

# Die Wiederverwertung von Kunststoffen

Herausgegeben von

Dr. Johannes Brandrup

*Verband Kunststoffherzeugende Industrie e.V. (VKE), Frankfurt*

Dr.-Ing. Muna Bittner

Prof. Dr.-Ing. Walter Michaeli

Prof. Dr.-Ing. Georg Menges

*Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen*



Carl Hanser Verlag München Wien

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Allgemeine Fragestellungen</b>	1
<b>1.1</b>	<b>Werkstoffliche Grundlagen des Kunststoff-Recyclings</b>	3
	<i>Georg Menges</i>	
1.1.1	Werkstoffliche Grundlagen	3
1.1.1.1	Der chemische Aufbau von Polymeren	3
1.1.1.2	Der Aufbau der thermoplastischen Kunststoffe	6
1.1.1.3	Die wesentlichen Eigenschaften im festen Zustand und in der Schmelze	9
1.1.1.4	Jungfräulicher Lieferzustand	9
1.1.1.5	Geschädigte Kunststoffe; gealterter Zustand	10
1.1.1.6	Gemischte Kunststoffabfälle	10
1.1.1.7	Voraussetzungen für ein sinnvolles Recycling der thermoplastischen Kunststoffe durch Wiederverarbeitung aus der Schmelze	11
1.1.1.8	Die Preise für Kunststoffe	13
1.1.1.9	Aufbau und Eigenschaften der Elastomere	14
1.1.1.10	Aufbau und Eigenschaften der Duromere (Duroplaste)	14
1.1.2	Die Löslichkeit der Kunststoffe	14
1.1.2.1	Die Lösung von Polymeren als Mittel für die Wiedergewinnung von Kunststoffen aus gemischten Kunststoffabfällen	15
1.1.3	Selbsterfallende Kunststoffe (biologisch abbaubare Kunststoffe)	16
1.1.4	Grundlagen des rohstofflichen Recyclings von Kunststoffabfällen	16
1.1.4.1	Thermochemische Eigenschaften	16
1.1.4.2	Thermischer Abbau (Depolymerisation)	17
1.1.4.3	Chemisch bewirkter Abbau (Degradation)	19
	Literatur	20
<b>1.2</b>	<b>Gesetzgeberische Grenzen der Wiederverwertung</b>	22
	<i>Jürgen Helberg</i>	
1.2.1	Einführung	22
1.2.2	Ökologiesektor	22
1.2.3	Gesundheitssektor	23
1.2.3.1	Arbeitssicherheit	23
1.2.3.2	Verbraucherschutz	23
1.2.4	Konsequenzen für die Wiederverwertung	25
1.2.5	Ausblick	26
1.2.6	Anlage	26
1.2.6.1	Umweltschutz/Global	26
1.2.6.2	Umweltschutz/Bereich Abfall	27
1.2.6.3	Umwelt-/Gesundheitsschutz – industrieller Bereich	28
1.2.6.4	Gesundheitsschutz	29
1.2.6.5	Gesundheitsschutz/Arbeitssicherheit	29
1.2.6.6	Gesundheitsschutz/Verbrauchersicherheit	31
<b>1.3</b>	<b>Wirtschaftliche Randbedingungen des Kunststoff-Recyclings</b>	33
	<i>Johannes Brandrup</i>	
1.3.1	Einführung	33
1.3.2	Kosten des Recyclings	34
1.3.2.1	Kosten des Sammelns	34
1.3.2.2	Kosten der Sortierung	36

1.3.2.3	Kosten des werkstofflichen Recyclings. . . . .	38
1.3.2.4	Kosten des rohstofflichen Recyclings . . . . .	41
1.3.2.5	Kosten der energetischen Verwertung . . . . .	42
1.3.3	Gesamtrecyclingkosten. . . . .	43
1.3.3.1	Gesamtrecyclingkosten aus betriebswirtschaftlicher Sicht . . . . .	43
1.3.3.2	Gesamtrecyclingkosten aus volkswirtschaftlicher Sicht . . . . .	43
1.3.3.3	Gesamtrecyclingkosten aus ökologischer Sicht. . . . .	45
1.3.4	Einfluß der Entsorgungskosten auf den Primärmarkt . . . . .	45
	Literatur. . . . .	47
<b>1.4</b>	<b>Ökonomische Instrumente zur Förderung des Kunststoff-Recyclings.</b> . . . .	<b>49</b>
	<i>Jürgen Bruder</i>	
1.4.1	Einordnung, Adressatenkreis und Typisierung ökonomischer Instrumente. . . . .	49
1.4.1.1	Einordnung und Adressatenkreis . . . . .	49
1.4.1.2	Typisierung ökonomischer Instrumente . . . . .	51
1.4.2	Finanzierungsmethoden . . . . .	53
1.4.2.1	Fondslösungen . . . . .	53
1.4.2.2	Gutschriftenmethoden . . . . .	61
1.4.3	Instrumente zur Verbesserung der Rahmenbedingungen . . . . .	63
1.4.3.1	Abgaben und Steuern. . . . .	63
1.4.3.2	Lizenzmodelle . . . . .	64
1.4.3.3	Subventionierung durch die öffentliche Hand . . . . .	64
	Literatur. . . . .	65
<b>1.5</b>	<b>Konstruieren recyclinggerechter Produkte.</b> . . . .	<b>67</b>
	<i>Helmut Käufer</i>	
1.5.1	Einleitung . . . . .	67
1.5.2	Gewichtsminimierung für Einwegprodukte. . . . .	67
1.5.3	Wiederverwendung nach Zerlegen . . . . .	69
1.5.4	Bevorzugung von Thermoplasten eines Typs bei der Werkstoffauswahl . . . . .	69
1.5.5	Hochfeste Leichtbauelemente durch lösbare Werkstoffverbunde. . . . .	70
1.5.6	Partielles Produktrecycling durch verbesserte Zerlegbarkeit . . . . .	72
1.5.7	Abtrennbarkeit des kontaminierten Teils vom recyclingfähigen Gesamtteil . . . . .	73
1.5.8	Schlußbetrachtung. . . . .	74
	Literatur. . . . .	75
<b>2</b>	<b>Ökologische Betrachtungen.</b> . . . .	<b>77</b>
<b>2.1</b>	<b>Ökobilanzen – Theorie und Definitionen.</b> . . . .	<b>79</b>
	<i>Ian Boustead</i>	
2.1.1	Einleitung . . . . .	79
2.1.2	Rückblick . . . . .	79
2.1.3	Ökobilanzen contra Ökonomie . . . . .	80
2.1.4	Systeme contra Produkte. . . . .	81
2.1.5	Das Einzelsystem . . . . .	82
2.1.6	Lineare Systeme . . . . .	83
2.1.7	Netzwerke . . . . .	83
2.1.8	Erweiterte Systeme . . . . .	85
2.1.9	Recyclingsysteme . . . . .	86
2.1.9.1	Materialströme in geschlossenen Recyclingkreisläufen . . . . .	86
2.1.9.2	Energieströme in geschlossenen Recyclingkreisläufen . . . . .	88

