

BIOGENE FESTBRENNSTOFFE
ASCHEEIGENSCHAFTEN
KLEINFEUERUNGSANLAGEN
FEINSTAUBBILDUNG
FEINSTAUBMINDERUNG
THERMO-CHEMISCHE UMWANDLUNGSVERFAHREN
AUTOMATISCH BESCHICKTE FEUERUNGSANLAGEN
GASERZEUGUNG
PYROLYSE
HYDROTHERMALE CARBONISIERUNG
HYDROTHERMALE VERFLÜSSIGUNG
SYNTHESEN

Martin Kaltschmitt · Hermann Hofbauer
Volker Lenz *Hrsg.*

Energie aus Biomasse

Thermo-chemische Konversion

4. Auflage

Energie aus Biomasse

Band 2

Reihe herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt, Technische Universität Hamburg (TUHH),
Hamburg, Deutschland

Dr. Hans Hartmann, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Straubing, Deutschland

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Hofbauer, Technische Universität Wien
(TUW), Wien, Österreich

Die Bände dieser Reihe beschreiben umfassend die biologischen, physikalischen, chemischen und technischen Grundlagen einer Energiegewinnung aus Biomasse. Dies beinhaltet eine Beschreibung der verfügbaren Biomasseressourcen, eine Systematisierung möglicher Bereitstellungsketten und -techniken zur Verfügbarmachung der Biomassen an der jeweiligen Konversionsanlage und eine Darstellung der thermo-chemischen, der physikalisch-chemischen sowie der biochemischen Umwandlungsmöglichkeiten in Bioenergieträger (z. B. Holzkohle, Biodiesel, Biogas) bzw. Bioenergie (d. h. Wärme, Strom).

Diese Reihe wird herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt, Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg

Dr. Hans Hartmann, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Straubing

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Hofbauer, Technische Universität Wien (TUW), Wien

Martin Kaltschmitt · Hermann Hofbauer ·
Volker Lenz
(Hrsg.)

Energie aus Biomasse

Thermo-chemische Konversion

4. Auflage

 Springer Vieweg

Hrsg.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt
Institut für Umwelttechnik und
Energiewirtschaft (IUE)
Technische Universität Hamburg (TUHH)
Hamburg, Deutschland

Dr.-Ing. Volker Lenz
Deutsches Biomasseforschungszentrum
(DBFZ)
Leipzig, Deutschland

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.
Hermann Hofbauer
Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik
und Technische Biowissenschaften
Technische Universität Wien (TU Wien)
Wien, Österreich

ISSN 2731-4774

Energie aus Biomasse

ISBN 978-3-658-41215-9

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-41216-6>

ISSN 2731-4782 (electronic)

ISBN 978-3-658-41216-6 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2001, 2009, 2016, 2024

Ursprünglich erschienen in einem Band

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort

Wesentlicher Bestandteil einer nachhaltigen Energieversorgung ist der schonende und effiziente Umgang mit den der Menschheit insgesamt zur Verfügung stehenden begrenzten natürlichen Ressourcen. Hierzu kann die Nutzung regenerativer Energien (z. B. Biomasse, Solarstrahlung, Windenergie, Wasserkraft, Erdwärme) einen substanziellen Beitrag leisten. Deshalb steht eine weitergehende Nutzung dieser umweltfreundlichen und klimaverträglichen Energien schon seit vielen Jahren – mit einer wechselnden Schwerpunktsetzung – weit oben auf der politischen Agenda – und das national wie international. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund der akzelerierenden und immer deutlicher werdenden Auswirkungen des globalen Klimawandels. Diese unterschiedlichen Entwicklungen bedingen, dass regenerative Energien insbesondere in den letzten beiden Jahrzehnten zunehmend mehr zur Deckung der Energienachfrage auf einer nationalen und einer internationalen Ebene beigetragen haben – und das mit weiterhin steigender Tendenz.

Biomasse ist der regenerative Energieträger, der bisher weltweit und in vielen Volkswirtschaften mit Abstand am meisten genutzt wird; beispielsweise werden derzeit global zwischen 15 und knapp 20 % der Primärenergie-Nachfrage durch Bioenergie gedeckt, und lokal/national kann dieser Anteil noch deutlich höher sein. Auch in Europa trägt die Bioenergie merklich zur Deckung der Primärenergie-Nachfrage bei – und das sowohl im Wärme- und Strom- als auch im Verkehrssektor. Außerdem könnte die Biomasse aufgrund von nach wie vor – lokal unterschiedlich – unerschlossenen Mengenpotenzialen auf der Ressourcenseite und noch vorhandenen Effizienzpotenzialen auf der Konversionsseite sowie der relativen Marktnähe zukünftig weitergehend zur Deckung der Energienachfrage beitragen – und das ökologisch verträglich, klimaneutral und oft auch ökonomisch darstellbar sowie sozial akzeptabel. Die Biomasse kann damit auch in den kommenden Jahren den Aufbau einer krisen- und versorgungssicheren sowie umwelt- und klimaverträglicheren – und damit nachhaltigeren – Energieversorgung unterstützen und gleichzeitig als Kohlenstoffträger für eine defossilisierte industrielle Produktion dienen.

Zur Bewertung der Möglichkeiten und Grenzen einer technisch, ökonomisch und ökologisch effizienten energetischen Biomassenutzung im Energiesystem müssen die physikalischen, chemischen und biologischen Grundlagen einer Energiegewinnung aus Biomasse sowie deren (verfahrens-)technische Umsetzung im Verlauf der gesamten Bereitstellungskette von der Anbau-/Anfallfläche bis zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung

schnell und einfach – nach dem aktuellen Stand des Wissens und der Technik – verfügbar sein. Dies ist das Ziel der vorliegenden Buchreihe, die in drei Bänden diese Themenstellung umfassend adressiert. Dazu werden in einem ersten Band die verfügbaren Biomassefraktionen dargestellt und ausgehend davon die Techniken und Verfahren zur Produktion bzw. Bereitstellung der Biomasse frei Konversionsanlage diskutiert. Anschließend werden in einem zweiten Band die vielfältigen Möglichkeiten einer thermo-chemischen Umwandlung von Biomasse in End- bzw. Nutzenergie – und damit in Bioenergie – erörtert. Zusätzlich werden in einem dritten Band auch die physikalisch-chemischen und insbesondere die biochemischen Wandlungsoptionen organischer Stoffe insbesondere in gasförmige und flüssige Sekundärenergieträger adressiert. Damit liegt der Schwerpunkt dieser Buchreihe auf der Diskussion der zum Verständnis einer Energiebereitstellung aus Biomasse notwendigen naturwissenschaftlichen Grundlagen – dies inkludiert die „klassischen“ Disziplinen der Biologie, der Physik und der Chemie – und insbesondere des aktuellen Standes der (Verfahrens-)Technik. Ökonomische und ökologische Gesichtspunkte sowie energiewirtschaftliche Analysen einer Bioenergiegewinnung sind – ebenso wie sonstige nicht technische Aspekte – damit nicht Gegenstand der Darstellungen und Ausführungen dieser Buchreihe.

Die Herausgeber möchten den Autoren, die zum Gelingen der vierten Auflage, bei der das ursprünglich einbändige Werk in drei Bände aufgeteilt wurde, beigetragen haben, von Herzen danken. Ohne ihr hohes Engagement, ihre Sach- und Fachkompetenz sowie ihre sehr weitgehende Kooperationsbereitschaft und ihr über das übliche Maß deutlich hinausgehendes Entgegenkommen wäre diese Buchreihe in der vorliegenden Form nicht möglich gewesen. Neben den genannten Autoren, die z. T. auch an Kapiteln mitgewirkt haben, für die sie nicht verantwortlich zeichnen, war eine Vielzahl weiterer Fachleute an der Durchsicht der Texte beteiligt. Ihnen sei an dieser Stelle – ebenso wie dem Verlag für die sehr kooperative Zusammenarbeit – sehr herzlich gedankt. Auch gilt unser ganz besonderer Dank den Autoren der ersten, der zweiten und der dritten Auflage, die an der hier vorliegenden vierten Auflage nicht mitarbeiten konnten; ohne ihre wertvolle Vorarbeit hätte diese Buchreihe in der vorliegenden Form nicht erarbeitet werden können. Des Weiteren ist insbesondere Frau Sarah Flashaar und Frau Nicolle Brinkhus sowie vielen weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unser aufrichtiger Dank auszusprechen; ohne ihre tatkräftige Unterstützung u. a. bei der Erstellung der Zeichnungen hätte diese Buchreihe nicht realisiert werden können.

