kaltverformung	95
2.6.2	Eigenspannungen infolge schneller Abkühlung	95
2.6.3	Nachweis und Abbau von Eigenspannungen	96
	Ergänzende und weiterführende Literatur	96

3	Werkstoffprüfung	97
3.1	Statische Festigkeits- und Verformungskennwerte	97
3.1.1	Spannung – Verformung – Verlauf	97
3.1.2	Elastische Kennwerte	99
3.1.3	Kennwerte des Zugversuchs	100
3.1.4	Kennwerte des Druckversuchs	102
3.1.5	Biegeversuch und Verdrehversuch	103
3.1.6	Zeitstandversuch	104
3.1.7	Einflussfaktoren	105
3.1.7.1	Versuchsbedingte Einflüsse	105
3.1.7.2	Werkstoffbedingte Einflüsse	106
3.1.7.3	Vergleich verschiedener Werkstoffe	107
3.1.7.4	Besonderheiten einzelner Werkstoffgruppen	107
3.2	Festigkeits- und Verformungskennwerte bei schwingender Beanspruchung	108
3.2.1	Definitionen	108
3.2.1.1	Kennzeichnung schwingender Beanspruchung	108
3.2.1.2	Einstufige Beanspruchung	109
3.2.1.3	Mehrstufige Beanspruchung	110
3.2.2	Prüfverfahren	110
3.2.3	Einflüsse auf die Schwingfestigkeit	111
3.2.3.1	Spannungsverhältnis, Dauerfestigkeitsschaubild	111
3.2.3.2	Spannungsgradient	112
3.2.3.3	Oberfläche	112
3.2.3.4	Prüfbedingungen	113
3.2.3.5	Statische Festigkeit	114
3.2.4	Werkstoffverhalten bei schwingender Beanspruchung	114
3.2.4.1	Verfestigung, Entfestigung	114
3.2.4.2	Gefügeänderungen	115
3.2.4.3	Rissbildung, Rissfortschritt	115
3.2.4.4	Schwingungsbruch (Dauerbruch)	116
3.3	Härtekennwerte	116
3.3.1	Begriffe	116
3.3.2	Statische Härteprüfverfahren	117
3.3.2.1	Messung der Eindruckfläche	117
3.3.2.2	Messung der Eindringtiefe	118
3.3.2.3	Vergleich von Härteangaben	120
3.3.3	Dynamische Härteprüfverfahren	120
3.3.4	Einflüsse auf die Härtewerte	121
3.4	Kennwerte des Bruchverhaltens	121
3.4.1	Bruchformen	121
3.4.2	Bruchkriterien, Grundlagen der Bruchmechanik	124
3.4.3	Verfahren zur Prüfung des Zähigkeitsverhaltens	126
3.4.3.1	Kerbschlagbiegeversuch nach CHARPY	127
3.4.3.2	Kompakt-Zugversuch	129
3.4.3.3	Weitere Prüfverfahren	129
3.4.4	Einflüsse auf das Bruchverhalten	130
3.4.5	Anwendungsgrenzen von Bruchversuchen	132

3.5 Technologische Prüfverfahren	132
3.5.1 Prüfung der Umformeigenschaften	133
3.5.2 Prüfung der Gießeigenschaften	134
3.5.3 Weitere technologische Prüfungen	134
3.6 Zerstörungsfreie Prüfung	135
3.6.1 Kapillarverfahren	135
3.6.2 Magnetische und induktive Verfahren	135
3.6.3 Schallverfahren	136
3.6.4 Strahlenverfahren	137
3.7 Metallografische Untersuchungsverfahren	137
3.7.1 Makroskopische Verfahren	138
3.7.2 Mikroskopische Verfahren	138
3.7.2.1 Lichtmikroskopie	138
3.7.2.2 Raster-Elektronenmikroskopie	139
3.7.2.3 Durchstrahlungs-Elektronenmikroskopie	139
3.8 Physikalische Analyseverfahren	140
3.8.1 Spektralanalyse	140
3.8.1.1 Lichtemissionsspektroskopie	140
3.8.1.2 Röntgenspektroskopie	140
3.8.2 Röntgenfeinstrukturuntersuchung	141
Ergänzende und weiterführende Literatur	142
4 Eisenwerkstoffe	143
4.1 Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS)	143
4.1.1 Metallkundliche Grundlagen	143
Reines Eisen	143
Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	143
4.1.2 Phasenänderungen im Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS)	144
4.2 Einteilung der Eisenwerkstoffe	147
4.3 Stahlherstellung	148
4.3.1 Hochofenerzeugnisse	148
4.3.2 Erschmelzungsverfahren	148
4.3.2.1 Allgemeine Grundlagen	148
4.3.2.2 THOMAS-Verfahren (T)	149
4.3.2.3 SIEMENS-MARTIN-Verfahren (M)	149
4.3.2.4 Sauerstoff-Aufblas-Verfahren (Y)	149
4.3.2.5 Elektro Stahl-Verfahren (E)	150
4.3.3 Sekundärmetallurgie (Pfannenmetallurgie)	151
4.3.4 Desoxidieren von Stahl	152
4.3.4.1 Vergießen von Stahl	153
4.3.4.2 Erstarren von Stahl	153
Unberuhigter Stahl (Kennzeichen FU (U))	153
Beruhigter Stahl (Kennzeichen (R))	153
Besonders beruhigter Stahl (Kennzeichen FF (RR))	154
4.3.5 Weitere Verarbeitung von Stahl	154