2.1.9.3	Materialströme in geschlossenen Recyclingkreisläufen mit Verlusten . . . . .	91
2.1.9.4	Energieströme in geschlossenen Recyclingkreisläufen mit Verlusten . . . . .	92
2.1.9.5	Materialströme in offenen Recyclingkreisläufen . . . . .	92
2.1.9.6	Energieströme in offenen Recyclingkreisläufen . . . . .	93
2.1.9.7	Brennstoffe und Rohstoffe beim Polymerrecycling . . . . .	95
2.1.9.8	Zweck des Recyclings . . . . .	95
2.1.9.9	Energiebedingungen beim werkstofflichen Recycling . . . . .	96
2.1.9.10	Energiebedingungen bei der energetischen Verwertung . . . . .	98
2.1.9.11	Energiebedingungen beim rohstofflichen Recycling . . . . .	99
2.1.10	Schlußfolgerung . . . . .	99
	Literatur . . . . .	99
<b>2.2</b>	<b>Methoden und Ansätze zur Bewertung von Ökobilanzen . . . . .</b>	<b>101</b>
	<i>Paul Fink</i>	
2.2.1	Erwartungen an eine Ökobilanz . . . . .	101
2.2.1.1	Ganzheitliche Betrachtung und klare Ziele . . . . .	101
2.2.1.2	Vorgehen in drei Schritten . . . . .	102
2.2.2	Umgang mit der hohen Komplexität . . . . .	103
2.2.2.1	Ganzheitliche Betrachtung . . . . .	103
2.2.2.2	Zwang zur Reduktion der Komplexität . . . . .	104
2.2.2.3	Strukturierung der Ökobilanzierung . . . . .	105
2.2.3	Informationsinhalte und Lücken sowie Ansätze für eine Bewertung . . . . .	106
2.2.3.1	Beitrag der Sachbilanz . . . . .	107
2.2.3.2	Belastungsindikatoren für Bedrohungsbild . . . . .	107
2.2.3.3	Thermodynamik und Toxikologie als Grundlage . . . . .	110
2.2.3.4	Datenaggregation – Möglichkeit und Grenzen . . . . .	112
2.2.3.5	Bewertungsansätze . . . . .	113
2.2.3.6	Maßnahmen in der Entscheidungsphase . . . . .	114
2.2.4	Ökobilanz – ein taugliches und umfassendes Meßinstrument für die Umweltbelastung? . . . . .	115
2.2.4.1	Einsatz von Ökobilanzen . . . . .	115
2.2.4.2	Umweltmanagement . . . . .	116
2.2.4.3	Umweltstrategien . . . . .	116
2.2.4.4	Kreisläufe kontra lineare Stoffflüsse . . . . .	117
2.2.4.5	Regeln statt Lenken . . . . .	118
2.2.5	Schlußfolgerungen . . . . .	118
	Literatur . . . . .	118
<b>2.3</b>	<b>Fallbeispiele . . . . .</b>	<b>120</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Erstellung vergleichender Sachökobilanzen am Beispiel Einweg- und Mehrwegtransportverpackungen . . . . .</b>	<b>120</b>
	<i>Wolfgang Holley, Horst-Christian Langowski, Martina Ludwig</i>	
2.3.1.1	Vorbemerkungen . . . . .	120
2.3.1.2	Methode der Speziellen Ökobilanzierung . . . . .	120
2.3.1.3	Beispiel: Ermittlung der Sachökobilanzen alternativer Transportverpackungssysteme . . . . .	126
2.3.1.4	Schlußbemerkung . . . . .	137
	Literatur . . . . .	138

<b>2.3.2 Ganzheitliche Bilanzierung von Automobilteilen aus Stahl, Aluminium und Kunststoffen</b> . . . . .	139
<i>Peter Eyerer, Manfred Schuckert, Ingrid Pfeiderer, Thomas Dekorsy, Oswald Parr</i>	
2.3.2.1 Einführung . . . . .	139
2.3.2.2 Definition der Ganzheitlichen Bilanzierung . . . . .	140
2.3.2.3 Methodik und Software zur Ganzheitlichen Bilanzierung . . . . .	140
2.3.2.4 Risiken von Ganzheitlichen Bilanzierungen . . . . .	152
2.3.2.5 Großräumig gemittelte Daten für Ganzheitliche Bilanzierung contra bauteil-spezifische Detaildaten . . . . .	153
2.3.2.6 Anwendungsbeispiel: Automobil-Ölfilter mit Aluminium-, Stahl- oder Polyamid PA 66 GF 35-Gehäuse. . . . .	155
2.3.2.7 Schlußfolgerungen und Ausblick . . . . .	169
Literatur . . . . .	171
<b>2.3.3 Erstellung einer Sachbilanz für Fenster aus Holz-, Holz/Aluminium- und Kunststoff-Profilen</b> . . . . .	172
<i>Klaus Richter</i>	
2.3.3.1 Einleitung . . . . .	172
2.3.3.2 Hintergrund . . . . .	172
2.3.3.3 Fensterrahmen im anwendungsorientierten Ökovergleich . . . . .	172
2.3.3.4 Schlußfolgerungen . . . . .	178
Literatur . . . . .	179
<b>3 Aufbereitungstechnik</b> . . . . .	181
<b>3.1 Charakterisierung von Kunststoffreststoffen</b> . . . . .	183
<b>3.1.1 Analytische Methoden zur Charakterisierung von Kunststoff-Fraktionen</b> . . . . .	183
<i>Bernd Willenberg</i>	
3.1.1.1 Notwendigkeit solcher Verfahren . . . . .	183
3.1.1.2 Anforderungen an die Identifikationsverfahren . . . . .	184
3.1.1.3 Geeignete spektroskopische Verfahren . . . . .	184
3.1.1.4 Infrarotspektroskopie . . . . .	185
3.1.1.5 Raman-Spektroskopie . . . . .	187
3.1.1.6 Pyrolytische Verfahren . . . . .	187
3.1.1.7 Laser- oder gleitfunkeninduzierte Emissionsspektralanalyse . . . . .	188
3.1.1.8 Sonstige Verfahren . . . . .	188
3.1.1.9 Ausblick . . . . .	189
Literatur . . . . .	189
<b>3.1.2 Technische Methoden zur Trennung und zum Recycling von Flaschen und Behältern aus dem kommunalen Abfallaufkommen.</b> . . . . .	191
<i>Keith Engstrom</i>	
3.1.2.1 Einleitung . . . . .	191
3.1.2.2 Wichtige, die Verfahrenswahl beeinflussende Faktoren . . . . .	191
3.1.2.3 Verfahren zur Ermittlung und Trennung ganzer Behälter . . . . .	193
3.1.2.4 Großtechnische Flaschenrecycling-Anlage. . . . .	198
3.1.2.5 Technologien für granuliertes oder flockiges Material . . . . .	200
3.1.2.6 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	202
Literatur . . . . .	203

<b>3.2 Aufbereitung</b> . . . . .	204
<i>Walter Michaeli, Muna Bittner</i>	
<b>3.2.1 Zerkleinerung von Kunststoffreststoffen</b> . . . . .	204
<i>Siegfried Beyer, Werner Herbold</i>	
3.2.1.1 Vorbemerkung . . . . .	204
3.2.1.2 Die Zerkleinerungsmaschinen . . . . .	205
3.2.1.3 Anwendungen der Zerkleinerungsmaschinen . . . . .	212
Literatur . . . . .	217
<b>3.2.2 Klassieren</b> . . . . .	218
<i>Walter Michaeli, Muna Bittner</i>	
3.2.2.1 Siebklassierung . . . . .	218
3.2.2.2 Stromklassierung . . . . .	220
Literatur . . . . .	222
<b>3.2.3 Waschen und Trocknen bei der Aufbereitung von Kunststoffen für eine erneute Schmelzverarbeitung</b> . . . . .	224
<i>Walter Michaeli, Muna Bittner</i>	
3.2.3.1 Waschen . . . . .	224
3.2.3.2 Trocknen . . . . .	226
Literatur . . . . .	229
<b>3.2.4 Erzeugung von hochwertigen Rezyklaten durch Entfernung von Druckfarben und störenden Inhaltsstoffen (NOREC-Verfahren)</b> . . . . .	231
<i>Hans Peter Walser</i>	
3.2.4.1 Problemstellung . . . . .	231
3.2.4.2 Anwendungshindernisse und deren Ursachen bei herkömmlich aufbereiteten Rezyklaten für Folien . . . . .	231
3.2.4.3 Das NOREC-Verfahren . . . . .	233
3.2.4.4 Verarbeitbarkeit und Eigenschaften von Rezyklaten aus dem NOREC-Prozeß und daraus hergestellten Folien . . . . .	241
3.2.4.5 Großtechnische Umsetzung des NOREC-Verfahrens . . . . .	242
3.2.4.6 Wirtschaftlichkeit des NOREC-Verfahrens . . . . .	242
3.2.4.7 Ausblick . . . . .	242
Literatur . . . . .	243
<b>3.2.5 Sortiertechniken für Kunststoffe</b> . . . . .	244
<i>Walter Michaeli<sup>1</sup>, Muna Bittner<sup>2</sup>, Karl-Heinz Unkelbach<sup>3</sup>, Ingo Stahl<sup>4</sup>, Ulrich Kleine-Kleffmann<sup>5</sup>, Sabine Bletsch<sup>6</sup></i>	
3.2.5.1 Dichtesortierung <sup>1, 2, 3</sup> . . . . .	244
3.2.5.2 Sortierung nach Benetzbarkeit (Flotation) <sup>1, 2</sup> . . . . .	254
3.2.5.3 Elektrostatische Sortierung <sup>4, 5</sup> . . . . .	256
3.2.5.4 Sortieren durch chemisches Lösen <sup>1, 2</sup> . . . . .	264
3.2.5.5 Thermische Trennverfahren <sup>2, 6</sup> . . . . .	267
3.2.5.6 Sortieren von Kunststoffen durch Klauerverfahren <sup>1, 2</sup> . . . . .	273
Literatur . . . . .	277
<b>3.2.6 Zusammenfassung des Kapitels 3.2.</b> . . . . .	280
<i>Walter Michaeli, Muna Bittner</i>	