Trotz der hohen Sorgfalt, mit der die Autoren und Herausgeber sich bemüht haben, die dargestellten Zahlen und Fakten sowie die aufgezeigten physikalischen, chemischen, biologischen und vor allem (verfahrens-)technischen Zusammenhänge nach dem aktuellen Stand des Wissens und der Technik zu recherchieren und zusammenzustellen, können Fehler leider niemals gänzlich ausgeschlossen werden. Über diesbezügliche konstruktive Anmerkungen und zielorientierte Verbesserungsvorschläge, die dann in eine mögliche Neuauflage einfließen, würden sich die Autoren und Herausgeber deshalb sehr freuen.

Hamburg im April 2024

im Namen aller Herausgeber
Martin Kaltschmitt

Inhaltsübersicht

Band 1 – Ressourcen und Bereitstellung

- 1 Einleitung und Zielsetzung**
- 2 Biomasseentstehung**
- 3 Forstwirtschaftlich produzierte Biomasse**
- 3 Landwirtschaftlich produzierte Biomasse**
- 4 Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle**
- 5 Bereitstellungskonzepte**
- 6 Ernteprozesse**
- 7 Mechanische Aufbereitungsprozesse**
- 8 Transportprozesse**
- 9 Trocknungsprozesse für biogene Festbrennstoffe**
- 10 Lagerungsprozesse**
- 11 Algenbiomasse**

Band 2 – Thermo-chemische Konversion

- 1 Einleitung und Zielsetzung
- 2 Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften
- 3 Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung
- 4 Einordnung der thermo-chemischen Umwandlungsverfahren
- 5 Vollständige thermo-chemische Umwandlungsverfahren (Verbrennung)
- 6 Verfahren der Gaserzeugung in der Gasatmosphäre
- 7 Pyrolyseverfahren
- 8 Hydrothermale Verfahren
- 9 Synthese- und Weiterverarbeitungsverfahren

Band 3 – Biochemische und physikalisch-chemische Konversion

- 1 Einleitung und Zielsetzung
- 2 Chemische Grundlagen des Biomasseaufbaus
- 3 Grundlagen biochemischer Konversionen
- 4 Bioethanolerzeugung
- 5 Biogaserzeugung
- 6 Weitere fermentative Prozesse
- 7 Erzeugung Pflanzenöl-basierter Kraftstoffe

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
	Martin Kaltschmitt, Hermann Hofbauer und Volker Lenz	
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 „Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften“	14
1.4.2	Gebiet „Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung“	14
1.4.3	Gebiet „Einordnung der thermo-chemischen Umwandlungsverfahren“	15
1.4.4	Gebiet „Verbrennung“	15
1.4.5	Gebiet „Gaserzeugung“	16
1.4.6	Gebiet „Schnelle und langsame Pyrolyse“	17
1.4.7	Gebiet „Hydrothermale Umwandlung“	17
1.4.8	Gebiet „Synthesen“	18
	Literatur	18
2	Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften	19
	Daniel Kuptz, Isabel Höfer-Sanning und Hans Hartmann	
2.1	Chemisch-stoffliche Brennstoffeigenschaften	26
2.1.1	Hauptelemente	27
2.1.2	Nebenelemente	33
2.1.3	Spurenelemente	48
2.1.4	Brennstoffindizes	60
2.2	Brennstofftechnische Eigenschaften	65
2.2.1	Wassergehalt	65
2.2.2	Aschegehalt	68
2.2.3	Heizwert und Brennwert	72

2.2.4	Flüchtige Bestandteile	77
2.2.5	Ascheerweichungsverhalten	77
2.3	Physikalisch-mechanische Eigenschaften	80
2.3.1	Form und Stückigkeit	81
2.3.2	Partikelgrößenverteilung	83
2.3.3	Feinanteil	85
2.3.4	Partikelgrößenverteilung von Pellet-Ausgangsmaterial	86
2.3.5	Abriebfestigkeit	87
2.3.6	Fließigenschaften und Brückenbildungsneigung	88
2.3.7	Lagerdichte	91
2.3.8	Lagervolumen	93
2.3.9	Rohdichte	98
2.3.10	Energiedichte	99
2.3.11	Brennstoffmengenabschätzung	100
2.4	Genormte Brennstoffanforderungen	104
	Literatur	116
3	Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung	123
	Martin Kaltschmitt, Marvin Scherzinger und Hermann Hofbauer	
3.1	Phase „Aufheizung“	128
3.1.1	Aufheizung (Gasatmosphäre)	129
3.1.2	Aufheizung (hydrothermale Atmosphäre)	132
3.2	Phase „Zersetzung“	134
3.2.1	Pyrolytische Zersetzung (Gasatmosphäre)	135
3.2.1.1	Zersetzungseffekte und -mechanismen	137
3.2.1.2	Produkte und Produktverteilung	142
3.2.2	Hydrolytische Zersetzung (hydrothermale Atmosphäre)	146
3.2.2.1	Zersetzungseffekte und -mechanismen	149
3.2.2.2	Produkte und Produktverteilung	152
3.3	Phase „Vergasung“	155
3.3.1	Vergasung (Gasatmosphäre)	157
3.3.1.1	Vergasungsreaktionen	158
3.3.1.2	Vergasungsmedien und Vergasungsprodukte	162
3.3.2	Vergasung (hydrothermale Atmosphäre)	166
3.3.2.1	Vergasungsreaktionen	168
3.3.2.2	Produkte und Produktverteilung	170
3.4	Phase „Oxidation“	173
	Literatur	174

4	Einordnung der thermo-chemischen Umwandlungsverfahren	181
	Martin Kaltschmitt, Marvin Scherzinger, Ulf Neuling und Hermann Hofbauer	
4.1	Begriffsdefinitionen	181
4.2	Prozesscharakterisierung	187
4.3	Prozessvergleich	192
	Literatur	198
5	Vollständige thermo-chemische Umwandlungsverfahren (Verbrennung) .	199
	Roman Adam, Sebastian Fendt, Matthias Gaderer, Markus Gölles, Johannes Haimerl, Hans Hartmann, Hermann Hofbauer, Isabel Höfer-Sanning, Theresa Hülsmann, Martin Kaltschmitt, Frerich Keil, Daniel Kuptz, Volker Lenz, Theresa Siegmund und Hartmut Spliethoff	
5.1	Chemische Grundlagen	200
5.1.1	Hauptelemente	202
5.1.1.1	Grundlagen der Kinetik	203
5.1.1.2	Vollständige Oxidation	210
5.1.1.3	Unvollständige Oxidation	212
5.1.2	Nebenelemente	243
5.1.2.1	Stickstoff	243
5.1.2.2	Schwefel und Chlor	256
5.1.2.3	Weitere Nebenelemente	264
5.1.3	Spurenelemente	283
5.1.3.1	Bildungsmechanismen	283
5.1.3.2	Beeinflussung der Reaktionen	287
5.1.4	Feste (und flüssige) Reaktionsprodukte	288
5.1.4.1	Einordnung und Unterteilung	288
5.1.4.2	Verbrennungsrückstände in der Konversionsanlage	293
5.1.4.3	Verbrennungsrückstände im Abgas	311
5.1.4.4	Beeinflussung der Austragspfade	323
5.1.4.5	Verwertung und Entsorgung fester Verbrennungsrückstände	339
5.2	Verfahrenstechnische Grundlagen	352
5.2.1	Anforderungen aus Sicht des Verbrennungsablaufs	353
5.2.2	Resultierende konstruktive Anforderungen	360
5.2.3	Auswirkungen auf die Emissionen	366
5.2.4	Verbrennungsrechnung, adiabate Verbrennungstemperatur und Taupunkttemperatur	368
5.2.5	Unterschiede von hand- und automatisch beschickten Feuerungen	378
5.3	Handbeschickte Feuerungsanlagen	380
5.3.1	Feuerungsprinzipien	382
5.3.2	Einzelraumfeuerstätten	386
5.3.3	Erweiterte Einzelraumfeuerstätten	402

