

Martin Kaltschmitt · Hans Hartmann
Hermann Hofbauer (Hrsg.)

Energie aus Biomasse

Grundlagen, Techniken und Verfahren

2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage

 Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
1.1	Biomasse als nachwachsender Energieträger	1
	MARTIN KALTSCHMITT	
1.1.1	Definition "Biomasse"	2
1.1.2	Aufbau typischer Bereitstellungsketten	3
1.1.3	Wandlungsmöglichkeiten in End- bzw. Nutzenergie	5
	Thermo-chemische Umwandlung 5; Physikalisch-chemische Umwandlung 6; Bio-chemische Umwandlung 6	
1.2	Biomasse im Energiesystem	7
	MARTIN KALTSCHMITT, DANILEA THRÄN	
1.2.1	Definition der Energiebegriffe	7
	Energien und Energieträger 8; Energievorräte und -quellen 9 (Energievorräte 9, Energiequellen 9)	
1.2.2	Potenziale und Nutzung	10
	Begriffsdefinitionen 10; Welt 11 (Potenziale – Stand 11, Potenziale – Entwicklung 14, Nutzung 19); Europa 22 (Potenziale – Stand 22, Potenziale – Entwicklung 23, Nutzung 27)	
1.2.3	Energiesystem	28
	Welt 28 (Energieverbrauch 29, Anteile 31); Europa 33 (Energieverbrauch 33, Anteile 34)	
1.3	Aufbau und Abgrenzungen	36
	MARTIN KALTSCHMITT, HANS HARTMANN, HERMANN HOFBAUER	
1.3.1	Gebiet "Biomasseaufkommen"	37
1.3.2	Gebiet "Biomassebereitstellung"	38
1.3.3	Gebiet "Direkte Verbrennung und thermo-chemische Umwandlung"	39
1.3.4	Gebiet "Physikalisch-chemische Umwandlung"	40
1.3.5	Gebiet "Bio-chemische Umwandlung"	40
2	Biomasseentstehung	41
2.1	Aufbau und Zusammensetzung	41
	IRIS LEWANDOWSKI	
	Aufbau 41; Zusammensetzung 43 (Aufgabe der verschiedenen Elemente 43, Gebildete Verbindungen 45)	

XII Inhaltsverzeichnis

2.2	Primärproduktion	46
	IRIS LEWANDOWSKI	
	Photosynthese 47 (Lichtreaktion 47, Dunkelreaktion 48); Atmung 50 (Dunkelatmung 50, Lichtatmung 51); Wirkungsgrad der Primärproduktion 52	
2.3	Standortfaktoren.....	54
	IRIS LEWANDOWSKI	
	Einstrahlung 54; Temperatur 55; Wasser 56; Boden und Nährstoffe 59; Humusproduktion 60	
2.4	Acker- und pflanzenbauliche Grundlagen.....	61
	ARMIN VETTER	
2.4.1	Anbausysteme und Fruchtfolgegestaltung.....	61
	Grünland-Anbausysteme 62; Ackerbau-Anbausysteme 63; Agrosforstsysteme 66	
2.4.2	Einflussfaktoren im Produktionssystem.....	67
	Bodenbearbeitung und Bestellung 67; Düngung und Nährstoffkreislauf 67 (Bemessung der Düngung 68, Nebenprodukte- und Rückstandsverwertung 69); Pflanzenschutzmaßnahmen 70; Beregnung 70; Erntemaßnahmen 72	
2.5	Zeitliche und räumliche Angebotsunterschiede.....	72
	IRIS LEWANDOWSKI	
2.5.1	Zeitliche Angebotsunterschiede.....	72
2.5.2	Räumliche Angebotsunterschiede.....	73
3	Angebaute Biomasse	75
3.1	Forstwirtschaftlich produzierte Lignocellulosepflanzen.....	75
	HERMANN ENGLERT	
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 77; Standortansprüche und Anbau 77; Nutzung und Ertragspotenzial 79 (Begriffsfestlegungen 80, Ertragspotenziale 85)	
3.2	Landwirtschaftlich produzierte Lignocellulosepflanzen.....	88
	IRIS LEWANDOWSKI, CONSTANZE BÖHMEL, ARMIN VETTER, HANS HARTMANN	
3.2.1	Schnellwachsende Baumarten.....	88
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 89; Standortansprüche und Anbau 89; Nutzung und Ertragspotenzial 91; Rekultivierung 91; Ökologische Aspekte 92	
3.2.2	Miscanthus.....	92
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 93; Standortansprüche und Anbau 93; Nutzung und Ertragspotenzial 94; Rekultivierung 95; Ökologische Aspekte 96	
3.2.3	Rutenhirse.....	96
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 96; Standortansprüche und Anbau 97; Nutzung und Ertragspotenzial 97; Ökologische Aspekte 98	

3.2.4	Rohrglanzgras	98
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 98; Standortansprüche und Anbau 99; Nutzung und Ertragspotenzial 99; Rekultivierung 99; Ökologische Aspekte 99	
3.2.5	Futtergräser	99
	Geeignete Arten 100 (Weidelgras 100, Knaulgras 100, Glatthafer 100, Rohrschwengel 100); Energieträgerrelevante Eigenschaften 100; Standortansprüche und Anbau 101; Nutzung und Ertragspotenzial 102; Ökologische Aspekte 102	
3.2.6	Getreideganzpflanzen	103
	Geeignete Arten 103 (Weizen 103, Roggen 104, Tricale 104); Energieträgerrelevante Eigenschaften 104; Standortansprüche und Anbau 105; Nutzung und Ertragspotenzial 107; Ökologische Aspekte 108	
3.3	Ölpflanzen	109
3.3.1	Raps	109
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 109; Standortansprüche und Anbau 110; Nutzung und Ertragspotenzial 112; Ökologische Aspekte 112	
3.3.2	Sonnenblume	112
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 112; Standortansprüche und Anbau 113; Nutzung und Ertragspotenzial 115; Ökologische Aspekte 115	
3.4	Zucker- und Stärkepflanzen	115
	IRIS LEWANDOWSKI, CONSTANZE BÖHMEL	
3.4.1	Zuckerpflanzen	115
3.4.1.1	Zuckerrübe	116
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 116; Standortansprüche und Anbau 116; Nutzung und Ertragspotenzial 118; Ökologische Aspekte 118	
3.4.1.2	Zuckerhirse	119
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 119; Standortansprüche und Anbau 119; Nutzung und Ertragspotenzial 120; Ökologische Aspekte 121	
3.4.2	Stärkepflanzen	121
3.4.2.1	Kartoffel.....	121
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 121; Standortansprüche und Anbau 122; Nutzung und Ertragspotenzial 123; Ökologische Aspekte 124	
3.4.2.2	Topinambur	124
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 124; Standortansprüche und Anbau 125; Nutzung und Ertragspotenzial 126; Ökologische Aspekte 126	
3.4.2.3	Getreide	126
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 127; Standortansprüche und Anbau 127; Nutzung und Ertragspotenzial 129; Ökologische Aspekte 129	

