

Technische Thermoplaste

# Hochleistungs- Kunststoffe

Polyarylate · Thermotrope Polyester

Polyimide · Polyetherimide

Polyamidimide · Polyarylsulfide

Polysulfone · Polyetheretherketone

## Kunststoff Handbuch

**3/3**

Herausgegeben von Dr. Ludwig Bottenbruch

Mit 241 Bildern und 162 Tabellen

Die Autoren:

Dr. R. Becker, Prof. Drs. J. Bussink, P. J. Clarke, H.-R. Dicke,  
Dr. S. Dorf, Dr. V. Eckhardt, Dr. J. Felberg, J. van Helmond,  
Dr. A. Horbach, W. E. Kelly, Dr. M. Matzner, Dr. H.-H. Müller,  
Dr. E. Ostlinning, Dr. D. Rathmann, Dr. K. Reinking, Dr. C. E. Sroog,  
Dr. P. Tacke, C. Van Weynsberghe, Dr. B. Willenberg



# Inhaltsverzeichnis

5  
1

## 1 Polyarylate

(Dr. D. Rathmann, Dr. P. Tacke)

1.1 Einleitung . . . . .	1
1.1.1 Definition des Begriffs „Polyarylat“ . . . . .	1
1.1.2 Geschichtliche Entwicklung . . . . .	1
Literatur zu Abschnitt 1.1 . . . . .	2
1.2 Chemischer Aufbau der Polyarylate . . . . .	3
1.2.1 Homopolyester . . . . .	3
1.2.2 Copolyester . . . . .	3
Literatur zu Abschnitt 1.2 . . . . .	4
1.3 Herstellung der Polyarylate . . . . .	4
1.3.1 Herstellung der Ausgangsstoffe . . . . .	4
1.3.1.1 Dichloride der aromatischen Dicarbonsäuren . . . . .	4
1.3.1.2 2,2-Bis(4-hydroxyphenyl)-propan(BPA) . . . . .	4
1.3.1.3 Diphenylester der aromatischen Dicarbonsäuren . . . . .	4
1.3.1.4 Diphenylcarbonat . . . . .	5
1.3.1.5 Bisphenol A-diacetat . . . . .	5
1.3.1.6 Hydroxybenzoesäuren . . . . .	5
Literatur zu Abschnitt 1.3.1 . . . . .	5
1.3.2 Chemische Grundlagen der Herstellung der Polyarylate . . . . .	5
1.3.2.1 Lösungsverfahren in homogener Phase . . . . .	6
1.3.2.1.1 Tertiäre organische Basen als Lösemittel . . . . .	6
1.3.2.1.2 Umsetzung in inertem Lösungsmittel . . . . .	7
1.3.2.2 Verfahren in homogener Schmelze . . . . .	7
1.3.2.2.1 Phenylumesterungsverfahren . . . . .	7
1.3.2.2.2 Acetatumesterungsverfahren . . . . .	8
1.3.2.2.3 Silylverfahren . . . . .	9
1.3.2.3 Phasengrenzflächenverfahren . . . . .	9
1.3.2.4 Polykondensation an der Phasengrenzfläche flüssig/fest . . . . .	10
1.3.2.5 Einbau von Telechelen, Comonomeren, Kettenabbrechern und Verzweigern . . . . .	10
1.3.2.6 Reaktionskinetik . . . . .	11
1.3.3 Technologie der Herstellung der Polyarylate . . . . .	11
Literatur zu Abschnitt 1.3 . . . . .	11
1.4 Modifizierung der Polyarylate durch Additive . . . . .	12
1.4.1 Stabilisierung . . . . .	12
1.4.1.1 Stabilisierung gegen thermischen und oxidativen Abbau . . . . .	12
1.4.1.2 Stabilisierung gegen fotochemische Veränderungen . . . . .	12
1.4.1.3 Stabilisierung gegen hydrolytischen Abbau und Rißbildung . . . . .	13
1.4.2 Fließhilfs- und Formtrennmittel . . . . .	13
1.4.3 Verstärkungsstoffe . . . . .	13
1.4.4 Brandschutzadditive . . . . .	13
Literatur zu Abschnitt 1.4 . . . . .	13
1.5 Mischungen mit anderen Polymeren . . . . .	14
Literatur zu Abschnitt 1.5 . . . . .	15

