

Hans Domininghaus[†] · Peter Elsner (Hrsg.)
Peter Eyerer (Hrsg.) · Thomas Hirth (Hrsg.)

Kunststoffe

Eigenschaften und Anwendungen

7., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 817 Abbildungen und 240 Tabellen

 Springer

Inhalt

Kunststoffübersicht (synthetische Kunststoffe)	XXV
1 Einführung in Polymer Engineering	1
1.1 Einteilungen	3
1.1.1 Einteilung der Werkstoffe	3
1.1.2 Einteilung der Kunststoffe	4
1.1.3 Einteilung der Verbundwerkstoffe	4
1.1.4 Hauptmerkmale von Kunststoffen (in Anlehnung an DIN 7724)	5
1.1.5 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe	14
1.1.5.1 Wirtschaftsdaten zu Thermoplasten	14
1.1.5.2 Wirtschaftsdaten zu Duroplasten	14
1.1.5.3 Wirtschaftsdaten zu Elastomeren	14
1.1.5.4 Preisspanne für Kunststoffe	16
Literatur – Kapitel 1.1	17
1.2 Synthese (Herstellung, Erzeugung) von Kunststoffen	17
1.2.1 Übersicht Polymerisation	17
1.2.2 Zuordnung von Kunststoffen zu Polymerisationsarten	19
1.2.3 Polymerisationen	21
1.2.3.1 Additionspolymerisation	21
1.2.3.1.1 Kettenreaktion (im deutschen Sprachraum früher: Polymerisation)	21
1.2.4 Einflüsse der Polymerisation auf die Werkstoffeigenschaften	27
1.2.5 Duroplaste (technische Harze)	29
1.2.6 Abgewandelte Naturstoffe	31
1.2.6.1 Kunststoffe auf Cellulosebasis	31
1.2.6.2 Kunststoffe auf Proteinbasis	32
1.2.6.3 Kunststoffe auf Ligninbasis	32
1.2.7 Kunststofferzeugung (verfahrenstechnische Prozesse)	33
Literatur – Kapitel 1.2	33
1.3 Eigenschaften von Kunststoffen in Bauteilen	34
1.3.1 Aufbau der Kunststoffe	35
1.3.1.1 Chemische Ordnungszustände	37

1.3.1.2	Physikalische Ordnungszustände	52
1.3.2	Mechanische Eigenschaften	57
1.3.2.1	Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften	57
1.3.2.2	Verformungsverhalten von Kunststoffen	61
1.3.2.3	Verhalten bei Zugbelastung	63
1.3.2.4	Mechanische Dämpfung	66
1.3.2.5	Zeitabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften . .	67
1.3.3	Weitere physikalische Eigenschaften	70
1.3.4	Chemische Eigenschaften	74
1.3.4.1	Beständigkeit gegen Chemikalien/Medien	74
1.3.4.2	Alterung und Beständigkeit von Kunststoffen	78
1.3.4.3	Schutzmaßnahmen gegen Alterungsvorgänge	81
1.3.5	Zusatzstoffe für Kunststoffe	81
	Literatur – Kapitel 1.3	82
1.4	Verarbeitung (Urformen) von Kunststoffen zu Bauteilen	84
1.4.1	Aufbereitung und Zusatzstoffe (Additive)	84
1.4.2	Verarbeitung von Kunststoffschmelzen	91
1.4.2.1	Fließeigenschaften von Schmelzen	92
1.4.2.2	Verformungsverhalten von Schmelzen	96
1.4.3	Verarbeitung von Thermoplasten	97
1.4.3.1	Spritzgießen	100
1.4.3.2	Extrudieren	107
1.4.3.3	Verarbeitungstechniken thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe	111
1.4.4	Verarbeitung von thermoplastischen Elastomeren . . .	116
1.4.5	Verarbeitung von Elastomeren	118
1.4.5.1	Formgebung (Rohlingsverarbeitung) und Vernetzung (Vulkanisation)	119
1.4.6	Verarbeitung von Duroplasten	120
1.4.6.1	Verarbeitungsprinzip	120
1.4.6.2	Typisierung von Duroplasten (härtbare Formmassen)	123
1.4.6.3	Einteilung der Verarbeitungsverfahren	124
1.4.7	Verarbeitungseinflüsse auf Bauteileigenschaften	124
1.4.7.1	Bauteileigenschaften	126
1.4.7.2	Einflüsse des Verfahrens und des Kunststoffes auf die Bauteileigenschaften	130
1.4.7.2.1	Thermoplaste und thermoplastische Elastomere: Molekül-Orientierungen	131
	Literatur – Kapitel 1.4	142
1.5	Kunststoffe und Bauteile – Umwelt und Recycling	146
1.5.1	Kreislaufwirtschaft und Recycling	146
1.5.1.1	Bauteil-Wiederverwendung	147
1.5.1.2	Möglichkeiten der werkstofflichen Kreislaufführung .	148