3.4.2.4	Mais	129
	Energieträgerrelevante Eigenschaften 129; Standortansprüche und Anbau 130; Nutzung und Ertragspotenzial 133; Ökologische Aspekte 133	
4	Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle.....	135
4.1	Holzartige Biomasse	137
	DANIELA THRÄN	
4.1.1	Landschaftspflegeholz	137
	Straßenbegleitholz 137; Gehölze in der freien Landschaft 138; Baumschnitt aus Parks, Anlagen und Friedhöfen 139; Baumschnitt aus Obstplantagen, Streuobstwiesen und Rebflächen 139 (Obstplantagen 140, Streuobstwiesen 140, Rebflächen 141); Schwemholz 141	
4.1.2	Industrierestholz.....	141
4.1.3	Altholz	143
	Stoffliche Nutzung 147; Energetische Nutzung 147	
4.2	Halmgutartige Biomasse	148
	DANIELA THRÄN	
4.2.1	Stroh.....	149
	Getreidestroh 150; Ölsaatenstroh 153; Maisstroh 153; Körnerleguminosenstroh 154	
4.2.2	Weitere Erntereste aus der Landwirtschaft	154
4.2.3	Halmgüter aus der Landschaftspflege	155
	Straßengrasschnitt 155; Grasschnitt aus Parks, Anlagen und Friedhöfen 156; Grasschnitt von Naturschutzflächen 156	
4.3	Sonstige Biomasse.....	157
	DANIELA THRÄN, FRANK SCHOLWIN, INA KÖRNER	
4.3.1	Exkremate aus der Nutztierhaltung	158
4.3.2	Siedlungsabfälle.....	159
4.3.3	Produktionsspezifische Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle	162
	Getreideverarbeitung 163; Obst-, Gemüse- und Kartoffelverarbeitung 164; Zuckerherstellung 164; Pflanzenölherstellung 164; Bierherstellung 165; Weinherstellung 165; Brennereien 165; Milchverarbeitung 165; Fleischverarbeitung 166; Zellstoff- und Papierindustrie 166	
4.3.4	Organisch belastete Abwässer.....	167
	Kommunal-Abwasser 168; Industrielle Abwässer 169	
5	Bereitstellungskonzepte.....	171
5.1	Rändbedingungen und Anforderungen.....	173
	DANIELA THRÄN, MARTIN KALTSCHMITT	
	Energieinhalt und Inhaltsstoffe 173; Wassergehalt 174; Ernte-Zeitfenster 175; Lagerung 175; Dichte 176; Transport 177; Qualitätsmanagement 177; Brennstoffmengen, Flächenbedarf und Einzugsgebiete 179	

5.2	Bereitstellungsketten für Holzbrennstoffe	184
	HANS HARTMANN, MARTIN KALTSCHMITT	
5.2.1	Stückholz (Brennholz)	184
	Stückholz aus dem Wald 185; Stückholz aus Industrierestholz 187; Stückholz aus Altholz 187	
5.2.2	Holzhackgut	188
	Hackgut aus dem Wald 188 (Hackgut aus Schwachholz – Motormanuelle Verfahren 188, Hackgut aus Schwachholz – Teilmechanisierte Verfahren 190, Hackgut aus Schwachholz – Vollmechanisierte Verfahren 190, Hackgut aus Waldrestholz 191); Hackgut aus Kurzumtriebsplantagen 192 (Kontinuierliche Verfahren 193, Absätzliche Verfahren 194); Hackgut aus Industrierest- und Altholz 195; Hackgut aus Landschaftspflegeholz 196	
5.2.3	Restholz-Ballen und Holzbündel	197
5.2.4	Sonstige Holzbrennstoffe	197
	Wurzelstöcke und Stubben 197; Rinde 198; Schwarten und Spreißel 198; Späne und Stäube 199; Holzpellets und -briketts 199	
5.3	Bereitstellungsketten für Halmgutbrennstoffe	199
	HANS HARTMANN, MARTIN KALTSCHMITT	
5.3.1	Ballen	201
	5.3.1.1 Stroh-Ballen	
	5.3.1.2 Getreidepflanzen-Ballen	
	5.3.1.3 Miscanthus-Ballen	
	5.3.1.4 Halmgut-Ballen von Grünlandflächen	
5.3.2	Häckselgut	206
	5.3.2.1 Miscanthus-Häcksel	
	Absätzliche Ernteverfahren 207; Kontinuierliche Ernteverfahren 208	
	5.3.2.2 Straßengrasschnitt	
5.3.3	Sonstige Halmgutketten	209
	5.3.3.1 Pellets und Briketts	
	5.3.3.2 Feuchtgut	
5.4	Bereitstellungsketten für Biogassubstrate	211
	HANS HARTMANN, MARTIN KALTSCHMITT	
5.4.1	Silagen	212
5.4.2	Weitere Biogassubstrate	213
5.5	Bereitstellungsketten für Ölsaaten	213
	HANS HARTMANN	
5.6	Bereitstellungsketten für zucker- und stärkehaltige Stoffe	214
	HANS HARTMANN	
	Zuckerrüben 214; Zuckerhirse 215; Kartoffeln und Topinambur 215; Winterweizen 216; Mais 216	

6 Ernte	217
HANS HARTMANN	
6.1 Holzartige Biomasse	217
6.1.1 Holz aus dem Wald.....	217
6.1.1.1 Manuelles Fällen und Aufarbeiten	218
Axt 218; Motorsäge 219; Fällen 221; Aufarbeiten 222; Ablängen 223	
6.1.1.2 Teil- und vollmechanisierte Verfahren	223
Teilmechanisierte Verfahren 223; Vollmechanisierte Verfahren 223	
6.1.1.3 Rücken und Vorliefern	225
6.1.2 Holz aus Kurzumtriebsplantagen	226
Fäll-Lege-Maschinen 227; Fäll-Bündel-Maschinen 227; Hackgut- Vollerntemaschinen 229	
6.1.3 Holz aus der Landschaftspflege	231
6.2 Halmgutartige Biomasse	232
6.2.1 Mähgut.....	233
Mähverfahren 233; Wendeverfahren 233; Schwadverfahren 234; Schwadmähverfahren 234	
6.2.2 Häckselgut	234
6.2.3 Ballen.....	236
Hochdruckballenpressen 236; Quaderballenpressen 237; Rund- ballenpressen 238; Pressen mit Zusatzfunktionen 239	
6.3 Ölhaltige Pflanzen	239
6.3.1 Raps	239
6.3.2 Sonnenblumen.....	240
6.4 Zucker- und stärkehaltige Pflanzen	240
6.4.1 Getreidekörner	241
6.4.2 Körnermais	242
6.4.3 Zuckerrüben.....	242
6.4.4 Zuckerhirse	243
6.4.5 Kartoffeln und Topinambur	243
7 Mechanische Aufbereitung	245
7.1 Zerkleinern	245
HANS HARTMANN	
7.1.1 Scheitholzbereitung.....	245
7.1.1.1 Sägen	246
Kettensägen 246; Kreissägen 246; Bandsägen 246	
7.1.1.2 Spalten	247
Manuelles Spalten 247; Mechanische Keilspalter 247; Spiralkegelspalter 248; Messerradspalter 249; Kombi- nierte Säge-Spaltmaschinen 249	

