

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Themenabgrenzung	1
1.2	Was sind Biopolymere?	5
1.2.1	Abbaubare petrobasierte Biopolymere	6
1.2.2	Abbaubare biobasierte Biopolymere	6
1.2.3	Nicht abbaubare biobasierte Biopolymere	7
1.2.4	Blends und Copolymere aus den verschiedenen Rohstoff- und Werkstoffgruppen	8
1.3	Rahmenbedingungen für Biopolymere	9
1.3.1	Entsorgung konventioneller und bioabbaubarer Kunststoffe	9
1.3.2	Limitierung petrochemischer Ressourcen	13
1.3.3	Zunehmendes Umweltbewusstsein	18
1.3.4	Nachhaltigkeit als Teil der Unternehmensstrategie	19
2	Stand der Kenntnisse	21
2.1	Historie von Biopolymeren	21
2.2	Biopolymer-Werkstoffgenerationen	22
2.3	Biologische Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit	24
2.4	Oxoabbaubarkeit	28
2.5	Rohstoff- und Flächenbedarf zur Biopolymererzeugung	29
2.6	Nachhaltigkeit und Entropieeffizienz von Biopolymeren	39
2.7	Patentrechtliche Situation von Biopolymeren	46
3	Rechtliche Rahmenbedingungen für Biopolymere	49
3.1	Deutsche Verpackungsverordnung	49
3.1.1	Anwendungen ohne Entsorgungserfordernis	49
3.1.2	Anwendungen mit Entsorgungserfordernis	49
3.1.3	Novellierung der deutschen Verpackungsverordnung	51
3.2	Übergeordnete Standards zur Prüfung der Kompostierbarkeit	53
3.2.1	DIN V 54900	54
3.2.2	DIN EN 13432	57
3.2.3	DIN EN 14995	58
3.2.4	ISO 17088	58

3.2.5	ASTM D6400	58
3.2.6	ASTM D6868	59
3.2.7	AS 4736	59
3.2.8	Vergleich der übergeordneten Normen/Standards	60
3.3	Prüfnormen zur Durchführung (Normative Verweisungen)	62
3.3.1	Richtlinien	63
3.3.1.1	ASTM D6002	63
3.3.1.2	AS 4454	63
3.3.2	Normen zu Verpackungen (Allgemein)	64
3.3.2.1	DIN EN 13193	64
3.3.2.2	DIN EN 13427	64
3.3.2.3	DIN EN ISO 472	65
3.3.2.4	ASTM D883	65
3.3.3	Aerober Bioabbau – aquatisch	65
3.3.3.1	DIN EN ISO 10634	65
3.3.3.2	DIN EN ISO 14851	65
3.3.3.3	DIN EN ISO 14852	66
3.3.3.4	ISO 9408	66
3.3.4	Aerober Bioabbau – terrestrisch	67
3.3.4.1	Kompostierung	67
3.3.4.1.1	DIN EN ISO 14855	67
3.3.4.1.2	ASTM D5338	67
3.3.4.2	Desintegration	67
3.3.4.2.1	DIN EN 14045	67
3.3.4.2.2	DIN EN 14046	68
3.3.4.2.3	DIN EN 14806	68
3.3.4.2.4	ISO 16929	68
3.3.4.2.5	DIN EN ISO 20200	69
3.3.4.3	Erdreich (DIN EN ISO 17556)	69
3.3.5	Anaerober Bioabbau	69
3.3.5.1	DIN EN ISO 11734	69
3.3.5.2	ISO 14853	69
3.3.5.3	ISO 15985	70
3.3.6	ASTM D6866 (¹⁴ C-Methode)	70
3.3.7	OECD-Richtlinien	71
3.3.8	Japanische Standards	72
3.3.8.1	JIS K 6950	72