1.6 Herstellung der Mischungen . . . . .	15
1.7 Eigenschaften . . . . .	16
1.7.1 Abhängigkeit der Eigenschaften von der Kettenstruktur . . . . .	16
1.7.2 Morphologie . . . . .	17
1.7.3 Brandverhalten . . . . .	17
1.7.4 Beständigkeit gegen UV-Licht . . . . .	18
1.7.5 Wasseraufnahme . . . . .	19
1.7.6 Chemikalien- und Hydrolysebeständigkeit . . . . .	19
1.7.7 Eigenschaften von Handelsprodukten . . . . .	20
1.7.7.1 Mechanisch-technologische Eigenschaften . . . . .	24
1.7.7.2 Thermische Eigenschaften . . . . .	28
1.7.7.3 Rheologische Eigenschaften . . . . .	30
1.7.7.4 Elektrische Eigenschaften . . . . .	31
1.7.7.5 Optische Eigenschaften . . . . .	33
Literatur zu Abschnitt 1.7 . . . . .	34
1.8 Analytik . . . . .	35
Literatur zu Abschnitt 1.8 . . . . .	36
1.9 Angaben zur Produktsicherheit . . . . .	36
Literatur zu Abschnitt 1.9 . . . . .	36
1.10 Thermoplastische Verarbeitung . . . . .	37
1.10.1 Trocknung . . . . .	37
1.10.2 Spritzgießen . . . . .	37
1.10.2.1 Maschinenausrüstung . . . . .	37
1.10.2.1.1 Schneckengeometrie . . . . .	37
1.10.2.1.2 Düsen . . . . .	38
1.10.2.2 Verarbeitungstemperaturen . . . . .	38
1.10.2.3 Spritzbedingungen . . . . .	39
1.10.2.4 Werkzeuggestaltung . . . . .	39
1.10.3 Extrusion . . . . .	41
1.10.3.1 Maschinenausrüstung . . . . .	41
1.10.3.2 Schnecken . . . . .	42
1.10.3.3 Temperaturführung . . . . .	44
1.10.3.4 Druckaufbau . . . . .	44
1.10.3.5 Extrusionsverfahren . . . . .	45
1.10.4 Reinigung der Plastifiziereinheiten . . . . .	45
1.10.5 Wiederverwendung von Abfällen . . . . .	45
Literatur zu Abschnitt 1.10 . . . . .	45
1.11 Weitere Bearbeitung . . . . .	46
1.11.1 Spanlose Umformung . . . . .	46
1.11.1.1 Druckluft-, Vakuum-Formen (Tiefziehen) . . . . .	46
1.11.1.2 Biegen . . . . .	46
1.11.2 Spangebende Bearbeitung . . . . .	47
1.11.3 Fügen . . . . .	47
1.11.3.1 Kleben . . . . .	47
1.11.3.2 Schweißen . . . . .	48
1.11.4 Oberflächenbehandlung . . . . .	48
Literatur zu Abschnitt 1.11 . . . . .	49
1.12 Anwendungen . . . . .	49

1.12.1 Elektrotechnik, Elektronik . . . . .	49
1.12.2 Lichttechnik . . . . .	50
1.12.3 Kraftfahrzeugsektor . . . . .	51
1.12.4 Medizin- und Labortechnik . . . . .	52
1.12.5 Haushaltgeräte . . . . .	52
1.13 Ausblick . . . . .	53
Literatur zu Abschnitt 1.13 . . . . .	53

## 2 Polyarylsulfide

(Dr. E. Ostlinning, Dr. K. Reinking, unter Mitarbeit von Dr. R. Becker, Dr. A. Horbach,  
Dr. H.-H. Müller)

2.1 Einleitung . . . . .	55
2.2 Geschichtliche Entwicklung . . . . .	55
Literatur zu Abschnitt 2.2 . . . . .	57
2.3 Chemischer Aufbau . . . . .	57
2.3.1 Poly-(p-phenylen)-sulfid (PPS) . . . . .	57
2.3.2 Polyarylsulfide mit anderen Monomereinheiten . . . . .	57
2.3.3 Copolymere . . . . .	59
2.3.4 Blockcopolymere . . . . .	59
Literatur zu Abschnitt 2.3 . . . . .	59
2.4 Reaktionsmechanismus und Enthalpie . . . . .	60
2.4.1 Reaktionsmechanismus . . . . .	60
2.4.1.1 Reaktivität der verschiedenen Halogenverbindungen . . . . .	60
2.4.1.2 Reaktivität verschiedener Nucleophile . . . . .	61
2.4.1.3 Substituenteneinfluß auf die Reaktivität . . . . .	61
2.4.2 Reaktionsenthalpie . . . . .	61
2.4.3 Polymeraufbau . . . . .	62
2.4.4 Verzweiger . . . . .	64
2.4.5 Kettenabbrecher . . . . .	64
2.4.6 Lösemittel . . . . .	65
2.4.7 Katalysatoren . . . . .	66
2.4.8 Nebenreaktionen . . . . .	66
2.4.8.1 Nebenreaktionen der Chloraromaten . . . . .	66
2.4.8.1.1 Verseifung zu Phenolen . . . . .	66
2.4.8.1.2 Funktionalitätsverlust . . . . .	67
2.4.8.2 Nebenreaktionen an der Polymerkette . . . . .	67
2.4.8.3 Bildung von cyclischen Oligomeren . . . . .	68
2.4.8.4 Nebenreaktionen der Lösemittel . . . . .	68
2.4.9 Curing von PPS . . . . .	69
2.4.10 Zusammenfassung der Reaktionen bei der PPS-Herstellung . . . . .	70
Literatur zu Abschnitt 2.4 . . . . .	71
2.5 Rohstoffe . . . . .	72
2.5.1 Chloraromaten . . . . .	72
2.5.2 Schwefelquelle . . . . .	72
2.5.2.1 Natriumsulfid aus Natriumsulfat . . . . .	72
2.5.2.2 Natriumsulfid aus Schwefel . . . . .	72
2.5.2.3 Natriumsulfid aus Schwefelwasserstoff . . . . .	72
2.5.3 Lösemittel . . . . .	72

