

Technische Thermoplaste

# **Polycarbonate Polyacetale Polyester Celluloseester**

## **Kunststoff Handbuch**

**3/1**

Herausgegeben von Dr. Ludwig Bottenbruch

Mit 360 Bildern und 96 Tabellen

Die Autoren:

Dr. S. Anders, Dr. R. Binsack, Dr. L. Bottenbruch,  
F. Brinkschröder, Dr. U. Grigo, Dr. A. Horbach,  
A. Kaminski, R. Kappenstein, Dr. K. Kircher, Ch. Leuschke,  
Dr. F. Müller, Dr. H.-H. Müller, Dr. P. R. Müller,  
Dr. H.-D. Sabel, Dr. H. Schlaf, Dr. P. Unger, Dr. U. Ziegler



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	
(Dr. L. Bottenbruch) . . . . .	1
<b>2 Thermoplastische Polyester</b>	
(Dr. R. Binsack) . . . . .	7
2.1 Einleitung . . . . .	7
2.1.1 Definition des Begriffs „Thermoplastische Polyester“ und Nomenklatur .	7
2.1.2 Geschichtliche Entwicklung . . . . .	7
Literatur zu Abschnitt 2.1 . . . . .	8
2.2 Chemischer Aufbau der Polyester . . . . .	9
2.2.1 Homopolyester . . . . .	9
2.2.2 Copolyester . . . . .	9
2.2.2.1 Amorphe Copolyester . . . . .	9
2.2.2.2 Blockcopolyetherester . . . . .	10
2.2.2.3 Niedrigschmelzende Copolyester . . . . .	11
2.2.2.4 Sonstige Copolyester . . . . .	12
Literatur zu Abschnitt 2.2 . . . . .	12
2.3 Herstellung der Polyester . . . . .	12
2.3.1 Rohstoffe . . . . .	12
2.3.1.1 Terephthalsäure und Terephthalsäuredimethylester . . . . .	12
2.3.1.2 Butan-1,4-diol . . . . .	14
2.3.1.3 Ethylenglykol . . . . .	15
2.3.1.4 Poly(tetramethylenether)glykol . . . . .	15
2.3.2 Chemische Grundlagen der Polyesterherstellung . . . . .	15
2.3.2.1 Umesterungsverfahren . . . . .	16
2.3.2.2 Veresterungsverfahren . . . . .	16
2.3.2.3 Polykondensation in der Schmelze . . . . .	17
2.3.2.4 Polykondensation in fester Phase . . . . .	18
2.3.2.5 Reaktionskinetik . . . . .	19
2.3.2.6 Oligomere . . . . .	20
2.3.2.7 Nebenreaktionen . . . . .	20
2.3.3 Technologie der Polyesterherstellung . . . . .	22
Literatur zu Abschnitt 2.3 . . . . .	23
2.4 Modifizierung der Polyester . . . . .	24
2.4.1 Stabilisierung . . . . .	24
2.4.1.1 Stabilisierung gegen thermischen Abbau . . . . .	24
2.4.1.2 Stabilisierung gegen thermooxidativen Abbau . . . . .	24
2.4.1.3 Stabilisierung gegen hydrolytischen Abbau . . . . .	26
2.4.1.4 Stabilisierung gegen photooxidativen Abbau . . . . .	26
2.4.2 Nukleierung . . . . .	27
2.4.3 Gleit- und Formtrennmittel . . . . .	28
2.4.4 Verstärkung . . . . .	28
2.4.5 Flammenschutz . . . . .	31

2.4.6 Modifizierung von Polyethylenterephthalat zum Verbessern der Verarbeitbarkeit . . . . .	35
Literatur zu Abschnitt 2.4 . . . . .	36
2.5 Mischungen mit anderen Polymeren . . . . .	38
2.5.1 Binäre Mischungen mit Elastomeren . . . . .	38
2.5.1.1 Mischungen mit Butadien-Copolymeren und mit Acrylat-Copolymeren . . . . .	38
2.5.1.1.1 Unverstärkte Produkte . . . . .	38
2.5.1.1.2 Verstärkte Produkte . . . . .	40
2.5.1.2 Mischungen mit elastomeren Copolymeren aus Ethylen und Propylen (EPM, EPDM) . . . . .	43
2.5.2 Binäre Mischungen mit anderen Thermoplasten . . . . .	43
2.5.2.1 Mischungen von Polybutylenterephthalat mit Polyethylenterephthalat . . . . .	43
2.5.2.2 Mischungen von Polybutylenterephthalat oder Polyethylenterephthalat mit anderen Polyestern . . . . .	43
2.5.2.3 Mischungen mit amorphen, wärmeformbeständigen Thermoplasten . . . . .	44
2.5.2.4 Mischungen mit Polyolefinen . . . . .	44
2.5.2.5 Andere Mischungen . . . . .	44
2.5.3 Ternäre Mischungen . . . . .	45
Literatur zu Abschnitt 2.5 . . . . .	45
2.6 Herstellung der Compounds . . . . .	46
2.6.1 Vorbereitung der Rohstoffe . . . . .	46
2.6.2 Compoundierverfahren . . . . .	46
2.6.3 Compoundiermaschinen . . . . .	48
Literatur zu Abschnitt 2.6 . . . . .	49
2.7 Eigenschaften . . . . .	50
2.7.1 Morphologie und Kristallinität . . . . .	50
2.7.1.1 Polybutylenterephthalat . . . . .	50
2.7.1.2 Polyethylenterephthalat . . . . .	53
2.7.2 Mechanisch-technologische Eigenschaften . . . . .	54
2.7.2.1 Kurzzeiteigenschaften . . . . .	54
2.7.2.2 Langzeitverhalten . . . . .	60
2.7.3 Thermische Eigenschaften . . . . .	63
2.7.3.1 Kurzzeiteigenschaften . . . . .	63
2.7.3.2 Langzeitverhalten . . . . .	68
2.7.4 Elektrische Eigenschaften . . . . .	69
2.7.5 Brandverhalten . . . . .	73
2.7.6 Chemikalien- und Hydrolysebeständigkeit . . . . .	73
2.7.7 Witterungs- und Strahlenbeständigkeit . . . . .	75
2.7.8 Reibungsverhalten . . . . .	76
2.7.9 Abriebfestigkeit . . . . .	76
2.7.10 Wasseraufnahme . . . . .	76
2.7.11 Permeationsverhalten . . . . .	77
2.7.12 Fließverhalten . . . . .	78
Literatur zu Abschnitt 2.7 . . . . .	78
2.8 Analytik . . . . .	78
2.8.1 Chemische Zusammensetzung . . . . .	79
2.8.1.1 Diole und Dicarbonsäuren . . . . .	79

