

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	1
1.1	Biomasse als nachwachsender Energieträger	1
	Martin Kaltschmitt	
1.1.1	Definition „Biomasse“	3
1.1.2	Aufbau typischer Bereitstellungsketten	4
1.1.3	Wandlungsmöglichkeiten in End- bzw. Nutzenergie	5
1.2	Biomasse im Energiesystem	9
	Lisa Thormann, Diana Pfeiffer, Karina Bloche-Daub, Daniela Thrän und Martin Kaltschmitt	
1.2.1	Energie- und Potenzialbegriffe	9
1.2.2	Bioenergie im globalen Energiesystem	14
	1.2.2.1 Stand 2010/2020	15
	1.2.2.2 Stand 2025/2035	28
1.2.3	Bioenergie im europäischen Energiesystem	43
	1.2.3.1 Stand 2010/2020	44
	1.2.3.2 Stand 2025/2035	53
1.3	Aufbau und Abgrenzungen	64
	Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann und Hermann Hofbauer	
1.3.1	Gebiet „Biomasseaufkommen“	66
1.3.2	Gebiet „Biomassebereitstellung“	68
1.3.3	Gebiet „Thermo-chemische Umwandlung“	69
1.3.4	Gebiet „Physikalisch-chemische Umwandlung“	71
1.3.5	Gebiet „Biochemische Umwandlung“	71
	Literatur	72
<b>2</b>	<b>Biomasseentstehung</b>	77
2.1	Primärproduzenten	78
	Christian Wilhelm	
2.1.1	Aquatische Primärproduzenten	79
2.1.2	Terrestrische Primärproduzenten	80

2.2	Höhere Pflanzen . . . . .	81
	Christian Wilhelm	
2.2.1	Funktionselemente . . . . .	81
2.2.2	Pflanzenaufbau . . . . .	82
2.2.3	Meristeme und Seneszenz . . . . .	88
2.3	Biomasseaufbau und -zusammensetzung . . . . .	88
	Christian Wilhelm	
2.3.1	Elementare Zusammensetzung . . . . .	88
2.3.2	Biochemische Zusammensetzung . . . . .	92
2.4	Primärproduktion . . . . .	95
2.4.1	Photosynthese . . . . .	96
	Christian Wilhelm	
2.4.2	Atmung . . . . .	104
	Christian Wilhelm	
2.4.3	Vom Zucker zur Biomasse . . . . .	105
	Christian Wilhelm	
2.4.4	Wirkungsgrad . . . . .	108
	Christian Wilhelm	
2.4.5	Natürliche Standortfaktoren . . . . .	112
	Christian Wilhelm und Iris Lewandowski	
	Literatur . . . . .	122
<b>3</b>	<b>Forstwirtschaftlich produzierte Biomasse . . . . .</b>	<b>125</b>
	Michael Köhl und Daniel Plugge	
3.1	Forstwirtschaftliche Grundlagen . . . . .	125
3.1.1	Grundlagen und Grundbegriffe . . . . .	125
3.1.2	Holzbildung und anatomischer Holzaufbau . . . . .	129
3.1.3	Holzeigenschaften . . . . .	134
3.1.4	Wirtschaftlich bedeutende Holzsortimente . . . . .	137
3.2	Waldbewirtschaftung und Holzproduktion . . . . .	143
3.2.1	Waldstruktur und -aufbau . . . . .	143
3.2.2	Waldbau . . . . .	145
3.2.3	Waldwachstum . . . . .	149
3.3	Baumarten . . . . .	153
3.3.1	Standortansprüche . . . . .	153
3.3.2	Produktivität . . . . .	154
3.3.3	Darstellung ausgewählter Baumarten . . . . .	154
3.3.4	Vorräte, Zuwachs und Nutzung . . . . .	162
	Literatur . . . . .	164