2.6 Technische Herstellung der Polyphenylensulfide . . . . .	73
2.6.1 Herstellung der Schwefelkomponente . . . . .	73
2.6.2 Niedermolekulares PPS . . . . .	74
2.6.2.1 Diskontinuierliches Verfahren . . . . .	74
2.6.2.2 Kontinuierliches Verfahren zum Herstellen von niedermolekularem PPS . . . . .	74
2.6.2.3 Aufarbeiten der Reaktionsmischung . . . . .	76
2.6.3 Curing von niedermolekularem PPS . . . . .	77
2.6.3.1 Curing mit Luftsauerstoff . . . . .	77
2.6.3.2 Curing mit Hilfe anderer Oxidations- bzw. Vernetzungsmittel . . . . .	78
2.6.4 Lösemittelkreisläufe . . . . .	78
2.6.4.1 Herstellung von hochmolekularem PPS analog dem niedermolekularen PPS . . . . .	79
2.6.4.2 Herstellung von hochmolekularem PPS ohne Wasser im Reaktionsgemisch . . . . .	80
2.6.4.2.1 Technische Durchführung der PPS-Reaktion ohne Wasser im Reaktionsgemisch . . . . .	80
2.6.4.2.2 Aufarbeiten der Reaktionsmischung . . . . .	80
2.6.4.2.3 Hochmolekulares lineares PPS . . . . .	80
2.6.4.3 Herstellen von hochmolekularem PPS mit zusätzlichem Wasser in der Reaktionsmischung . . . . .	81
Literatur zu Abschnitt 2.6 . . . . .	81
2.7 Analytik ( <i>Dr. A. Horbach, Dr. H.-H. Müller</i> ) . . . . .	82
2.7.1 Schmelzeviskosität . . . . .	82
2.7.1.1 Schmelzeviskosität mit dem Kegel-Platte-Viskosimeter . . . . .	82
2.7.1.2 Schmelzindexmessungen . . . . .	83
2.7.2 Lösungsviskosität . . . . .	83
2.7.3 Streulichtmessungen . . . . .	83
2.7.4 Spektroskopische Untersuchungen . . . . .	83
2.7.4.1 IR-Spektroskopische Messungen . . . . .	83
2.7.4.2 Kernresonanzspektroskopie . . . . .	83
2.7.5 Massenspektroskopie . . . . .	85
2.7.6 Messungen unter Pyrolysebedingungen . . . . .	87
2.7.7 Hochtemperatur-Größenausschluß-Chromatographie . . . . .	88
2.7.8 Endgruppenanalytik . . . . .	89
2.7.9 Ionengehalt . . . . .	89
2.7.10 Thermoanalytische Messungen . . . . .	90
Literatur zu Abschnitt 2.7 . . . . .	90
2.8 Kristallisationsverhalten . . . . .	90
Literatur zu Abschnitt 2.8 . . . . .	93
2.9 Unverstärkte Spritzgießformmassen . . . . .	94
2.9.1 Mechanische Eigenschaften . . . . .	94
2.9.2 Thermische Eigenschaften . . . . .	95
2.9.3 Elektrische Eigenschaften . . . . .	95
2.9.4 Brandverhalten . . . . .	96
2.9.5 Chemikalienbeständigkeit . . . . .	96
2.9.5.1 Gasdurchlässigkeit . . . . .	96
2.9.6 Zusammenfassung . . . . .	97
Literatur zu Abschnitt 2.9 . . . . .	97

