

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Kurzzeichen der Kunststoff-Technik	1
1.1 Alphabetische Gliederung verwendeter Kurzzeichen für Kunststoffe, chemische Bezeichnung	2
1.2 Grundeinheiten, ISO- und US-Einheiten	10
2 Einleitung	13
2.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe	13
2.2 Einordnung der Kunststoffe in das Gebiet der Werkstoffe	15
2.3 Aufbau der Kunststoffe	19
2.3.1 Chemische Struktur (Konstitution und Konfiguration der Makromoleküle)	19
2.3.1.1 Konformation	20
2.3.1.2 Konfiguration	20
2.3.1.3 Konstitution	22
2.3.1.4 Kunststoff-Hauptgruppen	27
2.3.2 Morphologische Struktur (Konformation und Aggregation der Makromoleküle)	28
2.3.3 Kunststoffklassen	35
2.4 Einfluss der Fertigung auf die inneren Eigenschaften	37
2.4.1 Eigenspannungen	38
2.4.2 Molekül-Orientierung	39
2.4.3 Kristallisationsverhalten	41
2.5 Stoffliche Modifizierung von Kunststoffen	42
2.5.1 Copolymere und Polymermischungen (Blends)	42
2.5.2 Kunststoffverbunde	44

3	Eigenschaften und Prüfverfahren	47
3.1	Aussagekraft der Kennwerte	48
3.2	Verarbeitungstechnische Kennwerte	54
3.2.1	Rheologisches Verhalten	54
3.2.1.1	Fließverhalten, Viskosität	54
3.2.1.2	Viskositätsmodelle	60
3.2.1.3	Schmelze-Volumenfließrate MVR und Schmelze-Massenfließrate MFR	62
3.2.2	Erstarrungsverhalten	63
3.2.2.1	Siegelzeit	63
3.2.2.2	Schwindung	63
3.2.2.3	Verzug	69
3.2.2.4	Toleranzen	71
3.2.2.5	Füllstoff-Orientierung	71
3.2.3	Prüfung partikelförmiger Feststoffe	72
3.2.3.1	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung	73
3.2.3.2	Mechanik partikelförmiger Feststoffe	73
3.2.3.3	Adhäsionskräfte und Fließfähigkeit	74
3.2.3.4	Fließfähigkeit und der Fließort	77
3.3	Mechanisches Verhalten	79
3.3.1	Kurzzeitverhalten	79
3.3.1.1	Kurzzeit-Zugversuch	79
3.3.1.2	Kurzzeit-Biegeversuch	82
3.3.1.3	Druckversuch	84
3.3.1.4	Eindruckversuch, Härtemessung	84
3.3.2	Verhalten bei Stoß	85
3.3.2.1	Berechnungs-Kennwerte	85
3.3.2.2	Schlag-, Biege- und Zugversuche nach CAMPUS	87
3.3.3	Statisches Langzeitverhalten	89
3.3.3.1	Zeitstand-Zugversuch	89
3.3.3.2	Zeitstand-Innendruckversuch an Rohren	93
3.3.4	Dynamisches Langzeitverhalten	94
3.3.5	Moduln und Querszahl	97
3.3.6	Dichte	99
3.4	Thermisches Verhalten	101
3.4.1	Zulässige Gebrauchstemperatur	101
3.4.1.1	Kurzzeitige Temperatureinwirkung	101
3.4.1.2	Langzeitige Temperatureinwirkung	108
3.4.2	Spezifische Wärmekapazität, Spezifische Enthalpie, Verbrennungswärme	110

3.4.3	Wärmeleitfähigkeit	112
3.4.4	Wärmeeindringzahl	115
3.4.5	Temperaturleitfähigkeit	115
3.4.6	Wärme-Ausdehnungskoeffizient	116
3.5	Elektrisches Verhalten	123
3.5.1	Isolationsverhalten	125
3.5.1.1	Durchgangs-Widerstand/Leitfähigkeit	125
3.5.1.2	Oberflächen-Widerstand	128
3.5.1.3	Elektromagnetische Abschirmung (Verträglichkeit EMV, Compatibility EMC)	128
3.5.2	Festigkeitsverhalten	129
3.5.2.1	Elektrische Durchschlagfestigkeit	129
3.5.2.2	Elektrische Zeitstandfestigkeit	132
3.5.2.3	Kriechstromfestigkeit	133
3.5.2.4	Lichtbogen-Festigkeit	134
3.5.2.5	Elektrolytische Korrosion	134
3.5.3	Dielektrisches Verhalten	134
3.5.4	Elektrostatistisches Verhalten	136
3.5.5	Elektrisch leitfähige Kunststoffe	137
3.6	Optisches Verhalten	138
3.6.1	Lichtdurchlässigkeit	139
3.6.2	Glanz und Reflexion, Trübung	140
3.6.3	Farbe	141
3.6.3.1	Grundlagen	141
3.6.3.2	Farbmessung	141
3.6.4	Brechungsindex, Doppelbrechung	142
3.6.5	Oberflächenstruktur	146
3.7	Verhalten gegen Umwelteinflüsse	147
3.7.1	Wasser, Feuchtigkeit	148
3.7.2	Chemikalien	152
3.7.3	Spannungsrisssbeständigkeit	153
3.7.4	Atmosphärische Einflüsse	156
3.7.5	Energiereiche Strahlung	157
3.7.6	Beständigkeit gegen Organismen	157
3.7.7	Migration und Permeation	158
3.7.7.1	Wasserdampf-Durchlässigkeit	159
3.7.7.2	Gas-Durchlässigkeit	161
3.7.7.3	Wasserdampf-Diffusions-Widerstandszahl	165
3.7.8	Brandverhalten	165
3.8	Reibungs- und Verschleißverhalten	168