1.5.3.1	Rohstoffliche Kreislaufführung	149
1.5.3.2	Verbrennung	149
1.5.1.4.1	Verbrennungskonzepte und -aggregate	150
1.5.1.4.2	Verbrennung in Kraftwerken	151
1.5.1.4.3	Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen	151
1.5.1.5	Ausblick	151
1.5.2	Umweltbewertung und -bilanzierung von Kunststoffen	152
1.5.2.1	Ganzheitliche Bilanzierung	153
	Literatur Kapitel 1.5	154
1.6	Ausblick zu Polymer Engineering	156
1.6.1	Werkstoffherstellung, Synthese	156
1.6.2	Werkstoffeigenschaften	157
1.6.3	Verarbeitung, Verfahrenstechnik	157
1.6.4	Werkzeugtechnik	158
1.6.5	Konstruktion, Berechnung	158
1.6.6	• Oberflächentechnik	159
1.6.7	Qualitätsmanagement	159
1.6.8	Serienfertigung	160
1.6.9	Umweltaspekte, Recycling, Entsorgung	160
1.6.10	Ausbildung	161
	Literatur – Kapitel 1.6	161
2	Synthetische Kunststoffe	163
2.1	Thermoplastische Polymere	163
2.1.1	Polyolefine (PO)	165
2.1.1.1	Polyethylen (PE)	167
2.1.1.1.1	PE-LD und PE-HD	173
2.1.1.1.2	PE-LLD	209
2.1.1.1.3	PE-UHMW	218
2.1.1.1.4	Polyethylen-Modifikationen	224
2.1.1.1.4.1	Vernetztes Polyethylen (PEX)	224
2.1.1.1.4.2	Chlorierte Polyolefine	228
2.1.1.1.4.2.1	Chloriertes Polyethylen (PE-C) (thermoplastisches Elastomer)	228
2.1.1.1.4.2.2	Vernetzte chlorierte Polyolefine (PE-CX)	232
2.1.1.1.4.3	Sulfochloriertes Polyethylen	233
2.1.1.1.4.4	Phosphorylierung, Sulfophosphorylierung, Sulfierung, Oxidation	233
2.1.1.1.4.5	Copolymere des Ethylens	234
2.1.1.1.4.5.1	Ethylen/Vinylacetat-Copolymere (EVAC)	234
2.1.1.1.4.5.2	Ethylen/Vinylalkohol-Copolymere (EVOH)	239
2.1.1.1.4.5.3	Ethylen/Ethylacrylat-Copolymere (EEAK)	240
2.1.1.1.4.5.4	Ethylen/Methacrylat-Copolymere (EMA)	242
2.1.1.1.4.5.5	Ethylen/Acrylsäure-Copolymere (EAA)	243

2.1.1.1.4.5.6	Ethylen/Butylarcrylat-Copolymere (EBA)	244
2.1.1.1.4.6	Abbaubare Polyethylene und andere Kunststoffe	245
2.1.1.1.5	Literatur – Kapitel 2.1.1.1	246
2.1.1.2	Polypropylen (PP)	247
2.1.1.2.1	Synthese und Compoundierung	248
2.1.1.2.1.1	Synthese	248
2.1.1.2.1.2	Struktur und Morphologie	250
2.1.1.2.1.3	Compound und Blend	256
2.1.1.2.2	Eigenschaften	261
2.1.1.2.2.1	Thermo-Mechanische Eigenschaften	261
2.1.1.2.2.2	Beständigkeit und Sperrfähigkeit	272
2.1.1.2.2.3	Elektrische, optische, akustische Eigenschaften	273
2.1.1.2.3	Verarbeitung und Anwendung	274
2.1.1.2.3.1	Urformen	275
2.1.1.2.3.2	Umformen	278
2.1.1.2.3.3	Fügen	278
2.1.1.2.3.4	Veredelung	279
2.1.1.2.4	Gesundheit und Umwelt	279
2.1.1.2.5	Handelsnamen	284
2.1.1.2.6	Literatur – Kapitel 2.1.1.2	286
2.1.1.3	Polybuten-1 (PB)	289
2.1.1.4	Polyisobutylen (PIB)	296
2.1.1.5	Poly-4-methylpenten-1 (PMP)	299
2.1.1.6	Andere aliphatische Polyolefine	303
2.1.1.7	Ionomere	304
2.1.1.8	Cycloolefinpolymere (COC)	308
2.1.1.9	Verbundwerkstoffe auf Basis Kohlenstoff-Polyolefine	314
	Literatur – Kapitel 2.1.1.3–2.1.1.9	315
2.1.2	Vinylpolymere	317
2.1.2.1	Polyvinylchlorid (PVC)	318
2.1.2.1.1	Synthese und Compoundierung	318
2.1.2.1.1.1	Synthese	318
2.1.2.1.1.2	Struktur	320
2.1.2.1.1.3	Rohstoffeigenschaften	320
2.1.2.1.1.4	Additive und Zuschlagstoffe	322
2.1.2.1.1.5	Compound und Blend	328
2.1.2.1.2	Eigenschaften	329
2.1.2.1.2.1	Thermo-Mechanische Eigenschaften	329
2.1.2.1.2.2	Beständigkeiten und Sperrfähigkeit	341
2.1.2.1.2.3	Elektrische und optische Eigenschaften	344
2.1.2.1.2.4	Sonstige Eigenschaften	348
2.1.2.1.3	Verarbeitung und Anwendung	348
2.1.2.1.3.1	Urformen	351
2.1.2.1.3.2	Pastenverarbeitung	352
2.1.2.1.3.3	Schäumen	353
2.1.2.1.3.4	Bearbeiten	353
2.1.2.1.3.5	Fügen	353