3.3.8.2	JIS K 6951	73
3.3.8.3	JIS K 6952	73
3.3.8.4	JIS K 6953	73
3.3.8.5	JIS K 6954	73
3.3.8.6	JIS K 6955	73
3.3.9	VDI 4427	73
3.4	Zulässige Hilfsstoffe und Additive	74
3.5	Zertifizierung der Kompostierbarkeit	75
3.6	Angrenzende Verordnungen	81
3.6.1	Biopolymere im Kontext der Abfallablagerungsverordnung	81
3.6.2	Biopolymere im Kontext der deutschen Kompostverordnung ...	83
3.6.3	Biopolymere im Kontext der Düngemittelverordnung	86
3.7	Abfallentsorgung in der EU	86
4	Herstellung und chemischer Aufbau von Biopolymeren	91
4.1	Herstellung von Biopolymeren	91
4.1.1	Chemische Synthese petrochemischer Rohstoffe	94
4.1.1.1	Polyvinylalkohol (PVAL)	94
4.1.1.2	Polyvinylbutyral (PVB)	100
4.1.1.3	Polycaprolacton (PCL)	102
4.1.1.4	Sonstige	103
4.1.2	Chemische Synthese biobasierter Rohstoffe	103
4.1.2.1	Poly lactide (PLA)	103
4.1.2.2	Bio-Co- und Terpolyester	108
4.1.2.3	(Bio-)Polyurethane (BIO-PUR)	113
4.1.2.4	(Bio-)Polyamide (BIO-PA)	114
4.1.2.5	Drop-in-Lösungen	120
4.1.3	Direkte Biosynthese der Biopolymere	121
4.1.4	Modifizierung nachwachsender Rohstoffe	128
4.1.4.1	Stärkepolymere	128
4.1.4.2	Cellulosepolymere	136
4.1.4.3	Lignin	146
4.1.4.4	Pflanzenölbasierte Biopolymere	147
4.1.4.5	Chitin, Chitosan	148
4.1.4.6	Casein-Kunststoffe (CS oder CSF)	150
4.1.4.7	Gelatine	151
4.1.5	Blends	151

4.2	Chemische Struktur der Biopolymere	152
4.2.1	Polymethylene	153
4.2.1.1	(Bio-)Polyethylen (Bio-PE)	153
4.2.1.2	Polyvinyle (Polyvinylalkohol)	153
4.2.1.3	Polyvinylacetale (Polyvinylbutyral)	155
4.2.2	Polyether (Polyglykole)	155
4.2.3	Polysaccharidpolymere	156
4.2.3.1	Celluloseregenerate (CH)	157
4.2.3.2	Celluloseether (MC, EC, HPC, CMC, BC)	157
4.2.3.3	Celluloseester (CA, CP, CB, CN, CAB, CAP)	159
4.2.3.4	Destrukturierte thermoplastische Stärke (TPS)	160
4.2.3.5	Stärkeacetat	160
4.2.4	(Bio-)Polyester	161
4.2.4.1	Polylactid (PLA)	162
4.2.4.2	Polyhydroxybutyrat (PHB)	162
4.2.4.3	Polyhydroxyvalerat (PHV)	162
4.2.4.4	Polyhydroxyhexonat (PHH)	162
4.2.4.5	Polyhydroxyoctanoat (PHO)	163
4.2.4.6	Polycaprolacton (PCL)	163
4.2.4.7	Polyglykolsäuren (PGA)	163
4.2.4.8	PLA-Copolymere	163
4.2.4.9	PHA-Copolymere	163
4.2.4.10	Polybutylensuccinat (PBS)	165
4.2.4.11	Polybutylensuccinat-Adipat (PBSA)	166
4.2.4.12	Polytrimethylenterephthalat (PTT)	166
4.2.4.13	Polybutylenterephthalat (PBT)	167
4.2.4.14	Polybutylenadipat-Terephthalat (PBAT)	167
4.2.4.15	Polybutylensuccinat-Terephthalat (PBST)	167
4.2.5	(Bio-)Polyamide (Bio-PA)	168
4.2.5.1	Homopolyamide	169
4.2.5.2	Copolyamide	169
4.2.5.3	Polyesteramide (PEA)	171
4.2.6	(Bio-)Polyurethane (Bio-PUR)	171
4.2.7	Proteinbasierte Polymere	172
4.2.8	Polyvinylpyrrolidon (PVP)	173

5 Technische Eigenschaftsprofile von Biopolymeren	175
5.1 Eigenschaftsprofile der wichtigsten Biopolymere	176
5.1.1 Polyvinylalkohole (PVAL)	176
5.1.2 Polycaprolacton (PCL)	183
5.1.3 Polyhydroxyalkanoate (PHA)	184
5.1.4 Polylacticacid (PLA)	187
5.1.5 PLA-Blends	192
5.1.6 Bio-Copolyester	194
5.1.7 Stärke/Stärkeblends/Thermoplastische Stärke (TPS)	195
5.1.8 Celluloseregenerate (CH)	197
5.1.9 Cellulosederivate (CA, CP, CB, CN, CAB, CAP)	199
5.1.10 Bio-PE, Bio-PP, Bio-PA, Bio-PUR	202
5.2 Eigenschaften im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen	202
5.2.1 Biopolymerwerkstoffe für Spritzgussanwendungen	203
5.2.1.1 Mechanische Kennwerte	203
5.2.1.2 Thermomechanische Eigenschaften	208
5.2.1.3 Verarbeitungseigenschaften	211
5.2.1.4 Ökonomische Eigenschaften	218
5.2.1.5 Preisspezifische Eigenschaften	220
5.2.2 Biopolymerfolienwerkstoffe	225
5.2.2.1 Lebensmittelrechtliche Zulassung	225
5.2.2.2 Zertifizierung der Kompostierbarkeit	228
5.2.2.3 Barriereeigenschaften	235
5.2.2.4 Physikalisch-chemische Eigenschaften	239
5.2.2.5 Mechanische Folienkennwerte	240
5.2.2.6 Verarbeitungseigenschaften von Biopolymerfolien	242
5.2.2.7 Ökonomische Folieneigenschaften	244
5.2.3 Fazit für zukünftige Anwendungen	247
6 End-of-Life-Options von Biopolymeren	251
6.1 Deponie	251
6.2 Recycling	253
6.2.1 Thermomechanisches Recycling	253
6.2.2 Chemisches Recycling	254
6.3 Kompostierung	254
6.3.1 Industrielle Kompostierung	255
6.3.2 Häusliche Kompostierung	255