2.8.1.2 Oligomere . . . . .	79
2.8.1.3 Endgruppen . . . . .	79
2.8.1.4 Sonstige Analysen . . . . .	80
2.8.2 Molmasse . . . . .	81
2.8.3 Additive . . . . .	83
Literatur zu Abschnitt 2.8 . . . . .	83
2.9 Toxikologie . . . . .	84
Literatur zu Abschnitt 2.9 . . . . .	85
2.10 Verarbeitung . . . . .	85
2.10.1 Spritzgießverarbeitung . . . . .	85
2.10.1.1 Vorbereitung der Rohstoffe . . . . .	85
2.10.1.2 Spritzgießmaschinen . . . . .	86
2.10.1.2.1 Schneckspritzgießmaschinen . . . . .	86
2.10.1.2.2 Spritzgießmaschinen mit Entgasungseinheit . . . . .	88
2.10.1.2.3 Kolbenspritzgießmaschinen . . . . .	88
2.10.1.2.4 Werkzeugtemperatur . . . . .	88
2.10.1.2.5 Produktionsunterbrechungen und Material- wechsel . . . . .	89
2.10.1.3 Werkzeuge . . . . .	89
2.10.1.3.1 Angußarten und Anschnittsysteme . . . . .	89
2.10.1.3.2 Werkzeugentlüftung . . . . .	90
2.10.1.3.3 Werkzeugtemperierung . . . . .	90
2.10.1.3.4 Entformung . . . . .	90
2.10.1.3.5 Schwindung, Nachschwindung und Verzug . . . . .	90
2.10.1.3.6 Verarbeitung auf Heißkanalwerkzeugen . . . . .	93
2.10.1.3.7 Zykluszeit . . . . .	93
2.10.2 Extrusion . . . . .	94
2.10.3 Blasformen . . . . .	94
2.10.4 Regeneratverarbeitung . . . . .	95
Literatur zu Abschnitt 2.10 . . . . .	95
2.11 Weitere Bearbeitung und Nachbehandlung . . . . .	96
2.11.1 Spanabhebende Bearbeitung . . . . .	96
2.11.2 Schweißen . . . . .	96
2.11.3 Kleben . . . . .	97
2.11.4 Lackieren . . . . .	97
2.11.5 Metallisieren . . . . .	98
2.11.6 Bedrucken . . . . .	98
2.11.7 Thermoformen . . . . .	98
Literatur zu Abschnitt 2.11 . . . . .	98
2.12 Anwendungen . . . . .	99
2.12.1 Elektrotechnik, Elektronik . . . . .	99
2.12.2 Fahrzeugindustrie . . . . .	101
2.12.3 Lichttechnik . . . . .	104
2.12.4 Datentechnik . . . . .	105
2.12.5 Haushaltgeräte . . . . .	105
2.12.6 Sonstige Anwendungen . . . . .	106
2.12.7 Flaschen und Behälter . . . . .	107
2.12.8 Filme . . . . .	109
Literatur zu Abschnitt 2.12 . . . . .	111

2.13 Wiederaufbereiten von Polyesterabfällen . . . . .	111
Literatur zu Abschnitt 2.13 . . . . .	112
2.14 Marktentwicklung . . . . .	112
Literatur zu Abschnitt 2.14 . . . . .	115
2.15 Handelsprodukte . . . . .	115

### 3 Polycarbonate

(Dr. U. Grigo, Dr. K. Kircher, Dr. P. R. Müller)

3.1 Einleitung . . . . .	117
3.1.1 Definition . . . . .	117
3.1.2 Geschichtliche Entwicklung . . . . .	117
Literatur zu Abschnitt 3.1 . . . . .	118
3.2 Chemischer Aufbau . . . . .	118
3.2.1 Aliphatische Polycarbonate . . . . .	118
3.2.1.1 Herstellung . . . . .	118
3.2.1.2 Eigenschaften und Anwendungen . . . . .	119
3.2.2 Aromatische Polycarbonate . . . . .	119
3.2.2.1 Homopolycarbonate . . . . .	119
3.2.2.1.1 Endgruppen . . . . .	127
3.2.2.1.2 Verzweigungen . . . . .	127
3.2.2.2 Bisphenol A-Copolycarbonate . . . . .	128
3.2.2.2.1 Bisphenol A-Copolycarbonate mit modifizierten Bisphenolen . . . . .	129
3.2.2.2.2 In der Säureeinheit modifizierte Bisphenol A-Polycarbonate . . . . .	129
3.2.2.2.3 Blockcopolycarbonate . . . . .	130
3.2.3 Entwicklungstrends bei aromatischen Polycarbonaten . . . . .	132
3.2.3.1 Polycarbonate für laser-optische Datenspeicherung . . . . .	133
3.2.3.2 Polycarbonate für Lichtwellenleiter . . . . .	134
3.2.3.3 Polycarbonate für Membranen . . . . .	134
3.2.3.4 Polycarbonate mit höherer Wärmeformbeständigkeit . . . . .	135
Literatur zu Abschnitt 3.2 . . . . .	136
3.3 Herstellung von aromatischen Polycarbonaten . . . . .	138
3.3.1 Ausgangsstoffe . . . . .	138
3.3.1.1 Kohlensäure-Komponenten . . . . .	138
3.3.1.2 Bisphenol-Komponenten . . . . .	139
3.3.1.2.1 Physikalische Eigenschaften von Bisphenolen . . . . .	139
3.3.1.2.2 Chemische Eigenschaften von Bisphenolen . . . . .	140
3.3.1.2.3 Synthese von Alkyliden-Bisphenolen . . . . .	140
3.3.1.2.4 Toxikologie . . . . .	140
3.3.2 Herstellverfahren . . . . .	140
3.3.2.1 Umesterung . . . . .	141
3.3.2.2 Polykondensation in homogener Phase . . . . .	142
3.3.2.3 Phasengrenzflächen-Polykondensation . . . . .	142
3.3.2.4 Herstellen von Copolycarbonaten . . . . .	144
3.3.3 Aufarbeiten der beim Phasengrenzflächenverfahren anfallenden Polycarbonatlösungen . . . . .	145
3.3.4 Synthesen von aromatischen Polycarbonaten, ausgehend von Bisphenolen und Kohlenmonoxid . . . . .	145