5.3.4	Handbeschickte Zentralheizungskessel	405
5.3.5	Integration in häusliche Energiesysteme	410
5.3.6	Regelung handbeschickter Feuerungsanlagen	420
5.4	Automatisch beschickte Feuerungen	428
5.4.1	Systematik	429
5.4.2	Feuerungen kleiner und mittlerer thermischer Leistung	441
5.4.2.1	Festbettfeuerungen kleiner Leistung im häuslichen Bereich	442
5.4.2.2	Festbettfeuerungen im mittleren Leistungsbereich	448
5.4.2.3	Sicherheitstechnische Aspekte	461
5.4.2.4	Regelung	464
5.4.2.5	Wärmeübertrager	479
5.4.2.6	Systemdimensionierung und -integration	486
5.4.3	Großfeuerungsanlagen	493
5.4.3.1	Festbettfeuerungen	493
5.4.3.2	Wirbelschichtfeuerungen	499
5.4.3.3	Staubfeuerungen	514
5.5	Abgasreinigung	527
5.5.1	Staubabscheidung	530
5.5.1.1	Grundprinzipien	532
5.5.1.2	Technische Umsetzung	535
5.5.2	Abscheidung unverbrannter kohlenstoffhaltiger gasförmiger Komponenten	556
5.5.3	Stickstoffoxidminderung	557
5.5.4	HCl- und SO ₂ -Minderung	563
5.5.5	Reduktion von Dioxinen und Furanen	567
5.5.6	Abgaskondensation	568
5.6	Stromerzeugung	577
5.6.1	Grundlagen	577
5.6.2	Wasserdampfkraftprozesse mit Strömungsmaschinen (Turbinen)	591
5.6.3	Wasserdampfkraftprozesse mit Verdrängermaschine	601
5.6.4	Organic-Rankine-Prozess	608
5.6.5	Stirling-Motor-Prozesse	616
5.6.6	Direkt gefeuerte Gasmotoren- und Gasturbinenprozesse	621
5.6.7	Indirekt gefeuerter Gasturbinenprozess	626
5.6.8	Thermoelektrische Generatoren	632
	Literatur	632

6	Verfahren der Gaserzeugung in der Gasatmosphäre	669
	Florian Benedikt, Sabine Fleck, Josef Fuchs, Hermann Hofbauer, Martin Kaltschmitt, Frerich Keil und Marco Klemm	
6.1	Chemische Grundlagen	671
6.1.1	Vergasungsreaktionen	673
6.1.2	Teerdefinition, -klassifikation und -messung	681
6.1.3	Weitere unerwünschte Produktgaskomponenten	688
6.2	Verfahrenstechnische Grundlagen	691
6.2.1	Vergasungsmittel	691
6.2.2	Prozesswärmebereitstellung	693
6.2.3	Erforderliche Betriebsbedingungen	693
6.2.4	Gaserzeugertypen	694
6.3	Gaserzeugungstechnik	696
6.3.1	Festbett-Gaserzeuger	696
6.3.2	Wirbelschicht-Gaserzeuger	706
6.3.3	Flugstrom-Gaserzeugung	718
6.3.4	Mehrstufige Verfahren	721
6.4	Produkte der Gaserzeugung	726
6.4.1	Hauptkomponenten	727
6.4.2	Verunreinigungen	736
6.5	Gasreinigungstechnik	745
6.5.1	Anforderungen an die Gasreinheit	746
6.5.2	Partikelentfernung	751
6.5.3	Teerentfernung	756
6.5.4	Feingasreinigung	763
6.6	Gasnutzungsoptionen	765
6.6.1	Wärmebereitstellung	766
6.6.2	Stromerzeugung/KWK	769
6.6.2.1	Stromerzeugung mit externer Verbrennung	769
6.6.2.2	Stromerzeugung mit interner Verbrennung	772
6.6.3	Wasserstoffbereitstellung	783
	Literatur	788
7	Pyrolyseverfahren	803
	Jörn Appelt, Martin Kaltschmitt, Frerich Keil, Dietrich Meier und Christoph Pfeifer	
7.1	Chemische Grundlagen	804
7.1.1	Zersetzungsmechanismen	806
7.1.2	Kinetische Betrachtungen	822

7.2	Verfahrenstechnische Grundlagen	833
7.2.1	Prinzipien	834
7.2.2	Aufreinigung / Aufbereitung der Pyrolyseprodukte	841
7.2.2.1	Feste Produkte	842
7.2.2.2	Flüssige Produkte	844
7.2.2.3	Gasförmige Produkte	852
7.3	Langsame Pyrolyse	852
7.3.1	Torrefizierung	853
7.3.1.1	Technik	857
7.3.1.2	Produkte	864
7.3.2	Verkohlung	865
7.3.2.1	Technik	865
7.3.2.2	Produkte	877
7.4	Schnelle Pyrolyse	880
7.4.1	Technik	881
7.4.2	Produkte und deren Nutzung	891
	Literatur	895
8	Hydrothermale Verfahren	917
	Frédéric Vogel	
8.1	Chemische Grundlagen	920
8.1.1	Thermodynamik und Phasenverhalten	920
8.1.2	Hydrothermale Umwandlungspfade	922
8.1.3	Hauptreaktionen	924
8.1.4	Abbaukinetik	934
8.2	Verfahrenstechnische Grundlagen	935
8.2.1	Konditionierung nasser Biomassen	935
8.2.2	Förderung von Biomassesuspensionen	938
8.2.3	Materialauswahl und Korrosionsschutz	940
8.2.4	Wärmeeintrag und -austrag	945
8.2.5	Produktaustrag und Phasentrennung	947
8.3	Hydrothermale Carbonisierung (HTC)	950
8.3.1	Haupteinflussparameter	951
8.3.2	Produkteigenschaften und -nutzung	954
8.3.3	Nebenprodukte	957
8.3.4	Verfahren und Anlagen	959
8.4	Hydrothermale Verflüssigung (HTL)	966
8.4.1	Haupteinflussparameter	967
8.4.2	Produkteigenschaften und -nutzung	972
8.4.3	Nebenprodukte	975
8.4.4	Verfahren und Anlagen	976

8.5	Hydrothermale Gaserzeugung (HTG)	985
8.5.1	Haupteinflussparameter	986
8.5.2	Produkteigenschaften und -nutzung	992
8.5.3	Nebenprodukte	993
8.5.4	Verfahren und Anlagen	994
	Literatur	1000
9	Synthese- und Weiterverarbeitungsverfahren	1011
	Stefan Bube, Hermann Hofbauer, Martin Kaltschmitt, Marco Klemm, Ulf Neuling, Steffen Voß und Tjerk Zitscher	
9.1	Synthesegaseigenschaften	1013
9.1.1	Stöchiometrische Zusammensetzung	1013
9.1.2	Reinheitsanforderungen	1014
9.2	Synthesegaserzeugung	1016
9.2.1	Ausgangsstoffe	1019
9.2.2	Reformierungsprozesse	1023
9.2.3	Konditionierungsprozesse	1028
9.3	Synthesen	1033
9.3.1	Methan-Synthese	1034
9.3.2	Fischer-Tropsch-Synthese	1042
9.3.3	Methanol-Synthese	1054
9.3.4	Gemischte Alkohol-Synthese	1063
9.3.5	DME-Synthese	1066
9.4	Weiterverarbeitung	1069
9.4.1	Hydrocracken	1069
9.4.2	Alkohol zu Kohlenwasserstoffen	1070
9.4.3	Methanol-Teildehydratisierung	1075
9.4.4	OME-Prozesse	1076
9.5	Upgrading	1078
9.5.1	Hydrierung	1078
9.5.2	Hydroisomerisierung	1079
9.5.3	Destillation / Rektifikation	1080
9.6	Prozessbeispiele	1084
9.6.1	Bio-SNG über Biomasse-Gaserzeugung	1084
9.6.2	FT-Kraftstoffe über Biomasse-Gaserzeugung	1087
9.6.3	Methanol-to-Hydrocarbons aus der Biogasreformierung	1089
	Literatur	1092
	Stichwortverzeichnis	1101

Die Autoren

Roman Adam, M.Sc. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Leipzig, Deutschland