7.1.1.3	Stapel- und Umschlagshilfen	250
	Stapelrahmen 250; Stapelrad 251; Stückholz Bindeapparat 251°	
7.1.2	Hack- und Schreddergutbereitung.....	252
7.1.2.1	Hacker.....	253
	Scheibenhacker 253; Trommelhacker 254; Schneckenhacker 255; Einsatzbereiche 255	
7.1.2.2	Schredder.....	258
7.1.2.3	Zerspaner	258
7.1.3	Mahlzerkleinerung	259
7.1.4	Ballenauflöser	260
7.2	Sieben und Sortieren	262
	HANS HARTMANN	
	Scheiben- und Sternsiebe 262; Plansiebe 262; Trommelsiebe 263	
7.3	Pressen	264
	HANS HARTMANN, JANET WITT	
7.3.1	Brikettierung	265
	Strangpressverfahren 265; Presskammerverfahren 267; Walzenpressverfahren 267	
7.3.2	Pelletierung.....	267
	Auswahl des Rohmaterials 268; Trocknen 270; Zerkleinern 270; Konditionieren 270; Presshilfsmittelzugabe 271; Pressen 271 (Kollergangpressen 271, Hohlwalzen- oder Zahnradpressen 273); Kühlen und Sieben 274; Abfüllen, Lagern und Transportieren 275; Qualitätsanforderungen 275	

8 Transport, Lagerung, Konservierung und Trocknung..... 277

HANS HARTMANN

8.1	Transport.....	277
8.1.1	Straßentransporte	277
8.1.1.1	Land- und forstwirtschaftliche Transporte.....	279
	Allzweckkipper 279; Hochkipper 280; Silieranhänger 280; Sonderbauarten von Anhängern 281; Pumpwagen-Anhänger 281; Transport auf Erntemaschinen 281	
8.1.1.2	Lkw-Transporte	282
	Lkw mit Plattformanhänger 282; Sattelkipper 282; Abrollcontainer 282; Pumpwagen-Lkw 283	
8.1.2	Schienentransporte.....	284
8.1.3	Schiffstransporte	284
8.2	Lagerung	285
8.2.1	Biologische Vorgänge.....	285
	Selbsterhitzung 286; Pilzwachstum und Sporenbildung 287 (Holz 287, Halmgut 288)	
8.2.2	Lagerungsrisiken.....	289
	Substanzabbau 289 (Holzhackgut 290, Rinde 291, Stangenholz, Ganzbäume und Scheitholz 291, Halmgut 291, Körner und Öl-	

	saaten 292, Zuckerhaltige Erntegüter 292); Selbstentzündung und Brandrisiko 292; Explosionsrisiken 293; Gesundheitliche Risiken 294; Entmischung und Feinabrieb 295 °	
8.2.3	Lagerungstechniken	295
8.2.3.1	Bodenlagerung im Freien.....	295
	Bodenlagerung ohne Witterungsschutz 295; Bodenlagerung mit Witterungsschutz 296	
8.2.3.2	Lagerung in Gebäuden.....	297
	Hallen 297; Behälter 298	
8.2.3.3	Kurzzeitlagerung.....	300
8.2.4	Lagerbeschickung	302
8.2.4.1	Lagerein- und -austragssysteme	302
	Ladefahrzeuge 302; Blattfederrührwerke 303; Drehschnecken, Konusschnecken, Austragsfräsen 303; Schubböden 204; Wanderschnecken 305; Krananlagen 305	
8.2.4.2	Fördersysteme.....	306
8.3	Feuchtkonservierung (Silierung).....	309
8.3.1	Prinzipien und Voraussetzungen.....	309
	Wassergehalt 310; Zerkleinerung 311; Verdichtung 311; Luftzutritt 311; Verschmutzung 311	
8.3.2	Silagetechniken	311
	Flach-/Fahrsilo 311; Hochsilo 313; Ballen-/Schlauchsilo 313	
8.3.3	Anwendungen	314
8.4	Trocknung	314
8.4.1	Grundlagen	314
	Trocknungsvermögen von Luft 316; Trocknungsverlauf und Dauer 317; Strömungswiderstand 318	
8.4.2	Trocknungsverfahren	320
8.4.2.1	Natürliche Trocknung	320
	Bodentrocknung 320; Trocknung durch natürliche Konvektion 321; Trocknung durch Selbsterwärmung 322	
8.4.2.2	Technische Trocknung.....	323
	Belüftungskühlung 323; Belüftungstrocknung 323; Warmlufttrocknung 325; Heißlufttrocknung 326	
8.4.3	Trocknungseinrichtungen.....	326
8.4.3.1	Systeme ohne Gutförderung.....	326
8.4.3.2	Systeme mit Gutförderung	329
	Schubwendetrockner 329; Bandtrockner 330; Drehrohrtrockner 331	

9 Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe..... 333

9.1 Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften 333

HANS HARTMANN

Charakterisierung nach qualitätsrelevanten Eigenschaften 333; Charakterisierung nach Herkunft 334