3.3.5 Cyclische aromatische Polycarbonate . . . . .	146
Literatur zu Abschnitt 3.3 . . . . .	147
3.4 Modifizieren von Polycarbonat durch Additive . . . . .	149
3.4.1 Einleitung . . . . .	149
3.4.2 Herstellen von Compounds . . . . .	149
3.4.2.1 Vorbereiten der Rohstoffe . . . . .	149
3.4.2.2 Compoundierverfahren . . . . .	149
3.4.2.3 Compoundiermaschinen . . . . .	150
3.4.3 Stabilisierung . . . . .	150
3.4.3.1 Stabilisierung gegen thermischen sowie thermooxidativen Ab- bau . . . . .	150
3.4.3.2 Stabilisierung gegen hydrolytischen Abbau . . . . .	150
3.4.3.3 Stabilisierung gegen UV-Licht sowie photooxidativen Abbau . . . . .	151
3.4.4 Gleit- und Formtrennmittel . . . . .	151
3.4.5 Verstärkungs- und Füllstoffe . . . . .	151
3.4.6 Flammenschutzmittel . . . . .	151
3.4.7 Chemische Verschäumungsmittel . . . . .	152
3.4.8 Farbstoffe, Pigmente . . . . .	152
Literatur zu Abschnitt 3.4 . . . . .	152
3.5 Polycarbonat-Blends . . . . .	153
3.5.1 Einleitung . . . . .	153
3.5.2 Polycarbonat-Polyolefin-Blends . . . . .	154
3.5.3 Polycarbonat-Polystyrol- und -Styrolcopolymer-Blends . . . . .	155
3.5.4 Blends aus Polycarbonat und Elastomeren . . . . .	156
3.5.5 Polycarbonat-Polyamid-Blends . . . . .	157
3.5.6 Polycarbonat-Polyurethan (TPU)-Blends . . . . .	158
3.5.7 Weitere Polycarbonat-Blends . . . . .	159
Literatur zu Abschnitt 3.5 . . . . .	159
3.6 Polycarbonat-Analytik ( <i>Dr. A. Horbach, Dr. H.-H. Müller</i> ) . . . . .	160
3.6.1 Spektroskopische Identifizierung von Polycarbonaten . . . . .	160
3.6.2 Polycarbonat-Bausteinanalyse nach Verseifung . . . . .	161
3.6.3 Endgruppenanalyse . . . . .	162
3.6.4 Analyse von Molmassen-Mittelwerten und Molmassenverteilung . . . . .	162
3.6.4.1 Molmassen-Mittelwert $M_w$ (Massenmittelwert) . . . . .	162
3.6.4.2 Molmassen-Mittelwert $M_n$ (Zahlenmittelwert) . . . . .	163
3.6.4.3 Lösungsviskosität . . . . .	163
3.6.4.4 Größenausschlußchromatographie . . . . .	164
3.6.5 Charakterisieren von verzweigtem Polycarbonat . . . . .	165
3.6.6 Charakterisieren von cyclischem Polycarbonat . . . . .	165
3.6.7 Oligomerenanalyse . . . . .	166
3.6.8 Additivanalyse . . . . .	166
Literatur zu Abschnitt 3.6 . . . . .	166
3.7 Eigenschaften von Bisphenol A-Polycarbonat . . . . .	167
3.7.1 Einleitung . . . . .	167
3.7.2 Klassifizierung von Polycarbonaten nach rheologischen Eigenschaften . . . . .	168
3.7.2.1 Standardtypen . . . . .	168
3.7.2.2 Verzweigte Polycarbonat-Typen . . . . .	170
3.7.2.3 Extrem leicht fließende Polycarbonat-Typen . . . . .	170