Dr. Jörn Appelt Institut für Holzforschung, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Hamburg, Deutschland

Dipl.-Ing. Dr. techn. Florian Benedikt Institut für Verfahrens- und Energietechnik (IVET), Universität für Bodenkultur (BOKU), Wien, Österreich

Stefan Bube, M.Sc. Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland

Dr.-Ing. Sebastian Fendt Lehrstuhl für Energiesysteme, Technische Universität München (TUM), München, Deutschland

Dr.-Ing. Sabine Fleck Institut für Technische Chemie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland

Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Fuchs Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Technische Universität Wien (TU Wien), Wien, Österreich

Prof. Dr. Matthias Gaderer Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit, Technische Universität München (TUM), Straubing, Deutschland

Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Gölles BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH, Graz, Österreich

Johannes Haimerl, M.Sc. Lehrstuhl für Energiesysteme, Technische Universität München (TUM), München, Deutschland

Dr. Hans Hartmann Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing, Deutschland

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Hofbauer Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Technische Universität Wien (TU Wien), Wien, Österreich

Dr. Isabel Höfer-Sanning Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland (heute: Hamburgische Investitions- und Förderbank (IFB), Hamburg, Deutschland)

Dr.-Ing. Theresa Hülsmann Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland (heute: Crespel und Deiters, Ibbenbüren, Deutschland)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland

Prof. Dr. Dr. h.c. Frerich Keil Institut für Chemische Reaktionstechnik, Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland

Dr.-Ing. Marco Klemm Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Leipzig, Deutschland

Dr. Daniel Kuptz Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing, Deutschland

Dr.-Ing. Volker Lenz Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Leipzig, Deutschland

Dr. Dietrich Meier Institut für Holzforschung, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Hamburg, Deutschland (heute: thermophil international, Hamburg, Deutschland)

Dr.-Ing. Ulf Neuling Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland (heute: Agora Verkehrswende, Berlin, Deutschland)

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christoph Pfeifer Institut für Verfahrens- und Energietechnik (IVET), Universität für Bodenkultur (BOKU), Wien, Österreich

Dr. Marvin Scherzinger Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland

Theresa Siegmund, M.Sc. Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff Lehrstuhl für Energiesysteme, Technische Universität München (TUM), München, Deutschland

Prof. Dr. Frédéric Vogel Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz, Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Hochschule für Technik, Windisch, Schweiz

Steffen Voß, M.Sc. Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland

Tjerk Zitscher, M.Sc. Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg (TUHH), Hamburg, Deutschland



Einleitung und Zielsetzung

1

Martin Kaltschmitt, Hermann Hofbauer und Volker Lenz

Die auf der Erde insgesamt nutzbaren Energieströme entspringen drei grundsätzlich unterschiedlichen primären Energiequellen. Dies sind die Sonnenenergie, die Erdwärme sowie die Energie aus der Massenanziehung und der Bewegung von Himmelskörpern, aus der die Gezeitenenergie resultiert. Dabei ist die von der Sonne eingestrahlte Energie mit Abstand die größte Quelle des regenerativen Energieangebots. Es folgen die Erdwärme, die im Vergleich dazu eine deutlich geringere flächenbezogene Energiedichte (z. B. die auf einen Quadratmeter Erdoberfläche bezogene Energiemenge im Jahresverlauf) hat, und die Gezeitenenergie, die – bezogen auf die im Energiesystem „Erde“ umgesetzte Energie – die mit Abstand geringste Bedeutung hat.

Aus diesen drei Quellen wird durch verschiedene natürliche Umwandlungen innerhalb der Erdatmosphäre eine Reihe sehr unterschiedlicher weiterer Energieströme hervorgerufen. So stellen beispielsweise die Windenergie und die Wasserkraft wie auch die Meeresströmungsenergie und die Biomasse umgewandelte Formen der Sonnenenergie dar (Abb. 1.1).

Bei der Biomasse wird die solare Strahlung mithilfe von Pflanzen über den Prozess der Photosynthese in organische Materie umgewandelt (Kapitel 2, Band 1). Biomasse stellt damit eine Form von gespeicherter Sonnenenergie dar, die nachfrageorientiert dann genutzt werden kann, wenn eine entsprechende Energienachfrage gegeben ist. Dies unterscheidet sie grundsätzlich von anderen Optionen der direkten und indirekten Nutzung der Sonnenenergie (z. B. solarthermische Nutzung, Windkraftnutzung). Durch diese natürlicherweise ablaufende Umwandlung der eingestrahlten Sonnenenergie in energiehaltige Materie – und damit eine Wandlung von Strahlungsenergie in gespeicherte chemische Energie – unterliegt die Biomasse keinen Angebotsschwankungen innerhalb vergleichsweise kurzer Zeiträume mehr, wie es beispielsweise bei der Windenergie oder der Solar-

Martin Kaltschmitt, Hamburg, Deutschland
Hermann Hofbauer, Wien, Österreich
Volker Lenz, Leipzig, Deutschland

© Der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2024

M. Kaltschmitt, H. Hofbauer, V. Lenz (Hrsg.), *Energie aus Biomasse*, Energie aus Biomasse 2, https://doi.org/10.1007/978-3-658-41216-6_1

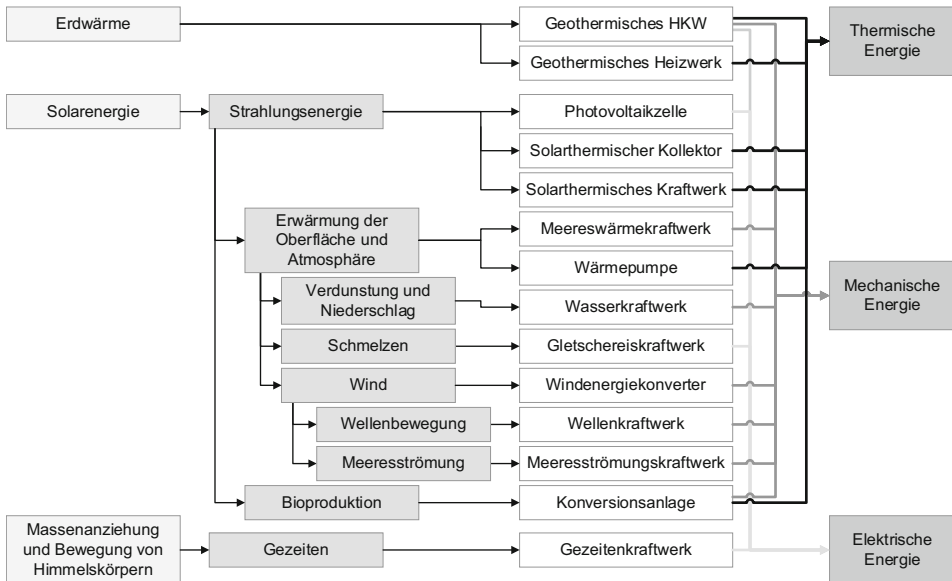


Abb. 1.1 Ausgewählte Möglichkeiten zur Nutzung des regenerativen Energieangebots (links (hellste Graustufe): regenerative Energiequellen; links Mitte (dunkelste Graustufe): natürliche Umwandlung; rechts Mitte (keine Graustufe): technische Umwandlung; rechts (mittlere Graustufe): Endenergie; die Möglichkeiten der Bioenergiebereitstellung befinden sich im unteren Drittel dieser Grafik; nach [1.1])

strahlung der Fall ist; derartige Energieangebotsvariationen erschweren deren technische Nutzbarmachung und erfordern zusätzliche Speicher- und/oder Backup-Systeme, wenn eine Energieversorgung mit einem hohen Maß an Versorgungssicherheit realisiert werden soll.

1.1 Definition „Biomasse“

Unter dem Begriff „Biomasse“ werden sämtliche Stoffe organischer Herkunft (d. h. kohlenstoffhaltige Materie) verstanden. Biomasse beinhaltet damit

- die in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere),
- die daraus resultierenden Rückstände, Nebenprodukte und/ oder Abfälle (z. B. tierische Exkremente),
- abgestorbene (aber noch nicht fossile) Phyto- und Zoomasse (z. B. Stroh) sowie
- im weiteren Sinne alle Stoffe biogenen Ursprungs, die beispielsweise durch eine technische Umwandlung und/oder stoffliche Nutzung entstanden sind bzw. anfallen (z. B. Schwarzlauge, Papier und Zellstoff, Schlachthofabfälle, organische Hausmüllfraktion, Pflanzenöl, Alkohol).