2.1.2.1.3.6	Veredelung	356
2.1.2.1.3.7	Anwendungsbeispiele	356
2.1.2.1.4	Sicherheit, Umwelt und Recycling	358
2.1.2.1.4.1	Sicherheit	358
2.1.2.1.4.2	Recycling	359
2.1.2.1.5	Sortiment	363
2.1.2.1.5.1	Lieferformen	363
2.1.2.1.5.2	Typisierung	363
2.1.2.1.5.3	Handelsnamen	363
2.1.2.1.6	Literatur – Kapitel 2.1.2.1	364
2.1.2.2	Polyvinylchlorid-Modifikationen	365
2.1.2.2.1	Erhöhung der Schlagzähigkeit	367
2.1.2.2.2	Höhere Wärmeformbeständigkeit	375
2.1.2.2.3	Modifikationen mit speziellen PVC-Typen	378
2.1.2.2.3.1	PVC-Modifikationen mit VC-VAc-Copolymeren	379
2.1.2.2.3.2	PVC-Modifikationen mit speziellen E-PVC-Typen	381
2.1.2.2.3.3	Oberflächenmodifizierung mit „hochmolekularem PVC“	383
2.1.2.2.3.4	PVC-Modifikation mit kautschukreichen PVC-Pfropfpolymeren	384
2.1.2.2.4	Barriereeigenschaftsänderungen mit Mehrschichtfolien	387
2.1.2.2.5	PVC-Naturfaser-Verbunde	397
2.1.3	Styrolpolymere (PS)	405
2.1.3.1	Styrol-Homopolymere (PS)	407
2.1.3.2	Styrol-Copolymere	424
2.1.3.2.1	Schlagzähmodifizierte Polystyrole	426
2.1.3.2.1.1	Styrol/Butadien-Pfropfcopolymere (SB)	429
2.1.3.2.1.2	Styrol/Butadien/Styrol-Blockcopolymere (SBS)	438
2.1.3.2.1.3	Thermoplastische Styrol/Butadien-Elastomere (SBS-TE)	449
2.1.3.2.1.4	Styrol/ α -Methylstyrolcopolymere (S/MS)	455
2.1.3.2.2	Styrol/Acrylnitrilcopolymere (SAN)	456
2.1.3.2.2.1	SAN-Modifikationen	469
2.1.3.2.2.1.1	Acrylnitril/Polybutadien/Styrolpfropfpolymere (ABS)	469
2.1.3.2.2.1.2	Propfcopolymere aus MMA, SB und ABS (MABS)	479
2.1.3.2.3.1	Polymerblends aus (ABS + PC)	484
2.1.3.2.3.2	Acrylnitril/Styrol/Acrylester-Pfropfcopolymere (ASA)	491
2.1.3.2.3.3	Polymerblends aus ASA und Polycarbonat (ASA + PC)	504
2.1.3.3	Literatur – Kapitel 2.1.3	509
2.1.4	Polyacrylate	511
2.1.4.1	Polyacrylnitril (PAN)	512
2.1.4.1.1	Synthese und Compoundierung	512
2.1.4.1.1.1	Synthese	512
2.1.4.1.1.2	Struktur und Morphologie	513
2.1.4.1.2	Eigenschaften	513
2.1.4.2	Acrylnitril-Copolymere mit geringer Gasdurch- lässigkeit (Barriere-Kunststoffe)	514
2.1.4.2.1	Styrol/Acrylnitrilcopolymer SAN	514
2.1.4.2.2	Acrylnitril-Methyl-Acrylat-Copolymerisate	515

2.1.4.2.2.1	Eigenschaften	515
2.1.4.2.2.2	Verarbeitung	517
2.1.4.2.2.3	Handelsnamen	517
2.1.4.3	Polymethylmethacrylat (PMMA)	518
2.1.4.3.1	Synthese und Compoundierung	518
2.1.4.3.2	Eigenschaften	520
2.1.4.3.2.1	Thermo-mechanische Eigenschaften	521
2.1.4.3.2.2	Beständigkeit und Sperrfähigkeit	528
2.1.4.3.2.3	Elektrische, optische, akustische Eigenschaften	531
2.1.4.3.3	Verarbeitung und Anwendung	533
2.1.4.4	PMMA/ABS Blends	536
2.1.4.5	Polymethylmethacrylimid (PMMI)	537
2.1.4.6	MBS-Polymerisat	537
2.1.4.7	Polymethacryl/Imid (PM/I)	537
2.1.4.7.1	Synthese und Compoundierung	537
2.1.4.7.1.1	Die Herstellung von ROHACELL®	538
2.1.4.7.2	Eigenschaften	538
2.1.4.8	Literatur – Kapitel 2.1.4	539
2.1.5	Polyacetal (POM)	541
	Literatur – Kapitel 2.1.5	574
2.1.6	Fluorkunststoffe	575
2.1.6.1	Polytetrafluorethylen (PTFE)	576
2.1.6.2	Tetrafluorethylen/Hexafluorpropylencopolymer (FEP)	597
2.1.6.3	Tetrafluorethylen/Ethylencopolymer (E/TFE)	606
2.1.6.4	Polytrifluorchlorethylen (PCTFE)	612
2.1.6.5	Polyvinylfluorid (PVF)	617
2.1.6.6	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	620
2.1.6.7	Thermoplastische Fluorelastomere	628
2.1.6.8	Literatur – Kapitel 2.1.6	629
2.2	Polykondensate	631
2.2.1	Thermoplastische Polykondensate	633
2.2.1.1	Polyamide (PA)	638
2.2.1.1.1	Allgemeine Stoffbeschreibung	638
2.2.1.1.1.1	Nomenklatur	639
2.2.1.1.2	Aliphatische Polyamide	641
2.2.1.1.2.1	Struktur und allgemeine Eigenschaften	643
2.2.1.1.2.2	Eigenschaften	650
2.2.1.1.2.3	Verarbeitung	682
2.2.1.1.2.4	Sicherheit, Umwelt und Recycling	689
2.2.1.1.3	Partiell aromatische Polyamide	689
2.2.1.1.3.1	Polyarylamide: Arylamid PA MXD 6	689
2.2.1.1.3.1.1	Allgemeine Stoffbeschreibung, Synthese und Struktur	689
2.2.1.1.3.1.2	Eigenschaften	690
2.2.1.1.3.1.3	Verarbeitung	694
2.2.1.1.3.2	Polyamid 6/6T	694