9.1.1	Molekularer Aufbau.....	336
9.1.2	Elementarzusammensetzung	338
9.1.2.1	Hauptelemente	339
	Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff 339; Stickstoff 339; Kalium 340; Kalzium, Magnesium, Phosphor 341; Schwefel 343; Chlor 344	
9.1.2.2	Spurenelemente.....	345
9.1.3	Brennstofftechnische Eigenschaften	348
9.1.3.1	Heizwert und Brennwert.....	348
	Definition 348 (Definition Heizwert 348, Definition Brennwert 349, Unterschied 349); Bestimmung 350; Heizwert trockener Brennstoffe 351; Einfluss Wasserge- halt 352; Einfluss Aschegehalt 352; Energiemengenab- schätzung 353	
9.1.3.2	Flüchtige Bestandteile	355
9.1.3.3	Wassergehalt.....	356
9.1.3.4	Aschegehalt.....	358
9.1.3.5	Ascheerweichungsverhalten.....	359
9.1.4	Physikalisch-mechanische Eigenschaften	362
9.1.4.1	Stückigkeit	363
9.1.4.2	Größenverteilung und Feinanteil.....	365
9.1.4.3	Fließeigenschaften und Brückenbildungsneigung.....	367
9.1.4.4	Lagerdichte	368
	Definition 368; Bestimmung 368; Umrechnung auf Be- zugswassergehalte 369; Umrechnung von Verkaufs- maßen 370; Energiedichte 371	
9.1.4.5	Rohdichte.....	372
9.1.4.6	Abriebfestigkeit	373
9.2	Thermo-chemische Umwandlungsprozesse.....	375
	HERMANN HOFBAUER, MARTIN KALTSCHMITT, THOMAS NUSSBAUMER	
9.2.1	Begriffe.....	376
	Luftüberschusszahl (Luftüberschuss, Luftzahl) 376; Verbrennung 377; Vergasung 378; Pyrolytische Zersetzung 378; Verflüssigung 379; Verkohlung 379; Torrefizierung 379	
9.2.2	Phasen der thermo-chemischen Umwandlung.....	380
9.2.2.1	Aufheizung und Trocknung	381
9.2.2.2	Pyrolytische Zersetzung.....	382
	Verlauf 382; Zersetzungsmechanismen 385; Reaktions- kinetik 387; Anwendungen 388	
9.2.2.3	Vergasung.....	389
	Vergasungsreaktionen 390; Reaktionskinetik 391; An- wendung 394 (Wärmehaushalt 394, Vergasungsreakti- onen 395, Produktgaseigenschaften 395)	
9.2.2.4	Oxidation	397
	Verlauf 397; Verbrennungsrechnung 400 (Gesamtzu- sammenhänge 401, Verbrennungstemperatur 403, Tau- punkt der Abgase 405)	

9.3.	Schadstoffbildungsmechanismen.....	407
9.3.1	Stoffe aus vollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile	408
	THOMAS NUSSBAUMER	
	Kohlenstoffdioxid 408; Wasserdampf 409	
9.3.2	Stoffe aus unvollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile	409
	THOMAS NUSSBAUMER	
	Entstehung 410 (Ascheausbrand 410, Synthese- und Abbaumechanismen von CO, Ruß und Kohlenwasserstoffen 410, Bildung höherer aromatischer Kohlenwasserstoffe und Ruß 413, Heterogene Reaktionen von Kohlenstoff 414, Luftüberschuss und CO/Lambda-Diagramm 414); Beeinflussung 416	
9.3.3	Stoffe aus Spurenelementen bzw. Verunreinigungen.....	417
9.3.3.1	Stickstoffoxide	417
	THOMAS NUSSBAUMER	
	Entstehung 417 (Thermisches NO _x 417, Promptes NO _x 418, NO _x aus Brennstoffstickstoff 419); Beeinflussung 421 (Abgasrezirkulation 422, Luftstufung 423, Brennstoffstufung 425)	
9.3.3.2	Emissionen aus Schwefel, Chlor und Kalium	427
	THOMAS NUSSBAUMER	
	Entstehung 427 (Schwefel 427, Chlor 427, Kalium 427); Konsequenzen 428	
9.3.3.3	Emissionen fester und flüssiger Teilchen.....	428
	VOLKER LENZ	
	Entstehung 430 (Aerosole aus dem Brennstoff 430, Aerosole aus unvollständiger Verbrennung 430, Aerosole aus vollständiger Verbrennung 432, Aerosole durch Mitreißen von Aschepartikeln 434); Beeinflussung 435	
9.3.3.4	Emissionen polychlorierter Dioxine und Furane.....	437
	THOMAS NUSSBAUMER	
	Entstehung 438; Beeinflussung 440	
9.4	Feste Konversionsrückstände und deren Verwertung.....	441
	INGWALD OBERNBERGER	
9.4.1	Eigenschaften.....	442
9.4.1.1	Aschefractionen und -anfall, Dichten und Korngrößen.....	442
	Aschefractionen und -anfall 442; Dichte 443; Schüttdichte 444; Korngröße 444	
9.4.1.2	Nährstoffgehalte	445
	Holz-, Stroh- und Ganzpflanzenaschen 445; Industrie- rest- und Altholzaschen 446	
9.4.1.3	Schwermetallgehalte	446
	Holz-, Stroh- und Ganzpflanzenaschen 446; Industrie- rest- und Altholzaschen 447	

9.4.1.4	Organische Schadstoffe und Gehalte an organischem Kohlenstoff.....	448
	Holz-, Stroh- und Ganzpflanzenaschen 448; Industrie- rest- und Altholzaschen	449
9.4.1.5	pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit	449
9.4.1.6	Gehalte an Si, Al, Fe, Mn, S und Karbonat	450
9.4.1.7	Eluatverhalten.....	451
9.4.2	Verwertung	452
9.4.2.1	Nutzung in der Land- und Forstwirtschaft	453
	Anfall und Aufbereitung 454; Ausbringungstechnik 455; Ausbringungsmengen und sonstige Randbedingungen 456	
9.4.2.2	Nutzung im Straßen- und Forstwegebau.....	458
9.4.2.3	Verwertung im Landschaftsbau	458
9.4.2.4	Industrielle Nutzung	458
9.4.2.5	Deponierung	459
9.4.3	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	459
	Deutschland 459; Österreich 459; Dänemark 460; Schweden 461; Finnland 461,	

10 Direkte thermo-chemische Umwandlung (Verbrennung) 463

10.1 Anforderungen und Besonderheiten..... 463

THOMAS NUSSBAUMER, HANS HARTMANN

Grundlegender Ablauf der Verbrennung 464; Allgemeine konstruktive Anforderungen 464; Unterschiede von hand- und automatisch beschickten Feuerungen 466

10.2 Handbeschickte Feuerungsanlagen..... 468

HANS HARTMANN, THOMAS NUSSBAUMER, HERMANN
HOFBAUER

10.2.1 Feuerungsprinzipien und Bauartenüberblick..... 468
Durchbrand 469; Oberer Abbrand 470; Unterer Abbrand 471

10.2.2 Einzelfeuerstätten..... 473
Offene Kamine 474; Geschlossene Kamine 475; Zimmeröfen 475;
Kaminöfen 476; Speicheröfen 477; Küchenherde 479

10.2.3 Erweiterte Einzelfeuerstätten
 480 || | Zentralheizungsherde 481; Erweiterte Kachelöfen, Kamine oder Kaminöfen 481; Pelletöfen mit Wasserwärmeübertrager 483 | |
10.2.4	Zentralheizungskessel	484
	Funktionsweise 484; Anwendungsbereiche und Varianten 485	
10.2.5	Integration in häusliche Energiesysteme	486
	Lastvariabilität 486; Wärmespeicher 486; Kombination mit Solar- wärme 488; Kombination mit anderen Wärmeerzeugern 490	
10.2.6	Regelung handbeschickter Feuerungsanlagen.....	491