Die Abgrenzung der Biomasse gegenüber den fossilen Energieträgern beginnt beim Torf, dem fossilen Sekundärprodukt der Verrottung. Damit zählt Torf im strengeren Sinn dieser Begriffsabgrenzung nicht mehr zur Biomasse; dies widerspricht der in einigen Ländern (u. a. Schweden, Finnland) üblichen Praxis, wo Torf durchaus zur Biomasse gezählt wird.

Biomasse kann zusätzlich in sogenannte primäre, sekundäre und tertiäre Biomasse unterteilt werden.

- Primäre Biomasse entsteht durch die direkte photosynthetische Ausnutzung der Sonnenenergie; dazu zählen im Wesentlichen die gesamte Pflanzenmasse wie z. B. land- und forstwirtschaftliche Produkte (u. a. Bäume bzw. Holz, Energiegräser bzw. halmgutartige Biomasse) oder pflanzliche Rückstände und Nebenprodukte aus der Land- und Forstwirtschaft sowie der weiterverarbeitenden Industrie (u. a. Stroh, Wald- und Industrierestholz).
- Sekundäre Biomasse bezieht dagegen ihre Energie nur indirekt von der Sonne; sie wird durch den Ab- oder Umbau organischer Substanz in höheren Organismen (z. B. Tiere) gebildet. Zu ihnen zählt z. B. die gesamte Zoomasse und deren Exkremete (z. B. Gülle und Festmist).
- Tertiäre Biomasse entsteht durch einen oder mehrere technische Weiterverarbeitungsschritte der primären und z. T. der sekundären Biomasse. Damit gehören zu dieser Kategorie u. a. Papier und Zellstoff, Holzstühle, Schokolade und Baumwollkleidung.

1.2 Aufbau typischer Bereitstellungsketten

Eine Bereitstellungs- oder Versorgungskette, mit der Energie aus Biomasse bereitgestellt werden kann, umfasst alle Prozesse beginnend mit der Produktion der Energiepflanzen bzw. der Verfügbarmachung von Rückständen, Nebenprodukten oder Abfällen organischer Herkunft bis zur Bereitstellung der End- (z. B. Fernwärme, Strom) bzw. Nutzenergie (z. B. Heizwärme). Sie beschreibt damit den „Lebensweg“ der organischen Stoffe von der Produktion und damit der Primärenergie bis zur Bereitstellung der entsprechenden End- bzw. Nutzenergie (Abb. 1.2); dabei handelt es sich im Wesentlichen um Wärme und/oder Kraft (zu den Begriffsdefinitionen Abb. 1.3 in Kapitel 1, Band 1).

Das Ziel einer derartigen Bereitstellungs- bzw. Versorgungskette besteht darin, eine gegebene, ggf. schwankende End- bzw. Nutzenergienachfrage sicher zu decken und die dazu erforderliche(n) Konversionsanlage(n) mit der jeweils benötigten Menge und Qualität der konkret eingesetzten organischen Stoffe zu versorgen.

Jede Bereitstellungskette besteht aus den Lebenswegabschnitten Biomasseproduktion bzw. -verfügbarmachung, Bereitstellung, Nutzung sowie Verwertung bzw. Entsorgung der anfallenden Rückstände bzw. Abfälle. Jeder einzelne Abschnitt setzt sich im Regelfall wiederum aus zahlreichen Einzelprozessen zusammen. Beispielsweise erfordert die Biomasseernte u. a. ein Abtrennen der Biomasse vom entsprechenden Wurzelwerk, ein Sammeln und Aufkonzentrieren der losen organischen Masse und ggf. ein mechanisches

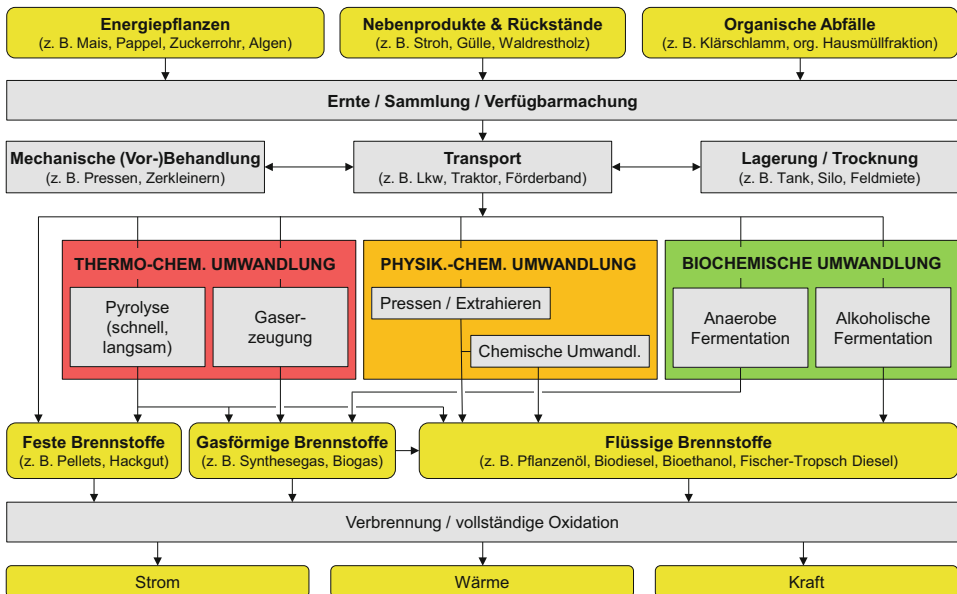


Abb. 1.2 Schematischer Aufbau typischer Bereitstellungsketten zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse (org. organisch; chem. chemisch; physik. physikalisch; Umwandl. Umwandlung; nach [1.2])

Verdichten. Da die verschiedenen Lebenswegabschnitte einer Biomassennutzungskette im Normalfall nicht am gleichen Ort angesiedelt sind, müssen die jeweiligen Entfernungen durch entsprechende Transporte (z. B. mittels Traktor, mithilfe eines Lkw, über Rohrleitungen) überbrückt werden.

Eine bestimmte Bereitstellungskette wird damit letztlich durch die Randbedingungen festgelegt, die von der Biomasseproduktion (Angebotsseite) einerseits und der End- bzw. Nutzenergiebereitstellung (Nachfrageseite) andererseits vorgegeben werden. Weiterhin kommen als zusätzliche wesentliche Bestimmungsgrößen ökonomische, ökologische und technische (sowie regulatorische, soziale und administrative) Randbedingungen hinzu, welche die praktische Umsetzung bzw. Realisierung einer bestimmten Bereitstellungskette signifikant beeinflussen (können). Beispielsweise wird die Wahl der Konversionstechnologie u. a. durch den oder die bereitzustellenden Endenergieträger (z. B. thermische Energie, elektrische Energie) bzw. die entsprechende Nutzenergie (z. B. Wärme, Kraft), daneben aber auch durch die gesetzlichen Umweltschutzvorgaben und das jeweils ökonomisch Machbare sowie lokal Akzeptierbare ganz wesentlich beeinflusst. Zusätzlich kann die erforderliche Entsorgung von Stoffen, die im Verlauf der Bereitstellung und/oder bei der Nutzung anfallen (z. B. ausgefaulte Gülle bei der Biogasgewinnung (Gärrest), Asche bei der Verbrennung von Festbrennstoffen), für eine bestimmte Bereitstellungskette ebenfalls bestimmend sein. Aus den möglichen Entsor-

gungswegen für die entstehenden Abfälle und/oder der Konversionstechnologie leiten sich wiederum Anforderungen an die Eigenschaften der Biomasse ab (z. B. Stückigkeit, Wassergehalt), die durch eine vorherige Aufbereitung und/oder die Bereitstellungstechnik erfüllt werden müssen. Hier ist es u. U. erforderlich, zunächst einen entsprechenden Sekundärenergieträger mit definierten Eigenschaften zu produzieren; dies kann u. a. mit technischen, logistischen, energetischen, ökonomischen und/oder ökologischen Vorteilen verbunden sein. Daneben sind Art (z. B. Holz- oder Halmgutartig) und Qualität (z. B. Wassergehalt, Anteil an Spurenelementen) der verfügbaren Biomasse von Bedeutung; dies gilt auch für den kurz- und längerfristigen zeitlichen Verlauf der Bioenergienachfrage vor dem Hintergrund des jahreszeitlich unterschiedlichen Anfalls der primären, als Energieträger nutzbaren Biomasse. Daraus resultieren wiederum möglicherweise bestimmte Lagernotwendigkeiten; u. U. kann deshalb auch eine natürliche oder sogar technische Trocknung der organischen Masse notwendig werden. Zusätzlich muss die letztlich gefundene Kombination unter den gegebenen Randbedingungen vor Ort ökonomisch tragfähig, genehmigungsfähig sowie gesellschaftlich akzeptabel sein.

