

Inhaltsübersicht

1 Einleitung und Zielsetzung

- 1.1 Biomasse als nachwachsender Energieträger
- 1.2 Biomasse im Energiesystem
- 1.3 Aufbau und Abgrenzungen

2 Biomasseentstehung

- 2.1 Aufbau und Zusammensetzung
- 2.2 Primärproduktion
- 2.3 Standortfaktoren
- 2.4 Acker- und pflanzenbauliche Grundlagen
- 2.5 Zeitliche und räumliche Angebotsunterschiede

3 Angebaute Biomasse

- 3.1 Forstwirtschaftlich produzierte Lignocellulosepflanzen
- 3.2 Landwirtschaftlich produzierte Lignocellulosepflanzen
- 3.3 Ölpflanzen
- 3.4 Zucker- und Stärkepflanzen

4 Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle

- 4.1 Holzartige Biomasse
- 4.2 Halmgutartige Biomasse
- 4.3 Sonstige Biomasse

5 Bereitstellungskonzepte

- 5.1 Randbedingungen und Anforderungen
- 5.2 Bereitstellungsketten für Holzbrennstoffe
- 5.3 Bereitstellungsketten für Halmgutbrennstoffe
- 5.4 Bereitstellungsketten für Biogassubstrate
- 5.5 Bereitstellungsketten für Ölsaaten
- 5.6 Bereitstellungsketten für zucker- und stärkehaltige Stoffe

6 Ernte

- 6.1 Holzartige Biomasse
- 6.2 Halmgutartige Biomasse
- 6.3 Ölhaltige Pflanzen
- 6.4 Zucker- und stärkehaltige Pflanzen

7 Mechanische Aufbereitung

- 7.1 Zerkleinern
- 7.2 Sieben und Sortieren
- 7.3 Pressen

8 Transport, Lagerung, Konservierung und Trocknung

- 8.1 Transport
- 8.2 Lagerung

X Inhaltsübersicht

- 8.3 Feuchtkonservierung (Silierung)
- 8.4 Trocknung
- 9 Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe**
 - 9.1 Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften
 - 9.2 Thermo-chemische Umwandlungsprozesse
 - 9.3 Schadstoffbildungsmechanismen
 - 9.4 Feste Konversionsrückstände und deren Verwertung
- 10 Direkte thermo-chemische Umwandlung (Verbrennung)**
 - 10.1 Anforderungen und Besonderheiten
 - 10.2 Handbeschickte Feuerungsanlagen
 - 10.3 Automatisch beschickte Feuerungen
 - 10.4 Abgasreinigung und -kondensation
 - 10.5 Stromerzeugungstechniken
 - 10.6 Mitverbrennung in Kohlekraftwerken
- 11 Vergasung**
 - 11.1 Vergasungstechnik
 - 11.2 Gasreinigungstechnik
 - 11.3 Gasnutzungstechnik
- 12 Pyrolyse**
 - 12.1 Bereitstellung flüssiger Sekundärenergieträger
 - 12.2 Bereitstellung fester Sekundärenergieträger
- 13 Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen**
 - 13.1 Rohstoffbereitstellung
 - 13.2 Pflanzenölgewinnung
 - 13.3 Weiterverarbeitung von Pflanzenölen
 - 13.4 Produkte und energetische Nutzung
- 14 Grundlagen der bio-chemischen Umwandlung**
 - 14.1 Grundlagen der Mikrobiologie
 - 14.2 Stoffwechsel und Energieerzeugung
 - 14.3 Grundlagen des enzymatischen Polymerabbaus
 - 14.4 Biologische Grenzen für die Verfahrenstechnik
- 15 Ethanolerzeugung und -nutzung**
 - 15.1 Bio-chemische Grundlagen
 - 15.2 Verfahrensschritte
 - 15.3 Anlagenkonzepte
 - 15.4 Produkte und energetische Nutzung
- 16 Biogaserzeugung und -nutzung**
 - 16.1 Grundlagen
 - 16.2 Verfahrenstechnik
 - 16.3 Produkte und energetische Nutzung
 - 16.4 Exkurs: Deponiegas

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 Umwandelung 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; Humusreproduktion 60 | |
| 2.4 | Acker- und pflanzenbauliche Grundlagen | 61 |
| | ARMIN VETTER | |
| 2.4.1 | Anbausysteme und Fruchtfolgegestaltung..... | 61 |
| | Grünland-Anbausysteme 62; Ackerbau-Anbausysteme 63; Agroforstsysteme 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; Be- regnung 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, Ertragspo- tenziale 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 | Misanthus | 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 As- pekte 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, Rohrschwingel 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, Triccale 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 | |