2.10 Verstärkte Spritzgießformmassen . . . . .	97
2.10.1 Glasfaserverstärkte PPS-Spritzgießformmassen . . . . .	98
2.10.1.1 Mechanische Kurzeiteigenschaften . . . . .	98,
2.10.1.2 Kohlefaserverstärkte PPS-Spritzgießformmassen . . . . .	98 <sup>1</sup>
2.10.1.3 Glasfaser-mineralverstärkte PPS-Spritzgießformmassen . . . . .	100
2.10.1.4 Mineralgefüllte PPS-Spritzgießformmassen . . . . .	100
2.10.2 Mechanische Langzeiteigenschaften . . . . .	100
2.10.2.1 Statische Zeitstandfestigkeit . . . . .	100
2.10.2.2 Dynamische Zeitstandfestigkeit . . . . .	102
2.10.2.3 Gleiteigenschaften . . . . .	102
2.10.3 Thermische Eigenschaften . . . . .	102
2.10.3.1 Formbeständigkeit in der Wärme . . . . .	103
2.10.3.2 Maximale Dauergebrauchstemperatur . . . . .	104
2.10.3.3 Wärmeleitfähigkeit . . . . .	105
2.10.3.4 Thermische Längenausdehnung . . . . .	105
2.10.4 Elektrische Eigenschaften . . . . .	106
2.10.4.1 Spezifischer Durchgangswiderstand, spezifischer Oberflächenwiderstand . . . . .	106
2.10.4.2 Dielektrische Eigenschaften . . . . .	106
2.10.5 Brandverhalten . . . . .	108
2.10.6 Chemische Beständigkeit . . . . .	109
2.10.6.1 Beständigkeit gegenüber organischen Chemikalien . . . . .	109
2.10.6.2 Beständigkeit gegenüber anorganischen Chemikalien . . . . .	109
2.10.6.3 Beständigkeit gegenüber Wasser . . . . .	110
2.10.6.4 Wasseraufnahme . . . . .	110
2.10.6.5 Beständigkeit gegenüber heißer Luft . . . . .	111
2.10.6.6 Bewitterungsbeständigkeit . . . . .	111
2.10.6.7 Beständigkeit gegen energiereiche Strahlung . . . . .	111
Literatur zu Abschnitt 2.10 . . . . .	112
2.11 Verarbeitung durch Spritzgießen . . . . .	112
2.11.1 Trocknung der Granulate . . . . .	112
2.11.2 Schmelzetemperatur . . . . .	112
2.11.3 Werkzeugtemperatur . . . . .	112
2.11.4 Einspritzgeschwindigkeit . . . . .	113
2.11.5 Spritzdruck . . . . .	113
2.11.6 Nachdruck . . . . .	113
2.11.7 Spritzgießmaschinen . . . . .	113
2.11.8 Schnecken . . . . .	113
2.11.9 Düsen . . . . .	114
2.11.10 Schließkraft . . . . .	114
2.11.11 Verarbeitungsschwindung . . . . .	114
2.11.12 Nachbehandlung . . . . .	114
2.11.13 Regeneratverarbeitung . . . . .	114
Literatur zu Abschnitt 2.11 . . . . .	115
2.12 Richtlinien für die Konstruktion der Formwerkzeuge . . . . .	115
2.12.1 Werkzeugstähle . . . . .	115
2.12.2 Art und Lage der Anschnitte . . . . .	115
2.12.3 Entformungsschrägen . . . . .	115
2.12.4 Entlüftung . . . . .	115
2.12.5 Oberflächenrauheit . . . . .	116