2.2.1.1.3.2.1	Allgemeine Stoffbeschreibung, Struktur und allgemeine Eigenschaften	694
2.2.1.1.3.2.2	Eigenschaften	696
2.2.1.1.3.2.3	Beständigkeit	706
2.2.1.1.3.2.4	Elektrische Eigenschaften	706
2.2.1.1.3.2.5	Verarbeitung	707
2.2.1.1.3.3	Polyphthalamid PPA	711
2.2.1.1.3.3.1	Allgemeine Stoffbeschreibung, Struktur und allgemeine Eigenschaften	711
2.2.1.1.3.3.2	Thermo-Mechanische Eigenschaften	712
2.2.1.1.3.3.3	Beständigkeit	720
2.2.1.1.3.3.4	Verarbeitung	721
2.2.1.1.3.4	Weitere partiell aromatische Polyamide	723
2.2.1.1.3.4.1	Eigenschaften	723
2.2.1.1.4	Modifizierte Polyamide	723
2.2.1.1.4.1	Flexible Polyamide	725
2.2.1.1.4.1.1	Verarbeitung	726
2.2.1.1.4.1.2	Anwendungsbeispiele	726
2.2.1.1.4.2	Co-Polyamide	726
2.2.1.1.4.2.1	Verarbeitung	726
2.2.1.1.5	Thermoplastische Polyamid-Elastomere	727
2.2.1.1.5.1	PA 12-Elastomere	728
2.2.1.1.5.1.1	Allgemeine Stoffbeschreibung, Synthese und Struktur	728
2.2.1.1.5.1.2	Thermo-Mechanische Eigenschaften	729
2.2.1.1.5.1.3	Verarbeitung	729
2.2.1.1.5.2	PA 11-Elastomer	730
2.2.1.1.5.2.1	Allgemeine Stoffbeschreibung, Synthese und Struktur	730
2.2.1.1.6	Guss-Polyamide und Polyamid-RIM-Systeme	731
2.2.1.1.6.1	Allgemeine Eigenschaften	731
2.2.1.1.6.1.1	Allgemeine Stoffbeschreibung, Synthese und Struktur	731
2.2.1.1.6.1.2	Verarbeitung	733
2.2.1.1.6.2	Gusspolyamid 6	736
2.2.1.1.6.2.1	Allgemeine Stoffbeschreibung	736
2.2.1.1.6.2.2	Verarbeitung von ϵ -Carpolactam zu PA G-6	736
2.2.1.1.6.3	Gusspolyamid 6/12 (Copolymerisation)	737
2.2.1.1.6.3.1	Allgemeine Stoffbeschreibung	737
2.2.1.1.6.4	Elastomermodifiziertes Gusspolyamid 6 (Nyrin™)	737
2.2.1.1.6.4.1	Allgemeine Stoffbeschreibung	737
2.2.1.1.6.4.2	Verarbeitung	738
2.2.1.1.6.4.3	Anwendungsbeispiele	738
2.2.1.1.6.5	Gusspolyamid 12	738
2.2.1.1.6.5.1	Allgemeine Stoffbeschreibung	738
2.2.1.1.6.5.2	Verarbeitung von Laurinlactam zu PA 12-G	740
2.2.1.1.7	Polymermodifizierte Polyamide	740
2.2.1.1.7.1	Allgemeine Stoffbeschreibung	740
2.2.1.1.7.2	Verarbeitung	743
2.2.1.1.8	Sortiment	744

2.2.1.1.9	Literatur – Kapitel 2.2.1.1 bis 2.2.1.1.4.2	748
2.2.1.2	Thermoplastische Polyester	748
2.2.1.2.1	Polycarbonat (PC)	749
2.2.1.2.1.1	Verarbeitung und Anwendung	770
	Urformen	771
	Spritzgießen	771
2.2.1.2.1.2	PC-Cokondensate	796
2.2.1.2.1.2.1	Bisphenol A-Copolycarbonate	796
2.2.1.2.1.2.2	Blockpolymerisation	797
2.2.1.2.1.3	Entwicklungstrends bei aromatischen Polycarbonaten	797
2.2.1.2.1.3.1	Polycarbonate für laseroptische Datenspeicherung	798
2.2.1.2.1.3.2	Polycarbonate für Lichtwellenleiter	799
2.2.1.2.1.3.3	Erhöht wärmebeständige PC-Cokondensate (PEC)	800
2.2.1.2.1.3.4	Erhöht schlagzähe PC-Cokondensate	801
2.2.1.2.1.4	Polycarbonatblends	801
2.2.1.2.1.5	Polycarbonat + Styrolcopolymerblends (PC + ABS)-, (PC + ASA)- und (PC + SEBS)-Blends	802
2.2.1.2.1.6	Polycarbonat + Polybutylenterephthalat-Blends (PC + PBT)	814
2.2.1.2.1.7	Literatur – Kapitel 2.2.1.2–2.2.1.2.1.5	817
2.2.1.2.2	Polyalkylenterephthalate	818
2.2.1.2.2.1	Polyethylenterephthalat (PET)	819
2.2.1.2.2.1.1	Synthese	821
2.2.1.2.2.1.2	Eigenschaften	821
2.2.1.2.2.1.2.1	Struktur und Morphologie	821
2.2.1.2.2.1.2.2	Merkmale von teilkristallinem PET	822
2.2.1.2.2.1.2.3	Thermische und Mechanische Eigenschaften	823
2.2.1.2.2.1.2.4	Beständigkeiten	831
2.2.1.2.2.1.2.5	Elektrische, optische und akustische Eigenschaften	835
2.2.1.2.2.1.3	Verarbeitung und Compounding	836
2.2.1.2.2.1.3.1	Additive und Zuschlagstoffe	836
2.2.1.2.2.1.3.2	Verarbeitungsbedingte Polymer-Abbau- mechanismen	840
2.2.1.2.2.1.4	Verarbeitung und Anwendung	841
2.2.1.2.2.1.4.1	Bestimmung der intrinsischen Viskosität	841
2.2.1.2.2.1.4.2	Feuchtegehaltmessung	841
2.2.1.2.2.1.4.3	Trocknung	842
2.2.1.2.2.1.4.4	Thermoplastische Verarbeitung von PET	843
2.2.1.2.2.1.4.5	Urformen	843
2.2.1.2.2.1.4.6	Umformen, Fügen und Trennen	846
2.2.1.2.2.1.4.7	Spanende Verarbeitung	847
2.2.1.2.2.1.4.8	Veredelung	847
2.2.1.2.2.1.4.9	Verschäumen von PET	847
2.2.1.2.2.1.4.10	Anwendungsbeispiele	848
2.2.1.2.2.1.5	Sicherheit, Umwelt und Recycling	849
2.2.1.2.2.1.5.1	Verarbeitung, Arbeitsplatz	849