3.7.3	Polymerphysikalische Aspekte des Bisphenol A-Polycarbonats . . . . .	172
3.7.3.1	Dynamisch-mechanisches Verhalten . . . . .	172
3.7.3.2	Zähigkeitsverhalten . . . . .	173
3.7.4	Mechanische Eigenschaften von Bisphenol A-Polycarbonat . . . . .	174
3.7.4.1	Spannungs-Dehnungs-Verhalten im Zugversuch . . . . .	174
3.7.4.2	Zeitstand-Zugversuch . . . . .	177
3.7.4.3	Hysteres-Zugversuch . . . . .	179
3.7.4.4	Druckversuch und Biegeversuch . . . . .	180
3.7.4.5	Schlagbiegeversuch . . . . .	180
3.7.4.5.1	Schlagzähigkeit nach DIN 53453 . . . . .	180
3.7.4.5.2	Kerbschlagzähigkeit nach DIN 53453 (Charpy-Methode) und ISO 180 . . . . .	180
3.7.4.5.3	Izod-Schlagzähigkeit und Izod-Kerbschlagzähigkeit nach ASTM D 256 . . . . .	181
3.7.4.6	Beschußfestigkeit . . . . .	182
3.7.4.7	Schlagzugversuch . . . . .	182
3.7.4.8	Schubmodul und mechanische Dämpfung . . . . .	183
3.7.4.9	Mechanische Festigkeit bei dynamischer Beanspruchung . . . . .	183
3.7.4.10	Scherversuch . . . . .	184
3.7.4.11	Gleit- und Abriebverhalten . . . . .	184
3.7.5	Thermische Eigenschaften von Polycarbonat aus Bisphenol A . . . . .	185
3.7.5.1	Einleitung . . . . .	185
3.7.5.2	Differential-Thermoanalyse . . . . .	186
3.7.5.3	Wärmeformbeständigkeit . . . . .	186
3.7.5.3.1	Kurzzeit-Temperaturbeständigkeit . . . . .	187
3.7.5.3.2	Langzeit-Temperaturbeständigkeit nach ISO TC 61 . . . . .	187
3.7.5.3.3	Langzeit-Temperaturbeständigkeit nach UL 746 B . . . . .	188
3.7.5.4	Thermodynamische Kenngrößen . . . . .	188
3.7.5.4.1	Wärmeleitfähigkeit . . . . .	188
3.7.5.4.2	Spezifische Wärmekapazität . . . . .	189
3.7.5.4.3	Spezifisches Volumen und p,v,T-Diagramm . . . . .	189
3.7.5.4.4	Lineare Wärmeausdehnung . . . . .	190
3.7.5.5	Schwindung . . . . .	190
3.7.5.6	Wärmealterung . . . . .	190
3.7.5.7	Thermische Alterung in Gegenwart von Wasser . . . . .	192
3.7.6	Elektrische Eigenschaften von Polycarbonat . . . . .	192
3.7.6.1	Dielektrizitätskonstante und dielektrischer Verlustfaktor . . . . .	192
3.7.6.2	Spezifischer Durchgangswiderstand und Oberflächenwiderstand . . . . .	194
3.7.6.3	Durchschlagfestigkeit . . . . .	194
3.7.6.4	Kriechwegbildung und elektrolytische Korrosionswirkung . . . . .	195
3.7.6.5	Elektrische Index-Werte nach Underwriters Laboratories UL . . . . .	195
3.7.7	Optische Eigenschaften . . . . .	195
3.7.8	Brandverhalten . . . . .	196
3.7.8.1	Polycarbonate ohne Brandschutzausrüstung . . . . .	196
3.7.8.2	Polycarbonate mit Brandschutzausrüstung . . . . .	197
3.7.9	Entformungsverhalten . . . . .	199
3.7.10	Verhalten gegen äußere chemische und physikalische Einflüsse . . . . .	200
3.7.10.1	Chemikalienbeständigkeit . . . . .	200
3.7.10.2	Verhalten gegen Luft, Sauerstoff, Ozon . . . . .	201
3.7.10.3	Verhalten gegen Wasser und Wasserdampf . . . . .	201
3.7.10.4	Witterungsbeständigkeit . . . . .	202

3.7.10.5 Wasserdampf- und Gasdurchlässigkeit . . . . .	204
3.7.10.6 Verhalten gegen energiereiche Strahlungen . . . . .	205
3.7.10.7 Verhalten gegen Termitenbefall, Mikroorganismen und Huminsäuren . . . . .	206
3.7.10.8 Reinigung, Desinfektion und Sterilisation von Polycarbonat . .	206
3.7.10.8.1 Allgemeines . . . . .	206
3.7.10.8.2 Reinigung . . . . .	206
3.7.10.8.3 Desinfektion . . . . .	207
3.7.10.8.4 Sterilisation . . . . .	207
3.7.10.9 Anfärbbbarkeit von Polycarbonat . . . . .	208
3.7.11 Eignung für Lebensmittelkontakt . . . . .	208
Literatur zu Abschnitt 3.7 . . . . .	208
3.8 Verarbeiten von Polycarbonat . . . . .	211
3.8.1 Spritzgießen ( <i>Dr. S. Anders, A. Kaminski, R. Kappenstein</i> ) . . . . .	211
3.8.1.1 Allgemeines . . . . .	211
3.8.1.2 Produktionsvorbereitung . . . . .	212
3.8.1.2.1 Trocknung und Lagerung . . . . .	212
3.8.1.2.2 Materialwechsel, Produktionsunterbrechung, Reinigung . . . . .	212
3.8.1.3 Spritzgießen . . . . .	213
3.8.1.3.1 Maschinenausrüstung . . . . .	213
3.8.1.3.2 Verarbeitungsparameter . . . . .	216
3.8.1.3.3 Sonderverfahren . . . . .	219
3.8.1.3.4 Spritzgießfehler . . . . .	225
3.8.1.4 Formteil- und Werkzeuggestaltung, konstruktive Einzelheiten . .	227
3.8.1.4.1 Formteilgestaltung . . . . .	227
3.8.1.4.2 Werkzeuggestaltung . . . . .	233
3.8.2 Polycarbonat-Extrusionsverarbeitung ( <i>F. J. Brinkschröder</i> †) . . . . .	236
3.8.2.1 Einleitung . . . . .	236
3.8.2.2 Vorbereiten der Produkte . . . . .	237
3.8.2.3 Regeneratverarbeitung . . . . .	237
3.8.2.4 Extruderauslegung . . . . .	237
3.8.2.4.1 Förderwirksame Einzugszone . . . . .	237
3.8.2.4.2 Temperaturregelung . . . . .	238
3.8.2.4.3 Antriebstechnik . . . . .	238
3.8.2.4.4 Antriebsleistung . . . . .	238
3.8.2.4.5 Werkstoffe für Zylinder und Schnecke . . . . .	239
3.8.2.4.6 Entgasungsöffnung . . . . .	239
3.8.2.5 Schneckenauswahl . . . . .	239
3.8.2.5.1 Drei-Zonen-Schnecken . . . . .	239
3.8.2.5.2 Entgasungsschnecken . . . . .	240
3.8.2.6 Siebwechsler, Schmelzepumpe, Statikmischer . . . . .	240
3.8.2.7 Praxisnahe Säuberung von Extrudern und Werkzeugen . . . . .	241
3.8.2.8 Temperaturführung . . . . .	241
3.8.2.9 Breitschlitzdüsen für Platten- und Folienextrusion . . . . .	242
3.8.2.10 Herstellen von kompakten Platten . . . . .	243
3.8.2.11 Herstellen von Folien aus Polycarbonat . . . . .	245
3.8.2.12 Herstellen von Stegdoppelplatten . . . . .	248
3.8.2.12.1 Geometrien . . . . .	248
3.8.2.12.2 Auslegen von Anlagen zum Herstellen von Stegdoppelplatten . . . . .	251