XIV Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| 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; Baum- schnitt aus Obstplantagen, Streuobstwiesen und Rebflächen 139 (Obstplantagen 140, Streuobstwiesen 140, Rebflächen 141); Schwemmholtz 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 Exkremente aus der Nutztierhaltung | 158 |
| 4.3.2 Siedlungsbabfälle..... | 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 Randbedingungen 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, Absätzige 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 |
| | Wurzelstücke und Stubben 197; Rinde 198; Schwarten und Sprei- ßel 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..... | 203 |
| 5.3.1.2 | Getreidepflanzen-Ballen | 203 |
| 5.3.1.3 | Miscanthus-Ballen | 205 |
| 5.3.1.4 | Halmgut-Ballen von Grünlandflächen | 205 |
| 5.3.2 | Häckselgut | 206 |
| 5.3.2.1 | Miscanthus-Häcksel | 207 |
| | Absätzige Ernteverfahren 207; Kontinuierliche Ernte- verfahren 208 | |
| 5.3.2.2 | Straßengrasschnitt..... | 208 |
| 5.3.3 | Sonstige Halmgutketten | 209 |
| 5.3.3.1 | Pellets und Briketts | 209 |
| 5.3.3.2 | Feuchtgut | 211 |
| 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-Spaltnmaschinen 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 | Ballenaufloser | 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 Zahnräderpressen 273); Kühlung und Sieben 274; Auffüllen, Lagern und Transportieren 275; Qualitätsanforderungen 275 | |
| 8 | Transport, Lagerung, Konservierung und Trocknung | 277 |
| | HANS HARTMANN | |
| 8.1 | Transport | 277 |
| 8.1.1 | Straßenverkehr | 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- | |

XVIII Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| 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; Dreh-schnecken, 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; Reak- tions- kinetik 387; Anwendungen 388 | |
| 9.2.2.3 | Vergasung | 389 |
| | Vergasungsreaktionen 390; Reaktionskinetik 391; An- wendung 394 (Wärmeaushalt 394, Vergasungsreaktio- nen 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 | Aschefraktionen und -anfall, Dichten und Korngrößen | 442 |
| | Aschefraktionen und -anfall 442; Dichte 443; Schütt-dichte 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 An- forderungen 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 Wasserwärmevertrager 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 |

XXII Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| 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 |
| Abwurffeuерung für Pellets mit Schalenbrenner 497; Abwurffeuерung für Pellets mit Kiprost 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; Ballenauf löser- 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, Schüttsschichtfilter, 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; Entnahme-Kondensations-Betrieb 557 | |
| 10.5.1.3 | Arbeitsmaschinen..... | 558 |
| | Dampfturbinen 559; Dampfmotoren 561 (Dampfkolbenmotor 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 gefeuerte Gasturbinenprozesse 573 | |
| 10.5.5 | Indirekt gefeuerte Gasturbinenprozesse | 575 |
| | Indirekt gefeuerte Gasturbinenprozesse mit rekuperativen Wärmeübertragern 575; Indirekt gefeuerte Gasturbinenprozesse mit regenerativen 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 Wirbelschichtfeuerungen 584 | |
| 10.6.2 | Staubfeuerungen | 584 |
| | Brennstoff- und Abgasvolumenstrom 585; Verbrennungsablauf 587; Verschlackung und Verschmutzung 588; Korrosion und Erosion 589; Emissionen 589; Abgasreinigung 591 (Entstickungs-Anlage 591, Abgas-Entschwefelungs-Anlage (REA) 592); Ascheinfall und -verwertung 592 (Ascheinfall 592, Ascheverwertung 592) | |
| 10.6.3 | Wirbelschichtfeuerungen | 594 |
| | Verbrennungsablauf 594; Verschlackung und Verschmutzung 595; Korrosion und Erosion 596; Emissionen 597; Ascheinfall und -verwertung 597 | |

XXIV Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| 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 (Funktionsweise 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-Wirbelschichten 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 (Stickstoff(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, Schüttsschichtfilter 634, Kerzenfilter 635); Elektrostatische Abscheider (Elektroabscheider) 634; Wäscher 635 | |
| 11.2.3 Teerentfernung | 636 |
| Physikalische Teerentfernung 636 (Wäscher 636, Nasselektroabscheider 637, Filter mit Filtermedium 637); Katalytische Teerentfernung 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 |