1.3 Wandlungsmöglichkeiten in End- bzw. Nutzenergie

Die verfügbare Biomasse kann im Verlauf einer Bereitstellungskette auf sehr unterschiedliche Weise aufgearbeitet und letztlich in die jeweils gewünschte End- bzw. Nutzenergie umgewandelt werden.

Im einfachsten Fall wird beispielsweise Holz (d. h. Lignocellulose-haltige Biomasse) im Anschluss an eine (einfache) mechanische Aufbereitung (u. a. Zerkleinerung zu Stückholz, Herstellung von Holzpellets) direkt in einer (Klein-)Feuerungsanlage verbrannt. Für zahlreiche Anwendungen (z. B. die mobile Kraftbereitstellung im Pkw- oder Lkw-Motor, die Stromerzeugung mit einer Gasturbine) ist es aber sinnvoll oder sogar notwendig, beispielsweise aus der primären Biomasse flüssige oder gasförmige Sekundärenergieträger herzustellen.

Der Umwandlung in Nutzenergie werden somit Aufbereitungs- und/oder Veredelungsprozesse vorgeschaltet, bei denen die Energieträger hinsichtlich einer oder mehrerer der folgenden Eigenschaften aufgewertet werden: Energiedichte, Handhabung, Speicher- und Transporteigenschaften, Umweltverträglichkeit der energetischen Nutzung, Potenzial zur Substitution fossiler Energieträger, Verwertbarkeit von Nebenprodukten und/oder Rückständen.

Bei den Verfahren zur Umwandlung organischer Stoffe in feste, flüssige oder gasförmige Sekundärenergieträger als Zwischenstufe vor der Umwandlung in die letztlich gewünschte End- bzw. Nutzenergie kann zwischen thermo-chemischen, physikalisch-chemischen und biochemischen Veredelungsverfahren unterschieden werden (Abb. 1.2).

1.3.1 Thermo-chemische Umwandlung

Durch thermo-chemische Veredelungsverfahren (z. B. Gaserzeugung, schnelle Pyrolyse (z. B. Flash-Pyrolyse), langsame Pyrolyse (d. h. Holzkohleherstellung, Torrefizierung), hydrothermale Umwandlung) werden feste Bioenergieträger in erster Linie unter dem Einfluss von Wärme – sowie ggf. im Beisein entsprechender Katalysatoren – in feste, flüssige und/oder gasförmige Sekundärenergieträger transformiert. Ziel einer derartigen Umwandlung kann beispielsweise sowohl die Bereitstellung von gut transportfähigen sekundären Energieträgern mit einer hohen Energiedichte als auch – und das ist der primäre Anwendungsfall – von Energieträgern mit klar definierten brennstofftechnischen Eigenschaften sein.

Bei der Gaserzeugung wird Biomasse bei hohen Temperaturen möglichst vollständig in brennbare Gase (d. h. in ein sogenanntes Produktgas) umgewandelt. Dabei wird dem Prozess unterstöchiometrisch ein sauerstoffhaltiges Vergasungsmittel (z. B. Luft, Wasser, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid) zugeführt, durch das u. a. der in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff in Kohlenstoffmonoxid überführt werden kann. Gleichzeitig wird bei autothermen Prozessen durch eine teilweise Verbrennung des Einsatzmaterials die erforderliche Prozesswärme bereitgestellt, damit der endotherme Gaserzeugungsprozess überhaupt stattfinden kann; bei allothermen Prozessen wird die benötigte thermische Energie dem Wandlungsprozess von außen zugeführt. Das entstandene, oft niederkalorische Gas kann in Brennern zur Wärmebereitstellung und u. a. in Gasmotoren oder -turbinen zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Alternativ dazu kann das erzeugte Produktgas durch weitere wärmeinduzierte Umwandlungsschritte auch in flüssige (z. B. Methanol, Fischer-Tropsch-Diesel) oder gasförmige Sekundärenergieträger (z. B. SNG (Synthetic Natural Gas), DME (Dimethylether), Wasserstoff) umgewandelt werden, die dann außer in stationären Anwendungen (z. B. in Blockheizkraftwerken (BHKW) zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung) insbesondere im Verkehrssektor als flüssige bzw. gasförmige Kraftstoffe einsetzbar sind.

Bei der schnellen Pyrolyse, bei der zusätzlich zwischen einer ultraschnellen (Flash-Pyrolyse), einer schnellen und einer mittelschnellen Pyrolyse unterschieden werden kann, werden biogene Festbrennstoffe unter dem kurzzeitigen Einfluss von Wärme mit dem Ziel einer möglichst weitgehenden Maximierung der unmittelbaren Ausbeute an flüssigen Komponenten umgewandelt. Derartigen Verfahren liegt der pyrolytische Abbau der festen Biomasse und damit ihre Zersetzung unter Sauerstoffabschluss bei Temperaturen maximal um die 500 °C zugrunde. Die so u. a. produzierten flüssigen Sekundärenergieträger können nach einer entsprechenden Aufbereitung als Brennstoff in entsprechenden Feuerungsanlagen oder als Treibstoff in Motoren zur Kraft- (u. a. für die Stromerzeugung) bzw. gekoppelten Kraft-Wärme-Bereitstellung und insbesondere im Verkehrssektor zur Deckung der dort gegebenen Energie- bzw. Treibstoffnachfrage eingesetzt werden.

Unter der langsamen Pyrolyse von fester Biomasse wird eine thermo-chemische Umwandlung mit dem Ziel einer möglichst hohen Ausbeute an einem sehr kohlenstoffhaltigen Festbrennstoff mit möglichst klar definierten Eigenschaften (z. B. Holzkohle) ver-

standen; unter bestimmten Prozessbedingungen wird dieser Prozess auch als Verkohlung bezeichnet, da er typischerweise das Ziel verfolgt, beispielsweise Holzkohle (oder eine andere Art von Biokohle) bereitzustellen. Auch dazu wird die feste organische Masse unter einem weitgehenden Sauerstoffabschluss thermisch auf der molekularen Ebene zersetzt. Die erforderliche Prozesswärme wird dabei auch hier häufig durch eine Teilverbrennung des Rohstoffs bzw. eines Teils der Zersetzungsprodukte dieser thermo-chemischen Umwandlung bereitgestellt (typischerweise: Verbrennung der entstandenen permanenten Gase). Die langsame Pyrolyse unterscheidet sich damit hinsichtlich der dabei ablaufenden thermo-chemischen Abbau- bzw. Umwandlungsprozesse nicht grundsätzlich von der schnellen Pyrolyse; die Bedingungen, unter denen diese thermo-chemische Umwandlung hier realisiert wird, werden aber so gesetzt, dass bei den Reaktionsprodukten der Feststoffanteil (hier: Anteil an beispielsweise Holzkohle an dem gesamten Produktspektrum) maximiert und der der flüssigen (und gasförmigen) Komponenten minimiert wird. Die dadurch gewonnene sehr kohlenstoffreiche Biomasse (z. B. Holzkohle) kann anschließend beispielsweise in entsprechenden Anlagen zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden (d. h. thermische Verwertung). Alternativ ist auch eine stoffliche Nutzung möglich (z. B. Aktivkohle).

