
Martin Kaltschmitt · Marvin Scherzinger
Johannes Gescher
(Hrsg.)

Energie aus Biomasse

Bio-chemische und
physikalisch-chemische Konversion

4. Auflage

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
	Martin Kaltschmitt, Marvin Scherzinger und Johannes Gescher	
1.1	Definition „Biomasse“	2
1.2	Aufbau typischer Bereitstellungsketten	3
1.3	Wandlungsmöglichkeiten in End- bzw. Nutzenergie	5
1.3.1	Thermo-chemische Umwandlung	6
1.3.2	Physikalisch-chemische Umwandlung	7
1.3.3	Biochemische Umwandlung	8
1.4	Aufbau und Abgrenzungen	9
1.4.1	Gebiet „Biogene Molekülgruppen“	13
1.4.2	Gebiet „Grundlagen der biochemischen Umwandlung“	13
1.4.3	Gebiet „Ethanolkraftstoffe“	14
1.4.4	Gebiet „Biogas als Energieträger“	14
1.4.5	Gebiet „Weitere fermentative Prozesse“	14
1.4.6	Gebiet „Pflanzenöl-basierte Kraftstoffe“	15
	Literatur	16
2	Chemische Grundlagen des Biomasseaufbaus	17
	Marvin Scherzinger, Martin Kaltschmitt und Johannes Gescher	
2.1	Klassifizierung	18
2.1.1	Holz	18
2.1.2	Halmgutartige Biomasse	20
2.1.3	Algenbiomasse	22
2.2	Stoffklassen in Biomasse	24
2.2.1	Kohlenhydrate	24
2.2.2	Proteine	31
2.2.3	Lipide	35
2.2.4	Lignin	38
	Literatur	39

3	Grundlagen biochemischer Konversionen	43
	Andreas Zimmermann, Marvin Scherzinger, Johannes Gescher und Martin Kaltschmitt	
3.1	Vorbehandlung und Aufschluss	49
3.1.1	Wirkungsmechanismen	50
3.1.2	Verfahren	54
3.2	Enzymkatalysierte Umsetzungen	64
3.2.1	Aufbau und Funktion	64
3.2.2	Michaelis-Menten-Kinetik	68
3.2.3	Hemmungsmechanismen	71
3.2.4	Industrielle Anwendungen von Enzymen	75
3.3	Mikrobielle Umsetzungen	80
3.3.1	Einteilung von Mikroorganismen	81
3.3.2	Aufbau von mikrobiellen Zellen	83
3.3.3	Grundlegende Stoffwechselvorgänge	86
3.3.4	Wichtige Gärungsprozesse	92
3.3.5	Wachstumskinetik	97
3.3.6	Industrielle Anwendungen	101
3.4	Verfahrenstechnische Umsetzung biochemischer Prozesse	103
3.4.1	Upstream Processing	104
3.4.2	Fermentation	107
3.4.3	Downstream Processing	111
3.4.4	Verfahrenstechnische Herausforderungen	115
	Literatur	116
4	Bioethanolerzeugung	119
	Arne Gröngröft, Gabriel Costa de Paiva, Anton Friedl, Angela Miltner, Andreas Zimmermann und Martin Kaltschmitt	
4.1	Rohstoffaufbereitung und -verzuckerung	121
4.1.1	Zuckerhaltige Rohstoffe	121
4.1.2	Stärkehaltige Rohstoffe	125
4.1.3	Lignocellulose-haltige Rohstoffe	138
4.2	Fermentation	151
4.2.1	Biologische Grundlagen	152
4.2.2	Hefebereitstellung	158
4.2.3	Konstruktionsmerkmale von Fermentern	159
4.2.4	Fermentationstechniken	161
4.3	Ethanolabtrennung und -aufreinigung	168
4.3.1	Destillation und Rektifikation	168
4.3.2	Absolutierung	177