10.3	Automatisch beschickte Feuerungen	492
	HANS HARTMANN, THOMAS NUSSBAUMER, HERMANN HOFBAUER, JÜRGEN GOOD	
10.3.1	Feuerungsprinzipien.....	492
10.3.2	Festbettfeuerungen.....	495
10.3.2.1	Pellet- und Getreidefeuerungen	497
	Abwurfheizung für Pellets mit Schalenbrenner 497; Abwurfheizung für Pellets mit Kipprost 500; Getreide- feuerungen 501	
10.3.2.2	Hackgut- und Rindenfeuerungen	502
	Unterschubfeuerungen 502; Vorschubstreufeuerungen 504; Unterschubfeuerungen mit rotierendem Rost 506; Vorofenfeuerungen (Voröfen) 507; Feuerungen mit Wurfbeschickung 507; Feuerungen mit Rotationsgebläse 508	
10.3.2.3	Halmgutfeuerungen.....	509
	Chargenweise beschickte Ganzballenfeuerungen 510; Zigarrenabbrandfeuerungen 512; Ballenfeuerungen mit Ballenteiler 514; Ballenauflöser- und Schüttgutfeuerun- gen 515	
10.3.3	Wirbelschichtfeuerungen	515
	Stationäre Wirbelschichtfeuerungen 516; Zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen 519;	
10.3.4	Staubfeuerungen	520
	Einblasfeuerungen 520; Staubbrenner für Biomasse in mit fossilen Brennstoffen befeuerten Kraftwerken 521	
10.3.5	Wärmeübertrager	521
	Rauchrohrkessel 523; Wasserrohrkessel 524; Zusatz-Wärmeüber- trager zur Brennwertnutzung 524	
10.3.6	Regelung automatisch beschickter Feuerungsanlagen	526
	Unterdruckregelung 527; Leistungsregelung 528 (Leistungsrege- lung bei Einkesselanlagen mit Speicher 529, Leistungsregelung bei bivalenten Anlagen 529, Leistungsregelung bei monovalenten Mehrkesselanlagen 529); Verbrennungsregelung 529 (Lambda- Regelung 531, Verbrennungstemperatur-Regelung 531, CO/Lambda-Regelung 532, Schichthöhenregelung 532); Kombi- nation von Leistungs- und Verbrennungsregelung 533	
10.4	Abgasreinigung und -kondensation	533
	THOMAS NUSSBAUMER	
10.4.1	Staubabscheidung	534
	Zyklon 535; Gewebefilter, Schütttschichtfilter, Keramikfilter 536; Elektrostatischer Abscheider (Elektrofilter) 538; Wäscher 541	
10.4.2	Stickstoffoxidminderung.....	543
	Selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR) 543; Selektive ka- talytische Reduktion (SCR) 544	
10.4.3	HCl-Minderung.....	546
	Trockensorption 546; Wäscher 547	
10.4.4	Minderung von Dioxinen und Furanen	547

10.4.5	Abgaskondensation	548
	Funktionsprinzip 548; Anwendung 549; Staubabscheidung und Kondensatbehandlung 550	
10.5	Stromerzeugungstechniken.....	551
	MARTIN KALTSCHMITT, JÜRGEN KARL, HARTMUT SPLIETHOFF	
10.5.1	Dampfkraftprozesse	553
10.5.1.1	Wirkungsgrade.....	554
10.5.1.2	Betriebsweisen.....	555
	Kondensationsbetrieb 556; Gegendruckbetrieb 556; Ent- nahme-Kondensations-Betrieb 557	
10.5.1.3	Arbeitsmaschinen.....	558
	Dampfturbinen 559; Dampfmotoren 561 (Dampfkolben- motor 561, Dampfschraubenmotor 563)	
10.5.2	ORC-Prozesse.....	564
10.5.3	Stirlingprozesse.....	567
10.5.4	Direkt gefeuerte Gasmotoren- und Gasturbinenprozesse	571
10.5.4.1	Direkt gefeuerte Gasmotorprozesse	571
10.5.4.2	Direkt gefeuerte Gasturbinenprozesse	572
	Druckaufgeladene direkt gefeuerte Gasturbinenprozesse 572 (Einsatz staubförmiger Brennstoffe 572, Einsatz stückiger Brennstoffe 573); Atmosphärische direkt ge- feuerte Gasturbinenprozesse 573	
10.5.5	Indirekt gefeuerte Gasturbinenprozesse	575
	Indirekt gefeuerte Gasturbinenprozesse mit rekuperativen Wärme- übertragern 575; Indirekt gefeuerte Gasturbinenprozesse mit rege- nerativen Wärmeübertragern 579	
10.6	Mitverbrennung in Kohlekraftwerken	581
	HARTMUT SPLIETHOFF, MARTIN KALTSCHMITT, JOACHIM WERTHER	
10.6.1	Biomasseaufbereitung.....	582
	Aufbereitung für Staubfeuerungen 583; Aufbereitung für Wirbel- schichtfeuerungen 584	
10.6.2	Staubfeuerungen	584
	Brennstoff- und Abgasvolumenstrom 585; Verbrennungsablauf 587; Verschlackung und Verschmutzung 588; Korrosion und Ero- sion 589; Emissionen 589; Abgasreinigung 591 (Entstickungs-An- lage 591, Abgas-Entschwefelungs-Anlage (REA) 592); Aschean- fall und -verwertung 592 (Ascheanfall 592, Ascheverwertung 592)	
10.6.3	Wirbelschichtfeuerungen	594
	Verbrennungsablauf 594; Verschlackung und Verschmutzung 595; Korrosion und Erosion 596; Emissionen 597; Ascheanfall und -verwertung 597	