Wird der thermo-chemische Prozess der langsamen Pyrolyse bei vergleichsweise geringen Temperaturen (ca. 200 °C) und damit unvollständig realisiert, spricht man von einer Torrefizierung. Dadurch kann ein fester Biobrennstoff bereitgestellt werden, der im Vergleich zur Ausgangsbiomasse u. a. eine höhere Energiedichte aufweist und gleichzeitig – aufgrund des wärmeinduziert veränderten molekularen Aufbaus – einfacher vermahlen werden kann; dies kann Vorteile bei einer anschließenden technischen Nutzung haben.

Die genannten thermo-chemischen Umwandlungsoptionen laufen in der Gasatmosphäre ab. Sie können aber auch unter hydrothermalen Bedingungen realisiert werden; in einer derartigen Umgebung können ebenfalls organische Stoffe in die Gasphase überführt, verflüssigt und/oder verkohlt werden. Das Ziel derartiger Umwandlungsprozesse ist es, insbesondere Biomassestoffströme, die bereits mit einem hohen Wasseranteil anfallen (z. B. Klärschlamm, Schlachthofabfälle), in Sekundärenergieträger mit definierten Eigenschaften zu überführen.

1.3.2 Physikalisch-chemische Umwandlung

Zu den Verfahren der physikalisch-chemischen Umwandlung zählen alle Möglichkeiten zur Bereitstellung von Energieträgern auf Pflanzenölbasis. Ausgangsmaterial stellen jeweils ölhaltige Biomassen/Pflanzenkomponenten dar (z. B. Rapssaat, Sonnenblumensaat, Früchte der Ölpalme). Dabei muss zunächst immer die Ölphase von der restlichen Biomasse abgetrennt werden. Beispielsweise kann dies durch ein mechanisches Auspressen realisiert werden, mit dem z. B. bei der Rapssaat ein großer Teil des Rapsöls abgetrennt wird; zurück bleibt der sogenannte Presskuchen, der immer noch bestimmte Ölteile beinhaltet, da allein durch mechanische Pressvorgänge keine vollständige

Entölung der organischen Masse realisiert werden kann. Bei der alternativ oder additiv möglichen Extraktion wird der ölhaltigen Saat oder dem noch ölhaltigen Presskuchen der Ölinhalt daher mithilfe eines Lösemittels entzogen. Öl und Lösemittel bzw. die verbleibende Biomasse und das Lösemittel werden anschließend durch eine Destillation bzw. durch wärmeinduzierte Verdampfungsprozesse getrennt und das Lösemittel rezykliert. Als Feststoff verbleibt dabei das sogenannte Extraktionsschrot, das u. a. stofflich (z. B. als Futtermittel) oder ggf. auch als Festbrennstoff genutzt werden kann. Das gewonnene Pflanzenöl ist in seiner Reinform in pflanzenölauglichen Dieselmotoren und in bestimmten Heiz- bzw. Heizkraftwerken (d. h. Blockheizkraftwerken) als Treib- oder Brennstoff energetisch nutzbar.

Soll ein Einsatz in marktüblichen Dieselmotoren erfolgen bzw. soll ein normenkonformer sogenannter Drop-in-Kraftstoff erzeugt werden, müssen die Eigenschaften des Pflanzenöls an die des handelsüblichen Dieselmotors angenähert bzw. angepasst werden. Dies kann u. a. über eine Umesterung oder eine Hydrierung mit anschließender Isomerisierung realisiert werden. Dabei kann mit der ersteren Option beispielsweise die heute gültige Dieselspezifikation näherungsweise und mit der letzteren Variante vollumfänglich eingehalten werden. Deshalb wird umgeestertes Pflanzenöl üblicherweise nur im einstelligen Prozentbereich zu fossilem Dieselmotors zugemischt und u. a. in Deutschland an den Tankstellen als Mischkraftstoff vermarktet. Demgegenüber kann hydriertes und isomerisiertes Pflanzenöl auch eigenständig die gültigen Kraftstoffspezifikationen einhalten.

1.3.3 Biochemische Umwandlung

Bei den biochemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung der Biomasse in Sekundärenergieträger bzw. in End- oder Nutzenergie mithilfe von Mikroorganismen und damit durch biologische Prozesse.

Zucker-, stärke- und cellulosehaltige Biomasse kann durch eine alkoholische Gärung mithilfe z. B. von Hefen in einer wässrigen Lösung in Ethanol (C_2H_5OH) überführt werden, das anschließend durch eine Destillation bzw. Rektifikation aus der Maische abgetrennt und im Anschluss daran durch eine Absolutierung in Reinform gewonnen werden kann. Ethanol kann dann als Kraft- und Brennstoff in Ottomotoren oder Verbrennungsanlagen zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung eingesetzt werden. Zur Einhaltung der derzeit gültigen Kraftstoffspezifikationen kann Ethanol in Reinform nur als Zumischkomponente zu konventionellem Ottokraftstoff in den heute marktgängigen Motoren eingesetzt werden. Soll ein Drop-in-Kraftstoff erzeugt werden, muss der Alkohol anschließend über eine Dehydrierung, Oligomerisierung und Hydrierung in langkettige Kohlenwasserstoffverbindungen überführt werden, aus denen dann der normenkonforme Kraftstoff abgetrennt werden kann. Ähnlich wie Ethanol können mithilfe von Biokatalysatoren auch andere Alkohole erzeugt und zu einem marktgängigen Kraftstoff weiterverarbeitet werden; ein entsprechendes Beispiel ist Butanol.

Bei der anaeroben Fermentation organischer Stoffe (d.h. dem Biomasseabbau unter Sauerstoffabschluss) wird durch den sukzessiven Abbau organischer Masse durch bestimmte Bakteriengruppen ein wasserdampfgesättigtes Mischgas (Biogas) freigesetzt, das zu etwas mehr als der Hälfte aus Methan (CH_4) besteht (der verbleibende Rest ist hauptsächlich Kohlenstoffdioxid (CO_2)). Es kann – nach einer ggf. notwendigen entsprechenden Reinigung – in Gasbrennern oder Motoren als Energieträger genutzt werden. Alternativ dazu ist auch eine Aufbereitung auf Erdgasqualität möglich mit dem Ziel, das aufbereitete Gas ins vorhandene Erdgasnetz einzuspeisen. So kann es dann zeitlich und räumlich von der Erzeugung entkoppelt zur Energienachfragedeckung im Wärme-, Strom- und/oder Transportsektor eingesetzt werden.

Beim aeroben Abbau wird die Biomasse mit Luftsauerstoff unter Wärmefreisetzung ebenfalls mithilfe von Bakterien oxidiert (Kompostierung). Die dabei auf einem relativ geringen Temperaturniveau frei werdende Wärme kann beispielsweise mithilfe von Wärmepumpen in Form von Niedertemperaturwärme verfügbar gemacht werden; dieser Energiebereitstellungspfad ist aber bisher praktisch bedeutungslos.

1.4 Aufbau und Abgrenzungen

Das Energieangebot der Biomasse ist durch eine große Bandbreite hinsichtlich der Energieträgercharakteristik, der Energiedichte, der potenziell bereitstellbaren Sekundär- oder Endenergieträger und einer Vielzahl weiterer Bestimmungsgrößen gekennzeichnet. Daher muss jede technische Möglichkeit zur Umwandlung in einen Energieträger an die jeweilige Charakteristik der entsprechenden organischen Stoffe (d.h. der jeweiligen Biomasse) angepasst sein. Daraus resultiert eine sehr große Vielzahl möglicher Nutzungsoptionen, -techniken und -systeme.

Diese große Vielfalt und erhebliche Inhomogenität sowohl des biogenen Energieangebots als auch der möglichen Konversionstechniken verursacht methodische Probleme und strukturelle Herausforderungen bei einer systematischen und in sich schlüssigen Darstellung der verschiedenen Optionen. Ein einheitlicher Aufbau bei einer umfassenden Darstellung der gegebenen Möglichkeiten, die allen Optionen adäquat Rechnung trägt und in sich logisch konsequent strukturiert ist, ist deshalb schwierig und im Sinne einer verständlichen Darstellung z. T. nicht möglich und ggf. auch kontraproduktiv.