3.8.1	Reibung	168
3.8.1.1	Reibungsmechanismen	168
3.8.1.2	Ruckgleiten, Reibungsschwingung oder Stick-Slip-Effekt	169
3.8.2	Verschleiß	170
3.8.3	Probekörper und Prüfsysteme	171
3.8.4	Tribologische Eigenschaften von Thermoplasten	173
3.9	Analytische Untersuchungen	180
3.9.1	Infrarot (IR)- und Raman-Spektroskopie	180
3.9.2	Kernresonanz-Spektroskopie (Nuclear Magnetic Resonance: NMR)	181
3.9.3	Dynamisch-mechanische Spektroskopie (DMA)	181
3.9.4	Dielektrische Spektroskopie (DEA)	183
3.9.5	Differential-Thermoanalyse (DTA) und Differential- Kalorimetrie (DSC)	184
3.9.6	Thermogravimetrische Analyse (TGA)	186
3.9.7	Dilatometrie, Thermomechanische Analyse (TMA), spezifisches Volumen (ρvT)	187
3.9.8	Thermische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit	189
3.9.9	Lösungs-Viskosimetrie	191
3.9.10	Chromatographie	192
4	Kunststoffverarbeitung	195
4.1	Aufbereiten	197
4.1.1	Mischen	197
4.1.1.1	Mischer	200
4.1.1.2	Schneckenknetter für viskose Stoffe	201
4.1.1.3	Sonstige Mischer für viskose Stoffe	208
4.1.2	Granuliertvorrichtungen	211
4.1.3	Mühlen	213
4.1.4	Trockner	215
4.1.5	Aufbereiten härtdarer Formmassen	217
4.1.6	Aufbereitung von Recyclingmaterial	218
4.2	Extrudieren	218
4.2.1	Extruderbauformen	219
4.2.1.1	Einschneckenextruder	220
4.2.1.2	Zylinderbauarten: Glattrohr und Nutbuchse	221
4.2.1.3	Schneckenkonzepte: Dreizonen-, Barriereschnecke	223
4.2.1.4	Entgasungs-Extruder	223
4.2.1.5	Kaskaden- oder Tandem-Extruder	224

4.2.1.6	Schnellläufer-Extruder (adiabatischer Extruder) ..	225
4.2.1.7	Planetwalzen-Extruder	225
4.2.1.8	Doppelschneckenextruder	226
4.2.2	Zusatzeinrichtungen für Extruder	232
4.2.3	Extrusions-Werkzeuge und Nachfolgeeinrichtungen	233
4.2.3.1	Rohre und symmetrische Hohlprofile	233
4.2.3.2	Vollprofile	234
4.2.3.3	Hohlkammer-Profile	234
4.2.3.4	Ummantelungen	235
4.2.3.5	Platten und Flachfolien	236
4.2.3.6	Schlauchfolien	238
4.2.3.7	Geschäumte Halbzeuge und Profile	239
4.2.3.8	Monofilament, Bändchen, Fasern	241
4.2.3.9	Co- oder Mehrschichtextrudate	242
4.2.3.10	Mehrschichtige Bahnen	243
4.2.4	Kalanderte Folien	246
4.2.5	Hohlkörper mit variablem Querschnitt durch Extrusionsblasformen	248
4.3	Spritzgießen	250
4.3.1	Das Spritzgießverfahren	250
4.3.2	Bauformen von Spritzgießmaschinen	256
4.3.2.1	Schließeinheiten	256
4.3.2.2	Vollelektrische Spritzgießmaschine	256
4.3.2.3	Plastifizieraggregat	257
4.3.3	Allgemeine Hinweise zum Spritzgießen	259
4.3.4	Reinigen von Schnecken und Zylindern	263
4.3.5	Spritzgießsondervverfahren	263
4.3.5.1	Spritzprägen	264
4.3.5.2	Pulverspritzgießen	264
4.3.5.3	Mikrospritzgießen	265
4.3.5.4	Spritzgießen mit mehreren Einspritzeinheiten	265
4.3.5.5	Fluidinjektionstechnik	269
4.3.5.6	Schaumspritzgießen	271
4.3.5.7	(Flüssig)Silikonspritzgießen (LSR)	272
4.3.5.8	Spritzgießen mit Einlegeteilen	273
4.3.6	Spritzgießblasformen	275
4.4	Formwerkzeuge	276
4.4.1	Allgemeines zum Formenbau	276
4.4.2	Spritzgießwerkzeuge und Angussarten	278
4.4.3	Normalien für Werkzeuge	284
4.5	Schäumen	285