<b>4</b>	<b>Landwirtschaftlich produzierte Biomasse</b> . . . . .	167
	Iris Lewandowski	
4.1	Acker- und pflanzenbauliche Grundlagen . . . . .	168
4.1.1	Anbausysteme und Fruchtfolgegestaltung . . . . .	168
4.1.2	Einflussfaktoren im Produktionssystem . . . . .	174
4.1.3	Zeitliche und räumliche Angebotsunterschiede . . . . .	179
4.2	Landwirtschaftlich produzierte Lignozellulosepflanzen . . . . .	183
4.2.1	Schnellwachsende Baumarten . . . . .	184
4.2.2	Miscanthus . . . . .	188
4.2.3	Rutenhirse . . . . .	193
4.2.4	Rohrglanzgras . . . . .	196
4.2.5	Szarvasigras . . . . .	197
4.2.6	Futtergräser . . . . .	200
4.2.7	Getreideganzpflanzen . . . . .	204
4.3	Ölhaltige Pflanzen . . . . .	211
4.3.1	Raps . . . . .	211
4.3.2	Sonnenblume . . . . .	215
4.3.3	Leindotter . . . . .	218
4.4	Zuckerhaltige Pflanzen . . . . .	220
4.4.1	Zuckerrübe . . . . .	220
4.4.2	Zuckerhirse . . . . .	224
4.4.3	Durchwachsene Silphie . . . . .	227
4.5	Stärkehaltige Pflanzen . . . . .	229
4.5.1	Kartoffel . . . . .	229
4.5.2	Topinambur . . . . .	232
4.5.3	Getreide . . . . .	236
4.5.4	Mais . . . . .	239
	Literatur . . . . .	244
<b>5</b>	<b>Aquatische Biomasse</b> . . . . .	249
5.1	Biologische Grundlagen . . . . .	250
	Christian Wilhelm	
5.1.1	Wichtige Organismen . . . . .	250
5.1.2	Physiologische Eigenschaften . . . . .	252
5.2	Verfahrenstechnische Grundlagen . . . . .	254
	Clemens Posten	
5.2.1	Biologische Randbedingungen . . . . .	254
5.2.2	Allgemeine Konstruktionsmerkmale . . . . .	258
5.2.3	Messbare Leistungskriterien . . . . .	261
5.3	Kultivierung in offenen Seen und Becken . . . . .	263
	Clemens Posten	

5.4	Produktion in geschlossenen Systemen . . . . .	265
	Clemens Posten	
5.4.1	Plattenreaktoren (Flate Plate Reactors) . . . . .	266
5.4.2	Rohrreaktoren (Tubular Reactors) . . . . .	268
5.5	Ernte und Weiterverarbeitung . . . . .	270
	Clemens Posten	
	Literatur . . . . .	271
<b>6</b>	<b>Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle . . . . .</b>	<b>273</b>
	Daniela Thrän, Oliver Arendt, Helmut Adwiraah und Martin Kaltschmitt	
6.1	Holzartige Biomasse . . . . .	275
6.1.1	Landschaftspflegeholz . . . . .	276
6.1.2	Industrierestholz . . . . .	281
6.1.3	Altholz . . . . .	284
6.2	Halmgut- und krautartige Biomasse . . . . .	290
6.2.1	Stroh . . . . .	290
6.2.2	Weitere Erntereste aus der Landwirtschaft . . . . .	296
6.2.3	Halmgüter aus der Landschaftspflege . . . . .	297
6.3	Sonstige Biomassen . . . . .	301
6.3.1	Exkrememente aus der Nutztierhaltung . . . . .	301
6.3.2	Siedlungsabfälle . . . . .	303
6.3.3	Produktionsspezifische Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle	308
6.3.4	Organisch belastete Abwässer . . . . .	315
	Literatur . . . . .	319
<b>7</b>	<b>Bereitstellungskonzepte . . . . .</b>	<b>325</b>
7.1	Randbedingungen und Anforderungen . . . . .	327
	Daniela Thrän, Ronny Wirkner und Martin Kaltschmitt	
7.2	Bereitstellungsketten für Holzbrennstoffe . . . . .	341
	Hans Hartmann und Martin Kaltschmitt	
7.2.1	Stückholz (Brennholz) . . . . .	342
7.2.2	Holzhackgut . . . . .	345
7.2.3	Restholz-Ballen und Holzbündel . . . . .	357
7.2.4	Sonstige Holzbrennstoffe . . . . .	358
7.3	Bereitstellungsketten für Halmgutbrennstoffe . . . . .	360
	Hans Hartmann und Martin Kaltschmitt	
7.3.1	Ballen . . . . .	362
7.3.1.1	Stroh-Ballen . . . . .	364
7.3.1.2	Ballen aus Hochgräsern und Stauden . . . . .	365
7.3.1.3	Halmgut-Ballen von Grünlandflächen . . . . .	365
7.3.2	Häckselgut . . . . .	367
7.3.2.1	Häckselgut von Hochgräsern und Stauden . . . . .	367