11 Vergasung	599
11.1 Vergasungstechnik	600
HERMANN HOFBAUER, ALEXANDER VOGEL, MARTIN KALTSCHMITT	
11.1.1 Vergasertypen	601
11.1.1.1 Festbettvergaser	603
Gegenstromvergaser 603 (Funktionsweise 604, Stand der Technik 605); Gleichstromvergaser 606 (Funktions- weise 606, Stand der Technik 607); Doppelfeuervergaser 607 (Funktionsweise 608, Stand der Technik 608); Mehrstufige Verfahren 608 (Funktionsweise 608, Stand der Technik 609)	
11.1.1.2 Wirbelschichtvergaser	609
Stationäre Wirbelschicht 611 (Funktionsweise 611, Stand der Technik 612); Zirkulierende Wirbelschicht 613 (Funktionsweise 613, Stand der Technik 614); Zweibett-Wirbelschicht 614 (Zweibett-Wirbelschicht mit umlaufendem Wärmeträger 614, Zweibett-Wirbel- schichten mit Hochtemperatur-Wärmeübertrager 616)	
11.1.1.3 Flugstromvergaser.....	617
Funktionsweise 617; Stand der Technik 618	
11.1.2 Produktgaseigenschaften.....	618
11.1.2.1 Hauptkomponenten.....	619
Vergasungsmittel 619; Vergaserbauart 620; Temperatur 621; Druck 622; Biomasseart 623	
11.1.2.2 Verunreinigungen	623
Partikel 624; Teere 625; Alkalien 626; Stickstoff-, Schwefel- und Halogen-Verbindungen 626 (Stick- stoff(N)-Verbindungen 626, Schwefel(S)-Verbindungen 627, Halogen(Cl)-Verbindungen 628); Schwermetalle 628	
11.2 Gasreinigungstechnik	628
HERMANN HOFBAUER, ALEXANDER VOGEL, MARTIN KALTSCHMITT	
11.2.1 Anforderungen	630
Nutzung zur Wärmebereitstellung 630; Nutzung in Motoren 630; Nutzung in Gasturbinen 631; Nutzung in Brennstoffzellen 631; Nutzung als Synthesegas 632	
11.2.2 Partikelentfernung.....	633
Fliehkraftabscheider 633; Filternde Abscheider 633 (Gewebefilter 633, Schüttschichtfilter 634, Kerzenfilter 635); Elektrostatische Abscheider (Elektroabscheider) 634; Wäscher 635	
11.2.3 Teerentfernung.....	636
Physikalische Teerentfernung 636 (Wäscher 636, Nasselektroab- scheider 637, Filter mit Filtermedium 637); Katalytische Teerent- fernung 637; Thermische Teerentfernung 638	

11.2.4	Entfernung sonstiger Verunreinigungen.....	639
	Entfernung von Schwefel(S)-Verbindungen 639 (Absorptive Verfahren 639, Adsorptive Verfahren 639); Entfernung von Stickstoff (N)-Verbindungen 639; Entfernung von Alkalien 639; Entfernung von Halogen(Cl)-Verbindungen 640	
11.3	Gasnutzungstechnik.....	640
	HERMANN HOFBAUER, FRANZISKA MÜLLER-LANGER, MARTIN KALTSCHMITT, ALEXANDER VOGEL	
11.3.1	Wärmebereitstellung.....	640
	Nutzungstechnik 640; Anwendungsbeispiele 641 (Nahwärmebereitstellung 641, Prozesswärmebereitstellung 642)	
11.3.2	Stromerzeugung.....	642
11.3.2.1	Stromerzeugung mit externer Verbrennung.....	643
	Nutzungstechnik 643; (Dampfkraftprozess 643, Stirlingmotor 643, Indirekt befeuerte Gasturbine (Heißluftturbine) 643); Anwendungsbeispiel 644	
11.3.2.2	Stromerzeugung mit interner Verbrennung.....	645
	Nutzungstechnik 645 (Gasmotor 645; Gasturbine 646; Brennstoffzelle 648); Anwendungsbeispiele 649 (KWK-Anlage mit Gegenstromvergasung und Gasmotor 649, KWK-Anlage mit Gleichstromvergasung und Gasmotor 650, KWK-Anlage mit Wirbelschichtdampfvergasung und Gasmotor 651, IGCC-Anlage mit Wirbelschicht-Druckvergasung 651)	
11.3.3	Kraftstoffbereitstellung.....	653
	Einstellung des Wasserstoff(H ₂)/Kohlenstoffmonoxid(CO)-Verhältnisses 655; Kohlenstoff(CO ₂)-Entfernung 655; Kohlenwasserstoff-Reformierung 656	
11.3.3.1	Fischer-Tropsch-Synthese.....	656
	Nutzungstechnik 656; Anwendungsbeispiel 660	
11.3.3.2	Methanolsynthese.....	662
	Nutzungstechnik 662; Anwendungsbeispiel 663	
11.3.3.3	SNG-Synthese.....	664
	Nutzungstechnik 664; Anwendungsbeispiel 665	
11.3.3.4	Dimethylether-Synthese.....	666
	Nutzungstechnik 666; Anwendungsbeispiel 667	
11.3.3.5	Hythane und Wasserstoff.....	668
12	Pyrolyse.....	671
12.1	Bereitstellung flüssiger Sekundärenergieträger.....	671
	DIETRICH MEIER	
12.1.1	Flash-Pyrolyse.....	671
12.1.1.1	Reaktoren mit stationärer Wirbelschicht.....	672
12.1.1.2	Reaktoren mit zirkulierender Wirbelschicht.....	675
12.1.1.3	Reaktoren mit ablativer Wirkung.....	675
	Reaktor mit heißer Scheibe 676; Reaktor mit Konus 677	
12.1.1.4	Reaktor mit horizontalem Zylinder.....	678
12.1.1.5	Reaktoren mit Vakuum.....	679

12.1.1.6	Reaktoren mit Doppelschnecke	680
12.1.2	Druckverflüssigung	681
12.1.3	Produkte und deren Nutzung.....	684
	Charakterisierung 684; Aufbereitung 687 (Physikalische Methoden 687, Chemische Methoden 687); Nutzung 688 (Thermische bzw. energetische Nutzung 688, Chemische bzw. stoffliche Nutzung 689)	
12.2	Bereitstellung fester Sekundärenergieträger	690
12.2.1	Verkohlung	691
	JOHANNES WELLING, BERNWARD WOSNITZA	
12.2.1.1	Meilerverfahren	691
	Erdmeiler 691; Gemäuerte Meiler 692; Transportierbare metallische Meiler 693	
12.2.1.2	Indirekt beheizte Retortenverfahren.....	694
	Chargenweise Retortenverkohlung 694; Kontinuierliche Retortenverkohlung 694	
12.2.1.3	Direkt beheizte Retortenverfahren oder Spülgasverfahren	696
	Reichert-Retorte 696; SIFIC-Prozess 697; CISR-Lamblotte-Retorte 698	
12.2.1.4	Sonstige Verfahren	698
	Verkohlung in zwangsbewegten Wanderschichten 698; Wirbelschicht-Verkohlung 698; Flugstaubreaktor 698; Flash-Karbonisierung 699	
12.2.1.5	Produkte.....	699
	Charakterisierung 700; Energetischer Wirkungsgrad 700; Produktion 701; Nutzung 701 (Energetische Nutzung 701, Stoffliche Nutzung 702)	
12.2.2	Torrefizierung	703
	HERMANN HOFBAUER	
12.2.2.1	Technische Umsetzung	703
12.2.2.2	Produkte.....	707
13	Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen	711
13.1	Rohstoffbereitstellung	711
	BERNHARD WIDMANN	
13.2	Pflanzenölgewinnung	712
13.2.1	Pflanzenölgewinnung in Großanlagen	712
	MARTIN KALTSCHMITT, ERNST W. MÜNCH, FRANZISKA MÜLLER-LANGER	
13.2.1.1	Vorbehandlung	714
13.2.1.2	Preßung.....	715
13.2.1.3	Extraktion	716
	Vorbereitung 716; Lösemittel 716; Extraktion 717; Miscella-Destillation 719; Schrot-Entbenzinierung 719	