4.5.1	Schäumprinzipien	285
4.5.2	Herstellung von Partikelschaum	287
4.6	Gießen	288
4.7	Polyurethan(PUR)-Verarbeitungstechnik	289
4.7.1	Allgemeine Grundlagen	289
4.7.2	Die Verfahrensschritte	291
4.7.2.1	Nieder- und Hochdruckmaschinen	292
4.7.2.2	Spritz- oder Sprühmaschinen	296
4.7.2.3	Anlagen	297
4.7.2.4	Kontinuierliche Fertigung	297
4.7.2.5	Diskontinuierliche Fertigung	298
4.7.2.6	Herstellung faserverstärkter Teile	300
4.7.2.7	Reinigung	301
4.8	Herstellung von Hochleistungs-Faserverbundkunststoffen	301
4.8.1	Kurzfaserverstärkte Verbundkunststoffe	303
4.8.1.1	Spritzgießen	303
4.8.1.2	Bulk Molding Compounds	303
4.8.2	Langfaserverstärkte Verbundkunststoffe	305
4.8.2.1	Sheet Molding Compound	305
4.8.2.2	Glassmattenverstärkte Thermoplaste	306
4.8.2.3	Langfaserverstärkte Thermoplaste	307
4.8.3	Fertigungsprozesse mit moderatem Faseranteil	309
4.8.3.1	Manuelle Verfahren	309
4.8.3.2	Vakuumentstützte Harzinfusion	309
4.8.4	Fertigungsprozesse mit hohem Faseranteil	310
4.8.4.1	Resin Transfer Molding	311
4.8.4.2	Vakuumentstütztes Resin Transfer Molding	311
4.8.4.3	Compression Resin Transfer Molding	312
4.8.4.4	Structural Reaction Injection Molding	312
4.8.5	Wickeln	313
4.8.6	Pultrusion	316
4.8.7	Ablegeverfahren	317
4.8.7.1	Prepreg-Herstellung	317
4.8.7.2	Automated Tape Layup	318
4.9	Pressen	319
4.9.1	Schichtpressen	319
4.9.2	Strangpressen	321
4.9.3	Spritzpressen (Transferpressen)	321
4.10	Additive Fertigungsverfahren	322
4.10.1	Flüssige Werkstoffe	327

4.10.1.1	Stereolithografie (SLA)	327
4.10.1.2	Digital Light Processing (DLP)	328
4.10.1.3	UV-Assisted Direct Ink Writing (DIW)	329
4.10.1.4	Material Jetting (MJ)	330
4.10.2	Pulverbasierte Verfahren	330
4.10.2.1	Lasersintern (LS)	330
4.10.2.2	Hochgeschwindigkeitssintern (HSS)	332
4.10.2.3	3D-Druck (3DP)	332
4.10.2.4	In Entwicklung befindliche Verfahren	332
4.10.3	Filament-/Granulatbasierte Verfahren	333
4.10.3.1	Fused Filament Fabrication (FFF)	335
4.10.3.2	Granulatbasierte Strangablegeverfahren	336
4.10.3.3	Varianten	336
4.11	Faserherstellung	337
4.11.1	Textile Definitionen	337
4.11.2	Faserspinnen aus der Schmelze	338
4.11.2.1	Klassisches Faserspinnen	339
4.11.2.2	Meltblown-Verfahren	341
4.11.2.3	Vliesstoffherstellung	342
4.11.2.4	SMS-Vliesstoffe	344
4.11.2.5	Spezielle Düsengeometrien und deren Anwendung	348
4.11.3	Spezielle Faserherstellungsverfahren	349
4.11.3.1	Melt-Elektrospinning	351
4.11.3.2	Solution-Elektrospinning	352
4.11.4	Additive für das Faserspinnen	352
4.11.5	Relevante Polymerkenngrößen für das Faserspinnen	353
4.11.6	Prozessinstabilitäten	355
4.11.7	Einfache Korrelationen im Faserspinnprozess für den Praktiker	357
4.12	Rotationsformen	358
4.13	Umformen	361
4.13.1	Biegeformen	362
4.13.2	Ziehformen	363
4.13.3	Streckformen	364
4.14	Fügen	367
4.14.1	Einteilung der Fertigungsverfahren und Eingliederung Fügen	367
4.14.2	Einteilung der Kunststoffschweißverfahren	368
4.14.3	Schweißen	369