XXVI Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| 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; Gemauerte 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-Lamotte-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, Ent-säuerung (Neutralisation) 722, Bleichung 723, Desodo-rierung/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 (Sedi-mentation im Erdschwerefeld 730, Sedimentation im Zentrifugalfeld 731); Filtrationsverfahren zur Haupt-reinigung 731 (Kuchenbildende Filtration 731, Tiefen-filtration 733); Filterapparate zur Endreinigung 735 (Beutelfilter 735, Kerzenfilter 735, Tiefenschichtenfilter 735); Verfahren zur Reduzierung unerwünschter Fettbe-gleistoffe 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; Anforde-rungen an die Rohstoffqualität 741; Verfahrenstechnische Umset-zung 741 (Diskontinuierliche Verfahren 742, Kontinuierliche Ver-fahren 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 Kenngrößen..... | 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 | |

XXVIII Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| 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; Butanol- 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 | |

| | |
|--|------------|
| 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 Stärkever- zuckerung 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; Lingnocellulosehaltige Rohstoffe 803 | |
| 15.2.2 Aufschlussprozesse | 803 |
| Drucklose Stärkeaufschlussverfahren 803 (Mahl-Maischprozesse 804, Dispergier-Maischverfahren 805); Stärkeaufschlussverfahren unter Druck 807; Lignocelluloseaufschluss-Verfahren 808 (Enzy- matisch katalysierte Hydrolyse 808, Säurekatalysierte Hydrolyse 811) | |
| 15.2.3 Fermentation | 813 |
| Hefebereitstellung 814; Konstruktionsmerkmale von Fermentern 814; Absatzweise Fermentation 815; Kontinuierliche Fermentati- on 817 | |
| 15.2.4 Ethanol-Abtrennung, Reinigung und Absolutierung | 818 |
| Destillation und Rektifikation 818 (Grundlagen 818, Absatzweise Rektifikation 824, Kontinuierliche Rektifikation 826); Entwässe- rung und Absolutierung 828 (Adsorptionsverfahren 829, Azeo- troprektifikation 830, Membranverfahren 831) | |
| 15.2.5 Schlempebehandlung | 832 |
| Entwässerung 832; Eindampfung 833; Trocknung 834; Biogasge- winnung 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; Ligno- cellulosehaltige Rohstoffe 840 (Ethanol-Lignocelluloseprozess mit verdünnter Schwefelsäure 840, Ethanol-Lignocelluloseprozess mit konzentrierter Schwefelsäure (Arkenol-Prozess) 841, Ethanol- Lignocelluloseprozess mit enzymatischer Hydrolyse (Iogen-Pro- zess) 842, Ethanol-Prozess mit Multi-Feedstock-Verfahren 843) | |

XXX Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| 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-Ge- halt 860, Gehalt an suspendierten und anderen Inhaltsstoffen 861, Hemmstoffgehalt 862, Prozesstemperatur 864, pH-Wert 864, Re- doxpotenzial 865, Gehalt an niederen Fettsäuren 865, Gehalt an Ammonium 866, Gaszusammensetzung 868); Verfahrenstechni- sche Kenngrößen 869 (Nutzvolumen Fermenter 869, Spezifische Rührleistung 870, Eigenenergiebedarf 870, Aufenthaltszeit 870, Durchflussrate 871, Raumbelastung 871, Abbauleistung 872, Gas- ausbeute 874, Biogasproduktivität 874, Massenspezifischer Ener- gieertrag 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 Sub- strate 880 | |
| 16.2.3 Gärtechniken | 880 |
| Einteilung 880 (Trockenmassegehalt 881, Beschickung 882, Tem- peratur 882, Durchmischung 882, Rückhalt aktiver Biomasse 883, Prozessauf trennung 883); Typische Gärverfahren 885 (Kontakt- prozess 885, Schlammbettreaktoren 885, Wirbelbettreaktoren 886, Anaerobfilter 886, Nassfermentationsverfahren 887, Verfahren mit getrennter Flüssigkeitsvergärung 888, Diskontinuierliche Fest- stoffvergärung 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_2O) 912, Schwefelwasserstoff (H_2S) 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 |