13.2.1.4	Raffination	720
	Chemische Raffination 721 (Entschleimung 721, Entsäuerung (Neutralisation) 722, Bleichung 723, Desodorierung/Dämpfung 723); Physikalische Raffination 724; Miscella-Raffination 725; Extraktive Raffination mit überkritischen Lösemitteln 725	
13.2.2	Pflanzenölgewinnung in Kleinanlagen.....	725
	EDGAR REMMELE, BERNHARD WIDMANN	
13.2.2.1	Pressen	727
13.2.2.2	Ölreinigung	729
	Sedimentationsverfahren zur Hauptreinigung 730 (Sedimentation im Erdschwerefeld 730, Sedimentation im Zentrifugalfeld 731); Filtrationsverfahren zur Hauptreinigung 731 (Kuchenbildende Filtration 731, Tiefenfiltration 733); Filterapparate zur Endreinigung 735 (Beutelfilter 735, Kerzenfilter 735, Tiefenschichtenfilter 735); Verfahren zur Reduzierung unerwünschter Fettbegleitstoffe 735	
13.3	Weiterverarbeitung von Pflanzenölen	736
	FRANZISKA MÜLLER-LANGER, MARTIN KALTSCHMITT	
13.3.1	Umesterung	736
	Grundlagen 737; Katalysatoren 739; Biodieselaufbereitung 740; Methanolaufbereitung 740; Glycerinaufbereitung 740; Anforderungen an die Rohstoffqualität 741; Verfahrenstechnische Umsetzung 741 (Diskontinuierliche Verfahren 742, Kontinuierliche Verfahren 743)	
13.3.2	Hydrierung	746
	Hydrierung in Mineralölraffinerien 746; Hydrierung in speziellen Anlagen 747	
13.4	Produkte und energetische Nutzung	748
	BERNHARD WIDMANN, KLAUS THUNEKE, EDGAR REMMELE, FRANZISKA MÜLLER-LANGER	
13.4.1	Pflanzenöle und Biodiesel.....	748
13.4.1.1	Chemischer Aufbau.....	748
13.4.1.2	Lagerung	751
13.4.1.3	Kenngößen.....	753
13.4.1.4	Nutzung als Kraftstoff.....	757
	Fettsäuremethylester (FAME, Biodiesel) 757; Hydrierte Pflanzenöle 758; Naturbelassener Pflanzenölkraftstoff 758 (Vor- bzw. Wirbelkammermotoren 759, Motoren mit Direkteinspritzung 759)	
13.4.1.5	Feuerungstechnische Nutzung als Brennstoff	762
13.4.2	Kuppel- und Nebenprodukte	763
13.4.2.1	Stroh	764
13.4.2.2	Presskuchen und Extraktionsschrot.....	764
	Futtermittel 764; Düngemittel 765; Verbrennung 765; Biogasproduktion 766; Weitere Einsatzmöglichkeiten 766	

13.4.2.3 Glycerin 766
 13.4.2.4 Sonstige Kuppelprodukte..... 768

14 Grundlagen der bio-chemischen Umwandlung 769

14.1 Grundlagen der Mikrobiologie..... 769

CHRISTIAN ELEND, GARABED ANTRANIKIAN

14.1.1 Einteilung der Mikroorganismen 769
 Eukaryonten 769; Prokaryonten 770
 14.1.2 Aufbau der bakteriellen Zelle 770
 Nukleinsäuren 771; Proteine 771; Lipide 771; Polysaccharide
 772; Zellwandaufbau 772
 14.1.3 Nährstoffe und Wachstum..... 772
 Energiegewinnung 772; Kohlenstoff 773; Kultivierungsbedingun-
 gen 773

14.2 Stoffwechsel und Energieerzeugung 774

CHRISTIAN ELEND, GARABED ANTRANIKIAN

14.2.1 Möglichkeiten der ATP-Erzeugung 774
 Substrat-Ketten-Phosphorylierung 774; Elektronen-Transport-
 Phosphorylierung 775
 14.2.2 Energiegewinnung durch Atmung..... 776
 14.2.2.1 Aerobe Atmung..... 776
 14.2.2.2 Anaerobe Atmung..... 776
 Atmung mit alternativen Elektronenakzeptoren 777; Me-
 thanogenese 777
 14.2.3 Gärung 778
 14.2.3.1 Alkoholische Gärung 779
 14.2.3.2 Weitere Gärungstypen 780
 Milchsäuregärung 781; Gemischte Säuregärung 781; Es-
 sigsäure/Buttersäure-Gärung 781; Butandiol- und Ace-
 ton/Butanol-Gärung 781; Wasserstoffproduktion wäh-
 rend der Gärung 782

14.3 Grundlagen des enzymatischen Polymerabbaus 782

CHRISTIAN ELEND, GARABED ANTRANIKIAN

14.3.1 Stärke-hydrolysierende Enzyme..... 782
 14.3.2 Cellulasen 783
 14.3.3 Xylanasen..... 784
 14.3.4 Lignin-abbauende Enzyme..... 785
 14.3.5 Pektinasen..... 785
 14.3.6 Proteasen und lipolytische Enzyme..... 786