4.14.4	Serienschweißverfahren	370
4.14.4.1	Sequenzielle Stumpfschweißverfahren	371
4.14.4.2	Reibschweißverfahren	377
4.14.4.3	Ultraschallschweißen (US)	382
4.14.4.4	Laserdurchstrahlschweißen (LB)	384
4.14.5	Schweißen von Halbzeugen	387
4.14.5.1	Direktes Heizelementschiweißen	387
4.14.5.2	Indirektes Heizelementschiweißen	390
4.14.5.3	Konvektive Schweißverfahren	391
4.14.6	Schweißen durch elektromagnetisches Wechselfeld	395
4.14.6.1	Hochfrequenzschweißen (HF)	395
4.14.6.2	Induktionsschweißen (IND)	395
4.14.6.3	Mikrowellenschweißen (MW)	396
4.14.7	Kleben	397
4.14.8	Schrauben, Nieten, Schnappen	399
4.15	Oberflächenbehandlungen	399
4.15.1	Vorbehandlung der Oberflächen	400
4.15.1.1	Nasschemische Verfahren	400
4.15.1.2	Gasphasenbehandlung	400
4.15.1.3	Flammoxidieren	400
4.15.1.4	Strahlenbehandlung	401
4.15.1.5	Coronabehandlung	401
4.15.1.6	Plasmabehandlung	401
4.15.1.7	Mechanische Vorbehandlung	402
4.15.2	Polieren	403
4.15.3	Lackieren	403
4.15.4	Beschichten	404
4.15.5	Bedrucken, Beschriften und Dekorieren	405
4.15.6	Prägen, Heißprägen	407
4.15.7	Beflocken	407
4.15.8	Metallisieren von Folien	408
4.15.9	SiO _x -Beschichtung von Folien	409
4.15.10	Metallisieren	409
4.15.11	Einreiben	410
4.15.12	Fluorierung, Gasphasenfluorierung	410
4.15.13	Plasmaverfahren (Chemical Vapor Deposition, CVD)	411
4.15.14	Thermisches Spritzen	411
4.16	Sonstige Bearbeitungsverfahren	412
4.16.1	Spanabhebende Bearbeitung	412
4.16.2	Trennen, Abtragen	414
4.16.3	Strahlenvernetzung	415

4.16.4	Wärmebehandlung	416
4.16.5	Abbau elektrostatischer Aufladungen	416
4.17	Kreislaufwirtschaft – Recycling	417
4.17.1	Werkstoffliche Verwertung	418
4.17.2	Rohstoffliche Verwertung	421
5	Werkstoff- und verarbeitungsgerechte Konstruktion und Simulation	423
5.1	Systematisches Konstruieren von Produkten aus Kunststoff	424
5.1.1	Anforderungslisten, Pflichtenheft und Lastenheft	425
5.1.2	Konstruktionskataloge	426
5.2	Werkstoffauswahl	427
5.3	Fertigungsgerechtes Konstruieren	430
5.3.1	Auswahl des Fertigungsverfahrens	430
5.3.2	Fertigungsgerechtes Gestalten	430
5.4	Konstruktion mit faserverstärkten Kunststoffen	432
5.4.1	Faserlängenverteilung	433
5.4.2	Faserorientierungsverteilungen	435
5.4.3	Faserdichteverteilung	442
5.4.4	Faser-Matrix-Haftung	445
5.4.5	Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehung	446
5.5	Rechnerunterstützte Konstruktion	450
5.5.1	Struktursimulation mit der Methode der Finiten Elemente ..	450
5.5.2	Prozesssimulation	453
5.5.2.1	Werkzeugfüllsimulation	455
5.5.2.2	Vorhersage von Schwindung und Verzug	456
5.5.2.3	Orientierungsvorhersagen	457
5.5.3	Modellierung diskontinuierlicher faserverstärkter Materialien für die FEM-Implementierung	459
5.6	Werkstoffgerechtes Konstruieren	468
5.6.1	Dimensionierungsrechnung	468
5.6.2	Dimensionierungskennwerte	469
5.6.3	Konventionelle Dimensionierungsrechnung	473
5.6.4	Empirisch gestützte Dimensionierungsrechnung	473
5.6.5	Bauteilversuche an Prototypen und Modellen	473
5.7	Funktionselemente	474
5.7.1	Filmscharniere	474
5.7.2	Schnappverbindungen	475
5.7.3	Schraubverbindungen	476