<b>4 Verfahren zur physikalisch-stofflichen Verwertung (werkstoffliches Recycling)</b> . . . . .	281
<b>4.1 Filtrationssysteme für die Rezyklatverarbeitung</b> . . . . .	283
<i>Friedhelm Hensen</i>	
4.1.1 Einleitung . . . . .	283
4.1.2 Polymereinschlüsse . . . . .	283
4.1.3 Filterzweck . . . . .	284
4.1.4 Filterart . . . . .	284
4.1.5 Filtrationssysteme . . . . .	285
4.1.6 Großflächenfilter . . . . .	285
Literatur . . . . .	288
<b>4.2 Qualitätsverbesserung von Rezyklaten durch Additive (Stabilisatoren)</b> . . . . .	289
<i>Heinz Herbst, Kurt Hoffmann, Rudolf Pfaender, Franek Sitek</i>	
4.2.1 Einleitung . . . . .	289
4.2.2 Nachstabilisierung von Rezyklaten . . . . .	289
4.2.2.1 Die bisherige industrielle Praxis . . . . .	289
4.2.2.2 Untersuchungsmethoden . . . . .	290
4.2.2.3 Stabilisatoren . . . . .	291
4.2.3 Verarbeitungs- und Langzeitwärmestabilisierung von Rezyklaten . . . . .	292
4.2.3.1 Polypropylen . . . . .	292
4.2.3.2 Polyethylen . . . . .	295
4.2.3.3 Polystyrol . . . . .	297
4.2.3.4 PVC . . . . .	299
4.2.3.5 Technische Kunststoffe . . . . .	300
4.2.3.6 Kunststoffmischungen . . . . .	302
4.2.4 Lichtstabilisierung . . . . .	303
4.2.5 Zusammenfassung und Empfehlung . . . . .	304
Literatur . . . . .	306
<b>4.3 Verträglichmacher für Kunststoffe</b> . . . . .	309
<i>Joop Lemmens</i>	
4.3.1 Einleitung . . . . .	309
4.3.2 Heterogene und homogene Blends . . . . .	310
4.3.3 Die Mischbarkeit von Kunststoffen und die Rolle der Verträglichmacher in heterogenen Blends . . . . .	310
4.3.4 Die Mischbarkeit der Polymeren untereinander ist keine Selbstverständlichkeit . . . . .	311
4.3.5 Methoden zur Beeinflussung der Mischbarkeit zweier Polymerer . . . . .	313
4.3.5.1 Löslichkeitsparameter aufeinander abstimmen . . . . .	313
4.3.5.2 Einführen spezifischer Interaktionen . . . . .	315
4.3.5.3 Applizieren von niedermolekularen Stoffen . . . . .	315
4.3.5.4 Temperatureinflüsse . . . . .	315
4.3.5.5 Chemische Bindung . . . . .	316
4.3.5.6 Bildung eines Netzwerks mit gegenseitiger Durchdringung (IPN) . . . . .	316
4.3.5.7 Vernetzung . . . . .	316
4.3.5.8 Umesterung oder Umamidierung . . . . .	316
4.3.5.9 Umwandlung zweier inkompatibler Polymerer in miteinander mischbare durch minimale chemische Modifikation . . . . .	316
4.3.5.10 Addition von Ionomeren . . . . .	317
4.3.5.11 Zugabe von Füllstoffen . . . . .	317
4.3.5.12 Salzbildung . . . . .	317
4.3.5.13 Addition niedermolekularer Stoffe . . . . .	317

4.3.5.14	Reaktionsverfahren . . . . .	317
4.3.5.15	Addition von Vielzahl-Verträglichmachern . . . . .	317
4.3.6	Die Bedeutung von Verträglichmachern in heterogenen Blends . . . . .	317
4.3.7	Eigenschaften eines Verträglichmachers . . . . .	318
<b>4.4</b>	<b>Probleme bei der Rezyklatverarbeitung in der Extrusion . . . . .</b>	<b>322</b>
	<i>Graziano Parisi, Achim Neubauer</i>	
4.4.1	Verfahrenstechnische Aspekte . . . . .	322
4.4.1.1	Verarbeitung von Mahlgut . . . . .	322
4.4.1.2	Verarbeitung von Mischungen . . . . .	323
4.4.2	Verarbeitung von Rezyklaten auf Einschneckenextrudern (mit und ohne Nutbuchsen) . . . . .	323
4.4.2.1	Wirkungsweise eines konventionellen Extruders ohne Nutbuchse . . . . .	323
4.4.2.2	Wirkungsweise eines Extruders mit förderwirksamem Einzug (Nutbuchse) . . . . .	324
4.4.3	Verarbeitung von Rezyklaten auf Doppelschneckenextrudern . . . . .	326
4.4.3.1	Verarbeitung von Rezyklaten auf gegenläufigen Doppelschneckenextrudern . . . . .	326
4.4.3.2	Verarbeitung von Mahlgut . . . . .	327
4.4.3.3	Verarbeitung von Mahlgut auf gleichläufigen Doppelschneckenextrudern . . . . .	328
4.4.4	Verarbeitung durch Coextrusion . . . . .	328
4.4.5	Ausgewählte Beispiele für die Extrusion von Rezyklaten . . . . .	329
4.4.5.1	Verarbeitung von Rezyklaten zu Rohren . . . . .	329
4.4.5.2	Verarbeitung von Rezyklaten zu Profilen . . . . .	329
4.4.5.3	Verarbeitung von Rezyklaten zu Platten und Flachfolien . . . . .	330
	Literatur . . . . .	330
<b>4.5</b>	<b>Spezielle Probleme beim Extrusionsblasformen mit Rezyklaten . . . . .</b>	<b>331</b>
	<i>Werner Daubenbüchel, Manfred Kulik</i>	
4.5.1	Einführung . . . . .	331
4.5.2	Allgemeines zum Extrusionsblasformen . . . . .	331
4.5.3	Anforderungen an den Rohstoff und die durch ihn beeinflussten Problemkreise . . . . .	333
4.5.4	Möglichkeiten der Rezyklatverarbeitung . . . . .	335
4.5.4.1	Verschiedene Schichtaufbauten im Blasformteil . . . . .	336
4.5.5	Maschinenteknik und Verfahrensprozeß . . . . .	340
4.5.5.1	Materialaufbereitung . . . . .	340
4.5.5.2	Plastifizierung . . . . .	340
4.5.5.3	Kopfauslegung . . . . .	342
4.5.5.4	Vorformlingsbildung . . . . .	343
4.5.5.5	Blasformprozeß . . . . .	345
4.5.5.6	Blasformwerkzeug . . . . .	345
	Literatur . . . . .	346
<b>4.6</b>	<b>Besonderheiten beim Spritzgießen von Rezyklaten . . . . .</b>	<b>347</b>
	<i>Erwin Bürkle, Peter Karlinger</i>	
4.6.1	Einführung und Stand der Rezyklatverarbeitung beim Spritzgießen . . . . .	347
4.6.2	Wichtige Anwendungen und Verarbeitungskriterien . . . . .	348
4.6.3	Schmelzfiltration im Spritzgießprozeß . . . . .	351
4.6.3.1	Filtration im Einspritzstrom . . . . .	354
4.6.3.2	Filtration im Plastifizierstrom . . . . .	355
4.6.4	2-Komponenten-Spritzgießen . . . . .	356