2.13	Andere Formgebungsverfahren . . . . .	116
2.13.1	Pressen . . . . .	116
2.13.1.1	Herstellen von Formteilen . . . . .	116
2.13.1.2	Eigenschaften gepreßter Formteile . . . . .	116
2.13.2	Sintern . . . . .	117
	Literatur zu Abschnitt 2.13 . . . . .	117
2.14	Nachbearbeiten von Formteilen . . . . .	117
2.14.1	Mechanisches Nachbearbeiten . . . . .	117
2.14.2	Verbinden von Formteilen . . . . .	117
2.14.2.1	Schweißen . . . . .	117
2.14.2.2	Kleben . . . . .	117
2.14.3	Lackieren . . . . .	118
2.15	Folien . . . . .	118
2.15.1	Mechanische Eigenschaften . . . . .	118
2.15.2	Temperaturbeständigkeit . . . . .	119
2.15.3	Chemikalienbeständigkeit . . . . .	119
2.15.4	Brandverhalten . . . . .	119
2.15.5	Lackierbarkeit . . . . .	119
2.15.6	Elektrische Eigenschaften . . . . .	119
2.15.7	Herstellen von Folien . . . . .	120
	Literatur zu Abschnitt 2.15 . . . . .	120
2.16	Fasern . . . . .	121
2.16.1	Eigenschaften . . . . .	121
2.16.2	Herstellung . . . . .	122
	Literatur zu Abschnitt 2.16 . . . . .	122
2.17	Beschichtungen aus PPS . . . . .	122
2.17.1	Beschichtungsverfahren . . . . .	122
2.17.2	Eigenschaften der Beschichtungen . . . . .	123
	Literatur zu Abschnitt 2.17 . . . . .	123
2.18	Thermoplastische Hochleistungsverbundwerkstoffe ( <i>Dr. R. Becker</i> ) . . . . .	124
2.18.1	Definition und Abgrenzung der Hochleistungsverbundwerkstoffe . . . . .	124
2.18.1.1	Physikalische Prozesse während des Imprägnierens . . . . .	124
2.18.1.2	Haftungsmechanismen . . . . .	125
2.18.1.3	Verbesserung der Haftung . . . . .	125
2.18.2	Wichtige Imprägniertechniken für PPS . . . . .	127
2.18.2.1	Pulverimprägnierung . . . . .	127
2.18.2.2	„film-stacking“ . . . . .	127
2.18.2.3	Mischsysteme aus Thermoplast- und Verstärkungsfasern . . . . .	128
2.18.2.4	Pultrusionsverfahren . . . . .	128
2.18.2.5	Verarbeiten vorimprägnierter Linearprofile . . . . .	128
2.18.2.6	Verarbeiten von Plattenhalbzeugen . . . . .	129
2.18.3	Eigenschaften von Hochleistungsverbundwerkstoffen mit PPS-Matrix im Vergleich zu Metallen . . . . .	130
	Literatur zu Abschnitt 2.18 . . . . .	132
2.19	Anwendungen . . . . .	133
2.20	Zulassungen im Lebensmittelbereich . . . . .	138
	Literatur zu Abschnitt 2.20 . . . . .	138
2.21	Marktentwicklung der Polyarylsulfide . . . . .	138

2.22 Handelsprodukte . . . . .	139
2.22.1 Harzhersteller . . . . .	139
2.22.2 Compound-Hersteller . . . . .	140

### 3 Polysulfone

(C. Van Weynsberghe) . . . . .	141
3.1 Einführung . . . . .	141
3.2 Chemie, Polymerisation und analytische Charakterisierung . . . . .	142
3.2.1 Struktur-Eigenschafts-Beziehung . . . . .	142
3.2.2 Technische Polymerisationssysteme . . . . .	143
3.2.3 Analytische Charakterisierung . . . . .	144
3.3 Eigenschaften . . . . .	150
3.3.1 Allgemeine und physikalische Eigenschaften . . . . .	150
3.3.2 Mechanische Eigenschaften . . . . .	151
3.3.2.1 Temperatureinfluß . . . . .	152
3.3.2.2 Kriechdehnung . . . . .	153
3.3.2.3 Hydrolysebeständigkeit . . . . .	154
3.3.3 Thermische und Brennbarkeitseigenschaften . . . . .	157
3.3.4 Elektrische Eigenschaften . . . . .	160
3.3.5 Chemikalien- und Strahlenbeständigkeit . . . . .	161
3.3.5.1 Chemikalienbeständigkeit . . . . .	161
3.3.5.2 Strahlenbeständigkeit . . . . .	162
3.4 Zulassungen, Gesundheits- und Sicherheitsinformationen . . . . .	163
3.5 Verarbeitung . . . . .	166
3.5.1 Rheologische Eigenschaften von Polysulfon . . . . .	166
3.5.2 Spritzgießen . . . . .	167
3.5.2.1 Vorbereiten von Material und Maschinen . . . . .	167
3.5.2.2 Praktische Aspekte des Spritzgießens . . . . .	168
3.5.2.2.1 Empfohlene Schmelze- und Werkzeugtemperatur . . . . .	168
3.5.2.2.2 Maschinenauswahl und Richtlinien für den Formenbau . . . . .	170
3.5.2.2.3 Einfluß der Verarbeitungsparameter auf den Schmelzefluß . . . . .	171
3.5.2.2.4 Wirtschaftliche Aspekte der Polysulfon-Verarbeitung . . . . .	173
3.5.2.2.5 Fehlersuche und -beseitigung . . . . .	175
3.5.2.2.6 Datenbank-Informationen . . . . .	175
3.5.2.3 Abschalten der Maschine und Nachbearbeitung der Teile . . . . .	176
3.5.2.4 Einfärben . . . . .	179
3.5.3 Weitere Verarbeitungsverfahren . . . . .	179
3.5.3.1 Extrusion . . . . .	179
3.5.3.1.1 Anforderungen an die Maschinen . . . . .	179
3.5.3.1.2 Extrusionsverfahren . . . . .	180
3.5.3.2 Blasformen . . . . .	181
3.5.3.3 Warmformen . . . . .	182
3.6 Nachbearbeitung . . . . .	183
3.6.1 Fügen . . . . .	183
3.6.2 Bedampfen . . . . .	185
3.6.3 Lackieren . . . . .	185
3.6.4 Mechanische Bearbeitung . . . . .	186



