

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

1 Einführung

(Dr. L. Bottenbruch)	1
--------------------------------	---

2 Thermoplastische Polyester

(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 Flammschutz	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 Polyester	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 Kurzeiteigenschaften	54
2.7.2.2 Langzeitverhalten	60
2.7.3 Thermische Eigenschaften	63
2.7.3.1 Kurzeiteigenschaften	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 Schneckenspritzgießmaschinen	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 Anschnittssysteme	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-Poly-carbonate	129
3.2.2.2.3 Blockcopolycarbonate	130
3.2.2.3 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 Alkyldien-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 Poly-carbonatlösungen	145
3.3.4 Synthesen von aromatischen Polycarbonaten, ausgehend von Bisphe-nolen 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	Hysterese-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 Anfärbarkeit 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. Kappensteiner</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 Heizwinkel- 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 Verscheibungen, 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

4 Polyacetale

(Dr. H.-D. Sabel, Dr. H. Schlaf, Dr. P. Unger, Dr. U. Ziegler)	300
4.1 Einleitung (Dr. H. Schlaf)	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 (Dr. H. Schlaf)	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 (Dr. H. Schlaf)	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 Formteilloberfläche	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 Löslichkeitverhalten	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 Flammfestausstattung	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 Rohrextrusion	443
5.11.4.6 Profilextrusion	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 Kratzfestausstattung	447
5.12.8.5 Antifoggingausstattung (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