Dennoch wird in dieser Buchreihe versucht, die verschiedenen Möglichkeiten zur Energiebereitstellung aus Biomasse nach einer weitgehend vergleichbaren Vorgehensweise und Struktur darzustellen und zu diskutieren; dies wird im Folgenden kurz beschrieben. Zur Gewährleistung einer besseren Verständlichkeit und eines klaren sowie nachvollziehbaren Aufbaus kann jedoch von dieser nachfolgend diskutierten prinzipiellen Vorgehensweise ggf. abgewichen werden. Auch gibt es zwingend Inhomogenitäten und Unterschiede in der Darstellungstiefe, da für einige Optionen aufgrund der größeren Marktbedeutung national wie international der Kenntnisstand deutlich weitergehend ist im Vergleich zu Nutzungsvarianten, die bisher nur im Labor und ggf. im Technikum umgesetzt wurden.

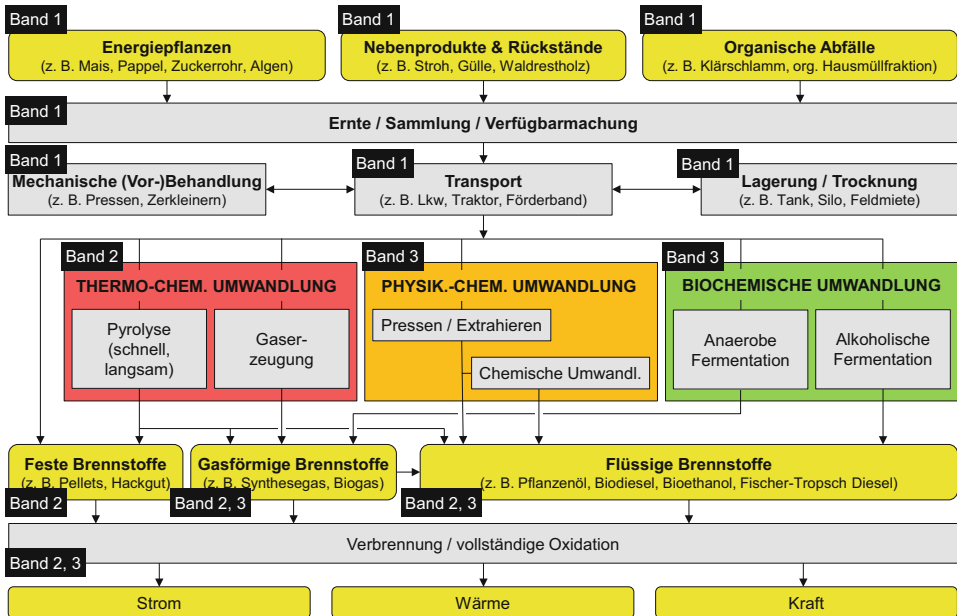


Abb. 1.3 Möglichkeiten der End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse und deren Darstellung innerhalb dieser Buchreihe (abgerundete Kästen Energieträger; eckige Kästen Umwandlungsprozesse; vereinfachte Darstellung; chem. chemisch; physik. physikalisch; Umwandl. Umwandlung; org. organisch)

Der Aufbau dieser Buchreihe (Abb. 1.3) und die inhaltliche Abgrenzung zwischen den einzelnen Bänden bzw. Kapiteln orientieren sich an dem diskutierten Aufbau der Biomasseversorgungsketten bzw. den unterschiedlichen Umwandlungsmöglichkeiten in Sekundärenergieträger (Abb. 1.2).

- Band 1 beschreibt – nach einer Einordnung der Biomasse in das globale und in das europäische Energiesystem – zunächst die biologischen Grundlagen der Biomasseproduktion. Ausgehend davon wird dann auf die der Menschheit – mit einem Schwerpunkt in Mitteleuropa – insgesamt verfügbare Biomasse-Ressourcenbasis eingegangen; dies gilt für Holz aus dem Wald, ein- und mehrjährige Kulturpflanzen aus der landwirtschaftlichen Primärproduktion sowie für die große Gruppe der organischen Rückstände (z. B. Gülle), Nebenprodukte (z. B. Stroh) und Abfälle (z. B. Klärschlamm, Organikanteil der kommunalen Siedlungsabfälle), die in nahezu allen Bereichen unserer Volkswirtschaft im Verlauf der gesamten Wertschöpfungskette in unterschiedlichen Mengen und in verschiedenartigen Zusammensetzungen anfallen. Ausgehend von dieser damit vorliegenden Beschreibung der potenziell verfügbaren Biomasseressourcen wird dann auf die entsprechenden Bereitstellungsketten für wesentliche organische Stoffströme eingegangen; darunter wird hier der Prozessablauf bzw. der „Lebensweg“ der Biomasse

von der Anfall-/Anbaufläche bis zum Eingang in die entsprechende Konversionsanlage verstanden. Danach werden die einzelnen Verfahrensschritte, die im Rahmen derartiger Bereitstellungsketten im Zeitverlauf umgesetzt werden (müssen), diskutiert. Neben den entsprechenden Ernteprozessen inkludiert dies Verfahren und Prozesse zur mechanischen Aufbereitung (u. a. Zerkleinerung, Kompaktierung), Transportprozesse auf dem Land (Straße und ggf. Schiene) und dem Wasser (Binnengewässer und Hochseegewässer) sowie die entsprechend notwendigen Trocknungs- und Lagerungsprozesse. Alle bisher betrachteten Biomassen und deren jeweilige Bereitstellungsketten beziehen sich auf Pflanzen, die auf Land angebaut werden. Da Biomasse jedoch auch im Wasser bzw. in einem sehr feuchten Umfeld produziert werden kann, adressiert ein weiteres Kapitel die Produktion und Bereitstellung von u. a. Mikro- und Makroalgen.

- Band 2 beinhaltet die Grundlagen der thermo-chemischen bzw. wärmeinduzierten Umwandlung fester organischer Stoffe in End- bzw. Nutzenergie. Nach einer vertieften Darstellung des Aufbaus und der Zusammensetzung biogener Festbrennstoffe werden die chemischen (und physikalischen) Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung detailliert diskutiert; da letztlich alle thermo-chemischen Umwandlungsoptionen die verschiedenen Phasen der thermo-chemischen Umwandlung – wenn auch z. T. unter unterschiedlichen Prozessbedingungen und in einer verschiedenartigen zeitlichen Abfolge – umsetzen, beinhaltet dieses Kapitel die wesentliche Basis für alle nachfolgenden Ausführungen. Ausgehend davon wird nun auf die Einordnung und Abgrenzung der jeweiligen thermo-chemischen Umwandlungsverfahren eingegangen; d. h., es wird ein Klassifizierungsschema vorgeschlagen, das eine eindeutige Einordnung und Abgrenzung der diversen wärmeinduzierten Biomasse-Konversionsverfahren erlaubt. Aufbauend darauf wird dann die Verbrennung biogener Festbrennstoffe – einschließlich der Grundlagen der vollständigen Verbrennung und der korrespondierenden Schadstoffbildung, der Anlagentechnik für Klein- und Großanlagen, der jeweiligen Abgasreinigungsoptionen (d. h. Sekundärmaßnahmen) und der korrespondierenden Stromerzeugungsmöglichkeiten – diskutiert. Die Verbrennung stellt nur eine Möglichkeit dar, aus fester Biomasse End- oder Nutzenergie bereitzustellen. Deshalb wird zusätzlich auf die Verfahren der Gaserzeugung, der schnellen und langsamen Pyrolyse sowie der hydrothermalen Biomassewandlung eingegangen. Da die Erzeugung von Treib- oder Kraftstoffen aus biogenen Festbrennstoffen nach wie vor in der Diskussion ist, werden ebenso die verschiedenen Möglichkeiten einer Synthese erörtert – und damit die Konversion beispielsweise von Produktgasen aus der Gaserzeugung in langkettige Kohlenwasserstoffverbindungen.
- Band 3 umfasst im Wesentlichen die Optionen einer biochemischen Biomassewandlung. Dazu werden zunächst die in der Biomasse natürlicherweise vorhandenen Makromolekülgruppen beschrieben. Ausgehend davon wird auf den Aufschluss der organischen Stoffe mithilfe u. a. chemischer, physikalischer oder biologischer Verfahren eingegangen und es werden die grundsätzlich gegebenen Optionen zur Umwandlung der biogenen Makromoleküle auf biokatalytischem Weg in die jeweils gewünschten und ggf. energetisch nutzbaren Moleküle dargestellt. Basierend darauf wird dann auf