4.6.5	Spritzpressen . . . . .	358
4.6.6	Peripherie und Materialzufuhr . . . . .	359
4.6.7	Qualitätssicherung . . . . .	360
4.6.7.1	Qualitätsüberwachung beim Einsatz von Filtersystemen . . . . .	360
	Literatur . . . . .	361
<b>4.7</b>	<b>Einsatz von sortenreinen Rezyklaten im Preßverfahren . . . . .</b>	<b>363</b>
	<i>Wenzel J. Brenik, Friedrich Harries</i>	
4.7.1	Grundlagen der Verarbeitung . . . . .	363
4.7.2	Eigenschaftsveränderungen durch Mehrfachverarbeitung . . . . .	363
4.7.2.1	Mehrfaches Verpressen von Polyethylen (PE-HD) . . . . .	364
4.7.2.2	Mehrfaches Verpressen von Polypropylen (PP-H) . . . . .	365
4.7.3	Aufbereitung, Homogenisierung, Pigmentierung . . . . .	367
4.7.4	Einfluß von Spurenverunreinigungen durch andere Polyolefine (PP in PE bzw. PE in PP) . . . . .	368
4.7.5	Qualitätsmerkmale der zu verarbeitenden Rezyklate . . . . .	370
4.7.6	Verarbeitbarkeit von Rezyklat-Preßplatten (Schweißen, mechanische Bearbeitung) . . . . .	371
4.7.6.1	Schweißen . . . . .	371
4.7.6.2	Maschinelle spangebende Bearbeitung . . . . .	372
4.7.7	Ausblick . . . . .	372
	Literatur . . . . .	373
<b>4.8</b>	<b>Schmelzverarbeitung gemischter Kunststofffraktionen . . . . .</b>	<b>375</b>
	<i>Hans Schubert</i>	
4.8.1	Zielsetzung . . . . .	375
4.8.2	Probleme bei der Verarbeitung gemischter Kunststoffe . . . . .	375
4.8.3	Anwendungen für gemischte Kunststoffe . . . . .	376
4.8.4	Verfahrensstufen zur Verarbeitung vermischter und verschmutzter Kunststoffe . . . . .	377
4.8.4.1	Aufbereitung der Kunststoffe . . . . .	377
4.8.4.2	Verarbeitung der Kunststoffe . . . . .	379
4.8.5	Ausgewählte Anlagenbeispiele . . . . .	381
4.8.5.1	Intrusionsverfahren von <i>Real</i> . . . . .	381
4.8.5.2	Extrusionsverfahren der <i>C.A. Greiner &amp; Söhne GmbH</i> . . . . .	383
4.8.5.3	Spritzpreßverfahren der <i>Remaplan GmbH</i> . . . . .	385
4.8.5.4	Sinterpreßverfahren der <i>Wegner &amp; Co. (Weco) Schweißwerk-Behälterbau GmbH</i> . . . . .	388
4.8.6	Überblick: Technologie-/Anlagenanbieter . . . . .	390
	Literatur . . . . .	391
<b>5</b>	<b>Verfahren zur chemisch-stofflichen Verwertung (rohstoffliches Recycling) . . . . .</b>	<b>393</b>
<b>5.1</b>	<b>Anforderungen an den Kunststoffabfall – Stoffstromvorbereitung für die petrochemische Verwertung . . . . .</b>	<b>395</b>
	<i>Johannes Brandrup</i>	
5.1.1	Einleitung . . . . .	395
5.1.2	Zusammensetzung von Kunststofffraktionen . . . . .	395
5.1.2.1	Haushaltsabfall . . . . .	395
5.1.2.2	Shredderfraktionen aus Autos bzw. Elektro-/Elektronikanwendungen . . . . .	398
5.1.2.3	Spurenbestandteile . . . . .	399

5.1.3	Technische Randbedingungen des Rohstoffrecyclings – Konsequenzen für die Stoffstromvorbereitung . . . . .	403
5.1.4	Methoden der Halogenentfernung aus dem Stoffstrom . . . . .	406
5.1.4.1	Thermische Methoden der Dehalogenierung . . . . .	406
5.1.4.2	Chemische Methoden der Dehalogenierung . . . . .	411
5.1.4.3	Physikalische Methoden der Halogenentfernung aus dem Stoffstrom . . . . .	411
5.1.5	Gesamtkonzept „Vom Abfall zum Rohstoff“ . . . . .	411
5.1.5.1	Technologie – Stand der Verfahrensentwicklung . . . . .	411
5.1.5.2	Konsequenzen für die Logistik . . . . .	413
	Literatur . . . . .	414
<b>5.2</b>	<b>Methoden zur Stoffstromverarbeitung . . . . .</b>	<b>416</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Degradative Extrusion von Kunststoffreststoffen . . . . .</b>	<b>416</b>
	<i>Georg Menges, Volker Lackner</i>	
5.2.1.1	Anforderungsprofile des rohstofflichen Recyclings . . . . .	416
5.2.1.2	Das Verfahren der degradativen Extrusion . . . . .	416
5.2.1.3	Stand der Technik . . . . .	419
5.2.1.4	Konzepte für praktische Anlagen . . . . .	420
5.2.1.5	Ausblick . . . . .	423
	Literatur . . . . .	425
<b>5.2.2</b>	<b>Tiefemperaturpyrolyse als Stoffstromvorbereitung . . . . .</b>	<b>426</b>
	<i>John H. Brophy, Steve Hardman</i>	
5.2.2.1	Chemie der Polymerspaltung . . . . .	426
5.2.2.2	Die Verfahrenskonzeption beeinflussende technische und ökonomische Faktoren . . . . .	429
5.2.2.3	Verfahrenskonzepte – BP-Polymercrackverfahren . . . . .	432
5.2.2.4	Verwendung der Pyrolyseprodukte in petrochemischen Veredlungsprozessen . . . . .	435
5.2.2.5	Zusammenfassung . . . . .	438
	Literatur . . . . .	438
<b>5.3</b>	<b>Petrochemische Verfahren zur Kunststoffverwendung . . . . .</b>	<b>440</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Pyrolyseverfahren . . . . .</b>	<b>440</b>
	<i>Walter Kaminsky, Hansjörg Sinn</i>	
5.3.1.1	Einleitung und Übersicht . . . . .	440
5.3.1.2	Schmelzkessel und Drehrohranlagen . . . . .	440
5.3.1.3	Pyrolyse in der Wirbelschicht . . . . .	441
5.3.1.4	Verwertung von gemischten Kunststoffen . . . . .	446
5.3.1.5	Verwertung von Elastomeren . . . . .	448
5.3.1.6	Wirtschaftlichkeit und Ausblick . . . . .	449
	Literatur . . . . .	450
<b>5.3.2</b>	<b>Hydrierung . . . . .</b>	<b>451</b>
	<i>Klaus Niemann</i>	
5.3.2.1	Verfahrensbeschreibung . . . . .	451
5.3.2.2	Produktausbeuten und Qualitäten . . . . .	456
5.3.2.3	Energiebilanzen . . . . .	457
5.3.2.4	Die Kohleöl-Anlage Bottrop . . . . .	458
5.3.2.5	Zukünftige Planungen . . . . .	461
	Literatur . . . . .	462