---

7.3.2.2	Grünflächen-Grasschnitt	369
7.3.3	Sonstige Halmgutketten	369
7.3.3.1	Pellets und Briketts	370
7.3.3.2	Feuchtgut	371
7.4	Bereitstellungsketten für Biogassubstrate	373
	Hans Hartmann und Martin Kaltschmitt	
7.4.1	Silagen	373
7.4.2	Weitere Biogassubstrate	375
7.5	Bereitstellungsketten für Ölsaaten	375
	Hans Hartmann	
7.6	Bereitstellungsketten für zucker- und stärkehaltige Stoffe	376
	Hans Hartmann	
	Literatur	379
<b>8</b>	<b>Ernte</b>	<b>383</b>
	Hans Hartmann	
8.1	Holzartige Biomasse	383
8.1.1	Holz aus dem Wald	384
8.1.1.1	Manuelles Fällen und Aufarbeiten	384
8.1.1.2	Teil- und vollmechanisierte Verfahren	390
8.1.1.3	Rücken und Vorliefern	392
8.1.2	Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP)	393
8.1.3	Holz aus der Landschaftspflege	399
8.2	Halmgutartige Biomasse	400
8.2.1	Mähgut	400
8.2.2	Häckselgut	402
8.2.3	Ballen	404
8.2.4	Pellets	408
8.3	Ölhaltige Pflanzen	410
8.3.1	Raps	410
8.3.2	Sonnenblumen	410
8.4	Zucker- und stärkehaltige Pflanzen	411
8.4.1	Getreidekörner	411
8.4.2	Körnermais	412
8.4.3	Zuckerrüben	413
8.4.4	Zuckerhirse	414
8.4.5	Kartoffeln und Topinambur	414
	Literatur	415

<b>9</b>	<b>Mechanische Aufbereitung</b> . . . . .	417
9.1	Zerkleinerung . . . . .	418
	Hans Hartmann	
9.1.1	Grundlagen und Prinzipien . . . . .	418
9.1.2	Scheitholzbereitung . . . . .	421
	9.1.2.1 Sägen . . . . .	421
	9.1.2.2 Spalten . . . . .	423
	9.1.2.3 Stapel- und Umschlagshilfen . . . . .	429
9.1.3	Hackgut- und Schreddergutbereitung . . . . .	431
	9.1.3.1 Hacker . . . . .	431
	9.1.3.2 Schredder . . . . .	439
	9.1.3.3 Zerspaner . . . . .	440
9.1.4	Mahlzerkleinerung . . . . .	441
9.1.5	Ballenauflöser . . . . .	443
9.2	Klassierung . . . . .	445
	Hans Hartmann	
9.2.1	Grundlagen . . . . .	446
9.2.2	Siebverfahren . . . . .	447
9.2.3	Metallabscheider . . . . .	450
9.2.4	Windsichter . . . . .	452
9.3	Pressung . . . . .	453
9.3.1	Grundlagen der Agglomeration . . . . .	454
	Martin Kaltschmitt und Hans Hartmann	
9.3.2	Pelletierung . . . . .	464
	Martin Englisch, Hans Hartmann und Martin Kaltschmitt	
	9.3.2.1 Pelletiertechnik . . . . .	464
	9.3.2.2 Verfahrenstechnische Einbindung (Gesamtanlage) . . .	471
9.3.3	Brikettierung . . . . .	481
	Hans Hartmann	
	9.3.3.1 Brikettiertechnik . . . . .	482
	9.3.3.2 Verfahrenstechnische Einbindung (Gesamtanlage) . . .	486
	Literatur . . . . .	487
<b>10</b>	<b>Transport, Trocknung, Konservierung und Lagerung</b> . . . . .	493
10.1	Transport . . . . .	493
	Hans Hartmann und Martin Kaltschmitt	
10.1.1	Straßentransporte . . . . .	494
	10.1.1.1 Land- und forstwirtschaftliche Transporte . . . . .	495
	10.1.1.2 Lkw-Transporte . . . . .	498
10.1.2	Schienentransporte . . . . .	501
10.1.3	Schiffstransporte . . . . .	503