5.7.4	Nieten	480
5.7.5	Schweißverbindungen	480
5.7.6	Pressverbindungen	481
6	Beschreibung der Kunststoffe	483
6.1	Allgemeine Hinweise	483
6.2	Polyolefine (PO), Polyolefinderivate und -copolymerisate	483
6.2.1	Polyethylen-Standard-Homo- und Copolymere (PE-LD, PE-HD, PE-HD-HMW, PE-HD-UHMW und PE-LLD) ...	484
6.2.1.1	Polymerisation, chemischer Aufbau	484
6.2.1.2	Verarbeitung	486
6.2.1.3	Nachbehandlung	488
6.2.1.4	Eigenschaften	488
6.2.1.5	Einsatzgebiete	492
6.2.2	Polyethylen-Derivate (PE-X)	493
6.2.3	Chloriertes und chloresulfoniertes PE (PE-C)	495
6.2.4	Ethylen-Copolymere (PE-ULD, EVAC, EVAL, EEAK, EB, EBA, EMA, EAA, E/P, EIM, COC, ECB, ETFE)	495
6.2.4.1	Ultraleichtes Polyethylen (PE-ULD, PE-VLD)	502
6.2.4.2	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVAC)	502
6.2.4.3	Ethylen/Vinylalkohol-Copolymere (EVAL)	504
6.2.4.4	Ethylen-Acryl-Copolymerisate (EEAK, EBA, EAA, EAMA, EMA)	505
6.2.4.5	PE- α -Olefin-Copolymere (PE α -PO-(M))	505
6.2.4.6	Cycloolefin-Copolymere (COC, COP)	505
6.2.4.7	Ionomere (EIM)	506
6.2.4.8	Ethylen-Copolymer-Bitumen-Blend (ECB, ECB/TPO)	508
6.2.5	Polypropylen-Homopolymerisate (PP, PP-H)	508
6.2.5.1	Chemischer Aufbau, Polymerisation	511
6.2.5.2	Verarbeitung	512
6.2.5.3	PP-Schaumstoffe (PP-E)	512
6.2.5.4	Nachbehandlung	512
6.2.5.5	Eigenschaften	513
6.2.5.6	Einsatzgebiete	514
6.2.6	Polypropylen-Copolymerisate und -Derivate, Blends (PP-C, PP-B, EPDM, PP+EPDM)	515
6.2.6.1	Chloriertes PP (PP-C)	515
6.2.6.2	PP-Copolymere (PP-B)	515
6.2.6.3	Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymer (EPDM)	516
6.2.6.4	PP+EPDM-Elastomer-Blends	516
6.2.6.5	Polypropylen-Blends	517

6.2.7	Polypropylen, Sondertypen	517
6.2.8	Polybutene (PB, PIB)	519
6.2.8.1	Polybuten-1 (PB)	520
6.2.8.2	Polyisobuten (PIB)	521
6.2.9	Höhere Poly-(α -Olefine) (PMP, PDCPD)	523
6.2.9.1	Poly-4-Methylpenten-1 (PMP)	523
6.2.9.2	Polydicyclopentadien (PDCPD)	524
6.3	Styrolpolymere	524
6.3.1	Polystyrol, Homopolymerisate (PS, PMS)	524
6.3.2	Polystyrol, Copolymerisate, Blends	525
6.3.2.1	Chemischer Aufbau	525
6.3.2.2	Verarbeitung	527
6.3.2.3	Eigenschaften	527
6.3.3	Polystyrol-Schaumstoff (PS-E, XPS)	534
6.4	Vinylpolymere	535
6.4.1	Polyvinylchlorid hart, Homopolymerisate (PVC-U)	535
6.4.1.1	Chemischer Aufbau	535
6.4.1.2	Lieferformen, Verarbeitung	536
6.4.1.3	Kennzeichnung	538
6.4.1.4	Eigenschaften und Einsatzgebiete	539
6.4.2	Polyvinylchlorid weich (PVC-P)	543
6.4.2.1	Aufbau	543
6.4.2.2	Lieferform, Verarbeitung	543
6.4.2.3	Weichmacher	544
6.4.2.4	Eigenschaften und Einsatzgebiete	547
6.4.3	Polyvinylchlorid: Copolymerisate und Blends	548
6.4.4	Polyvinylchlorid: Pasten, Plastisole, Organosole, Schäume ...	549
6.4.4.1	Pasten, Plastisole, Organosole	549
6.4.4.2	Schäume	550
6.4.5	Vinylpolymere, weitere Homo- und Copolymerisate (PVDC, PVAC, PVAL, PVME, PVFM, PVB, PVK, PVP)	551
6.4.5.1	Polyvinylidenchlorid (PVDC)	551
6.4.5.2	Polyvinylacetat (PVAC)	551
6.4.5.3	Polyvinylalkohol (PVAL)	551
6.4.5.4	Polyvinylmethylether (PVME)	552
6.4.5.5	Polyvinylbutyral, Polyvinylformal (PVB, PVFM) ...	552
6.4.5.6	Polyvinylcarbazol (PVK)	552
6.4.5.7	Polyvinylpyrrolidon und Copolymere (PVP)	553
6.5	Fluorpolymere	553
6.5.1	Fluor-Homopolymere (PTFE, PVDF, PVF, PCTFE)	553
6.5.1.1	Polytetrafluorethylen (PTFE)	556