2.2.1.2.2.1.5.2	Brandverhalten	849
2.2.1.2.2.1.5.3	Produkte	849
2.2.1.2.2.1.5.4	Recycling	850
2.2.1.2.2.1.5.4.1	Werkstoffliches Recycling	850
2.2.1.2.2.1.5.4.2	Rohstoffliches Recycling	852
2.2.1.2.2.1.5.4.3	Energetisches Recycling	852
2.2.1.2.2.1.6	Handelsnamen	852
2.2.1.2.2.1.7	Lieferformen	854
2.2.1.2.2.1.8	Literatur – Kapitel 2.2.1.2.2.1	854
2.2.1.2.2.2	Polybutylentherephthalat (PBT)	855
2.2.1.2.2.2.1	Synthese und Compoundierung	856
2.2.1.2.2.2.1.1	Synthese	856
2.2.1.2.2.2.1.2	Struktur und Morphologie	856
2.2.1.2.2.2.1.3	Compound und Blend	856
2.2.1.2.2.2.2	Eigenschaften	857
2.2.1.2.2.2.2.1	Thermo-Mechanische Eigenschaften	859
2.2.1.2.2.2.2.1.1	Verhalten bei langzeitiger statischer Beanspruchung	862
2.2.1.2.2.2.2.1.2	Verhalten bei schwingender Beanspruchung, Biegegewchselfestigkeit	862
2.2.1.2.2.2.2.1.3	Reibungs- und Verschleißverhalten	863
2.2.1.2.2.2.2.1.4	Thermische Eigenschaften	863
2.2.1.2.2.2.2.1.5	Verhalten bei kurzzeitiger Temperatureinwirkung	864
2.2.1.2.2.2.2.2	Beständigkeit und Sperrfähigkeit	865
2.2.1.2.2.2.2.2.1	Wärmealterungsbeständigkeit	865
2.2.1.2.2.2.2.3	Elektrische, optische und akustische Eigenschaften	865
2.2.1.2.2.2.2.3.1	Brennverhalten	866
2.2.1.2.2.2.2.3.2	Prüfungen	867
2.2.1.2.2.2.2.3.3	Verhalten gegenüber Chemikalien	867
2.2.1.2.2.2.2.3.4	Verhalten bei Bewitterung	868
2.2.1.2.2.2.3	Verarbeitung und Anwendung	868
2.2.1.2.2.2.3.1	Urformen	869
2.2.1.2.2.2.3.1.1	Spritzguss	869
2.2.1.2.2.2.3.1.2	Extrusion	872
2.2.1.2.2.2.3.2	Fügen	873
2.2.1.2.2.2.3.2.1	Kleben	873
2.2.1.2.2.2.3.2.2	Schweißen	873
2.2.1.2.2.2.3.2.3	Spanende Bearbeitung	874
2.2.1.2.2.2.3.3	Veredelung	874
2.2.1.2.2.2.3.3.1	Lackieren, Metallisieren, Beschriften	874
2.2.1.2.2.2.4	Gesundheit und Umwelt	874
2.2.1.2.2.2.4.1	Sicherheitsvorkehrungen bei der Verarbeitung	874
2.2.1.2.2.2.4.2	Angaben zur Toxikologie, Vorschriften	875
2.2.1.2.2.2.4.3	Lebensmittelrechtliche Bestimmungen	875
2.2.1.2.2.2.4.4	Lagerung und Transport	875
2.2.1.2.2.2.4.5	Entsorgung	876
2.2.1.2.2.2.4.6	Recycling	876

2.2.1.2.2.2.5	Handelsnamen	876
2.2.1.2.2.2.6	Literatur	876
2.2.1.2.2.3	Thermoplastische Polyesterelastomere (TPE-E) . .	877
2.2.1.2.2.4	Polyethylenterephthalat als Barrierekunststoff . . .	882
2.2.1.2.3	Polyarylate (Polyarylester)	886
2.2.1.2.4	Eigenverstärkende teilkristalline Polymere (LCP) .	893
2.2.1.2.4.1	LCP und Technische Kunststoffe – ein Vergleich . .	910
2.2.1.2.5	Polyarylether	913
2.2.1.2.5.1	Polyphenylenether (PPE _{mod}) (substituiert, modifiziert) = Polyphenylenetherblends	914
2.2.1.2.5.2	Blend aus Polyamid und Polyphenylenether (mod.) (PA + PPE _{mod})	923
2.2.1.2.6	Polyarylsulfon und -sulfid	925
2.2.1.2.6.1	Polysulfon (PSU)	927
2.2.1.2.6.1.1	Synthese und Compoundierung	927
2.2.1.2.6.1.1.1	Synthese	927
2.2.1.2.6.1.1.2	Struktur und Morphologie	927
2.2.1.2.6.1.1.3	Compound und Blend	927
2.2.1.2.6.1.2	Eigenschaften	928
2.2.1.2.6.1.2.1	Thermo-Mechanische Eigenschaften	928
2.2.1.2.6.1.2.1.1	Thermische Eigenschaften	928
2.2.1.2.6.1.2.1.2	Mechanische Eigenschaften	930
2.2.1.2.6.1.2.2	Beständigkeit und Sperrfähigkeit	935
2.2.1.2.6.1.2.3	Elektrische, optische Eigenschaften	938
2.2.1.2.6.1.2.3.1	Elektrische Eigenschaften	938
2.2.1.2.6.1.2.3.2	Optische Eigenschaften	939
2.2.1.2.6.1.3	Verarbeitung und Anwendung	939
2.2.1.2.6.1.3.1	Urformen	940
2.2.1.2.6.1.3.2	Umformen	941
2.2.1.2.6.1.3.3	Fügen	941
2.2.1.2.6.1.3.3.1	Schweißen	941
2.2.1.2.6.1.3.3.2	Kleben	941
2.2.1.2.6.1.3.3.3	Lösbare Verbindungen	942
2.2.1.2.6.1.3.4	Veredelung	942
2.2.1.2.6.1.4	Gesundheit und Umwelt	942
2.2.1.2.6.1.5	Handelsnamen	943
2.2.1.2.6.2	Polyethersulfon (PESU)	943
2.2.1.2.6.2.1	Synthese und Compoundierung	943
2.2.1.2.6.2.1.1	Synthese	943
2.2.1.2.6.2.1.2	Struktur und Morphologie	943
2.2.1.2.6.2.1.3	Compound und Blend	944
2.2.1.2.6.2.2	Eigenschaften	944
2.2.1.2.6.2.2.1	Thermo-Mechanische Eigenschaften	945
2.2.1.2.6.2.2.1.1	Thermische Eigenschaften	945
2.2.1.2.6.2.2.1.1	Mechanische Eigenschaften	946
2.2.1.2.6.2.2.2	Beständigkeit und Sperrfähigkeit	953
2.2.1.2.6.2.2.3	Elektrische, optische Eigenschaften	956