3.8.2.13	Herstellen von Profilen und Rohren	252
3.8.2.14	Coextrusion	254
3.8.3	Extrusionsblasformen von Hohlkörpern ( <i>F. J. Brinkschröder</i> †)	257
3.8.3.1	Allgemeine Eigenschaften	257
3.8.3.2	Polycarbonat-Typen zum Extrusionsblasformen	258
3.8.3.3	Extruderauslegung	258
3.8.3.4	Werkzeugauslegung	259
3.8.3.4.1	Werkzeuge für kontinuierliches Extrusionsblasformen	259
3.8.3.4.2	Werkzeuge für diskontinuierliches Extrusionsblasformen	259
3.8.3.4.3	Blaskopfdüse	260
3.8.3.5	Wanddickenprogrammierung	260
3.8.3.6	Blasformwerkzeug	260
3.8.3.6.1	Quetschnaht	261
3.8.3.6.2	Werkzeugoberfläche und Entlüftung	261
3.8.3.6.3	Temperierung	262
3.8.3.7	Verarbeitungshinweise	262
3.8.3.8	Tempern von extrusionsblasgeformten Mehrwegbehältern	262
3.8.3.9	Coextrusionsblasformen von Hohlkörpern	263
3.8.4	Regranulatverarbeitung und Recycling	263
	Literatur zu Abschnitt 3.8	264
3.9	Bearbeitung	265
3.9.1	Allgemeines	265
3.9.2	Tempern	265
3.9.3	Oberflächenbehandlung	266
3.9.3.1	Reinigen	266
3.9.3.2	Lackieren	266
3.9.3.3	Bedrucken	268
3.9.3.4	Färben	269
3.9.3.5	Metallisieren	269
3.9.3.6	Schleifen	269
3.9.3.7	Polieren	269
3.9.4	Fügen	270
3.9.4.1	Mechanische Verbindungen	270
3.9.4.2	Kleben	270
3.9.4.3	Schweißen	272
3.9.4.3.1	Heizelementschweißen (Spiegelschweißen)	272
3.9.4.3.2	Ultraschallschweißen	272
3.9.4.3.3	Friktionsschweißen	273
3.9.4.3.4	Warmgas- bzw. Heißluftschweißen	273
3.9.4.3.5	Heizwendel- bzw. Widerstandsschweißen	273
3.9.4.3.6	Schweißen von Polycarbonat-Folien	273
3.9.5	Spanloses Verformen	273
3.9.5.1	Allgemeines	273
3.9.5.2	Warmformen von Folien und Platten	274
3.9.5.3	Biegen	274
3.9.5.4	Prägen, Pressen	274
3.9.6	Spanabhebendes Bearbeiten	274
3.9.6.1	Allgemeines	274
3.9.6.2	Drehen, Fräsen	275

3.9.6.3 Bohren . . . . .	275
3.9.6.4 Sägen . . . . .	275
3.9.6.5 Gewindeschneiden . . . . .	276
3.9.6.6 Stanzen und Schneiden . . . . .	276
Literatur zu Abschnitt 3.9 . . . . .	276
3.10 Anwendungsbereiche für Polycarbonat . . . . .	277
3.10.1 Elektrotechnik . . . . .	277
3.10.2 Verschleißungen, Polycarbonat-Platten . . . . .	279
3.10.3 Verkehrswesen . . . . .	281
3.10.4 Folien . . . . .	282
3.10.5 Strukturschaum . . . . .	284
3.10.6 Medizintechnik . . . . .	286
3.10.7 Verpackung . . . . .	288
3.10.8 Haushalts- und Bedarfsartikel . . . . .	289
3.10.9 Film-, Foto- und optische Geräte . . . . .	290
3.10.10 Sport und Freizeit . . . . .	291
3.10.11 Sicherheitswesen . . . . .	291
3.10.12 Brillen, Streuscheiben . . . . .	292
3.10.13 Bausektor . . . . .	292
3.10.14 Bürotechnik . . . . .	292
3.10.15 Laser-optische Datenspeichersysteme . . . . .	293
3.10.16 Anwendung von glasfaserverstärktem Polycarbonat . . . . .	294
Literatur zu Abschnitt 3.10 . . . . .	295
3.11 Wirtschaftliche Bedeutung . . . . .	296
3.12 Handelsprodukte . . . . .	297
<b>4 Polyacetale</b>	
( <i>Dr. H.-D. Sabel, Dr. H. Schlaf, Dr. P. Unger, Dr. U. Ziegler</i> ) . . . . .	300
4.1 Einleitung ( <i>Dr. H. Schlaf</i> ) . . . . .	300
4.1.1 Definition . . . . .	300
4.1.2 Geschichte der Polyacetale . . . . .	300
Literatur zu Abschnitt 4.1.2 . . . . .	301
4.2 Chemische Struktur der Polyacetale ( <i>Dr. H. Schlaf</i> ) . . . . .	302
4.2.1 Homopolymere . . . . .	302
4.2.2 Copolymere . . . . .	303
4.2.3 Terpolymere . . . . .	303
Literatur zu Abschnitt 4.2 . . . . .	303
4.3 Herstellen der Polyacetale ( <i>Dr. H. Schlaf</i> ) . . . . .	304
4.3.1 Monomere . . . . .	304
4.3.1.1 Formaldehyd . . . . .	304
4.3.1.1.1 Eigenschaften . . . . .	304
4.3.1.1.2 Herstellung . . . . .	304
4.3.1.2 Trioxan . . . . .	307
4.3.1.2.1 Eigenschaften . . . . .	307
4.3.1.2.2 Herstellung . . . . .	307
Literatur zu Abschnitt 4.3.1 . . . . .	308
4.3.2 Comonomere . . . . .	309
Literatur zu Abschnitt 4.3.2 . . . . .	310