3.7 Gefülltes und modifiziertes Polysulfon . . . . .	186
3.7.1 Eigenschaften . . . . .	186
3.7.1.1 Glasfaserverstärktes Polysulfon . . . . .	186
3.7.1.2 Modifizierte Polysulfone . . . . .	187
3.7.1.2.1 Mindel A-670 . . . . .	187
3.7.1.2.2 Mindel B-Serie . . . . .	187
3.7.1.2.3 Mindel M-Serie . . . . .	193
3.7.1.2.4 Mindel S-1000 . . . . .	193
3.7.2 Verarbeitung . . . . .	194
3.7.2.1 Glasfaserverstärktes Polysulfon . . . . .	194
3.7.2.2 Modifizierte Polysulfone . . . . .	195
3.7.2.2.1 Mindel A-670 . . . . .	195
3.7.2.2.2 Mindel B-322 . . . . .	195
3.7.2.2.3 Mindel S-1000 . . . . .	196
3.8 Anwendungen . . . . .	197
3.8.1 Anwendungen für nicht modifiziertes Polysulfon . . . . .	197
3.8.1.1 Mikrowellengeschirr . . . . .	197
3.8.1.2 Handhabung von Lebensmitteln . . . . .	199
3.8.1.3 Haushaltgeräte . . . . .	200
3.8.1.4 Medizinische Anwendungen . . . . .	200
3.8.1.5 Lebensmittelverarbeitung . . . . .	202
3.8.1.6 Elektrische Batterien . . . . .	202
3.8.1.7 Beleuchtung . . . . .	203
3.8.1.8 Chemische Industrie . . . . .	203
3.8.1.9 Kfz-Industrie . . . . .	203
3.8.1.10 Elektrotechnik, Elektronikindustrie . . . . .	204
3.8.2 Anwendungen für gefüllte und modifizierte Polysulfone . . . . .	204
3.8.2.1 Gefüllte Polysulfone . . . . .	204
3.8.2.2 Mindel A-670 . . . . .	205
3.8.2.3 Mindel B-Serie . . . . .	205
3.8.2.4 Mindel S-1000 . . . . .	205
3.9 Weitere Polyarylethersulfone . . . . .	207
3.9.1 Radel A-Polyethersulfon . . . . .	207
3.9.1.1 Eigenschaften . . . . .	207
3.9.1.2 Verarbeitung . . . . .	210
3.9.2 Radel R-Polyphenylsulfon . . . . .	210
3.9.2.1 Radel R-5000 . . . . .	210
3.9.2.2 Radel R-7000/R-7200/R-7700 . . . . .	212
3.9.3 Sulfoniertes Polysulfon . . . . .	215
3.9.3.1 Anwendungen . . . . .	216
Literatur zu Kapitel 3 . . . . .	217

## 4 Flüssigkristalline Polyester

(Dr. H.-R. Dicke, Dr. B. Willenberg, Dr. V. Eckhardt) . . . . .	219
4.1 Einleitung . . . . .	219
4.2 Begriffe und Geschichte . . . . .	219
4.3 Chemischer Aufbau . . . . .	223

4.3.1 LC-Polyester mit flexiblen Spacer-Monomeren . . . . .	225
4.3.2 LC-Polyester mit substituierten Bausteinen . . . . .	227
4.3.3 LC-Polyester mit gewinkelten Einheiten . . . . .	228
4.3.4 LCC-Polyester mit „Crankshaft“-Einheiten . . . . .	232
4.4 Herstellen von thermotropen LC-Polyestern . . . . .	234
4.5 Modifizieren von LC-Polyestern . . . . .	236
4.6 Blends mit LC-Polyestern . . . . .	237
4.7 Eigenschaften der Schmelze . . . . .	238
4.7.1 Struktur der flüssigkristallinen Schmelze . . . . .	238
4.7.2 Rheologische Eigenschaften . . . . .	239
4.8 Prinzipien der Verarbeitung von LC-Polymeren . . . . .	240
4.8.1 Anisotropie . . . . .	240
4.8.2 Prinzipien der Orientierungseinstellung . . . . .	242
4.8.3 Einstellung und Beeinflussung der Orientierung beim Spritzgießen . . . .	242
4.8.4 Einstellung und Beeinflussung der Orientierung bei der Extrusion . . . .	245
4.9 Morphologie des Festkörpers . . . . .	246
4.10 Verarbeitungshinweise . . . . .	248
4.10.1 Vortrocknung . . . . .	248
4.10.2 Spritzgießen . . . . .	248
4.10.3 Extrusion . . . . .	250
4.11 Eigenschaften und Produkte . . . . .	251
4.11.1 Mechanische Eigenschaften . . . . .	252
4.11.2 Thermische Eigenschaften . . . . .	253
4.11.3 Elektrische Eigenschaften . . . . .	253
4.11.4 Chemische Eigenschaften . . . . .	255
4.12 Anwendungen . . . . .	255
Literatur zu Kapitel 4 . . . . .	258