---

10.2	Trocknung biogener Festbrennstoffe . . . . .	505
	Hans Hartmann und Jörg B. Ressel	
10.2.1	Grundlagen . . . . .	505
10.2.2	Natürliche Trocknung . . . . .	515
10.2.3	Technische Trocknung . . . . .	518
10.2.4	Trocknungseinrichtungen . . . . .	523
	10.2.4.1 Ventilatoren und Gebläse . . . . .	523
	10.2.4.2 Trocknersysteme ohne Gutförderung . . . . .	525
	10.2.4.3 Trocknersysteme mit Gutförderung . . . . .	527
10.3	Lagerung biogener Festbrennstoffe . . . . .	533
	Hans Hartmann	
10.3.1	Biologische Vorgänge . . . . .	534
10.3.2	Lagerungsrisiken . . . . .	537
10.3.3	Lagerungstechniken . . . . .	549
	10.3.3.1 Bodenlagerung . . . . .	549
	10.3.3.2 Hallen (Flachlager) . . . . .	551
	10.3.3.3 Behälter und Silos . . . . .	553
	10.3.3.4 Lagerräume . . . . .	555
10.3.4	Lagerbeschickung und -entleerung . . . . .	557
10.4	Lagerung und Konservierung von Biogassubstraten (Silage) . . . . .	565
	Hans Hartmann, Christiane Dieckmann und Martin Kaltschmitt	
10.4.1	Grundlagen und Voraussetzungen . . . . .	566
10.4.2	Silagetechniken . . . . .	571
10.4.3	Anwendungen . . . . .	573
	Literatur . . . . .	574
<b>11</b>	<b>Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung</b>	
	<b>biogener Festbrennstoffe . . . . .</b>	<b>579</b>
11.1	Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften . . . . .	580
	Hans Hartmann	
11.1.1	Chemisch-stoffliche Brennstoffeigenschaften . . . . .	585
	11.1.1.1 Hauptelemente . . . . .	586
	11.1.1.2 Nebenelemente . . . . .	590
	11.1.1.3 Spurenelemente . . . . .	599
	11.1.1.4 Brennstoffindizes . . . . .	603
11.1.2	Brennstofftechnische Eigenschaften . . . . .	607
	11.1.2.1 Heizwert und Brennwert . . . . .	607
	11.1.2.2 Flüchtige Bestandteile . . . . .	613
	11.1.2.3 Wassergehalt . . . . .	613
	11.1.2.4 Aschegehalt . . . . .	616
	11.1.2.5 Ascheerweichungsverhalten . . . . .	617
11.1.3	Physikalisch-mechanische Eigenschaften . . . . .	619

11.1.3.1	Form und Stückigkeit . . . . .	620
11.1.3.2	Korngrößenverteilung . . . . .	622
11.1.3.3	Feingutanteil . . . . .	624
11.1.3.4	Korngrößenverteilung von Pellet-Ausgangsmaterial . . . . .	625
11.1.3.5	Abriebfestigkeit . . . . .	625
11.1.3.6	Fließeigenschaften und Brückenbildungsneigung . . . . .	626
11.1.3.7	Lagerdichte . . . . .	629
11.1.3.8	Rohdichte . . . . .	634
11.1.3.9	Energiedichte . . . . .	636
11.1.3.10	Brennstoffmengenabschätzung . . . . .	636
11.1.4	Genormte Brennstoffanforderungen . . . . .	640
11.2	Thermo-chemische Umwandlungsprozesse . . . . .	646
	Veronika Wilk, Hermann Hofbauer und Martin Kaltschmitt	
11.2.1	Begriffsdefinitionen . . . . .	650
11.2.2	Phase „Aufheizung“ . . . . .	653
11.2.2.1	Aufheizung in Gasatmosphäre . . . . .	653
11.2.2.2	Aufheizung in hydrothormaler Atmosphäre . . . . .	656
11.2.3	Phase „Pyrolytische Zersetzung“ . . . . .	657
11.2.3.1	Pyrolytische Zersetzung in Gasatmosphäre . . . . .	657
11.2.3.2	(Pyrolytische) Zersetzung in hydrothormaler Atmosphäre . . . . .	665
11.2.4	Phase „Vergasung“ . . . . .	667
11.2.4.1	Vergasung in Gasatmosphäre . . . . .	667
11.2.4.2	Vergasung in hydrothormaler Atmosphäre . . . . .	679
11.2.5	Phase „Oxidation“ . . . . .	681
11.3	Einordnung der thermo-chemischen Verfahren . . . . .	684
	Ulf Neuling, Martin Kaltschmitt und Hermann Hofbauer	
11.3.1	Begriffsdefinitionen . . . . .	684
11.3.2	Prozesscharakterisierung . . . . .	688
11.3.3	Prozessvergleich . . . . .	692
11.4	Stoffe aus der thermo-chemischen Umwandlung . . . . .	697
11.4.1	Unterteilung und Definitionen . . . . .	698
	Isabel Höfer, Theresa Hülsmann, Martin Kaltschmitt und Volker Lenz	
11.4.2	Bildungsmechanismen und deren Beeinflussung . . . . .	704
11.4.2.1	Stoffe aus vollständiger Verbrennung der Hauptbrennstoffbestandteile . . . . .	705
	Martin Kaltschmitt, Volker Lenz und Günter Baumbach	
11.4.2.2	Stickstoffoxide . . . . .	705
	Thomas Nussbaumer und Franz Winter	