4.3.3	Reinigung der Monomeren	310
4.3.3.1	Formaldehyd	311
4.3.3.2	Trioxan	311
	Literatur zu Abschnitt 4.3.3	312
4.3.4	Polymerisation und Endgruppenstabilisierung	312
4.3.4.1	Formaldehyd	312
4.3.4.1.1	Polymerisation	312
4.3.4.1.2	Endgruppenstabilisierung	313
4.3.4.2	Trioxan	314
4.3.4.2.1	Polymerisation	314
4.3.4.2.2	Endgruppenstabilisierung	315
	Literatur zu Abschnitt 4.3.4	317
4.3.5	Polymere des 1,3-Dioxolans und 1,3-Dioxepans	318
	Literatur zu Abschnitt 4.3.5	318
4.3.6	Polymere höherer Aldehyde	319
	Literatur zu Abschnitt 4.3.6	319
4.4	Ausrüstung der Polyacetale ( <i>Dr. H.-D. Sabel</i> )	320
4.4.1	Stabilisierung	320
4.4.1.1	Abbaumechanismen	320
4.4.1.2	Stabilisieren gegen thermooxidativen Abbau	321
4.4.1.3	Stabilisieren gegen photooxidativen Abbau	322
4.4.2	Nukleierung	323
4.4.3	Gleit- und Formtrennmittel	323
	Literatur zu Abschnitt 4.4	324
4.5	Standardprodukte ( <i>Dr. H.-D. Sabel</i> )	324
	Literatur zu Abschnitt 4.5	326
4.6	Modifizierte Produkte ( <i>Dr. U. Ziegler</i> )	326
4.6.1	Gefüllte und verstärkte Produkte	326
4.6.1.1	Verstärkte Produkte	326
4.6.1.2	Produkte mit verbessertem Gleit- und Abriebverhalten	326
4.6.1.3	Sonstige Füllstoffe	327
4.6.2	Mischungen mit Elastomeren	327
4.6.2.1	Mischungen mit Polyurethanelastomeren	327
4.6.2.2	Mischungen mit Butadien-Copolymeren und mit Acrylat-Copolymeren	329
4.6.2.3	Mischungen mit Ethylen-Propylen-Elastomeren (EPM, EPDM)	329
4.6.3	Mischungen mit weiteren Polymeren	329
4.6.3.1	Mischungen mit Polyolefinen	329
4.6.3.2	Mischungen mit Fluorpolymeren	330
4.6.3.3	Mischungen mit anderen Polymeren	330
	Literatur zu Abschnitt 4.6	330
4.7	Eigenschaften der Polyacetale ( <i>Dr. H.-D. Sabel, Dr. U. Ziegler</i> )	332
4.7.1	Morphologie und Kristallinität	332
4.7.2	Mechanisch-technologische Eigenschaften	334
4.7.2.1	Kurzzeiteigenschaften	334
4.7.2.2	Langzeiteigenschaften	336
4.7.3	Thermische Eigenschaften	340
4.7.3.1	Kurzzeiteigenschaften	340
4.7.3.2	Langzeiteigenschaften	343

4.7.4	Elektrische Eigenschaften . . . . .	344
4.7.5	Brandverhalten . . . . .	346
4.7.6	Chemikalienbeständigkeit . . . . .	346
4.7.7	Hydrolysebeständigkeit . . . . .	347
4.7.8	Witterungs- und Strahlenbeständigkeit . . . . .	349
4.7.9	Permeabilität . . . . .	351
4.7.10	Physiologisches Verhalten . . . . .	353
4.7.11	Analytik ( <i>Dr. H. Schlaf</i> ) . . . . .	354
4.7.11.1	Monomere . . . . .	354
4.7.11.1.1	Formaldehyd . . . . .	354
4.7.11.1.2	Trioxan . . . . .	354
4.7.11.2	Polymere . . . . .	354
4.7.11.2.1	Restmonomergehalt . . . . .	354
4.7.11.2.2	Molmasse . . . . .	355
4.7.11.2.3	Chemische Zusammensetzung . . . . .	355
4.7.11.2.4	Endgruppen . . . . .	356
4.7.11.3	Additive . . . . .	356
	Literatur zu Abschnitt 4.7 . . . . .	356
4.8	Verarbeiten von Polyacetalen ( <i>Dr. P. Unger</i> ) . . . . .	358
4.8.1	Allgemeines . . . . .	358
4.8.2	Allgemeine Sicherheitsvorkehrungen beim Verarbeiten . . . . .	358
4.8.3	Spritzgießen . . . . .	362
4.8.3.1	Maschinenseitige Voraussetzungen . . . . .	362
4.8.3.2	Werkzeugseitige Voraussetzungen . . . . .	362
4.8.3.3	Fließfähigkeit . . . . .	363
4.8.3.4	Schwindung, Nachschwindung, Toleranzen . . . . .	364
4.8.3.5	Verarbeitungsbedingungen . . . . .	366
4.8.4	Extrusion . . . . .	367
4.8.4.1	Maschinenseitige Voraussetzungen . . . . .	367
4.8.4.2	Formmasse-Typen . . . . .	367
4.8.4.3	Halbzeugherstellung . . . . .	368
4.8.4.4	Anforderungen an die Eigenschaften von Halbzeugen . . . . .	369
4.8.5	Blasformen . . . . .	370
4.8.5.1	Extrusionsblasen . . . . .	370
4.8.5.2	Spritzblasen . . . . .	370
4.9	Bearbeiten und Nachbehandlung ( <i>Dr. P. Unger</i> ) . . . . .	371
4.9.1	Spanabhebendes Bearbeiten und Nachbehandlung . . . . .	371
4.9.2	Fügen von Formteilen und Halbzeugen . . . . .	372
4.9.2.1	Allgemeines . . . . .	372
4.9.2.2	Schnappverbindungen . . . . .	372
4.9.2.3	Verbindungen mit Metallschrauben . . . . .	373
4.9.2.4	Preßverbindungen . . . . .	373
4.9.2.5	Ultraschallschweißen . . . . .	374
4.9.2.6	Heizelementschweißen . . . . .	374
4.9.2.7	Kleben . . . . .	374
4.9.3	Oberflächenveredelung . . . . .	375
4.9.3.1	Allgemeine Anforderungen an die Formteiloberfläche . . . . .	375
4.9.3.2	Mechanisches Vorbehandeln . . . . .	375
4.9.3.3	Ätzen durch Säure . . . . .	375
4.9.3.4	Haftlacke . . . . .	375