4.4	Wirkung der Eisenbegleiter	154
4.4.1	Mangan	154
4.4.2	Silicium	155
4.4.3	Phosphor	155
4.4.4	Schwefel	156
4.4.5	Stickstoff	157
4.4.6	Wasserstoff	157
4.4.7	Sauerstoff	160
4.4.8	Nichtmetallische Einschlüsse	160
4.5	Wärmebehandlung der Stähle	162
4.5.1	Ziel der Wärmebehandlung	162
4.5.2	Temperaturführung	162
4.5.3	Glühbehandlungen (gleichgewichtsnahe Zustände)	163
4.5.3.1	Diffusionsglühen (Homogenisieren)	163
4.5.3.2	Grobkornglühen	164
4.5.3.3	Spannungsarmglühen	164
4.5.3.4	Rekristallisationsglühen	165
4.5.3.5	Weichglühen	165
4.5.3.6	Normalglühen (Normalisieren)	166
4.5.4	Härten (Nichtgleichgewichtszustände)	167
4.5.4.1	Einfluss der beschleunigten Abkühlung	167
4.5.4.2	Umwandlung in der Perlitstufe	168
4.5.4.3	Umwandlung in der Bainitstufe	169
4.5.4.4	Umwandlung in der Martensitstufe	170
4.5.5	Austenitumwandlung	172
4.5.5.1	ZTU-Schaubilder für kontinuierliche Abkühlung	174
4.5.5.2	Isotherme ZTU-Schaubilder	175
4.5.5.3	ZTA-Schaubilder	175
4.5.6	Härteverfahren	178
4.5.6.1	Grundlagen, Begriffe	178
4.5.6.2	Abschrecken, Abschreckmittel	179
4.5.6.3	Einfaches Härten, kontinuierliches Härten	180
4.5.6.4	Gebrochenes Härten	180
4.5.6.5	Warmbadhärten, isothermes Härten	180
4.5.6.6	Härtenspannungen	181
4.5.6.7	Härtbarkeitsprüfung	181
4.5.7	Vergüten	182
4.5.7.1	Normales Vergüten (Anlassvergüten)	182
4.5.7.2	Bainitisieren	186
4.5.7.3	Patentieren – Perlitisieren	186
4.5.8	Verfahren zum Härten oberflächennaher Schichten	186
4.5.8.1	Verfahren mit begrenztem Wärmeeinbringen	187
	Flammhärten	187
	Induktionshärten	187
	Laserrandschichthärten	188
4.5.8.2	Verfahren mit Änderung der chemischen Zusammensetzung	188
	Einsatzhärten	188
	Nitrieren	190
4.6	Legierungselemente im Stahl	191
4.6.1	Einteilung und allgemeine Wirkung	192