---

11.4.2.3	Emissionen aus Schwefel und Chlor . . . . .	716
	Franz Winter, Volker Lenz und Günter Baumbach	
11.4.2.4	Mineralien und Salze . . . . .	721
	Isabel Höfer, Theresa Hülsmann, Martin Kaltschmitt und Volker Lenz	
11.4.2.5	Stoffe aus unvollständiger Verbrennung der Hauptbrennstoffbestandteile . . . . .	732
	Günter Baumbach, Franz Winter, Volker Lenz, Isabel Höfer, Martin Kaltschmitt und Thomas Nussbaumer	
11.4.3	Stoffaustrag über den Gaspfad, Wirkung und Beeinflussung . . .	756
11.4.3.1	Austragspfade . . . . .	756
	Isabel Höfer, Theresa Hülsmann, Volker Lenz und Martin Kaltschmitt	
11.4.3.2	Beeinflussung . . . . .	764
	Volker Lenz, Günter Baumbach und Martin Kaltschmitt	
11.4.3.3	Wirkung der stofflichen Reaktionsprodukte . . . . .	767
	Volker Lenz, Anna-Lena Schulze, Günter Baumbach und Martin Kaltschmitt	
11.4.4	Feste Verbrennungsrückstände und deren Verwertung . . . . .	778
11.4.4.1	Eigenschaften . . . . .	778
	Ingwald Oberberger	
11.4.4.2	Verwertung . . . . .	788
	Ingwald Oberberger	
11.4.4.3	Rechtliche Rahmenbedingungen . . . . .	795
	Isabel Höfer, Theresa Hülsmann und Martin Kaltschmitt	
	Literatur . . . . .	797
<b>12</b>	<b>Direkte thermo-chemische Umwandlung (Verbrennung)</b> . . . . .	<b>815</b>
12.1	Grundlagen . . . . .	816
12.1.1	Grundlegender Ablauf der Verbrennung . . . . .	816
	Hermann Hofbauer	
12.1.2	Grundlagen der Kinetik . . . . .	817
	Frerich Keil	
12.1.3	Konstruktive Anforderungen . . . . .	825
	Hermann Hofbauer	
12.1.4	Verbrennungsrechnung und adiabate Verbrennungstemperatur .	830
	Hermann Hofbauer	
12.1.5	Unterschiede von hand- und automatisch beschickten Feuerungen . . . . .	838
	Hans Hartmann und Hermann Hofbauer	

---

12.2	Handbeschickte Feuerungsanlagen . . . . .	840
12.2.1	Feuerungsprinzipien . . . . . Hans Hartmann und Hermann Hofbauer	842
12.2.2	Einzelraumfeuerstätten . . . . . Hans Hartmann und Hermann Hofbauer	846
12.2.3	Erweiterte Einzelraumfeuerstätten . . . . . Hans Hartmann und Hermann Hofbauer	857
12.2.4	Handbeschickte Zentralheizungskessel . . . . . Hans Hartmann und Hermann Hofbauer	861
12.2.5	Integration in häusliche Energiesysteme . . . . . Hans Hartmann	864
12.2.6	Regelung handbeschickter Feuerungsanlagen . . . . . Markus Gölles	870
12.3	Automatisch beschickte Feuerungen . . . . .	875
12.3.1	Feuerungsprinzipien . . . . . Hans Hartmann, Hermann Hofbauer und Thomas Nussbaumer	876
12.3.2	Festbettfeuerungen . . . . . Hans Hartmann und Hermann Hofbauer	879
	12.3.2.1 Pellet- und Körnerfeuerungen . . . . .	882
	12.3.2.2 Hackgut- und Rindenfeuerungen . . . . .	887
	12.3.2.3 Halmgutfeuerungen . . . . .	896
	12.3.2.4 Sicherheitstechnische Ausstattungen . . . . .	903
12.3.3	Wirbelschichtfeuerungen . . . . . Hermann Hofbauer und Hans Hartmann	905
12.3.4	Staubfeuerungen . . . . . Hermann Hofbauer und Hans Hartmann	912
12.3.5	Wärmeübertrager . . . . . Hans Hartmann	914
12.3.6	Regelung automatisch beschickter Feuerungsanlagen . . . . . Markus Gölles	920
12.3.7	Systemeinbindung und Leistungsstufung . . . . . Hans Hartmann	933
12.4	Abgasreinigung . . . . . Matthias Gaderer	936
	12.4.1 Staubabscheidung . . . . .	938
	12.4.2 Stickstoffoxidminderung . . . . .	954
	12.4.3 HCl- und SO <sub>2</sub> -Minderung . . . . .	959
	12.4.4 Reduktion von Dioxinen und Furanen . . . . .	963
	12.4.5 Abgaskondensation . . . . .	964