4.9.3.5 Bedrucken und Auslegen . . . . .	376
4.9.3.6 Thermofixierverfahren . . . . .	376
4.9.3.7 Lackieren . . . . .	376
4.9.3.8 Metallisieren . . . . .	376
4.9.3.8.1 Metallisieren im Vakuum . . . . .	376
4.9.3.8.2 Galvanisieren . . . . .	377
4.9.3.9 Heißprägen, Foliendruck . . . . .	377
4.10 Anwendungen ( <i>Dr. P. Unger</i> ) . . . . .	377
4.10.1 Allgemeines . . . . .	377
4.10.2 Anwendungen in der Kraftfahrzeugindustrie . . . . .	378
4.10.3 Elektroindustrie . . . . .	382
4.10.4 Maschinenbau . . . . .	386
4.10.5 Sanitär- und Wasserinstallation . . . . .	388
4.10.6 Allgemeine Anwendungen . . . . .	391
Literatur zu den Abschnitten 4.8 bis 4.10 . . . . .	393
4.11 Handelsprodukte ( <i>Dr. H. Schlaf</i> ) . . . . .	394
4.12 Marktentwicklung ( <i>Dr. H. Schlaf</i> ) . . . . .	395
Literatur zu Abschnitt 4.12 . . . . .	395

## 5 Organische Celluloseester/Thermoplastische Formmassen

(*Dr. F. Müller, Ch. Leuschke*)

5.1 Einleitung . . . . .	396
5.1.1 Geschichtliche Entwicklung . . . . .	396
5.2 Chemischer Aufbau der organischen Celluloseester . . . . .	397
5.2.1 Organische Celluloseester, allgemein . . . . .	397
5.2.2 Organische Celluloseester mit technischer Bedeutung . . . . .	398
Literatur zu den Abschnitten 5.1 und 5.2 . . . . .	399
5.3 Herstellung der Celluloseester . . . . .	400
5.3.1 Allgemeine chemische Grundlagen der Celluloseester-Herstellung . . . . .	400
5.3.2 Chemische Grundlagen der technischen Celluloseester-Herstellung . . . . .	401
5.3.2.1 Aktivierung der Cellulose . . . . .	402
5.3.3 Rohstoffe für die technische Herstellung . . . . .	402
5.3.3.1 Cellulose . . . . .	402
5.3.3.2 Aliphatische Monocarbonsäuren . . . . .	404
5.3.3.3 Carbonsäureanhydride . . . . .	404
5.3.4 Technologie der Celluloseester-Herstellung . . . . .	404
5.3.4.1 Prozeßstufen . . . . .	404
5.3.4.2 Cellulose-Vorbehandlung . . . . .	405
5.3.4.3 Veresterungsverfahren, allgemein . . . . .	405
5.3.4.3.1 Eisessig-Verfahren . . . . .	405
5.3.4.3.2 Methylenchlorid-Verfahren . . . . .	405
5.3.4.3.3 Faseracetat-Verfahren . . . . .	406
5.3.4.4 Partielle Hydrolyse . . . . .	406
5.3.4.5 Fällung und Aufarbeitung . . . . .	407
5.3.4.6 Bleiche und Stabilisierung . . . . .	407
5.3.4.7 Wiedergewinnung von Säuren und Lösemitteln . . . . .	407
Literatur zu Abschnitt 5.3 . . . . .	408

5.4	Eigenschaften der organischen Celluloseester . . . . .	409
5.4.1	Allgemeine physikalische und chemische Eigenschaften . . . . .	409
5.4.1.1	Schmelztemperatur . . . . .	409
5.4.1.2	Zugfestigkeit . . . . .	409
5.4.1.3	Wasseraufnahme . . . . .	409
5.4.2	Chemische und physikalische Eigenschaften der technischen organischen Celluloseester . . . . .	410
5.4.2.1	Löslichkeitsverhalten . . . . .	410
5.4.2.1.1	Celluloseacetate . . . . .	410
5.4.2.1.2	Celluloseacetopropionate und Celluloseacetobutyrate . . . . .	411
5.4.2.2	Thermische Umwandlungen der organischen Celluloseester . . . . .	411
5.4.2.3	Celluloseester-Weichmachersysteme . . . . .	412
5.4.2.3.1	Celluloseacetate . . . . .	412
5.4.2.3.2	Celluloseacetopropionat und Celluloseacetobutyrat . . . . .	412
5.4.2.4	Grundlagenuntersuchungen zur Elastifizierung durch Polymere . . . . .	413
5.4.3	Flüssig-kristalline Eigenschaften von Celluloseesterlösungen . . . . .	415
	Literatur zu Abschnitt 5.4 . . . . .	415
5.5	Modifizierung der organischen Celluloseester . . . . .	416
5.5.1	Weichmacher . . . . .	416
5.5.2	Polymermodifikatoren . . . . .	417
5.5.3	Thermostabilisatoren, Puffer und Antioxidantien . . . . .	417
5.5.4	Witterungsstabilisatoren . . . . .	418
5.5.5	Verarbeitungshilfsmittel . . . . .	418
5.5.5.1	Entformungsmittel . . . . .	418
5.5.5.2	Einzugshilfsmittel . . . . .	418
5.5.6	Flammfestausrüstung . . . . .	418
5.5.7	Glasfaserverstärkung . . . . .	418
5.5.8	UV/IR-Absorber-Ausrüstungen . . . . .	419
5.5.9	Farbstoffe und Pigmente . . . . .	419
5.6	Mischungen mit anderen Polymeren . . . . .	419
5.7	Herstellung der Compounds . . . . .	419
5.7.1	Vorbereitung der Rohstoffe . . . . .	419
5.7.2	Zugabe von Zuschlagstoffen . . . . .	420
5.7.3	Compoundierung . . . . .	420
	Literatur zu den Abschnitten 5.5 bis 5.7 . . . . .	420
5.8	Eigenschaften der Celluloseester-Formmassen . . . . .	421
5.8.1	Allgemeine Eigenschaften . . . . .	421
5.8.2	Spezielle Eigenschaftsmerkmale der CA-, CP- und CAB-Formmassen . . . . .	421
5.8.3	Mechanische, thermische und rheologische Eigenschaften . . . . .	422
5.8.3.1	Kurzzeiteigenschaften . . . . .	422
5.8.3.2	Langzeiteigenschaften . . . . .	426
5.8.4	Elektrische Eigenschaften . . . . .	427
5.8.5	Bewitterungsverhalten . . . . .	429
5.8.6	Chemikalienbeständigkeit . . . . .	429
5.8.7	Brandverhalten . . . . .	429
5.8.8	Optische Eigenschaften . . . . .	429
5.8.9	Rohdichte . . . . .	431
	Literatur zu Abschnitt 5.8 . . . . .	431