4.6.1.1	Mischkristall- und Carbiddbildner	192
4.6.1.2	Verschiebung der Phasengrenzen im EKS	194
4.6.2	Austenitumwandlung, Darstellung im ZTU-Schaubild	195
4.6.3	Härtbarkeit und Härteverhalten legierter Stähle	196
4.7	Normgerechte Bezeichnung der Eisenwerkstoffe	197
4.7.1	Benennung nach DIN EN 10027-1	197
4.7.1.1	Kennzeichnung nach Verwendung und Eigenschaften	198
4.7.1.2	Kennzeichnung nach der chemischen Zusammensetzung	198
4.7.2	Kennzeichnung durch Werkstoffnummern (DIN EN 10027-2)	199
4.7.3	Benennung nach DIN 17006	199
4.8	Stahlgruppen	202
4.8.1	Einteilung der Stähle	202
4.8.2	Baustähle	203
4.8.2.1	Unlegierte Baustähle nach DIN EN 10025-2	204
4.8.2.2	Kaltgewalzte weiche Stähle zum Kaltumformen nach DIN EN 10130, DIN EN 10142	207
4.8.2.3	Hochfeste Baustähle	207
4.8.2.3.1	Methoden zum Erhöhen der Festigkeit	208
4.8.2.3.2	Hochfeste, nicht vergütete Feinkornbaustähle	211
4.8.2.3.3	Hochfeste vergütete Feinkornbaustähle	214
4.8.3	Härtbare Maschinenbaustähle	216
4.8.3.1	Vergütungsstähle	216
	Chemische Zusammensetzung	217
	Wärmebehandlung	219
4.8.3.2	Stähle für das Randschichthärten	221
4.8.3.3	Nitrierstähle	222
4.8.3.4	Einsatzstähle	224
4.8.4	Warmfeste und hitzebeständige Stähle	226
4.8.5	Kaltzähe Stähle	231
4.8.6	Nichtrostende Stähle	232
4.8.6.1	Perlitisch-martensitische Chromstähle	237
4.8.6.2	Ferritische und halb-ferritische Chromstähle	238
4.8.6.3	Austenitische Chrom-Nickel-Stähle	239
4.8.6.4	Austenitisch-ferritische Stähle	242
4.8.7	Druckwasserstoffbeständige Stähle	244
4.8.8	Werkzeugstähle	245
4.8.8.1	Anforderungen	245
4.8.8.2	Unlegierte Werkzeugstähle	247
4.8.8.3	Legierte Kaltarbeitsstähle	248
4.8.8.4	Warmarbeitsstähle	248
4.8.8.5	Schnellarbeitsstähle	248
4.9	Eisengusswerkstoffe	249
4.9.1	Begriff, Bedeutung, Einteilung	249
4.9.2	Stahlguss	251
4.9.2.1	Stahlgussorten	253
4.9.2.2	Schweißen von Stahlguss	256
4.9.3	Gusseisen – Übersicht	256
4.9.3.1	Gusseisendiagramme	257
4.9.3.2	Bezeichnung von Gusseisen	257

4.9.4	Hartguss	258
4.9.5	Graues Gusseisen	258
4.9.5.1	Grafitformen	258
4.9.5.2	Gusseisen mit Lamellengrafit	259
4.9.5.2.1	Mechanische Eigenschaften	259
4.9.5.2.2	Einfluss der Zusammensetzung	261
4.9.5.2.3	Schweißen von Grauguss	263
	Artgleiches Schweißen (Gusseisenwarmschweißen)	263
	Artfremdes Schweißen (Gusseisenkaltschweißen)	263
4.9.5.3	Gusseisen mit Kugelgrait	263
4.9.5.3.1	Schweißen von Gusseisen mit Kugelgrait	265
4.9.5.4	Gusseisen mit Vermiculargrait	266
4.9.6	Temperguss	266
4.9.6.1	Weißer Temperguss	267
4.9.6.2	Schwarzer Temperguss	268
	Ergänzende und weiterführende Literatur	270
5	Nichteisenmetalle	271
5.1	Normgerechte Bezeichnung der Nichteisenmetalle	271
5.1.1	Kurzzeichen	271
5.1.2	Werkstoffnummern	273
5.2	Kupfer und Kupferlegierungen	273
5.2.1	Kupferherstellung	274
5.2.2	Unlegiertes Kupfer	274
5.2.3	Legiertes Kupfer	277
5.2.4	Messing und Neusilber	278
5.2.5	Bronzen	280
5.2.6	Kupfer-Nickel-Werkstoffe mit besonderen elektrischen Eigenschaften	281
5.2.7	Korrosionsbeständige Kupfer-Nickel-Legierungen	283
5.3	Nickel und Nickellegierungen	283
5.3.1	Reinnickel	284
5.3.2	Legiertes Nickel	285
5.3.3	Nickel-Kupfer-Werkstoffe	285
5.3.4	Hochwarmfeste und hitzebeständige Nickellegierungen	286
5.3.5	Korrosionsbeständige Nickellegierungen	289
5.3.6	Nickelhaltige Magnetwerkstoffe	289
5.4	Aluminium und Aluminiumlegierungen	291
5.4.1	Unlegiertes Aluminium	292
5.4.2	Legierungssysteme des Aluminiums	294
5.4.3	Wärmebehandlung und Aushärten	295
5.4.4	Aluminium-Knetlegierungen	296
5.4.5	Aluminium-Gusslegierungen	297
5.4.6	Verarbeitung von Aluminiumlegierungen	298
5.5	Magnesium und Magnesiumlegierungen	299
5.5.1	Reinmagnesium	299
5.5.2	Magnesiumlegierungen	299