12.5	Stromerzeugung	972
	Matthias Gaderer und Martin Kaltschmitt	
12.5.1	Grundlagen	972
12.5.2	Wasserdampfkraftprozesse mit Strömungsmaschinen (Turbinen)	983
12.5.3	Wasserdampfkraftprozesse mit Verdrängermaschine (Dampfmotor)	993
12.5.4	Organic Rankine Prozess	998
12.5.5	Stirlingmotorprozesse	1006
12.5.6	Direkt gefeuerte Gasmotoren- und Gasturbinenprozesse	1011
12.5.7	Indirekt gefeuerter Gasturbinenprozess	1015
12.6	Mitverbrennung in Kohlekraftwerken	1022
	Hartmut Spliethoff und Martin Kaltschmitt	
12.6.1	Konzepte zur Mitverbrennung	1024
12.6.2	Biomasseaufbereitung	1028
12.6.3	Staubfeuerungen	1031
12.6.4	Wirbelschichtfeuerungen	1042
	Literatur	1046
<b>13</b>	<b>Vergasung in der Gasatmosphäre</b>	<b>1059</b>
13.1	Grundlagen der Kinetik	1061
	Frerich Keil	
13.2	Vergasungstechnik	1067
	Hermann Hofbauer und Martin Kaltschmitt	
13.2.1	Vergasertypen	1069
	13.2.1.1 Festbettvergaser	1070
	13.2.1.2 Wirbelschichtvergaser	1079
	13.2.1.3 Flugstromvergaser	1088
	13.2.1.4 Mehrstufige Verfahren	1090
13.2.2	Produktgaseigenschaften	1094
	13.2.2.1 Hauptkomponenten	1095
	13.2.2.2 Verunreinigungen	1102
13.3	Gasreinigungstechnik	1110
	Hermann Hofbauer und Martin Kaltschmitt	
13.3.1	Anforderungen	1113
13.3.2	Partikelentfernung	1116
13.3.3	Teerentfernung	1119
13.3.4	Entfernung sonstiger Verunreinigungen	1124
13.4	Gasnutzungstechnik	1125
	Hermann Hofbauer, Ulf Neuling, Hannes Wagner und Martin Kaltschmitt	
13.4.1	Wärmebereitstellung	1125
13.4.2	Stromerzeugung	1128
	13.4.2.1 Stromerzeugung mit externer Verbrennung	1128

13.4.2.2	Stromerzeugung mit interner Verbrennung	.1130
13.4.3	Kraftstoffbereitstellung	.1141
13.4.3.1	Fischer-Tropsch-Synthese	.1145
13.4.3.2	Methanolsynthese	.1156
13.4.3.3	Alkoholsynthese	.1162
13.4.3.4	SNG-Synthese	.1163
13.4.3.5	Dimethylethersynthese	.1166
13.4.3.6	Wasserstoff	.1168
Literatur		.1169
<b>14</b>	<b>Pyrolyse</b>	.1183
14.1	Grundlagen der Kinetik	.1185
	Frerich Keil	
14.2	Schnelle Pyrolyse	.1196
	Dietrich Meier	
14.2.1	Verfahrenstechnik zur Bioöl-Produktion	.1199
14.2.1.1	Reaktoren mit stationärer Wirbelschicht	.1199
14.2.1.2	Reaktoren mit zirkulierender Wirbelschicht	.1203
14.2.1.3	Reaktor mit rotierendem Konus	.1205
14.2.1.4	Reaktoren mit Doppelschnecke	.1206
14.2.1.5	Reaktoren mit ablativer Wirkung	.1207
14.2.1.6	Reaktoren mit Vakuum	.1210
14.2.2	Produktaufbereitung	.1210
14.2.2.1	Physikalische Methoden	.1214
14.2.2.2	Chemische Methoden	.1215
14.2.3	Produktnutzung	.1219
14.3	Langsame Pyrolyse	.1222
14.3.1	Vollständige langsame Pyrolyse (Verkohlung)	.1223
	Johannes Welling	
14.3.1.1	Verfahrenstechnik	.1223
14.3.1.2	Produkte	.1232
14.3.2	Unvollständige langsame Pyrolyse (Torrefizierung)	.1236
	Dietrich Meier, Hermann Hofbauer und Martin Kaltschmitt	
14.3.2.1	Verfahrenstechnik	.1240
14.3.2.2	Produkte	.1249
Literatur		.1250