5.9 Analytik und Normung organischer Celluloseester ( <i>Dr. H. H. Müller, Dr. A. Horbach</i> ) . . . . .	432
5.9.1 Analyse der chemischen Struktur . . . . .	432
5.9.1.1 Molmassen-Analyse . . . . .	433
5.9.1.2 Analyse von Additiven . . . . .	433
5.9.2 Normung der Celluloseester-Formmassen . . . . .	434
5.9.2.1 Internationale Normen . . . . .	434
5.9.2.2 Deutsche Normung . . . . .	434
5.10 Gesundheits- und Umweltaspekte . . . . .	435
5.10.1 Gesundheitliche Klassifizierung . . . . .	435
5.10.2 Biologischer Abbau von Celluloseestern . . . . .	435
Literatur zu den Abschnitten 5.9 und 5.10 . . . . .	436
5.11 Verarbeitung thermoplastischer Celluloseester-Formmassen . . . . .	437
5.11.1 Vorbereitung . . . . .	437
5.11.1.1 Sauberkeit . . . . .	437
5.11.1.2 Regeneratverarbeitung . . . . .	437
5.11.2 Spritzgießen . . . . .	438
5.11.2.1 Spritzgießmaschinen . . . . .	438
5.11.2.2 Spritzgießwerkzeug, Anguß . . . . .	438
5.11.2.3 Verarbeitungstemperaturen . . . . .	439
5.11.2.4 Einspritzgeschwindigkeit . . . . .	440
5.11.2.5 Spritz-, Nach- und Staudruck . . . . .	440
5.11.2.6 Verarbeitungsschwindung und Verzug . . . . .	440
5.11.2.7 Metalleinbettung/-umspritzung . . . . .	440
5.11.2.8 Fließnahtfestigkeit . . . . .	440
5.11.3 Spritzblasen . . . . .	440
5.11.4 Extrudieren . . . . .	441
5.11.4.1 Extruder . . . . .	441
5.11.4.2 Temperaturführung . . . . .	442
5.11.4.3 Rheologische Besonderheiten . . . . .	442
5.11.4.4 Folien- und Plattenextrusion . . . . .	443
5.11.4.5 Rohrextusion . . . . .	443
5.11.4.6 Profilextusion . . . . .	444
5.11.5 Rotationsformen . . . . .	445
5.11.6 Wirbelsinterbeschichtung . . . . .	445
5.12 Bearbeitung . . . . .	445
5.12.1 Tiefziehen von Folien und Platten . . . . .	445
5.12.2 Kaltverformen . . . . .	445
5.12.3 Prägen . . . . .	445
5.12.4 Biegen, Kröpfen . . . . .	446
5.12.5 Spanabhebendes Bearbeiten und Polieren . . . . .	446
5.12.6 Schweißen . . . . .	446
5.12.7 Verkleben . . . . .	446
5.12.8 Oberflächenausrüstung . . . . .	447
5.12.8.1 Lackieren/Bedrucken . . . . .	447
5.12.8.2 Metallisieren im Hochvakuum . . . . .	447
5.12.8.3 Oberflächeneinfärbung . . . . .	447
5.12.8.4 Kratzfestausrüstung . . . . .	447
5.12.8.5 Antifoggingausrüstung (Beschlagfreiheit) . . . . .	448
5.12.8.6 Elektrostatische Oberflächenaufladung . . . . .	448
Literatur zu den Abschnitten 5.11 und 5.12 . . . . .	448

5.13 Anwendungen . . . . .	449
5.13.1 Traditionelle Anwendungsbereiche . . . . .	449
5.13.2 Gegenüberstellung Anwendungen/Eigenschaften . . . . .	451
5.13.2.1 Fahrzeugausrüstung (CAB, CP) . . . . .	451
5.13.2.2 Optischer Sektor (CA, CP) . . . . .	451
5.13.2.3 Werkzeugindustrie/Maschinenbau (CA, CP, CAB) . . . . .	452
5.13.2.4 Haushalt-/Möbel-/Toilettenartikel (CA, CP, CAB) . . . . .	452
5.13.2.5 Bürobedarf (CA, CP, CAB) . . . . .	452
5.13.2.6 Werbung, Verpackung (CAB, CA, CP) . . . . .	452
5.13.2.7 Sport/Freizeit (CAB, CP) . . . . .	452
5.13.2.8 Medizinische Artikel (CP) . . . . .	454
5.13.2.9 Spielzeug . . . . .	454
5.14 Sonstige Anwendungen der Celluloseester . . . . .	454
5.14.1 Fasern . . . . .	454
5.14.2 Filme und Folien . . . . .	455
5.14.3 Lacke . . . . .	455
5.14.4 Spezielle Anwendungen . . . . .	455
5.15 Marktentwicklung und wirtschaftliche Bedeutung . . . . .	456
Literatur zu den Abschnitten 5.14 und 5.15 . . . . .	457
5.16 Handelsprodukte . . . . .	457
Sachwortregister . . . . .	458