<b>5.3.3 Vergasung von Altkunststoffen</b> . . . . .	463
<i>Manfred Gebauer, Dave Stannard</i>	
5.3.3.1 Einleitung . . . . .	463
5.3.3.2 Grundlagen und Chemismus . . . . .	463
5.3.3.3 Verfahren der partiellen Oxidation . . . . .	464
5.3.3.4 Inputspezifikation für Altkunststoffe bei den Vergasungsverfahren . . . . .	485
5.3.3.5 Verwertungsmöglichkeiten für die erzeugten Gase. . . . .	486
Literatur. . . . .	488
<b>5.4 Reduktion im Hochofen</b> . . . . .	490
<i>Burkhard Niemöller</i>	
5.4.1 Prozeß der Reduktion von Eisenerz im Hochofen . . . . .	490
5.4.2 Substitution der Reduktionsmittel durch Kunststoffabfälle . . . . .	492
5.4.3 Auswahl des Einbringungsverfahrens. . . . .	493
5.4.4 Stand der Projekts „Nutzung von Kunststoffabfällen im Hochofenprozeß“ . . . . .	494
5.4.5 Ausblick und Perspektiven . . . . .	496
Literatur. . . . .	496
<b>5.5 Depolymerisation von Polymethylmethacrylat (PMMA)</b> . . . . .	497
<i>Norbert Brand</i>	
5.5.1 Einleitung . . . . .	497
5.5.2 Chemisches Recycling von Acrylglas durch Depolymerisation. . . . .	499
5.5.3 Aufbereitung der PMMA-Abfälle für die Depolymerisation. . . . .	499
5.5.4 Depolymerisation von PMMA . . . . .	500
5.5.5 Aufbereitung von rückgewonnenem MMA-Rohprodukt . . . . .	501
5.5.6 Verwendung von wiederaufbereitetem MMA. . . . .	502
5.5.7 Ausblick . . . . .	503
Literatur. . . . .	503
<b>5.6 Solvolytische Verfahren für spezielle Kunststoffe</b> . . . . .	504
<b>5.6.1 Solvolyse von Polyethylenterephthalat</b> . . . . .	504
<i>Peter Klein</i>	
5.6.1.1 Glykolyse . . . . .	506
5.6.1.2 Methanolyse . . . . .	508
5.6.1.3 Hydrolyse . . . . .	509
5.6.1.4 Weitere Methoden . . . . .	511
Literatur. . . . .	511
<b>5.6.2 Depolymerisation von Polyamiden</b> . . . . .	513
<i>Michael Kopietz, Ursula Seeliger</i>	
5.6.2.1 Einleitung . . . . .	513
5.6.2.2 Depolymerisation von Polyamid 6 . . . . .	513
5.6.2.3 Polyamid 66 . . . . .	516
Literatur . . . . .	521
<b>5.6.3 Acidolyse von Polyoxymethylen (POM)</b> . . . . .	523
<i>Gerhard Reuschel</i>	
5.6.3.1 Einleitung . . . . .	523
5.6.3.2 POM-Begriffsbestimmung . . . . .	523
5.6.3.3 Herstellung von POM-Handelsprodukten . . . . .	524

5.6.3.4	Eigenschaften und Anwendungsgebiete von POM . . . . .	524
5.6.3.5	Wiederverwertung durch Recompondieren. . . . .	525
5.6.3.6	Monomerrückgewinnung durch Acidolyse von POM . . . . .	525
	Literatur. . . . .	528
<b>5.6.4</b>	<b>Solvolyse von Polyurethanen . . . . .</b>	<b>529</b>
	<i>Gunter Bauer</i>	
5.6.4.1	Allgemeines . . . . .	529
5.6.4.2	Hydrolyse von Polyurethanen . . . . .	529
5.6.4.3	Alkoholyse von Polyurethanen . . . . .	531
	Literatur. . . . .	538
<b>6</b>	<b>Abfallaufkommen . . . . .</b>	<b>539</b>
<b>6.1</b>	<b>Europa . . . . .</b>	<b>541</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Die europäische Situation bei Kunststoffaufkommen und -entsorgung. Ein statistischer Überblick . . . . .</b>	<b>541</b>
	<i>Vince Matthews</i>	
6.1.1.1	Einführung. . . . .	541
6.1.1.2	Methodik. . . . .	541
6.1.1.3	Verbrauch . . . . .	542
6.1.1.4	Lebenszyklen von Kunststoffprodukten . . . . .	546
6.1.1.5	Kunststoffabfallaufkommen nach der Nutzung („post-consumer“). . . . .	547
6.1.1.6	Methode des Recyclings gebrauchter Kunststoffe . . . . .	550
	Literatur. . . . .	551
<b>6.1.2</b>	<b>Die deutsche Situation bei Kunststoffaufkommen und -entsorgung . . . . .</b>	<b>552</b>
	<i>Ulrich Schlotter</i>	
6.1.2.1	Einleitung . . . . .	552
6.1.2.2	Erhebung zum Kunststoffrecycling . . . . .	553
6.1.2.3	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	556
	Literatur. . . . .	556
<b>6.1.3</b>	<b>Verpackungsabfälle . . . . .</b>	<b>557</b>
	<i>Gabriela Blumschein-Grossmayer</i>	
6.1.3.1	Einleitung . . . . .	557
6.1.3.2	Verpackungen . . . . .	557
6.1.3.3	Verpackungsabfälle . . . . .	560
6.1.3.4	Ökologische Einflüsse auf die Kunststoffverpackungen . . . . .	561
6.1.3.5	Verwertung . . . . .	563
	Literatur. . . . .	563
<b>6.1.4</b>	<b>Kunststoffreststoffe in der Altautoverwertung . . . . .</b>	<b>564</b>
	<i>Christian Ruhsert</i>	
6.1.4.1	Einleitung . . . . .	564
6.1.4.2	Mengenentwicklung der Kunststoffe im Automobil . . . . .	564
6.1.4.3	Ausbau brauchbarer Teile . . . . .	565
6.1.4.4	Das stoffliche Recycling. . . . .	566

6.1.4.5	Einsatz von Rezyklat . . . . .	571
6.1.4.6	Das recyclingfreundliche Automobil . . . . .	573
6.1.4.7	Ausblick . . . . .	575
	Literatur . . . . .	576
<b>6.1.5</b>	<b>Kunststoffe in der Elektro- und Elektronikindustrie und ihre Recyclingchancen .</b>	<b>578</b>
	<i>Werner Nickel</i>	
6.1.5.1	Werkstoffe und Anwendungsgebiete . . . . .	578
6.1.5.2	Einsatzbedingungen und Langzeitverhalten . . . . .	580
6.1.5.3	Geräterücklauf . . . . .	582
6.1.5.4	Wiederverwendung und -verwertung . . . . .	586
	Literatur . . . . .	590
<b>6.1.6</b>	<b>Kunststoffabfallströme aus der Bauwirtschaft. . . . .</b>	<b>591</b>
	<i>Wolfgang Engert, Rüdiger Kwasny-Echterhagen, Thomas Simon</i>	
6.1.6.1	Kunststoffe im Bauwesen . . . . .	591
6.1.6.2	Baureststoffe . . . . .	592
	Literatur . . . . .	594
<b>6.2</b>	<b>Kunststoffrecycling in den USA – eine Bestandsaufnahme . . . . .</b>	<b>596</b>
	<i>Ron N. Liesemer</i>	
6.2.1	Kunststoffrecycling heute . . . . .	596
6.2.2	Die Grenzen des Recyclings überwinden . . . . .	597
6.2.3	Rohstoffliches Recycling als Ergänzung zum werkstofflichen Recycling . . . . .	599
6.2.4	Abfälle aus dem Nichtverpackungsbereich . . . . .	600
6.2.5	Recycling als politische Herausforderung . . . . .	601
6.2.6	Der Weg in die Zukunft . . . . .	602
<b>6.3</b>	<b>Der gegenwärtige Stand und die Zukunftsaussichten des Kunststoff-Recyclings in Japan. . . . .</b>	<b>604</b>
	<i>Rinzo Iijima</i>	
6.3.1	Einleitung . . . . .	604
6.3.2	Kunststoffproduktion, -verbrauch und -beseitigung. . . . .	605
6.3.3	Stand des Sammelns, des Recyclings und der Beseitigung von Kunststoffabfällen . . . . .	605
6.3.4	Stand der Recyclingverfahren . . . . .	607
	6.3.4.1 Werkstoffliche Verwertung . . . . .	607
	6.3.4.2 Rohstoffliches Recycling . . . . .	610
	6.3.4.3 Thermisches Recycling . . . . .	612
6.3.5	Aktuelle Bemühungen der Industrie zur Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Recyclingverfahren. . . . .	613
6.3.6	Schlußfolgerung . . . . .	614
	Literatur . . . . .	614
<b>7</b>	<b>Anwendungen von Rezyklaten . . . . .</b>	<b>615</b>
<b>7.1</b>	<b>Voraussetzungen für das werkstoffliche Recycling . . . . .</b>	<b>617</b>
	<i>Johannes Brandrup</i>	
7.1.1	Einleitung . . . . .	617
7.1.2	Beeinflussung von Produkteigenschaften durch das Recycling. . . . .	617
7.1.3	Qualitätssicherung. . . . .	619