<b>15 Hydrothermale Verfahren</b> . . . . .	1267
Frédéric Vogel	
15.1 Grundlagen . . . . .	1269
15.1.1 Thermodynamik und Phasenverhalten . . . . .	1270
15.1.2 Hydrothermale Umwandlungspfade . . . . .	1271
15.1.3 Hauptreaktionen . . . . .	1274
15.1.4 Abbaukinetik . . . . .	1284
15.2 Hydrothermale Karbonisierung (HTC) . . . . .	1284
15.2.1 Haupteinflussparameter . . . . .	1285
15.2.2 Produkteigenschaften und -nutzung . . . . .	1287
15.2.3 Nebenprodukte: Prozesswasser . . . . .	1291
15.2.4 Verfahren und Anlagen . . . . .	1292
15.3 Hydrothermale Verflüssigung (HTL) . . . . .	1298
15.3.1 Haupteinflussparameter . . . . .	1298
15.3.2 Produkteigenschaften und -nutzung . . . . .	1303
15.3.3 Nebenprodukte: Gas, wässrige Phase, Koks . . . . .	1305
15.3.4 Verfahren und Anlagen . . . . .	1306
15.4 Hydrothermale Vergasung (HTG) . . . . .	1315
15.4.1 Haupteinflussparameter . . . . .	1316
15.4.2 Produkteigenschaften und -nutzung . . . . .	1322
15.4.3 Nebenprodukte: Salze . . . . .	1323
15.4.4 Verfahren und Anlagen . . . . .	1324
Literatur . . . . .	1330
<b>16 Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen</b> . . . . .	1339
16.1 Pflanzenölgewinnung . . . . .	1339
Ulf Neuling, Martin Kaltschmitt und Edgar Remmele	
16.1.1 Rohstoffbereitstellung und Vorbehandlung . . . . .	1343
16.1.2 Pressung . . . . .	1347
16.1.3 Extraktion . . . . .	1353
16.1.4 Ölreinigung . . . . .	1361
16.1.5 Ölraffination . . . . .	1367
16.1.6 Gesamtkonzepte . . . . .	1376
16.2 Weiterverarbeitung von Pflanzenölen . . . . .	1379
Ulf Neuling, Martin Kaltschmitt und Franziska Müller-Langer	
16.2.1 Chemische Umesterung . . . . .	1380
16.2.2 Enzymatische Umesterung . . . . .	1391
16.2.3 Veresterung freier Fettsäuren . . . . .	1398
16.2.4 HEFA-Prozess . . . . .	1399
16.2.5 BIC-Prozess . . . . .	1404
16.2.6 Mitraffination in Mineralölraffinerien . . . . .	1408

