

Martin Kaltschmitt · Hans Hartmann  
Hermann Hofbauer (Hrsg.)

# Energie aus Biomasse

Grundlagen, Techniken und Verfahren

2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage

 Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Biomasseentstehung</b>	<b>41</b>
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
<b>3</b>	<b>Angebaute Biomasse .....</b>	<b>75</b>
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	
<b>4</b>	<b>Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle.....</b>	<b>135</b>
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	Exkremete 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	
<b>5</b>	<b>Bereitstellungskonzepte.....</b>	<b>171</b>
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 – Motor-manuelle Verfahren 188, Hackgut aus Schwachholz – Teilmecha-nisierte Verfahren 190, Hackgut aus Schwachholz – Vollmecha-nisierte 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 Sprei-bel 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 Ernte-verfahren 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	

<b>6</b>	<b>Ernte</b> .....	<b>217</b>
	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
<b>7</b>	<b>Mechanische Aufbereitung</b> .....	<b>245</b>
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 Bindeapparate 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	Schientransporte	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 <sub>x</sub> 417, Promptes NO <sub>x</sub> 418, NO <sub>x</sub> 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	Aschefraktionen und -anfall, Dichten und Korngrößen.....	442
	Aschefraktionen 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; Vorschubrostfeuerungen 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	

<b>11 Vergasung .....</b>	<b>599</b>
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 <sub>2</sub> )/Kohlenstoffmonoxid(CO)-Verhältnisses 655; Kohlenstoff(CO <sub>2</sub> )-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
<b>13</b>	<b>Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen .....</b>	<b>711</b>
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; Kultivierungsbedingungen 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; Methanogenese 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; Essigsäure/Buttersäure-Gärung 781; Butandiol- und Aceton/Butanol-Gärung 781; Wasserstoffproduktion während 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

<b>15 Ethanolerzeugung und -nutzung .....</b>	<b>793</b>
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
<b>16</b>	<b>Biogaserzeugung und -nutzung.....</b>	<b>851</b>
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; Anlagensich- erheit 909	

16.3 Produkte und energetische Nutzung ..... 910

FRANK SCHOLWIN, WERNER EDELMANN

16.3.1	Biogas .....	911
	Gaseigenschaften 911 (Methan (CH <sub>4</sub> ) 911, Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) 912, Wasser (H <sub>2</sub> O) 912, Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> 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