7.1.4	Produzentenhaftung . . . . .	620
7.1.5	Grenzen des werkstofflichen Recyclings . . . . .	620
7.1.6	Anforderung an den Kunststoffabfall für das werkstoffliche Recycling . . . . .	622
	Literatur . . . . .	624
<b>7.2</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus Polyethylen-HD (PE-HD)</b> . . . . .	<b>625</b>
	<i>Norbert Hannig, Eckard Raddatz</i>	
7.2.1	Materialbeschreibung . . . . .	625
	7.2.1.1 Struktur und allgemeine Eigenschaften . . . . .	625
	7.2.1.2 Mechanische Eigenschaften . . . . .	627
	7.2.1.3 Anwendungsgebiete und Verarbeitung von Polyethylen . . . . .	627
7.2.2	Entwicklungstendenzen bei den Fertigteilherstellern . . . . .	630
7.2.3	Umweltverträglichkeit von Polyethylen . . . . .	631
7.2.4	PE-Recycling . . . . .	631
	7.2.4.1 Einflüsse auf das PE-Recycling . . . . .	632
	7.2.4.2 Rezyklatqualität . . . . .	638
	7.2.4.3 Verarbeiten von Rezyklaten . . . . .	638
	7.2.4.4 Wirtschaftlichkeit . . . . .	640
7.2.5	Gegenwärtiger und zukünftiger Markt für PE-Rezyklate . . . . .	641
	Literatur . . . . .	641
<b>7.3</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus Polyethylen-LD/LLD</b> . . . . .	<b>643</b>
	<i>Louis Jetten</i>	
7.3.1	Einleitung . . . . .	643
7.3.2	Eigenschaften und Anwendungen von PE-LD/LLD . . . . .	643
	7.3.2.1 Anwendungen . . . . .	644
7.3.3	Werkstoffliche Verwertung . . . . .	644
	7.3.3.1 Der Wiederaufarbeitungskreislauf . . . . .	644
	7.3.3.2 Technologische und wirtschaftliche Aspekte . . . . .	646
	7.3.3.3 Recyclingbetriebe von PE-LD/LLD in Westeuropa . . . . .	647
7.3.4	Aufkommen und Beschaffung von Kunststoffabfällen . . . . .	648
	7.3.4.1 Landwirtschaft . . . . .	649
	7.3.4.2 Bauwesen . . . . .	649
	7.3.4.3 Handel . . . . .	649
	7.3.4.4 Kraftfahrzeuge . . . . .	650
	7.3.4.5 Hausabfall . . . . .	650
7.3.5	Eigenschaften und Märkte für Regranulate . . . . .	650
	7.3.5.1 Eigenschaften . . . . .	650
	7.3.5.2 Märkte . . . . .	651
	7.3.5.3 Schlußfolgerung . . . . .	653
	Literatur . . . . .	655
<b>7.4</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus Polypropylen</b> . . . . .	<b>655</b>
	<i>Erhard Seiler</i>	
7.4.1	Charakterisierung des Werkstoffs Polypropylen . . . . .	655
7.4.2	Eigenschaftsänderungen bei Polypropylen durch Recycling . . . . .	657
	7.4.2.1 „Ideales“ werkstoffliches Recycling von Polypropylen . . . . .	657
	7.4.2.2 Produktmodifikation beim werkstofflichen Recycling von Polypropylen . . . . .	658
	7.4.2.3 Probleme beim sortenreinen werkstofflichen Recycling von Polypropylen . . . . .	659
	7.4.2.4 Polypropylen in Stoffgemischen . . . . .	662

7.4.2.5	Herstellung qualitätsgesicherter Polypropylen-Rezyklate . . . . .	663
7.4.2.6	Marktgängige Polypropylen-Rezyklate . . . . .	663
7.4.3	Anwendungen für Polypropylen-Rezyklate. . . . .	665
7.4.3.1	Projekte und Anwendungen für Polypropylen-Rezyklate im Automobilssektor . . . . .	666
7.4.3.2	Projekte und Anwendungen für Polypropylen-Rezyklate im Verpackungssektor . . . . .	667
7.4.3.3	Anwendungen für Polypropylen-Rezyklate in der Elektrotechnik und im Maschinen-/Apparatebau . . . . .	668
7.4.3.4	Anwendungen für Polypropylen-Rezyklate im Bau- und Möbelsektor . . . . .	669
7.4.4	Marktbedeutung von Polypropylen. . . . .	669
7.4.5	Gegenwärtiger und zukünftiger Markt für Polypropylen-Rezyklate . . . . .	670
	Literatur. . . . .	672
<b>7.5</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus Polystyrol . . . . .</b>	<b>674</b>
	<i>Hans-Michael Walter</i>	
7.5.1	Charakterisierung des Werkstoffs Polystyrol . . . . .	674
7.5.1.1	Standardpolystyrol . . . . .	674
7.5.1.2	Schlagfestes Polystyrol . . . . .	674
7.5.1.3	Blockcopolymere . . . . .	674
7.5.1.4	Polystyrolblends . . . . .	675
7.5.2	Eigenschaften von Polystyrol. . . . .	675
7.5.2.1	Typische Werkstoffdaten, Produktvielfalt, Verträglichkeit . . . . .	675
7.5.2.2	Modifikation durch Additive . . . . .	676
7.5.3	Recycling von Polystyrol. . . . .	677
7.5.3.1	Qualitätsanforderungen an Polystyrolrezyklat . . . . .	677
7.5.3.2	Mehrfachverarbeitung von Polystyrol. . . . .	678
7.5.3.3	Polystyrol in Stoffgemischen . . . . .	680
7.5.3.4	Recyclingprojekte mit Polystyrol . . . . .	682
7.5.4	Einsatzgebiete für Polystyrolrezyklat. . . . .	685
7.5.5	Marktbedeutung von Polystyrol . . . . .	685
7.5.5.1	Hersteller und Kapazitäten in Westeuropa. . . . .	685
7.5.5.2	Verbrauch nach Anwendungen und Branchen in Westeuropa . . . . .	686
7.5.5.3	Abschätzung des Recyclingpotentials (Chem Systems-Studie) . . . . .	686
7.5.6	Zusammenfassung und Perspektive. . . . .	688
	Literatur. . . . .	689
<b>7.6</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus expandiertem Polystyrol . . . . .</b>	<b>691</b>
	<i>Werner Lindhof</i>	
7.6.1	Eigenschaften von expandiertem Polystyrol (EPS) . . . . .	691
7.6.1.1	Historie . . . . .	691
7.6.1.2	Herstellung von EPS-Rohstoff . . . . .	691
7.6.1.3	Vom Rohstoff zum Schaumstoff . . . . .	691
7.6.1.4	Bauen mit EPS . . . . .	694
7.6.1.5	Verpacken mit EPS . . . . .	694
7.6.2	Problem der Recyclingverarbeitung. . . . .	695
7.6.2.1	Entsorgung nach Verwendung . . . . .	695
7.6.2.2	Aufbereitung von EPS-Schaumstoffen für ein Recycling. . . . .	695
7.6.3	Einsatzmöglichkeiten für Rezyklate . . . . .	696
7.6.3.1	Wiederverwertung . . . . .	697
7.6.3.2	Weiterverwertung . . . . .	697