2.2.1.2.6.2.2.3.1	Elektrische Eigenschaften	956
2.2.1.2.6.2.2.3.2	Optische Eigenschaften	956
2.2.1.2.6.2.3	Verarbeitung und Anwendung	956
2.2.1.2.6.2.3.1	Urformen	958
2.2.1.2.6.2.3.2	Umformen	959
2.2.1.2.6.2.3.3	Fügen	959
2.2.1.2.6.2.3.4	Veredelung	960
2.2.1.2.6.2.4	Gesundheit und Umwelt	960
2.2.1.2.6.2.5	Handelsnamen	960
2.2.1.2.6.3	Polyphenylensulfid (PPS)	961
2.2.1.2.6.3.1	Synthese und Compoundierung	961
2.2.1.2.6.3.1.1	Synthese	961
2.2.1.2.6.3.1.2	Struktur und Morphologie	961
2.2.1.2.6.3.1.3	Compound und Blend	961
2.2.1.2.6.3.2	Eigenschaften	962
2.2.1.2.6.3.2.1	Thermo-Mechanische Eigenschaften	962
2.2.1.2.6.3.2.1.1	Thermisches Verhalten	962
2.2.1.2.6.3.2.1.2	Mechanisches Verhalten	967
2.2.1.2.6.3.2.2	Beständigkeit und Sperrfähigkeit	973
2.2.1.2.6.3.2.2.1	Chemikalienbeständigkeit	973
2.2.1.2.6.3.2.2.2	Witterungsbeständigkeit	974
2.2.1.2.6.3.2.2.3	Brennbarkeit	974
2.2.1.2.6.3.2.2.4	Wasseraufnahme und Hydrolysebeständigkeit	975
2.2.1.2.6.3.2.3	Elektrische, optische und akustische Eigenschaften	975
2.2.1.2.6.3.2.3.1	Elektrische Eigenschaften	975
2.2.1.2.6.3.3	Verarbeitung und Anwendung	975
2.2.1.2.6.3.3.1	Beispiele für Anwendungen von PPS	975
2.2.1.2.6.3.3.2	Urformen	976
2.2.1.2.6.3.3.2.1	Spritzgießen	977
2.2.1.2.6.3.3.2.2	Extrusion	977
2.2.1.2.6.3.3.3	Umformen	980
2.2.1.2.6.3.3.3.1	Thermoformen	980
2.2.1.2.6.3.3.3.2	Spanende Bearbeitung	980
2.2.1.2.6.3.3.4	Fügen	981
2.2.1.2.6.3.3.4.1	Schweißen	981
2.2.1.2.6.3.3.4.2	Kleben	981
2.2.1.2.6.3.3.4.3	Schnapp- und Schraubverbindungen	981
2.2.1.2.6.3.3.5	Veredeln	982
2.2.1.2.6.3.3.5.1	Lackieren	982
2.2.1.2.6.3.3.5.2	Bedrucken	982
2.2.1.2.6.3.3.5.3	Metallisieren	982
2.2.1.2.6.3.3.5.4	Beschriften mittels Laserstrahlen	982
2.2.1.2.6.3.4	Gesundheit und Umwelt	982
2.2.1.2.6.3.5	Handelsnamen	983
2.2.1.2.7	Polyetherketone	983
2.2.1.2.7.1	Aromatische Polyetherketone (PEK, PEEK)	983
2.2.1.2.7.2	Aliphatische Polyetherketone (PEK)	1002

2.2.1.2.8	Hochwärmebeständige duro- und thermoplastische Polykondensate und Polyaddukte	1012
2.2.1.2.8.1	Polyimide (PI)	1016
2.2.1.2.8.1.1	Klassisches Polyimid (PI)	1017
2.2.1.2.8.1.2	Copolyimide	1030
2.2.1.2.8.1.2.1	Poly-oxadiazobenzimidazol	1030
2.2.1.2.8.1.2.2	Polybenzimidazol (PBI)	1031
2.2.1.2.8.1.3	Gemischt ein- und zweibindige Polymere	1034
2.2.1.2.8.1.3.1	Polybismaleinimid	1034
2.2.1.2.8.1.3.2	Polyamidimid (PAI)	1043
2.2.1.2.8.1.3.3	Polyetherimid (PEI)	1053
2.2.1.2.8.1.3.4	Polyesterimid	1064
2.2.1.2.8.2	Literatur – Kapitel 2.2.1.2.8	1065
2.2.2	Duroplastische Polykondensate	1067
2.2.2.1	Phenolharze (Phenoplaste, PF-Harze)	1069
2.2.2.1.1	Allgemeines	1069
2.2.2.1.1.1	Historie	1069
2.2.2.1.1.1.1	Chemie	1070
2.2.2.1.1.2	Novolake	1070
2.2.2.1.1.3	Resole	1073
2.2.2.1.1.4	Herstellung	1074
2.2.2.1.1.5	Umwelt	1075
2.2.2.1.1.5.1	Rohstoffe	1075
2.2.2.1.1.5.2	Recycling	1075
2.2.2.1.2	Anwendungen von Phenolharzen	1076
2.2.2.1.2.1	Härtbare PF-Formmassen	1076
2.2.2.1.2.1.1	Struktur und allgemeine Eigenschaften	1078
2.2.2.1.2.1.2	Aufbereitung / Compoundierung	1085
2.2.2.1.2.1.3	Verarbeitung	1085
2.2.2.1.2.2	Holzwerkstoffe	1087
2.2.2.1.2.3	Lamine	1089
2.2.2.1.2.4	Dämmstoffe	1089
2.2.2.1.2.4.1	Mineralwolle	1089
2.2.2.1.2.4.2	Phenolharzschäume	1090
2.2.2.1.2.5	Schleifmittel	1090
2.2.2.1.2.6	Reibbeläge	1091
2.2.2.1.2.7	Feuerfestmaterialien	1092
2.2.2.1.2.8	Kohlenstoffbauteile	1092
2.2.2.1.2.9	Textilvlies	1093
2.2.2.1.2.10	Coatings	1093
2.2.2.1.2.11	Gummi	1094
2.2.2.1.2.12	Gießerei	1094
2.2.2.1.2.13	Sonstige Anwendungen	1094
2.2.2.1.2.14	Zukunft	1095
2.2.2.2	Harnstoff/Formaldehyd-Kunststoffe (Aminoplaste) (UF)	1096
2.2.2.2.1	Härtbare UF-Formmassen	1097