6.5.1.2	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	558
6.5.1.3	Polyvinylfluorid (PVF)	558
6.5.1.4	Polychlortrifluorethylen (PCTFE)	559
6.5.2	Fluor-Copolymerisate und -Elastomere (ECTFE, ETFE, FEP, TFEP, PFA, AF, PTFEAF, TFEHFPVDF (THV bzw. TFB), [FKM, FPM, FFKM])	560
6.5.2.1	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (ECTFE) ..	560
6.5.2.2	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE)	560
6.5.2.3	Polyfluorethylenpropylen (FEP); Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer (TFEP)	561
6.5.2.4	Perfluorpropylvinylether-Copolymer, Perfluoralkoxy (PFA)	561
6.5.2.5	PTFE-Copolymer mit AF (PTFEAF)	562
6.5.2.6	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Terpolymer (TFEHFPVDF (THV bzw. TFB))	562
6.5.2.7	Weitere Fluor-Copolymere	562
6.6	Polyacryl- und Methacrylpolymerie	563
6.6.1	Polyacrylate, Homo- und Copolymerisate (PAA, PAN, PMA, PBA)	563
6.6.1.1	Polyacrylnitril (PAN)	563
6.6.1.2	Polyacrylate, Spezialprodukte	563
6.6.2	Polymethacrylate, Homo- und Copolymerisate (PMMA, AMMA, MABS, MBS)	564
6.6.2.1	Polymethylmethacrylat (PMMA)	564
6.6.2.2	Methylmethacrylat-Copolymerisate (AMMA)	567
6.6.2.3	Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (MABS); Methacrylat-Butadien-Styrol-Copolymere (MBS)	568
6.6.3	Polymethacrylate, Modifizierungen und Blends (PMMI, PMMA-HI, MMA-EML-Copolymer, PMMA+ABS)	569
6.6.3.1	Polymethacrylmethylimid (PMMI)	569
6.6.3.2	Schlagzähes PMMA (PMMA-HI)	569
6.6.3.3	Methylmethacrylat-exo-Methylenlacton-Copolymerisat (MMA-EML-Copol., MMAEML)	570
6.6.3.4	PMMA+ABS	570
6.7	Polyoxymethylen (Polyacetal, Polyformaldehyd) (POM)	571
6.7.1	Polyoxymethylen-Homo- und Copolymerisate (POM-H, POM-Cop.)	571
6.7.2	Polyoxymethylen, Modifizierungen und Blends (POM+PUR)	581

6.8	Polyamide (PA)	584
6.8.1	Polyamide, Homopolymere (AB- und AA/BB-Polymere); (PA 6, 11, 12, 46, 66, 69, 610, 612 (PA 7, 8, 9, 1313, 613)) ...	584
6.8.1.1	Chemische Zusammensetzung	585
6.8.1.2	Eigenschaften	592
6.8.1.3	Verarbeitung	595
6.8.1.4	Einsatzgebiete	598
6.8.2	Modifikationen	600
6.8.3	Copolyamide	605
6.8.3.1	Teilaromatische, teilkristalline Copolyamide (Polyphthalamide, PPA)	607
6.8.3.2	Teilaromatische, amorphe Copolyamide	607
6.8.3.3	Elastomere Blockcopolyamide (Polyetherblockamide, PEBA)	608
6.8.4	Gusspolyamide (PA6-G, PA12-G)	609
6.8.5	Polyamid für das Reaktionsgießen (PA-RIM)	609
6.8.6	Aromatische Polyamide, Aramide	610
6.9	Aromatische (gesättigte) Polyester	610
6.9.1	Polycarbonat (PC)	611
6.9.1.1	Polycarbonat auf Basis Bisphenol A (PC)	611
6.9.1.2	Polycarbonat-Copolymere	616
6.9.1.3	Blends (Polymermischungen)	617
6.9.2	Polyester der Terephthalsäure, Blends, Blockcopolymeren ...	619
6.9.2.1	Polyethylenterephthalat (PET)	619
6.9.2.2	Polybutylenterephthalat (PBT)	625
6.9.2.3	Zyklisches Polybutylenterephthalat (CBT)	626
6.9.2.4	Polytrimethylenterephthalat (PTT)	627
6.9.2.5	Thermoplastische Polyester-Elastomere (TPC) ...	627
6.9.2.6	Polyterephthalat-Blends (PET+: PBT, MBS, PMMA, PSU, Elastomer)	627
6.9.3	Polyester aromatischer Diole und Carbonsäuren (PAR, PBN, PEN)	628
6.9.3.1	Polyarylate (PAR)	628
6.9.3.2	Polybutylennaphthalat (PBN)	629
6.9.3.3	Polyethylennaphthalat (PEN)	629
6.10	Aromatische Polysulfide und Polysulfone (PPS, PSU, PES, PPSU)	630
6.10.1	Polyphenylensulfid (PPS)	630
6.10.2	Polyarylethersulfone (PAES, PSU, PSU+ABS, PES, PPSU) ...	633
6.11	Aromatische Polyether, Polyphenylenether und Blends (PPE)	636
6.12	Aliphatische Polyester (Polyglykole)(PEOX, PPOX, PTHF)	638