7.6.3.3	Aufschmelzen, Verdichten, Sintern und Granulieren . . . . .	701
7.6.3.4	Rohstoffrecycling, chemisches Recycling . . . . .	702
7.6.3.5	Thermische Verwertung . . . . .	702
7.6.3.6	Deponie . . . . .	703
7.6.4	Wirtschaftliche Bedeutung von EPS . . . . .	703
7.6.4.1	Verbrauch und Kapazitäten weltweit . . . . .	703
7.6.4.2	Hersteller und Kapazitäten in Westeuropa . . . . .	703
7.6.4.3	Verbrauch und Einsatzgebiete von EPS . . . . .	705
7.6.5	Abschätzung des Recyclingpotentials . . . . .	706
7.6.5.1	EPS-Verpackungen in Deutschland . . . . .	706
7.6.5.2	Entsorgungslogistik . . . . .	706
7.6.5.3	Wiederverwertungsquoten . . . . .	707
7.6.5.4	Ökobilanz . . . . .	708
	Literatur . . . . .	708
<b>7.7</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus Polyvinylchlorid</b> . . . . .	<b>710</b>
	<i>Rolf Bühl</i>	
7.7.1	Marktentwicklung für PVC-Neuware . . . . .	710
7.7.2	Allgemeine Qualitätsanforderungen an ein PVC-Rezyklat . . . . .	713
7.7.3	Erfahrungen mit dem Recycling von PVC-Reststoffen aus Industrie und Gewerbe . . . . .	715
7.7.3.1	Hart-PVC-Folien . . . . .	715
7.7.3.2	PVC-Kunstleder . . . . .	716
7.7.3.3	PVC-Kabel . . . . .	716
7.7.4	Recycling von PVC-Erzeugnissen nach Gebrauch . . . . .	719
7.7.4.1	PVC-Flaschen . . . . .	719
7.7.4.2	PVC-Bodenbeläge und -Dachbahnen . . . . .	720
7.7.4.3	PVC-Fenster . . . . .	722
7.7.4.4	PVC-Rohre . . . . .	724
7.7.5	Abschätzung des Aufnahmepotentials . . . . .	725
7.7.6	Ausblick . . . . .	727
	Literatur . . . . .	728
<b>7.8</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus Polyethylenterephthalat (PET)</b> . . . . .	<b>730</b>
	<i>Hans-Wolfgang Blumschein</i>	
7.8.1	PET – Produktbeschreibung und Einsatzgebiete . . . . .	730
7.8.2	Werkstoffliche Verwertung von PET . . . . .	731
7.8.2.1	Rohstoffquelle Produktion/Zwischenproduktion/Weiterverarbeitung . . . . .	731
7.8.2.2	Rohstoffquelle Endverbraucherprodukte . . . . .	733
7.8.3	Rohstoffliche Verwertung von PET . . . . .	734
7.8.3.1	Rohstoffquelle Produktion . . . . .	734
7.8.3.2	Rohstoffquelle Verpackungen Endverbraucher . . . . .	735
7.8.4	Markt . . . . .	735
7.8.5	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	737
	Literatur . . . . .	737
<b>7.9</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus Polyamiden</b> . . . . .	<b>738</b>
	<i>Philip Boydell</i>	
7.9.1	Eigenschaften von Polyamiden . . . . .	738
7.9.2	Rezyklatverwertung . . . . .	739



7.9.2.1	Abfall von gebrauchten Kunststoffen . . . . .	739
7.9.2.2	Industrielle Kunststoffabfälle . . . . .	740
7.9.2.3	Sonstiger Industrieabfall . . . . .	742
7.9.2.4	Sonstiger gebrauchter Abfall . . . . .	742
7.9.3	Anwendungen . . . . .	743
7.9.4	Wirtschaftliche Aspekte . . . . .	743
7.9.5	Abschätzung des Recyclingpotentials . . . . .	744
	Literatur . . . . .	745
<b>7.10</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus Polyurethan . . . . .</b>	<b>746</b>
	<i>Eckehard Weigand</i>	
7.10.1	Einleitung . . . . .	746
7.10.2	Verwertungsmethoden für Polyurethane . . . . .	748
7.10.2.1	Werkstoffliches Recycling. . . . .	748
7.10.2.2	Rohstoffliches Recycling . . . . .	750
7.10.2.3	Energiegewinnung . . . . .	752
7.10.3	Verwertung von PUR-Weichschaumstoff . . . . .	752
7.10.3.1	Flockenverbundschaumstoff . . . . .	752
7.10.3.2	Pulvereinarbeitung . . . . .	753
7.10.3.3	Glykolyse . . . . .	755
7.10.3.4	Energiegewinnung . . . . .	755
7.10.4	Verwertung von PUR-Hartschaumstoff. . . . .	755
7.10.4.1	Hartschaumpulver . . . . .	755
7.10.4.2	Klebpressen . . . . .	755
7.10.4.3	Glykolyse . . . . .	757
7.10.4.4	Energiegewinnung . . . . .	757
7.10.5	Verwertung von RIM-Polyurethanen. . . . .	757
7.10.5.1	Fließpressen . . . . .	757
7.10.5.2	Pulvereinarbeitung . . . . .	757
7.10.5.3	Glykolyse . . . . .	758
7.10.5.4	Klebpressen . . . . .	759
7.10.6	Verwertung von anderen Polyurethanen . . . . .	759
7.10.6.1	Füllschaumstoff . . . . .	759
7.10.6.2	Warmformbarer Hartschaumstoff. . . . .	760
7.10.6.3	Flexibler Integralschaumstoff . . . . .	760
7.10.6.4	Harter Integralschaumstoff . . . . .	760
7.10.6.5	Thermoplastisches Polyurethan (TPU) . . . . .	760
7.10.6.6	Sonstige Polyurethane . . . . .	761
7.10.7	Schlußbemerkungen . . . . .	761
	Anmerkungen und Literatur . . . . .	763
<b>7.11</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus faserverstärkten, gehärteten Kunststoffen (GFK) . . . . .</b>	<b>766</b>
	<i>Peter Schaefer</i>	
7.11.1	Wirtschaftliche Bedeutung von GFK-Werkstoffen. . . . .	766
7.11.2	Entsorgung der GFK-Abfälle . . . . .	767
7.11.3	Aufbau Kreislaufwirtschaft für GFK . . . . .	768
7.11.4	Mobile Vorzerkleinerung. . . . .	769
7.11.5	Aufbereitungsanlage und faserhaltige Rezyklate . . . . .	770
7.11.5.1	Qualitätssystem . . . . .	771

7.11.6	Entwicklung von Harzmatten und Bauteilen mit Rezyklat. . . . .	771
7.11.6.1	Rezepturen. . . . .	771
7.11.6.2	Prozeß für die Harzmattenherstellung. . . . .	773
7.11.6.3	Bauteileigenschaften . . . . .	775
7.11.7	Erfahrungen im Produktionsbetrieb . . . . .	775
7.11.8	Wirtschaftlichkeit . . . . .	777
7.11.8.1	Mengenströme . . . . .	777
7.11.8.2	Kosten . . . . .	778
7.11.9	Ausblick und Übertragbarkeit auf andere GFK-Produkte . . . . .	780
	Literatur. . . . .	781
<b>7.12</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von Rezyklaten aus Gemischtkunststoff. . . . .</b>	<b>782</b>
	<i>John A. N. Scott</i>	
7.12.1	Einführung . . . . .	782
7.12.1.1	Primärpolymere und gemischte Kunststoffe. . . . .	783
7.12.1.2	Abfallströme und ihre Zusammensetzung. . . . .	784
7.12.1.3	Einfluß der Verarbeitungstechnologien auf die Eigenschaften von Rezyklaten aus gemischtem Kunststoff . . . . .	786
7.12.2	Eigenschaften des gemischten Kunststoffrezyklats . . . . .	787
7.12.2.1	Grundlegende Materialeigenschaften . . . . .	787
7.12.2.2	Materialeigenschaften und Gebrauchswert der Produkte. . . . .	792
7.12.2.3	Vergleich mit den Eigenschaften von Holz und anderen konventionellen Materialien. . . . .	793
7.12.3	Anwendungen von gemischtem Kunststoffrezyklat . . . . .	795
7.12.3.1	Arten des Einsatzes, Formen und Profile. . . . .	795
7.12.3.2	Bau, Landwirtschaft . . . . .	795
7.12.3.3	Parks und Erholungsgebiete. . . . .	796
7.12.3.4	Anwendungen an Straßen . . . . .	797
7.12.3.5	Verteilung und Transport . . . . .	798
7.12.3.6	Anwendungen im Wassersport und hydrotechnische Anwendungen . . . . .	799
7.12.4	Aussichten für neue Anwendungen. . . . .	799
	Literatur. . . . .	800
<b>7.13</b>	<b>Gemischtkunststoffe als Baustoffzuschläge . . . . .</b>	<b>803</b>
	<i>Wolfgang Engert, Rüdiger Kwasny-Echterhagen, Thomas Simon</i>	
7.13.1	Verwendung von Kunststoffen in Baustoffen . . . . .	803
7.13.2	Kunststoffzuschläge in (Zement-)Beton . . . . .	804
7.13.3	SICOWA-Verfahren zur Erzeugung von Kunststoffkörnungen aus gemischten Alt- kunststoffen . . . . .	804
7.13.3.1	Rohstoffe. . . . .	804
7.13.3.2	Hauptverfahrensschritte . . . . .	804
7.13.3.3	Allgemeines zur Verwertung . . . . .	806
7.13.4	Eigenschaftsbild von (zementgebundenen) Baustoffen mit Kunststoffkörnungen aus gemischten Altkunststoffen . . . . .	807
7.13.4.1	Leichtputz . . . . .	807
7.13.4.2	Leichtmörtel . . . . .	807
7.13.4.3	Tiefbohr-Leichtschlamm . . . . .	808
7.13.5	Stand der verfahrens- und produkttechnischen Entwicklung, Schlußbemerkung. . . . .	809
	Literatur. . . . .	809