6.4	Verbrennung	256
6.4.1	Brennwerte von Biopolymeren	256
6.4.2	Emissionen bei der Verbrennung von Biopolymeren	259
6.5	Biogaserzeugung	262
6.6	Produktspezifische Entsorgung	264
6.6.1	Auflösen/Abbau in Wasser	264
6.6.2	Auflösen/Abbau im Erdreich	265
6.6.3	Auflösen/Abbau im Organismus (Verzehren, Bioabbau)	265
6.7	Littern	266
7	Ökobilanzierung von Biopolymeren	267
7.1	Methodik der Ökobilanzierung	267
7.1.1	Festlegung des Zieles und des Untersuchungsrahmens	269
7.1.2	Erstellung einer Sachbilanz	269
7.1.3	Wirkungsabschätzung	270
7.1.4	Auswerten der Ergebnisse	274
7.2	Daten zur Ökobilanz von Biopolymeren	275
8	Darstellung des Biopolymermarktes	281
8.1	Aktuelle Verfügbarkeit und zukünftige Kapazitäten	281
8.2	Aktuelle Preissituation	288
8.3	Marktakteure im Bereich biologisch abbaubarer Polymere	290
8.4	Biopolymerhersteller und Materialtypen	291
8.4.2	Absorbable Polymer Technologies	302
8.4.3	Acetati S.p.A.	303
8.4.4	Agrana Stärke GmbH	303
8.4.5	Albis Plastics GmbH	303
8.4.6	Archer Daniels Midland Company (ADM)	304
8.4.7	Arkema	304
8.4.8	BASF SE	305
8.4.9	Bayer AG	306
8.4.10	Biocycle	306
8.4.11	Biograde Limited	307
8.4.12	BioMatera	308
8.4.13	Biomer	308
8.4.14	Bio-Natural Technology Co., Ltd.	309
8.4.15	Bio-On srl	309
8.4.16	BIOP Biopolymer Technologies AG	310

8.4.17	Biopearls	311
8.4.18	Biostarch	311
8.4.19	BIOTEC Biologische Verpackungen GmbH & Co.KG	312
8.4.20	Birmingham Polymers	312
8.4.21	Braskem	313
8.4.22	Cargill Dow LLC	313
8.4.23	Cargill Inc.	314
8.4.24	Celanese	314
8.4.25	Cereplast Inc.	315
8.4.26	Cerestech Inc.	315
8.4.27	Chengu Dikang Biomedical Co., Ltd	316
8.4.28	Chinese Academy of Science, Changchun Institute of Applied Chemistry (CIAC)	317
8.4.29	Chronopol Inc.	317
8.4.30	Corn Products International Inc	317
8.4.31	Crystalsev Comércio E Representacao Ltda.	318
8.4.32	Daicel Chemicals Industries Ltd	318
8.4.33	Dainippon Ink and Chemicals	318
8.4.34	DaniMer Scientific	319
8.4.35	DIC Corporation	319
8.4.36	Dow Chemical Company	320
8.4.37	DSM N.V.	320
8.4.38	DuPont	321
8.4.39	DuPont Tate&Lyle Bio Products, LLC	323
8.4.40	DURECT Corporation	323
8.4.41	Eastman Chemical Company	324
8.4.42	Elastogran GmbH	324
8.4.43	Fasal Wood KEG	325
8.4.44	FKuR Kunststoff GmbH	325
8.4.45	Futerro	328
8.4.46	FuturaMat	328
8.4.47	Galactic	329
8.4.48	German Bioplastics Merzenich & Strauß GmbH	330
8.4.49	Grace Biotech Corporation	330
8.4.50	Guangzhou Bright China Biotechnological Co., Ltd.	330
8.4.51	Harbin Weilida Pharmaceuticals Co.Ltd.	330
8.4.52	Henan Piaoan Group Company Ltd.	331
8.4.53	Heritage Plastics, Inc.	331