## 5 Polyimide

(Dr. C. E. Sroog) . . . . .	263
5.1 Synthese von Polyimiden . . . . .	263
5.1.1 Zweistufige Synthese über Poly(amidsäure) . . . . .	263
5.1.1.1 Synthese der Poly(amidsäure) . . . . .	263
5.1.1.2 Umwandlung der Poly(amidsäure) . . . . .	264
5.1.2 Synthese in phenolischer Lösung . . . . .	265
5.1.3 Synthese durch Umsetzung von Dianhydriden mit Diisocyanaten . . . .	265
5.1.4 Synthese über Diels-Alder-Kondensation . . . . .	265
5.2 Struktur-Eigenschafts-Beziehungen . . . . .	266
5.2.1 Wärmebeständigkeit . . . . .	266
5.2.2 Hydrolysebeständigkeit . . . . .	267
5.2.3 Strahlenbeständigkeit . . . . .	268
5.2.4 Physikalische und elektrische Eigenschaften . . . . .	268
5.2.5 Kristallin-amorphe Übergänge bei Polyimiden . . . . .	268
5.3 Eigenschaften . . . . .	270

5.3.1 Löslichkeit . . . . .	270
5.3.2 Schmelzefließfähigkeit . . . . .	270
5.3.3 Vernetzung . . . . .	271
5.4 Anwendungen . . . . .	272
5.4.1 Elektronik . . . . .	272
5.4.2 Gedruckte Schaltungen . . . . .	274
5.4.3 Polymer-Verbundwerkstoffe . . . . .	275
5.4.4 Farblose Polyimide . . . . .	277
5.4.5 Polyimidfolien . . . . .	277
5.4.5.1 Eigenschaftsbild von Polyimidfolien . . . . .	278
5.4.5.2 Folienverstreckung . . . . .	284
5.4.6 Polyimid-Formteile . . . . .	284
5.4.7 Polyimid-Modifikationen . . . . .	288
5.4.7.1 Polyamidimide . . . . .	288
5.4.7.2 Polyetherimide . . . . .	288
5.4.8 Polyimidfasern . . . . .	288
5.4.9 Polyimid-Trennmembranen . . . . .	290
5.4.10 Hohlfasern . . . . .	291
5.4.11 Polyimidschaumstoffe . . . . .	292
5.4.12 Polyimidbeschichtungen . . . . .	292
Literatur zu Kapitel 5 . . . . .	293

## 6 Polyetherimide

<i>(Prof. Dr. J. Bussink, J. van Helmond)</i> . . . . .	297
6.1 Einleitung . . . . .	297
6.2 Chemie und Grundeigenschaften . . . . .	298
6.3 Handelsprodukte . . . . .	303
6.3.1 Glasfaserverstärkte Polyetherimide . . . . .	303
6.3.2 Entformungsmittel . . . . .	304
6.3.3 Einstellungen zum Herstellen von Lagern . . . . .	304
6.4 Eigenschaften . . . . .	304
6.4.1 Mechanische Eigenschaften . . . . .	304
6.4.1.1 Mechanisches Kurzzeitverhalten . . . . .	305
6.4.1.2 Fließnahtfestigkeit . . . . .	306
6.4.1.3 Schlag- und Kerbempfindlichkeit . . . . .	306
6.4.1.4 Eigenschaften bei Verwendung als Lagermaterial . . . . .	307
6.4.1.5 Kriechfestigkeit . . . . .	308
6.4.1.6 Zulässige Spannungs- und Dehnungsmaxima . . . . .	309
6.4.2 Thermische Eigenschaften . . . . .	310
6.4.2.1 Glasübergangstemperatur . . . . .	310
6.4.2.2 Wärmeformbeständigkeit bei Belastung (DTUL und Vicat-Temperatur) . . . . .	311
6.4.2.3 Dauergebrauchstemperatur . . . . .	311
6.4.3 Brennbarkeit . . . . .	312
6.4.4 Elektrische Eigenschaften . . . . .	313
6.4.4.1 Dielektrizitätskonstante . . . . .	314
6.4.4.2 Dielektrischer Verlustfaktor . . . . .	314
6.4.4.3 Durchschlagfestigkeit . . . . .	315