14.4 Biologische Grenzen für die Verfahrenstechnik..... 786

JAKOB MÜLLER, ANDREAS LIESE, CHRISTIAN ELEND, GARABED
 ANTRANIKIAN

Biogasproduktion 789; Biodieselproduktion 790; Stärkeabbau 790

15 Ethanolerzeugung und -nutzung	793
15.1 Bio-chemische Grundlagen	793
THOMAS SENN, ANTON FRIEDL	
Zuckerabbau durch alkoholische Gärung 793; Stärkeabbau zu Zucker 794 (Enzymatische Stärkeverflüssigung 794, Enzymatische Stärkeverzuckerung 796, Stärkeverflüssigung und -verzuckerung durch Malz 796, Stärkeverflüssigung und -verzuckerung durch Autoamylolyse 797); Lignocelluloseabbau zu Zucker 798 (Enzymatische Hydrolyse 799, Säurekatalysierte Hydrolyse 799)	
15.2 Verfahrensschritte	800
ANTON FRIEDL, THOMAS SENN, ARNE GRÖNGRÖFT	
15.2.1 Rohstoffreinigung und -aufbereitung	800
Zuckerrüben 800; Zuckerrohr 801; Getreide 801 (Mühlen 801, Dispergiermaschinen 802); Kartoffeln 803; Lignocellulosehaltige Rohstoffe 803	
15.2.2 Aufschlussprozesse	803
Drucklose Stärkeaufschlussverfahren 803 (Mahl-Maischprozesse 804, Dispergier-Maischverfahren 805); Stärkeaufschlussverfahren unter Druck 807; Lignocelluloseaufschluss-Verfahren 808 (Enzymatisch katalysierte Hydrolyse 808, Säurekatalysierte Hydrolyse 811)	
15.2.3 Fermentation	813
Hefebereitstellung 814; Konstruktionsmerkmale von Fermentern 814; Absatzweise Fermentation 815; Kontinuierliche Fermentation 817	
15.2.4 Ethanol-Abtrennung, Reinigung und Absolutierung	818
Destillation und Rektifikation 818 (Grundlagen 818, Absatzweise Rektifikation 824, Kontinuierliche Rektifikation 826); Entwässerung und Absolutierung 828 (Adsorptionsverfahren 829, Azeotroprektifikation 830, Membranverfahren 831)	
15.2.5 Schlempebehandlung	832
Entwässerung 832; Eindampfung 833; Trocknung 834; Biogasgewinnung 835	
15.3 Anlagenkonzepte	835
ANTON FRIEDL, THOMAS SENN	
15.3.1 Kleiner und mittlerer Maßstab	835
15.3.2 Großtechnischer Maßstab	836
Zuckerhaltige Rohstoffe 837; Stärkehaltige Rohstoffe 838; Lignocellulosehaltige Rohstoffe 840 (Ethanol-Lignocelluloseprozess mit verdünnter Schwefelsäure 840, Ethanol-Lignocelluloseprozess mit konzentrierter Schwefelsäure (Arkenol-Prozess) 841, Ethanol-Lignocelluloseprozess mit enzymatischer Hydrolyse (Iogen-Prozess) 842, Ethanol-Prozess mit Multi-Feedstock-Verfahren 843)	

15.4	Produkte und energetische Nutzung	844
	THOMAS SENN, ANTON FRIEDL	
15.4.1	Ethanol.....	844
	Kraftstoffrelevante Eigenschaften 844; Einsatzmöglichkeiten als Kraftstoff 845 (Reinkraftstoff 845, Zumischung als Reinkomponente 847, Zumischung nach chemischer Umwandlung 848)	
15.4.2	Schlempe.....	849
	Flüssiges Futtermittel 849; Festes Futtermittel 849; Düngemittel 849; Energiegewinnung 849	
15.4.3	Kohlenstoffdioxid	850
16	Biogaserzeugung und -nutzung.....	851
16.1	Grundlagen.....	851
	FRANK SCHOLWIN, JAN LIEBETRAU, WERNER EDELMANN	
16.1.1	Substratcharakterisierung.....	851
	Temperatur 851; Nährstoffangebot 851; Konzentration organischer Stoffe 852; Zusammensetzung der organischen Fraktion 852; Hemmstoffe 852; Feststoffgehalt 852; Korngrößenverteilung 853	
16.1.2	Grundlagen des anaeroben Abbaus.....	853
16.1.3	Prozesskinetik.....	855
16.1.4	Prozess- und verfahrenstechnische Messgrößen	860
	Prozesstechnische Kenngrößen 860 (Trockenmasse- und CSB-Gehalt 860, Gehalt an suspendierten und anderen Inhaltsstoffen 861, Hemmstoffgehalt 862, Prozesstemperatur 864, pH-Wert 864, Redoxpotenzial 865, Gehalt an niederen Fettsäuren 865, Gehalt an Ammonium 866, Gaszusammensetzung 868); Verfahrenstechnische Kenngrößen 869 (Nutzvolumen Fermenter 869, Spezifische Rührleistung 870, Eigenenergiebedarf 870, Aufenthaltszeit 870, Durchflussrate 871, Raumbelastung 871, Abbauleistung 872, Gasausbeute 874, Biogasproduktivität 874, Massenspezifischer Energieertrag 875)	
16.2	Verfahrenstechnik	875
	FRANK SCHOLWIN, WERNER EDELMANN, JAN LIEBETRAU	
16.2.1	Substrataufbereitung	875
	Aufbereitung flüssiger Substrate 875; Aufbereitung pastöser und fester Substrate 876; Hygienisierung 878	
16.2.2	Fermenterbeschickung	879
	Transport pumpfähiger Substrate 880; Transport stapelbarer Substrate 880	
16.2.3	Gärtechniken.....	880
	Einteilung 880 (Trockenmassegehalt 881, Beschickung 882, Temperatur 882, Durchmischung 882, Rückhalt aktiver Biomasse 883, Prozessauftrennung 883); Typische Gärverfahren 885 (Kontaktprozess 885, Schlammbedreaktoren 885, Wirbelbedreaktoren 886, Anaerobfilter 886, Nassfermentationsverfahren 887, Verfahren mit getrennter Flüssigkeitsvergärung 888, Diskontinuierliche Feststoffvergärung 888); Elemente von Fermentern 889 (Fermenter-	

materialien 890, Durchmischung 890, Beschickung und Austrag 893, Beheizung 893)

16.2.4	Biogasreinigung und -aufbereitung	895
	Gasreinigung 895 (Gastrocknung 895, Entschwefelung 896); Gas- aufbereitung 897 (Kohlenstoffdioxid-Abtrennung 897, Konditio- nierung 900)	
16.2.5	Gasspeicherung	900
	Fermenterexterne Foliengasspeicher 901; Foliengasspeicher im Fermentergasraum 901; Nassgasometer mit Glocke 901; Speicher- tanks und -flaschen 902	
16.2.6	Prozessoptimierung	902
	Prozessüberwachung und -regelung 902; Prozesshilfsstoffe 904	
16.2.7	Anlagenkonzeption	906
	Substrate 906; Logistik 907; Verfahrensauswahl 907; Anlagensi- cherheit 909	

16.3 Produkte und energetische Nutzung 910

FRANK SCHOLWIN, WERNER EDELMANN

16.3.1	Biogas	911
	Gaseigenschaften 911 (Methan (CH ₄) 911, Kohlenstoffdioxid (CO ₂) 912, Wasser (H ₂ O) 912, Schwefelwasserstoff (H ₂ S) 913, Stickstoff und stickstoffhaltige Verbindungen 913, Weitere Spu- renelemente 913); Gasnutzung 914 (Wärmebereitstellung 914, Nutzung in Verbrennungsmotoren 914, Nutzung in Blockheiz- kraftwerken (BHKW) 916, Nutzung als Fahrzeugtreibstoff 917, Einspeisung in Erdgasnetze 917, Weitere Möglichkeiten 918)	
16.3.2	Weitere Gärprodukte	918
	Gärkompost 918; Gülle 919; Düngewert 921; Industrieabwässer und Klärschlämme 921; Presswasser 922	

16.4 Exkurs: Deponiegas..... 923

MARCO RITZKOWSKI, INA KÖRNER

16.4.1	Entstehung	924
16.4.2	Erfassung	927
16.4.3	Behandlung und Nutzung.....	929
	Energetisch nutzbares Deponiegas 930; Energetisch nicht nutzba- res Deponiegas 930	

Literatur..... 933

Sachverzeichnis 991