<b>8</b>	<b>Energetische Verwertung</b>	811
<b>8.1</b>	<b>Mitverbrennung mit anderen Produktströmen</b>	813
<b>8.1.1</b>	<b>Thermische Verwertung von Kunststoffabfällen in Abfallverbrennungsanlagen.</b>	813
	<i>Egon Dirks</i>	
8.1.1.1	Einleitung	813
8.1.1.2	Funktionsweise der Abfallverbrennung	814
8.1.1.3	Verfahrenstechnik	816
8.1.1.4	Verbrennungstechnologie	817
8.1.1.5	Emissionsminderungstechnik	822
8.1.1.6	Reststoffe	830
8.1.1.7	Möglichkeiten der Energieverwertung aus Abfällen	833
8.1.1.8	Betriebliche und rechtliche Voraussetzungen	836
	Literatur	837
<b>8.1.2</b>	<b>Thermische Verwertung von Kunststoffabfällen in Kleinanlagen.</b>	838
	<i>Ernst Wogrolly</i>	
8.1.2.1	Aufbau und Beschreibung der Verbrennungsanlage	838
8.1.2.2	Beschreibung der Abgasreinigungsanlage	839
8.1.2.3	Betriebs- und Analysendurchführung	842
8.1.2.4	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	843
8.1.2.5	Diskussion der Ergebnisse	844
	Literatur	846
<b>8.1.3</b>	<b>Thermische Verwertung von Kunststoffabfällen in Zementöfen</b>	847
	<i>Hans J. Knopf</i>	
8.1.3.1	Einleitung	847
8.1.3.2	Die Zementherstellung	847
8.1.3.3	Anforderungen an die Brennstoffe	850
8.1.3.4	Betriebserfahrungen mit kunststoffreichen Ersatzbrennstoffen	853
8.1.3.5	Konzentrierte Kunststoffabfälle als Ersatzbrennstoff	859
8.1.3.6	Genehmigungsrechtliche Aspekte	861
	Literatur	864
<b>8.1.4</b>	<b>Thermische Verwertung von Kunststoffabfällen zusammen mit Klärschlamm.</b>	865
	<i>Rainer Römer</i>	
8.1.4.1	Einleitung	865
8.1.4.2	Klärschlammverbrennungsverfahren	865
8.1.4.3	Einsatzmöglichkeiten von Kunststoffen	871
8.1.4.4	Versuche	871
8.1.4.5	Betriebserfahrungen	872
	Literatur	873
<b>8.2</b>	<b>Monoverbrennung von Kunststoffen</b>	874
	<i>Rainer Martin</i>	
8.2.1	Einführung	874
8.2.2	Anforderungen an den Brennstoff	875
8.2.2.1	Störstoffe	875
8.2.3	Überlegungen zur Eignung von Feuerungssystemen	876

8.2.3.1	Rostfeuerungen . . . . .	876
8.2.3.2	Drehrohr . . . . .	877
8.2.3.3	Wirbelschicht. . . . .	878
8.2.4	Neuere Verbrennungsversuche . . . . .	882
8.2.4.1	Verbrennungsversuche in der ZWS-Pilotanlage, Ahlstrom. . . . .	883
8.2.4.2	Verbrennungsversuche in der IRWS-Pilotanlage EBARA/Japan . . . . .	887
8.2.5	Kosten . . . . .	887
	Literatur . . . . .	888
<b>8.3</b>	<b>Verbrennung unter reinem Sauerstoff mit Hochtemperaturumwandlung . . . . .</b>	<b>889</b>
	<i>Reinhard Fischer, Georg Menges</i>	
8.3.1	Einleitung . . . . .	889
8.3.2	Sauerstoff und seine Bedeutung in thermischen Prozessen . . . . .	889
8.3.2.1	Verbrennen mit Sauerstoff . . . . .	889
8.3.2.2	Herstellung des Sauerstoffes . . . . .	890
8.3.2.3	Brenner und Bedienungsanlage . . . . .	891
8.3.2.4	Drehrohrofen. . . . .	892
8.3.2.5	Erkenntnisse mit Verbrennungsanlagen, die mit konzentriertem Sauerstoff arbeiten . . . . .	893
8.3.2.6	Zusammenfassung der Vorteile . . . . .	893
8.3.3	Entnahme des Kohlendioxids . . . . .	895
8.3.3.1	Möglichkeiten zur Nutzung von Kohlendioxid. . . . .	895
8.3.3.2	Hochtemperatur-(HT)-Konversion der Rauchgase . . . . .	897
	Literatur . . . . .	900
<b>8.4</b>	<b>Emissionen . . . . .</b>	<b>901</b>
<b>8.4.1</b>	<b>Verbrennung von kommunalem Abfall – Der Einfluß von Mischkunststoff- abfall auf die Menge und Zusammensetzung von Aschen und Emission . . . . .</b>	<b>901</b>
	<i>Frank E. Mark</i>	
8.4.1.1	Einleitung . . . . .	901
8.4.1.2	Verbrennungsverfahren und Rückstände . . . . .	902
8.4.1.3	Zielsetzung der Untersuchungen . . . . .	902
8.4.1.4	Planung und Durchführung der Versuche . . . . .	903
8.4.1.5	Ergebnisse der Untersuchungen . . . . .	906
8.4.1.6	Schlußfolgerungen . . . . .	918
	Literatur . . . . .	919
<b>9</b>	<b>Entsorgung. . . . .</b>	<b>921</b>
	<i>Ernst Wogrolly</i>	
<b>9.1</b>	<b>Allgemeinsituation Entsorgung . . . . .</b>	<b>923</b>
9.1.1	Geschichte der Abfallwirtschaft. . . . .	923
9.1.2	Generelle Anforderungen an die Praxis der Abfallwirtschaft. . . . .	924
<b>9.2</b>	<b>Ablagerung in Deponien . . . . .</b>	<b>925</b>
9.2.1	Voraussetzungen und Kriterien für das Errichten und den Betrieb von Deponien. . . . .	925
9.2.2	Deponieformen . . . . .	927
9.2.2.1	Hangdeponien . . . . .	928
9.2.2.2	Haldendeponien . . . . .	928

9.2.3	Deponierbarkeit bzw. Zuordnung der Abfälle zu den einzelnen Deponiebauklassen . . . .	929
9.2.4	Kunststoffabfälle zum Ablagern auf Deponien . . . . .	932
9.2.5	Deponierichtlinien der EG . . . . .	935
9.2.6	Das Verhalten von Kunststoffen in Mülldeponien . . . . .	936
9.2.6.1	Müllausgrabungen . . . . .	936
9.2.6.2	Zusammenfassung . . . . .	938
<b>9.3</b>	<b>Sonderprobleme Entsorgung . . . . .</b>	<b>939</b>
9.3.1	Monodeponien . . . . .	940
	Literatur . . . . .	941
<b>10</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>943</b>
10.1	Verbände und Organisationen, die sich mit der Wiederverwertung von Kunststoffen in Deutschland beschäftigen . . . . .	945
10.2	Kunststoffe – Kurzzeichen und Kennbuchstaben für Polymere nach DIN 7728 (1988) . . . . .	949
10.2.1	Kurzzeichen für Kunststoffe . . . . .	949
10.2.2	Kennbuchstaben für besondere Eigenschaften . . . . .	951
	<b>Register . . . . .</b>	<b>953</b>