2.2.2.2.2	Technische Harnstoffharze	1102
2.2.2.3	Melamin/Formaldehyd-Kunststoffe (MF)	1103
2.2.2.3.1	Härtbare MF-Formmassen	1104
2.2.2.3.2	Modifizierte MF-Formmassen	1107
2.2.2.3.2.1	Härtbare Melamin/Phenol/Formaldehyd- Formmassen	1107
2.2.2.3.2.2	Technische Melaminharze	1109
2.2.2.4	Ungesättigte Polyesterharze (UP)	1110
2.2.2.4.1	Synthese und Compoundierung	1116
2.2.2.4.1.1	Synthese	1116
2.2.2.4.1.2	Struktur und Morphologie	1117
2.2.2.4.1.3	Compound und Blend	1118
2.2.2.4.2	Eigenschaften	1122
2.2.2.4.2.1	Thermo-Mechanische Eigenschaften	1122
2.2.2.4.2.2	Beständigkeit und Sperrfähigkeit	1133
2.2.2.4.2.3	Elektrische, optische, akustische Eigenschaften	1135
2.2.2.4.3	Verarbeitung und Anwendung	1138
2.2.2.4.3.1	Urformen	1143
2.2.2.4.3.2	Umformen	1145
2.2.2.4.3.3	Bearbeiten	1146
2.2.2.4.3.4	Fügen	1146
2.2.2.4.3.5	Veredeln	1146
2.2.2.4.3.6	Anwendungsbeispiele	1147
2.2.2.4.4	Sicherheit, Umwelt und Recycling	1147
2.2.2.4.5	Sortiment	1149
2.2.2.4.6	Literatur – Kapitel 2.2.2.4	1151
2.2.2.5	Verwandte Reaktionsharz-Formmassen	1151
2.2.2.5.1	Alkydharz-Formmassen	1151
2.2.2.5.2	Polydiallylphthalat-Formmassen (PDAP)	1154
2.2.2.6	Silicone (SI)	1156
2.2.2.6.1	Einleitung	1156
2.2.2.6.1.1	Herstellung	1156
2.2.2.6.2	Müller-Rochow-Synthese	1157
2.2.2.6.3	Siliconöle	1159
2.2.2.6.4	Siliconharze	1161
2.2.2.6.5	RTV-2 Siliconkautschuke	1161
2.2.2.6.6	RTV-1 Siliconkautschuke	1163
2.2.2.6.7	HTV-Siliconkautschuke	1165
2.2.2.6.8	Zusammenfassung der Eigenschaften der Silicone	1167
2.2.2.6.9	Markt und Anwendungen für Silicone	1168
2.2.2.6.10	Literatur – Kapitel 2.2.2.6.1–2.2.2.6.9	1169
2.2.2.6.11	Härtbare Siliconharz-Formmassen	1169
2.2.2.6.12	Literatur – Kapitel 2.2.2.6.11	1173
2.2.3	Polyaddukte	1175
2.2.3.1	Duroplastische Polyaddukte	1175
2.2.3.1.1	Epoxidharze (EP)	1176
2.2.3.1.2	Technische Epoxidharze	1176

2.2.3.1.3	Prepregs	1197
2.2.3.2	Duroplaste als Hochleistungswerkstoffe mit günstigem Preis/Leistungsverhältnis	1198
2.2.3.2.1	Vernetzte Polyurethane (PUR)	1200
2.2.3.2.1.1	Isocyanatharze	1201
2.2.3.2.1.2	Polyurethan-Gießharz	1208
2.2.3.2.1.3	PUR-Integralschaumstoffe	1212
2.2.3.2.2	Thermoplastische Polyurethan-Elastomere (TPE-U) . .	1219
2.2.3.2.2.1	Thermoplastische Polyaddukte	1228
2.2.3.2.2.1.1	Lineare Polyurethane	1228
2.2.3.3	Literatur – Kapitel 2.2.3	1230
3	Elastomere	1231
3.1	Marktwirtschaftliche Betrachtungen	1231
3.2	Compounding *	1233
3.2.1	Füllstoffe	1233
3.2.2	Alterungsschutz	1234
3.2.3	Weichmacher	1236
3.2.4	Vernetzungssysteme	1238
3.2.4.1	Schwefelvernetzung	1240
3.2.4.2	Peroxidvernetzung	1242
3.3	Verarbeitung	1243
3.4	Elastomere Werkstoffeigenschaften	1243
3.4.1	Medieneinfluss	1244
3.4.2	Temperatur	1246
3.5	Umwelt und Gesundheit	1249
3.6	Polymere	1251
3.6.1	Naturkautschuk (NR)	1251
3.6.1.1	Struktur	1251
3.6.1.2	Eigenschaften	1252
3.6.1.3	Verarbeitung	1252
3.6.1.4	Anwendung	1253
3.6.1.5	Handelsnamen	1253
3.6.2	Butadien-Kautschuk (BR)	1254
3.6.2.1	Struktur	1254
3.6.2.2	Eigenschaften	1255
3.6.2.3	Verarbeitung	1255
3.6.2.4	Anwendung	1256
3.6.2.5	Handelsnamen	1256
3.6.3	Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)	1257
3.6.3.1	Struktur	1257