6.4.4.4	Spezifischer Durchgangswiderstand . . . . .	315
6.4.4.5	Kriechstromfestigkeit . . . . .	315
6.4.5	Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse . . . . .	315
6.4.5.1	Spannungsrißkorrosion . . . . .	315
6.4.5.2	Hydrolysebeständigkeit . . . . .	316
6.4.5.3	Strahlenbeständigkeit . . . . .	317
6.4.5.4	Sterilisationsbeständigkeit . . . . .	317
6.4.6	Optische Eigenschaften . . . . .	317
6.5	Verarbeitung . . . . .	318
6.5.1	Spritzgießen . . . . .	318
6.5.1.1	Ausrüstung . . . . .	318
6.5.1.2	Vortrocknung des Materials . . . . .	320
6.5.1.3	Spritzbedingungen . . . . .	321
6.5.1.4	Reinigen . . . . .	322
6.5.1.5	Regranulierung . . . . .	322
6.5.1.6	Schwindung . . . . .	322
6.5.2	Extrusion . . . . .	322
6.5.2.1	Ausrüstung . . . . .	322
6.5.2.2	Materialvorbereitung . . . . .	323
6.5.2.3	Extrusionsbedingungen . . . . .	324
6.6	Analytik . . . . .	325
6.6.1	Identifizierung . . . . .	325
6.6.2	Qualitätskontrolle . . . . .	325
6.7	Anwendungen . . . . .	326
6.7.1	Wärmebeständigkeit . . . . .	326
6.7.2	Festigkeit . . . . .	327
6.7.3	Dimensionsstabilität . . . . .	327
6.8	Neuentwicklungen . . . . .	328
6.8.1	PEI-Blends . . . . .	334
6.8.2	PEI-Block-Copolymere . . . . .	335
	Literatur zu Kapitel 6 . . . . .	335

## 7 Polyamidimide

	(Dr. J. Felberg) . . . . .	337
7.1	Einleitung . . . . .	337
7.2	Synthesemethoden . . . . .	337
7.2.1	Reaktion von Diaminen mit Säureanhydriden . . . . .	338
7.2.2	Bildung einer Imid- oder Amidvorstufe und nachfolgende Polymerisation mit einem Diamin oder Dianhydrid . . . . .	339
7.2.3	Synthese auf der Basis von Isocyanaten . . . . .	341
7.3	Struktur-Eigenschafts-Beziehungen . . . . .	343
7.4	Blends und Legierungen . . . . .	344
7.5	Eigenschaften . . . . .	345
7.5.1	Thermische Eigenschaften . . . . .	345
7.5.2	Mechanische Eigenschaften . . . . .	346
7.5.3	Brandverhalten . . . . .	348

7.5.4 Elektrische Eigenschaften . . . . .	349
7.5.5 Chemikalienbeständigkeit . . . . .	349
7.5.6 Reibung und Verschleiß . . . . .	350
7.6 Verarbeitung . . . . .	350
7.7 Anwendungen . . . . .	353
7.7.1 Elektrotechnik . . . . .	353
7.7.2 Lager und Verschleißoberflächen . . . . .	353
7.7.3 Dichtungen und Auflageflächen . . . . .	354
7.7.4 Luft- und Raumfahrt . . . . .	355
7.7.5 Sonstige Anwendungen . . . . .	355
Literatur zu Kapitel 7 . . . . .	356

## 8 Poly(aryletherketone)

(Dr. V. Eckhardt, Dr. S. Dorf, W. E. Kelly, Dr. M. Matzner)

8.1 Einleitung . . . . .	359
8.2 Herstellung . . . . .	360
8.2.1 Friedel-Crafts-Acylierung . . . . .	360
8.2.2 Nucleophile Substitution . . . . .	361
8.3 Eigenschaften . . . . .	362
8.3.1 Mechanische Eigenschaften . . . . .	366
8.3.2 Thermische Eigenschaften . . . . .	367
8.3.3 Brandverhalten . . . . .	368
8.3.4 Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse . . . . .	368
8.3.5 Sonstige Eigenschaften . . . . .	370
8.4 Blends . . . . .	370
8.5 Verarbeitung . . . . .	374
8.6 Anwendungen . . . . .	376
8.6.1 Extrusionsprodukte . . . . .	376
8.6.2 Spritzgießprodukte . . . . .	377
8.6.3 Verbundwerkstoffe . . . . .	379
8.6.4 Beschichtungen . . . . .	379
8.7 Handelsprodukte . . . . .	380
8.7.1 Anbieter von Poly(aryletherketonen) . . . . .	380
8.7.2 Marktvolumen und Kapazitäten . . . . .	382
Literatur zu Kapitel 8 . . . . .	383
Sachwortregister . . . . .	385