5.6 Titan und Titanlegierungen	301
5.6.1 Unlegiertes Titan	301
5.6.2 Titanlegierungen	302
5.7 Zirkonium und Reaktorwerkstoffe	304
5.8 Zinn und Zinnlegierungen	305
5.8.1 Reinzinn	305
5.8.2 Zinnlegierungen	306
5.9 Zink und Zinklegierungen	306
5.9.1 Unlegiertes und niedriglegiertes Zink	306
5.9.2 Zink-Überzüge	307
5.9.3 Zink-Druckguss	308
5.10 Blei und Bleilegierungen	309
5.10.1 Weichblei	309
5.10.2 Bleilegierungen	310
5.11 Recycling metallischer Werkstoffe	310
Ergänzende und weiterführende Literatur	312
6 Anorganische nichtmetallische Werkstoffe	313
6.1 Einteilung, Definition, Bedeutung	313
6.2 Glas	314
6.3 Keramik	318
6.3.1 Tonkeramische Werkstoffe	319
6.3.2 Oxidkeramische Werkstoffe	322
6.3.3 Ferroelektrische keramische Werkstoffe	324
6.3.4 Magnetische keramische Werkstoffe	326
6.4 Kohlewerkstoffe	328
6.5 Nichtoxidische Hartstoffe	330
6.5.1 Nichtmetallische Hartstoffe	330
6.5.2 Hartstoffe mit metallischen Eigenschaften	332
6.6 Halbleiter	334
6.6.1 Einleitung	334
6.6.2 Bändermodell	335
6.6.3 Eigenleitung	336
6.6.4 Störstellenleitung	337
6.6.5 p-n-Übergang	339
6.6.6 Transistor	341
6.6.7 HALL-Generator	341
6.6.8 Fotoelektrische Bauelemente	342

6.7 Nanotechnologie und Nanomaterialien	344
Ergänzende und weiterführende Literatur	346
7 Kunststoffe	347
7.1 Einteilung und Aufbau der Kunststoffe	347
7.1.1 Bezeichnungen, Begriffe	347
7.1.2 Eingruppierung der Kunststoffe	348
7.1.3 Vorprodukte, Formstoffe, Zusatzstoffe	349
7.1.4 Normung	350
7.2 Gemeinsame Eigenschaften, charakteristische Merkmale	351
7.2.1 Äußere Merkmale	351
7.2.2 Chemische und physikalische Eigenschaften	352
7.2.2.1 Chemische Beständigkeit	352
7.2.2.2 Dichte	352
7.2.2.3 Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung	352
7.2.2.4 Wärmebeständigkeit	353
7.2.3 Mechanische Eigenschaften	353
7.2.3.1 Festigkeit	353
7.2.3.2 Spannung-Dehnungsverhalten	354
7.2.3.3 Schlagzähigkeit	356
7.2.4 Elektrische Eigenschaften	356
7.2.4.1 Isolationswiderstand	357
7.2.4.2 Durchschlagfestigkeit	357
7.2.4.3 Kriechstromfestigkeit	358
7.2.4.4 Dielektrische Eigenschaften	358
7.2.4.5 Statische Aufladung	358
7.3 Herstellung	359
7.3.1 Chemische Grundlagen	359
7.3.1.1 Grundbegriffe	359
7.3.1.2 Kohlenstoffverbindungen	361
7.3.1.3 Polymerbildung	364
7.3.2 Polymerisation	365
7.3.2.1 Chemische Verfahren	365
7.3.2.2 Technische Prozesse	367
7.3.2.3 Polymerisate	368
7.3.2.4 Mischungen und Copolymerisate	369
7.3.3 Polykondensation	371
7.3.3.1 Polykondensate	371
Lineare Polyester	371
Polyamide	372
Formaldehyd-Kunstharze	373
7.3.4 Polyaddition	375
7.3.4.1 Polyaddukte	375
Polyurethane	375
Epoxidharze	376
7.4 Aufbau und strukturelle Einflüsse	377
7.4.1 Aufbauformen	377