16.3	Produkte und energetische Nutzung . . . . .	1414
	Klaus Thuncke, Edgar Remmele, Ulf Neuling und Martin Kaltschmitt	
16.3.1	Pflanzenöle . . . . .	1415
16.3.2	Pflanzenölbasierte Kraftstoffe . . . . .	1428
16.3.3	Kuppel- und Nebenprodukte . . . . .	1431
	Literatur . . . . .	1437
<b>17</b>	<b>Grundlagen der biochemischen Umwandlung . . . . .</b>	<b>1447</b>
	Nils Tippkötter	
17.1	Substratfraktionen aus Biomasse . . . . .	1447
17.1.1	C5- und C6-Zucker . . . . .	1448
17.1.2	Stärke . . . . .	1450
17.1.3	Zellulose . . . . .	1451
17.1.4	Hemizellulose . . . . .	1452
17.1.5	Lignin . . . . .	1452
17.1.6	Öle und Fette . . . . .	1454
17.2	Grundlagen enzymkatalysierter Umsetzungen . . . . .	1455
17.2.1	Enzyme . . . . .	1455
17.2.2	Enzymatische Reaktionen . . . . .	1457
17.2.3	Produkte . . . . .	1461
17.2.4	Enzymkinetik . . . . .	1462
17.3	Grundlagen mikrobiologischer Umsetzungen . . . . .	1466
17.3.1	Mikroorganismen . . . . .	1467
17.3.2	Stoffwechsel und Wachstum . . . . .	1472
17.3.3	Energiegewinnung durch Gärung und Atmung . . . . .	1475
17.3.4	Wachstumsgesetz und Wachstumskinetik . . . . .	1483
17.4	Verfahrenstechnische Grundlagen . . . . .	1485
17.4.1	Vorbehandlung . . . . .	1485
17.4.2	Grundlegende verfahrenstechnische Operationen . . . . .	1490
17.4.3	Verfahrenstechnische Grenzen . . . . .	1496
	Literatur . . . . .	1499
<b>18</b>	<b>Fermentative Alkoholerzeugung und -nutzung . . . . .</b>	<b>1501</b>
	Anton Friedl, Angela Miltner, Ulf Neuling und Martin Kaltschmitt	
18.1	Biochemische Grundlagen . . . . .	1502
18.1.1	Alkoholische Fermentationen . . . . .	1502
18.1.2	Fermentation von Synthesegas . . . . .	1512
18.2	Verfahrensschritte und Verfahrenskonzepte . . . . .	1516
18.2.1	Aufbereitung zuckerhaltiger Rohstoffe . . . . .	1518
18.2.2	Aufbereitung/Aufschluss stärkehaltiger Rohstoffe . . . . .	1519
18.2.3	Aufbereitung/Aufschluss lignozellulosehaltiger Rohstoffe . . . . .	1528
18.2.4	Fermentation von Zuckerlösungen . . . . .	1535

18.2.5	Fermentation von Synthesegas	1540
18.2.6	Destillation und Rektifikation	1551
18.2.7	Schlempebehandlung	1562
18.2.8	Absolutierung	1566
18.2.9	Weiterverarbeitung zu höheren Kohlenwasserstoffen	1571
18.2.10	Anlagenkonzepte	1576
18.3	Produkte und energetische Nutzung	1590
18.3.1	Alkohole	1590
18.3.2	Schlempe	1599
18.3.3	Kohlenstoffdioxid	1600
	Literatur	1600
<b>19</b>	<b>Biogaserzeugung und -nutzung</b>	<b>1609</b>
19.1	Grundlagen	1610
	Jan Liebetrau, Heike Sträuber, Sören Weinrich, Saskia Oldenburg, Christiane Dieckmann und Martin Kaltschmitt	
19.1.1	Anaerober Abbau	1610
19.1.2	Substrate und Prozessbedingungen	1613
19.1.2.1	Biogasbildungspotenzial	1614
19.1.2.2	Kinetik des Substratabbaus	1621
19.1.2.3	Charakterisierende Kenngrößen	1625
19.2	Verfahrenstechnik	1635
	Christiane Dieckmann, Martin Kaltschmitt, Saskia Oldenburg, Frank Scholwin und Werner Edelmann	
19.2.1	Substratzwischenlagerung	1638
19.2.2	Substrataufbereitung	1640
19.2.3	Substrataufschluss	1646
19.2.4	Gärtechniken	1648
19.2.4.1	Einteilung	1649
19.2.4.2	Nassfermentationstechnik	1654
19.2.4.3	Feststofffermentationstechnik	1673
19.2.4.4	Kriterien für die Verfahrensauswahl	1679
19.2.5	Biogasreinigung	1681
19.2.6	Biogasspeicherung	1688
19.2.7	Biogasaufbereitung und -einspeisung	1691
19.2.8	Weiterverarbeitung zu höheren Kohlenwasserstoffen	1699
19.2.9	Gärrestaufbereitung und -lagerung	1703
19.2.10	Gesamtanlagenaspekte und -konzepte	1708
19.3	Produkte und Nutzung	1722
	Christiane Dieckmann, Martin Kaltschmitt, Frank Scholwin und Werner Edelmann	
19.3.1	Biogas	1722

---

19.3.2	Weitere Gärprodukte . . . . .	1730
19.4	Exkurs: Deponiegas . . . . .	1736
	Marco Ritzkowski	
19.4.1	Entstehung . . . . .	1737
19.4.2	Erfassung . . . . .	1740
19.4.3	Behandlung und Nutzung . . . . .	1743
	Literatur . . . . .	1749
	<b>Anhang – Energieeinheiten . . . . .</b>	<b>1757</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>1759</b>