8.4.54	Hisun Biomaterials Co., Ltd.	332
8.4.55	Hobum Oleochemicals GmbH	332
8.4.56	ICO Polymers	333
8.4.57	Idroplax Srl.	333
8.4.58	IFA-Tulln	334
8.4.59	IGV Institut für Getreideverarbeitung GmbH	335
8.4.60	Innovia Films Ltd.	335
8.4.61	IRE Chemicals Ltd	336
8.4.62	Jamplast Inc.	336
8.4.63	Japan Corn Starch Co., Ltd.	337
8.4.64	Japan Vam & Poval Co., Ltd.	338
8.4.65	JER Envirotech	339
8.4.66	Kaneka Corporation	339
8.4.67	Kareline OY Ltd.	340
8.4.68	Kingfa Sci. & Tech. Co., Ltd.	340
8.4.69	Kuraray Co., Ltd.	341
8.4.70	Limagrain Cereales Ingredients	342
8.4.71	Mazda	343
8.4.72	Mazzucchelli 1849 S.p.A.	343
8.4.73	Meredian Inc.	344
8.4.74	Merquinsa	344
8.4.75	Metabolix	345
8.4.76	Metzeler Schaum GmbH	345
8.4.77	Mitsubishi Chemical Holdings Corporation	346
8.4.78	Mitsubishi Gas Chemical Company Inc. (MGC)	346
8.4.79	Mitsui Chemicals Inc.	347
8.4.80	Nantong Jiuding Biological Engineering Co., Ltd.	347
8.4.81	NatureWorks LLC	348
8.4.82	NEC	349
8.4.83	Nihon Shokuhin Kako Co., Ltd	350
8.4.84	Novamont S.p.A.	350
8.4.85	Novomer Inc.	351
8.4.86	PE Design & Engineering BV	351
8.4.87	Perstorp UK Limited	352
8.4.88	Peter Holland BV	352
8.4.89	PHB Industrial Brasil S.A.	353
8.4.90	Plantic Technologies	353
8.4.91	Polyfea	355

8.4.92	Polykemi AB	356
8.4.93	Polymer Technology Group	356
8.4.94	Polysciences Inc.	356
8.4.95	Procter & Gamble Chemicals	357
8.4.96	PSM (HK) Co., Ltd.	358
8.4.97	Purac	358
8.4.98	Pyramid Bioplastics Guben GmbH	359
8.4.99	Rodenburg Biopolymers BV	359
8.4.100	Rotuba	360
8.4.101	Shanghai Tong-Jie-Liang Biomaterials Co., Ltd.	361
8.4.102	Shimadzu Corporation	361
8.4.103	Showa Highpolymer Co., Ltd.	361
8.4.104	SK Chemicals	362
8.4.105	Solvay S.A.	362
8.4.106	Sphere Group	363
8.4.107	Stanelco Group	363
8.4.108	Starch Tech Inc.	364
8.4.109	STEPAH NV	364
8.4.110	Tate&Lyle PLC	364
8.4.111	Tecnaro GmbH	365
8.4.112	Teijin Limited	365
8.4.113	Telles	366
8.4.114	Tianan Biologic Material Co., Ltd	366
8.4.115	Tianjin Green BioScience Co., Ltd.	367
8.4.116	Toray Industries	367
8.4.117	Total Petrochemicals	368
8.4.118	Toyota	368
8.4.119	Union Carbide Corporation	369
8.4.120	Unitika Ltd.	369
8.4.121	Urethane Soy System Company	369
8.4.122	Vegeplast S.A.S.	370
8.4.123	Vertellus Specialties Inc.	370
8.4.124	VTT Technical Research Centre of Finland	371
8.4.125	Wacker Chemie AG	371
8.4.126	Wuhan Huali Environment Protection Science & Technology Co., Ltd.	372
8.4.127	Zhejiang Hisun Biomaterials Co., Ltd.	372
8.5	Biopolymerverarbeiter/-Konverter	372

9 Ausblick	381
Anhang	383
A Hersteller, Handelsnamen und Datenblätter	383
B Abfallentsorgungssysteme in Europa	545
EU-Mitgliedstaaten	545
EU-Beitrittskandidaten	583
Kooperationspartner	588
C Auszug aus novellierter Verpackungsverordnung	594
D DSD-Lizenzgebühren	597
Abkürzungsverzeichnis	603
Literaturverzeichnis	607
Internetquellen	615
Register	617
Die Autoren	630