6.13	Poly(aryl)etherketone (aromatische Polyetherketone) (PAEK: PEK, PEEK, PEKEKK, PEKK)	639
6.14	Aromatische Polyimide (PI)	644
6.14.1	Duroplastische Polyimide (PI, PBMI, PBI, PBO und weitere) ..	649
6.14.1.1	Polyimid (PI)	649
6.14.1.2	Polybismaleinimid (PBMI)	649
6.14.1.3	Polybenzimidazol (PBI)	649
6.14.1.4	Polytriazine	650
6.14.2	Thermoplastische Polyimide (PAI, PEI, PISO, PMI, PMMI, PESI, PARI)	650
6.14.2.1	Polyamidimid (PAI)	650
6.14.2.2	Polyetherimid (PEI)	651
6.14.2.3	Polyimidsulfon (PISO)	652
6.14.2.4	Polymethacrylimid (PMI (Hartschaumstoff))	652
6.14.2.5	Polymethacrylatmethylimid (PMMI)	653
6.14.2.6	Polyesterimid (PESI)	654
6.15	Selbstverstärkende teilkristalline Polymere (LCP, flüssigkristalline Polymere, Liquid Crystal Polymers)	654
6.15.1	Chemischer Aufbau	654
6.15.2	Verarbeitung	655
6.15.3	Eigenschaften	655
6.15.4	Einsatzgebiete	657
6.16	Leiterpolymere: Zweidimensionale Polyaromaten und -heterocyclen ..	657
6.17	Polyurethane (PUR)	660
6.17.1	Allgemeine Grundlagen	660
6.17.1.1	Chemischer Aufbau	660
6.17.1.2	Herstellung der Polymeren	662
6.17.1.3	Brandverhalten	664
6.17.1.4	Handhabung der Rohstoffe, Arbeitssicherheit	664
6.17.1.5	Umweltschutz, Sicherheit und Abfallverwertung ..	665
6.17.2	Rohstoffe, Hilfsstoffe	665
6.17.2.1	Di- und Polyisocyanate	666
6.17.2.2	Polyole, Polyamine	667
6.17.2.3	Vernetzer bzw. Kettenverlängerer	667
6.17.2.4	Hilfsstoffe	668
6.17.3	PUR-Kunststoffe	670
6.17.3.1	Weichschaumstoffe (PUR-W)	671
6.17.3.2	Hartschaumstoffe (PUR-H)	673
6.17.3.3	Integralschaumstoffe (PUR-I)	674
6.17.3.4	Massive PUR-Kunststoffe, PUR-M	677

6.18	Natürlich vorkommende Polymere und Derivate	678
6.18.1	Cellulose- und Stärke-Derivate; CA, CTA, CP, CAP, CAB, CN, EC, MC, CMC, CH, VF, PSAC	680
6.18.1.1	Chemischer Aufbau	680
6.18.1.2	Verarbeitung	681
6.18.1.3	Eigenschaften, Einsatzgebiete	682
6.18.2	Polyhydroxyfettsäuren/Polyhydroxyalkanoate (PHA)	686
6.18.3	Casein-Kunststoffe, Casein-Formaldehyd, Kunsthorn (CS, CSF)	686
6.18.4	Polylactid, Polymilchsäure (PLA)	686
6.18.5	Elektrisch leitfähige/luminiszierende Polymere	687
6.18.6	Aliphatisches Polyketon (PK)	690
6.19	Thermoplastische Elastomere (TPE)	692
6.19.1	Physikalischer Aufbau	693
6.19.2	Chemischer Aufbau, Eigenschaften, Einsatzgebiete	693
6.19.2.1	Copolyamide (TPA)	695
6.19.2.2	Copolyester (TPC)	695
6.19.2.3	Polyolefin-Elastomere (TPO)	696
6.19.2.4	Polystyrol-Elastomere (TPS)	696
6.19.2.5	Polyurethan-Elastomere (TPU)	697
6.19.2.6	Polyolefin-Blends mit vernetztem Kautschuk (TPV)	697
6.19.2.7	Weitere TPE, TPZ	698
6.20	Duroplaste, härtbare Formmassen, Formaldehyd-Pressmassen (PF, RF, CF, XF, FF, MF, UF, MUF, MUPF) und weitere Massen (UP, VE (PHA), EP, PDAP, SI)	698
6.20.1	Formaldehyd-Formmassen (PF, RF, CF, XF, FF, MF, UF, MUF, MUPF)	699
6.20.1.1	Chemischer Aufbau	699
6.20.1.2	Eigenschaften	702
6.20.1.3	Einsatzgebiete	703
6.20.2	Ungesättigte Polyester-Harze (UP)	704
6.20.2.1	Chemischer Aufbau	704
6.20.2.2	Eigenschaften	706
6.20.2.3	Einsatzgebiete	706
6.20.3	Vinylester-Harze (VE), Phenacrylat-Harze; Vinylesterurethane (VU)	708
6.20.3.1	Chemischer Aufbau	708
6.20.3.2	Eigenschaften	708
6.20.4	Epoxid-Harze (EP)	708
6.20.4.1	Chemischer Aufbau	708