3.6.3.2	Eigenschaften	1258
3.6.3.3	Verarbeitung	1258
3.6.3.4	Anwendung	1259
3.6.3.5	Handelsnamen	1259
3.6.4	Chlorbutadien-Kautschuk (CR)	1259
3.6.4.1	Struktur	1259
3.6.4.2	Eigenschaften	1260
3.6.4.3	Verarbeitung	1260
3.6.4.4	Anwendung	1261
3.6.4.5	Handelsnamen	1261
3.6.5	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR)	1261
3.6.5.1	Struktur	1261
3.6.5.2	Eigenschaften	1263
3.6.5.3	Verarbeitung	1263
3.6.5.4	Anwendung	1264
3.6.5.5	Handelsnamen	1264
3.6.6	Hydrierter Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (HNBR)	1265
3.6.6.1	Struktur	1265
3.6.6.2	Eigenschaften	1265
3.6.6.3	Verarbeitung	1265
3.6.6.4	Anwendung	1266
3.6.6.5	Handelsnamen	1266
3.6.7	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)	1266
3.6.7.1	Struktur	1266
3.6.7.2	Eigenschaften	1267
3.6.7.3	Verarbeitung	1268
3.6.7.4	Anwendung	1269
3.6.7.5	Handelsnamen	1269
3.6.8	Butyl-Kautschuk (IIR) und halogenerter Butyl-Kautschuk (XIIR)	1269
3.6.8.1	Struktur	1269
3.6.8.2	Eigenschaften	1270
3.6.8.3	Verarbeitung	1271
3.6.8.4	Anwendung	1271
3.6.8.5	Handelsnamen	1271
3.6.9	Ethylenoxid-Epichlorhydrin-Kautschuk (ECO)	1272
3.6.9.1	Struktur	1272
3.6.9.2	Eigenschaften	1272
3.6.9.3	Verarbeitung	1273
3.6.9.4	Anwendung	1273
3.6.9.5	Handelsnamen	1273
3.6.10	Acrylat-Kautschuk (ACM)	1274
3.6.10.1	Struktur	1274
3.6.10.2	Eigenschaften	1274
3.6.10.3	Verarbeitung	1275
3.6.10.4	Anwendung	1275
3.6.10.5	Handelsnamen	1276

3.6.11	Ethylen-Acrylat-Kautschuk (AEM)	1276
3.6.11.1	Struktur	1276
3.6.11.2	Eigenschaften	1276
3.6.11.3	Verarbeitung	1277
3.6.11.4	Anwendung	1277
3.6.11.5	Handelsnamen	1277
3.6.12	Fluor-Kautschuk (FKM)	1277
3.6.12.1	Struktur	1277
3.6.12.2	Eigenschaften	1279
3.6.12.3	Verarbeitung	1279
3.6.12.4	Anwendung	1280
3.6.12.5	Handelsnamen	1280
3.6.13	Perfluor-Kautschuk (FFKM)	1281
3.6.13.1	Struktur	1281
3.6.13.2	Eigenschaften	1281
3.6.13.3	Verarbeitung	1282
3.6.13.4	Anwendung	1282
3.6.13.5	Handelsnamen	1282
3.6.14	Silikonkautschuke	1282
3.6.14.1	Struktur	1282
3.6.14.2	Eigenschaften	1283
3.6.14.3	Verarbeitung	1284
3.6.14.4	Anwendung	1285
3.6.14.5	Handelsnamen	1285
3.6.15	Polyurethan (AU, EU)	1286
3.6.15.1	Struktur	1286
3.6.15.2	Eigenschaften	1287
3.6.15.3	Verarbeitung	1287
3.6.15.4	Anwendung	1288
3.6.15.5	Handelsnamen	1288
3.7	Chemikalienbeständigkeit der Polymere	1288
3.8	Literatur	1298
4	Spezialkunststoffe	1299
4.1	Abgewandelte Naturstoffe	1299
4.1.1	Stärke und Derivate	1300
	Literatur – Kapitel 4.1.1	1304
4.1.2	Polymilchsäure (PLA)	1305
	Literatur – Kapitel 4.1.2	1307
4.1.3	Polyhydroxyfettsäuren (PHF)	1308
	Literatur – Kapitel 4.1.3	1311
4.1.4	Cellulose und Cellulosederivate	1311
4.1.4.1	Vulkanfiber (VF)	1312

4.1.4.2	Kunststoffe aus abgewandelter Cellulose	1314
4.1.4.2.1	Celluloseester aus anorganischen Säuren	1314
4.1.4.2.1.1	Cellulosenitrat (CN)	1314
4.1.4.2.2	Celluloseester aus aliphatischen Carbonsäuren	1317
4.1.4.2.2.1	Celluloseacetat (CA)	1319
4.1.4.2.2.2	Cellulosepropionat (CP)	1325
4.1.4.2.2.3	Celluloseacetobutyrat (CAB)	1330
	Literatur – Kapitel 4.1.4	1333
4.1.5	Thermoplaste auf Ligninbasis	1333
	Literatur – Kapitel 4.1.5	1336
4.1.6	Duroplaste auf Basis nachwachsender Rohstoffe	1336
4.1.6.1	Polyurethane (mit Polyolen auf Basis natürlicher Öle/Fette)	1336
4.1.6.2	Epoxyacrylate auf Basis nachwachsender Rohstoffe	1337
4.1.6.3	Weitere Duroplaste und Duroplastanteile auf Basis pflanzlicher Fette und Öle	1338
	Literatur – Kapitel 4.1.6	1338
4.2	Elektrisch leitfähige Polymere	1338
4.2.1	Intrinsisch leitfähige Polymere	1339
4.2.2	Elektrisch leitfähige gefüllte Polymere	1341
4.2.2.1	Eigenschaften	1341
4.2.3	Elektrisch leitfähige beschichtete Polymere	1347
4.2.4	Literatur – Kapitel 4.2	1349
5	Anhang	1351
5.1	Kurzzeichen für Kunststoffe, Tabellenverzeichnis	1352
5.2	Kunststoffkennwerte, Tabellenverzeichnis	1379
6	Datenbanken	1405
7	Handelsnamenverzeichnis	1407
8	Kunststoffverzeichnis	1419
9	Sachverzeichnis	1421