4.4	Nebenproduktbehandlung	182
4.4.1	Fuselöl	182
4.4.2	Vinasse	185
4.4.3	Schlempe	187
4.4.4	Kohlenstoffdioxid	192
4.5	Produkte und deren Nutzung	195
4.5.1	Ethanol	195
4.5.2	Vinasse	199
4.5.3	Schlempe	200
4.5.4	Kleie	201
4.5.5	Gluten	203
4.5.6	Maiskeimöl	203
4.5.7	Fuselöle	204
4.5.8	Kohlenstoffdioxid	204
4.6	Beispielhafte Anlagenkonzepte	205
4.6.1	Zucker und Ethanol aus zuckerhaltiger Biomasse	206
4.6.2	Integrierte Stärke-basierte Anlagen	208
4.6.3	Integration Zucker- und Stärke-basierter Produktion	211
4.6.4	Klein- und mittelgroße Ethanolerzeugung	212
4.6.5	Ethanol aus Stroh	214
4.6.6	Ethanol aus Bagasse in bestehenden Anlagen	215
4.6.7	Ethanol in Sulfit-Zellstoffanlagen	216
4.6.8	Ethanol aus Lebensmittelabfällen	217
4.6.9	Lignocellulose-Ethanol mithilfe verdünnter Schwefelsäure	218
4.6.10	Arkenol-Prozess	219
4.6.11	Iogen-Prozess	220
	Literatur	221
5	Biogasferzeugung	229
	Christiane Dieckmann, Martin Kaltschmitt, Jörg Kretschmar, Jan Liebetrau, Saskia Oldenburg, Marco Ritzkowski, Marvin Scherzinger, Frank Scholwin, Jana Schultz und Sören Weinrich	
5.1	Grundlagen	230
5.1.1	Anaerober Abbau	230
5.1.2	Substrate und Prozessbedingungen	247
5.1.2.1	Biogasbildungspotenzial	247
5.1.2.2	Kinetik des Substratabbaus	255
5.1.2.3	Charakterisierende Kenngrößen	260
5.2	Verfahrenstechnik	270
5.2.1	Substratzwischenlagerung	272
5.2.2	Substrataufbereitung	274
5.2.3	Substrataufschluss	281

5.2.4	Gärtechniken	284
5.2.4.1	Einteilung	284
5.2.4.2	Nassfermentationstechnik	291
5.2.4.3	Feststofffermentationstechnik	310
5.2.4.4	Kriterien für die Verfahrensauswahl	316
5.2.5	Erhöhung des Methananteils	318
5.2.6	Biogasreinigung	324
5.2.7	Biogasspeicherung	332
5.2.8	Biogasaufbereitung und -einspeisung	336
5.2.9	Gärrestaufbereitung und -lagerung	345
5.2.10	Gesamtanlagenaspekte und -konzepte	351
5.3	Produkte und Nutzung	365
5.3.1	Biogas	365
5.3.2	Weitere Gärprodukte	374
5.4	Exkurs: Deponiegas	379
5.4.1	Entstehung	381
5.4.2	Erfassung	383
5.4.3	Behandlung und Nutzung	386
	Literatur	392
6	Weitere fermentative Prozesse	403
	Miriam Edel, Johannes Gescher, Angela Miltner, Anton Friedl und Martin Kaltschmitt	
6.1	Ethanol aus Synthesegas	404
6.1.1	Grundlagen	404
6.1.2	Technische Umsetzung	408
6.2	Butanol	420
6.2.1	Grundlagen	421
6.2.2	Technische Umsetzung	423
6.3	2,3-Butandiol	425
6.3.1	Grundlagen	425
6.3.2	Technische Umsetzung	427
	Literatur	427
7	Erzeugung Pflanzenöl-basierter Kraftstoffe	431
	Edgar Ahn, Martin Kaltschmitt, Thies Langmaack, Ulf Neuling, Edgar Remmele, Marvin Scherzinger, Klaus Thuneke und Steffen Voß	
7.1	Pflanzenölgewinnung	432
7.1.1	Rohstoffbereitstellung und -vorbehandlung	436
7.1.2	Pressung	444
7.1.3	Extraktion	452
7.1.4	Ölreinigung	461

7.1.5	Ölraffination	469
7.1.6	Produkte	481
7.1.7	Gesamtkonzepte	495
7.2	Weiterverarbeitung zu Kraftstoffen	500
7.2.1	Um- und Veresterung	505
7.2.1.1	Chemische Grundlagen	506
7.2.1.2	Verfahrenstechnische Grundlagen	518
7.2.1.3	Produkte	527
7.2.1.4	Anlagenkonzepte und -beispiele	534
7.2.2	Hydrierung	544
7.2.2.1	Chemische Grundlagen	545
7.2.2.2	Verfahrenstechnische Grundlagen	548
7.2.2.3	Produkte	550
7.2.2.4	Anlagenkonzepte und -beispiele	552
7.2.3	Mittraffination in Mineralölraffinerien	557
7.2.3.1	Chemische Grundlagen	557
7.2.3.2	Verfahrenstechnische Grundlagen	558
7.2.3.3	Produkte	560
7.2.3.4	Anlagenkonzepte und -beispiele	560
	Literatur	565
	Stichwortverzeichnis	577