6.20.4.2	Eigenschaften	710
6.20.4.3	Einsatzgebiete	710
6.20.5	Diallylphthalat-Harze, Allylester (PDAP)	711
6.20.5.1	Chemischer Aufbau	711
6.20.5.2	Eigenschaften	711
6.20.5.3	Einsatzgebiete	711
6.20.6	Verarbeitung, Lieferformen	717
6.21	Härtbare Gieß- und Laminierharze	719
6.21.1	Phenoplaste (PF, CF, RF, XF)	719
6.21.2	Aminoplaste (UF, MF)	720
6.21.3	Furanharz (FF)	721
6.21.4	Ungesättigte Polyester-Harze (UP)	721
6.21.5	Vinylester-Harze (VE) Phenacrylat-Harze	725
6.21.6	Epoxid-Harze (EP)	725
6.21.7	Dicyclopentadien-Harz (DCPD)	726
6.21.8	Diallylphthalat-Harze (PDAP)	727
6.21.9	Kohlenwasserstoff-Harze (KWH)	727
6.22	Kautschuke	727
6.22.1	Generelle Beschreibung	727
6.22.2	Allgemeine Eigenschaften	729
6.22.3	R-Kautschuke (NR, IR, BR, CR, SBR, NBR, NCR, IIR, PNR, SIR, TOR, HNBR)	731
6.22.4	M-Kautschuke (EPM, EPDM, AEEM, EAM, CSM, CM, ACM, ABR, ANM, FKM, FPM, FFKM)	735
6.22.5	O-Kautschuke (CO, ECO, ETER, PO)	738
6.22.6	Silikonelastomere	738
6.22.6.1	Chemischer Aufbau und Vernetzungssysteme	740
6.22.6.2	Eigenschaften	743
6.22.6.3	Herstellungstechnologien	744
6.22.6.4	Verarbeitung	746
6.22.6.5	Einsatzgebiete	748
6.22.7	T-Kautschuke (TM, ET, TCF)	749
6.22.8	U-Kautschuke (AFMU, EU, AU)	750
6.22.9	Polyphosphazene (PNF, FZ, PZ)	751
6.22.10	Weitere Kautschuke	751
7	Additive, Füllstoffe und Fasern	753
7.1	Additive	753
7.1.1	Gleitmittel, Antiblockmittel, Trennmittel	753
7.1.2	Stabilisatoren	755
7.1.2.1	Antioxidantien	755

7.1.2.2	Lichtschutzmittel	756
7.1.2.3	Wärmestabilisatoren	757
7.1.2.4	Schaumstabilisatoren	757
7.1.3	Antistatika	757
7.1.4	Flammschutzmittel	758
7.1.5	Farbmittel	761
7.1.5.1	Effektpigmente	763
7.1.5.2	Fluoreszenz-Farbmittel (Tagesleucht-Farbmittel)	764
7.1.6	Additive für die Laserbeschriftung	765
7.1.7	Flexibilisatoren und Weichmacher	765
7.1.8	Haftvermittler	765
7.1.9	Treibmittel und Kicker	766
7.1.10	Nukleierungsmittel	768
7.1.11	Antibakterielle Mittel, Fungizide	769
7.2	Füllstoffe	769
7.2.1	Anorganische Füllstoffe	773
7.2.1.1	Ruß	773
7.2.1.2	Calciumcarbonat (CaCO ₃)	773
7.2.1.3	Talk/Talkum	774
7.2.1.4	Kieselsäuren	775
7.2.1.5	Aluminiumtrihydrat	775
7.2.1.6	Kaolin	775
7.2.1.7	Glimmer	776
7.2.1.8	Wollastonit	776
7.2.1.9	Massive und hohle Mikrokugeln	777
7.2.2	Nanofüllstoffe	777
7.3	Fasern	781
7.3.1	Verstärkungsfasern	782
7.3.1.1	Synthetische, anorganische Fasern, Glasfasern (GF)	784
7.3.1.2	Natürliche organische Verstärkungsfasern, Naturfasern	788
7.3.1.3	Synthetische, organische Verstärkungsfasern, Kohlenstofffasern (CF), Aramidfasern (AF) u. a.	790
7.3.2	Fasern, Fäden, Borsten, Bänder	798
7.3.2.1	Polyesterfasern	799
7.3.2.2	Polyamidfasern	799
7.3.2.3	Polyacrylnitrilfasern	799
7.3.2.4	Polyolefinfasern	800
7.3.2.5	Polyvinylalkoholfasern	800
7.3.2.6	Polytetrafluorethylenfasern	800
7.3.2.7	Polyurethanfasern	801

8	Kunststoffe im Vergleich	803
8.1	Verarbeitungstechnische Kennwerte und Toleranzen	804
8.2	Übersicht über mechanische, thermische und allgemeine elektrische Eigenschaften	815
8.3	Elektrisches Verhalten	827
8.4	Optisches Verhalten	828
8.5	Verhalten gegen Umwelteinflüsse	830
8.5.1	Wasser, Feuchtigkeit	830
8.5.2	Chemikalienbeständigkeit	832
8.5.3	Spannungsrissbeständigkeit	835
8.5.4	Atmosphärische Einflüsse	836
8.5.5	Migration und Permeation	838
8.5.6	Brandverhalten	842
8.6	Erkennen von Kunststoffen	843
	Index	851