7.4.1.1	Duroplaste	377
7.4.1.2	Elastomere	378
7.4.1.3	Thermoplaste	378
7.4.1.3.1	Amorphe Thermoplaste	378
7.4.1.3.2	Teilkristalline Thermoplaste	379
7.4.1.4	Thermoplastische Elastomere	380
7.5	Modifizierung von Kunststoffen	383
7.5.1	Strukturveränderungen	383
7.5.3	Additive	384
7.5.4	Füllstoffe	385
7.5.5	Verstärkungstoffe	386
7.6	Temperaturabhängige Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten	387
7.6.1	Thermische Zustands- und Übergangsbereiche	387
7.6.2	Temperaturabhängigkeit	389
7.6.3	Formgebungsmöglichkeiten	391
7.6.4	Verhalten im Gebrauchszustand	394
7.7	Kunststoffsorten	395
7.7.1	Duroplaste	395
	Phenol-Formaldehyd-Kunststoffe (Phenoplaste) PF	395
	Harnstoff-Formaldehyd-Kunststoffe UF Melamin-Formaldehyd-Kunststoffe MF (Aminoplaste)	396
	Glasfaserverstärkte Kunststoffe GFK	397
7.7.2	Thermoplaste	398
	Polystyrol PS	399
	Homopolymerisate	399
	Styrolcopolymerer und -Mischungen	399
	Styrol-Acrylnitril-Copolymerer SAN	399
	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate ABS	399
	Styrol-Butadien-Polymerisate SB	399
	Polyvinylchlorid PVC	400
	Emulsionspolymerisate PVC-E	400
	Suspensionspolymerisate PVC-S	400
	Massepolymerisate PVC-M	400
	Weichmacherfreies PVC (PVC-U)	401
	Weichmacherhaltiges PVC (PVC-P)	401
	Polyethylen PE	402
	Polypropylen PP	403
	Polyamid PA	404
	Polymethacrylsäuremethylester PMMA (Polymethacrylate)	405
	Polycarbonat PC	406
7.8	Bestimmung von Kunststoffen	407
7.9	Kunststoffprüfung	410
7.9.1	Mechanische Eigenschaften	410
7.9.1.1	Verhalten bei zügig gesteigerter Beanspruchung	410
7.9.1.1.1	Festigkeits- und Verformungskenngrößen	411
7.9.1.1.2	Elastizitätsmodul	411
7.9.1.1.3	Beurteilung der Versuchsergebnisse	412

7.9.1.2	Zeitstandverhalten	412
7.9.1.3	Isochrones Spannung-Dehnung-Diagramm	413
7.9.1.4	Verhalten bei Schlag- und Stoß-beanspruchung	414
7.9.1.5	Verhalten bei dynamischer Beanspruchung	415
7.9.1.6	Härte	415
7.9.2	Mechanisch-thermisches Verhalten	418
7.9.2.1	Schubmodul und Dämpfung	418
7.9.2.2	Formbeständigkeit in der Wärme	419
7.9.3	Elektrische Eigenschaften	420
7.9.3.1	Isoliereigenschaften	421
	Durchschlagfestigkeit	422
	Kriechstromfestigkeit	422
7.9.3.2	Dielektrisches Verhalten	423
7.10	Kriterien zur Kunststoffauswahl	424
7.10.1	Allgemeine Anforderungen	424
7.10.2	Eigenschaftskennwerte	425
	Ergänzende und weiterführende Literatur	426
8	Schadensanalyse	427
8.1	Schadensuntersuchungen	428
8.1.1	Untersuchung von Oberflächenschäden	428
8.1.2	Fraktografie	429
8.1.3	Werkstoffuntersuchungen	430
8.2	Beispiele von Schadenfällen	431
8.2.1	Wasserschaden durch undichten Rohrentlüfter	431
8.2.2	Bruch eines Auslassventils	432
8.2.3	Bruch der Kurbelwelle eines Dieselmotors	434
8.2.4	Lochkorrosion in einem Wärmeübertrager	435
8.2.5	Bruch von Federringen infolge Wasserstoffversprödung	435
	Ergänzende und weiterführende Literatur	436
9	Sachwortverzeichnis	437