
Energie aus Biomasse

Band 1

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 · Karl Stampfer
(Hrsg.)

Energie aus Biomasse

Ressourcen und Bereitstellung

4. Auflage

 Springer Vieweg

Hrsg.

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

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn.
Karl Stampfer
Institut für Forsttechnik
Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)
Wien, Österreich

ISSN 2731-4774

Energie aus Biomasse

ISBN 978-3-658-40827-5

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-40828-2>

ISSN 2731-4782 (electronic)

ISBN 978-3-658-40828-2 (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 klimaverträglichen – 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 Dezember 2023

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 |
| | Hans Hartmann, Hermann Hofbauer, Martin Kaltschmitt, Jana Schultz, Theresa Siegmund, Karl Stampfer und Daniela Thrän | |
| 1.1 | Biomasse als nachwachsender Energieträger | 1 |
| 1.1.1 | Definition „Biomasse“ | 3 |
| 1.1.2 | Aufbau typischer Bereitstellungsketten | 3 |
| 1.1.3 | Wandlungsmöglichkeiten in End- bzw. Nutzenergie | 5 |
| 1.2 | Biomasse im Energiesystem | 9 |
| 1.2.1 | Energie- und Potenzialbegriffe | 10 |
| 1.2.2 | Bioenergie im globalen Energiesystem | 16 |
| 1.2.2.1 | Stand 2022 | 17 |
| 1.2.2.2 | Perspektive 2030 | 37 |
| 1.2.3 | Bioenergie im europäischen Energiesystem | 52 |
| 1.2.3.1 | Stand 2022 | 53 |
| 1.2.3.2 | Perspektive 2030 | 65 |
| 1.3 | Aufbau und Abgrenzungen | 75 |
| 1.3.1 | „Grundlagen der Biomasseproduktion“ | 78 |
| 1.3.2 | „Biomasse aus der Primärproduktion“ | 79 |
| 1.3.3 | „Organische Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle“ | 80 |
| 1.3.4 | „Biomassebereitstellungskonzepte“ | 80 |
| 1.3.5 | „Biomassebereitstellungsprozesse, -verfahren und -konzepte“ | 81 |
| 1.3.6 | „Aquatische Biomasse“ | 82 |
| | Literatur | 82 |
| 2 | Biomasseentstehung | 91 |
| | Iris Lewandowski, Christian Wilhelm und Christian Zörb | |
| 2.1 | Primärproduzenten | 92 |
| 2.1.1 | Aquatische Primärproduzenten | 93 |
| 2.1.2 | Terrestrische Primärproduzenten | 94 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.2 | Höhere Pflanzen | 95 |
| 2.2.1 | Funktionselemente | 96 |
| 2.2.2 | Pflanzenaufbau | 97 |
| 2.2.3 | Meristeme und Seneszenz | 102 |
| 2.3 | Biomasseaufbau und -zusammensetzung | 104 |
| 2.3.1 | Elementare Zusammensetzung | 104 |
| 2.3.2 | Biochemische Zusammensetzung | 109 |
| 2.4 | Primärproduktion | 112 |
| 2.4.1 | Photosynthese | 113 |
| 2.4.2 | Atmung (Dissimilation) | 121 |
| 2.4.3 | Vom Zucker zur Biomasse | 122 |
| 2.4.4 | Wirkungsgrad | 125 |
| 2.4.5 | Natürliche Standortfaktoren | 129 |
| | Literatur | 140 |
| 3 | Forstwirtschaftlich produzierte Biomasse | 143 |
| | Michael Köhl und Thomas Knoke | |
| 3.1 | Forstwirtschaftliche Grundlagen | 143 |
| 3.1.1 | Grundlagen und Grundbegriffe | 144 |
| 3.1.2 | Holzbildung und anatomischer Holzaufbau | 147 |
| 3.1.3 | Holzeigenschaften | 153 |
| 3.1.4 | Wirtschaftlich bedeutende Holzsortimente | 155 |
| 3.2 | Waldbewirtschaftung und Holzproduktion | 161 |
| 3.2.1 | Waldstruktur und -aufbau | 161 |
| 3.2.2 | Waldbau | 163 |
| 3.2.3 | Waldwachstum | 167 |
| 3.2.4 | Anpassung der Wälder an den Klimawandel | 175 |
| 3.2.5 | Zielkonflikte bei der Waldbewirtschaftung | 177 |
| 3.3 | Baumarten | 178 |
| 3.3.1 | Standortansprüche | 178 |
| 3.3.2 | Produktivität | 179 |
| 3.3.3 | Darstellung ausgewählter Baumarten | 180 |
| 3.3.4 | Vorräte, Zuwachs und Nutzung | 187 |
| | Literatur | 190 |
| 4 | Landwirtschaftlich produzierte Biomasse | 195 |
| | Iris Lewandowski | |
| 4.1 | Acker- und pflanzenbauliche Grundlagen | 196 |
| 4.1.1 | Anbausysteme und Fruchtfolgegestaltung | 196 |
| 4.1.2 | Einflussfaktoren im Produktionssystem | 202 |
| 4.1.3 | Zeitliche und räumliche Angebotsunterschiede | 207 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2 | Landwirtschaftlich produzierte Lignocellulose-Pflanzen | 213 |
| 4.2.1 | Schnellwachsende Baumarten | 213 |
| 4.2.2 | Miscanthus | 218 |
| 4.2.3 | Rutenhirse | 225 |
| 4.2.4 | Rohrglanzgras | 228 |
| 4.2.5 | Szarvasigras | 229 |
| 4.2.6 | Futtergräser | 232 |
| 4.2.7 | Durchwachsene Silphie | 236 |
| 4.2.8 | Wildpflanzenmischungen | 238 |
| 4.2.9 | Getreideganzpflanzen | 241 |
| 4.3 | Ölhaltige Pflanzen | 248 |
| 4.3.1 | Raps | 249 |
| 4.3.2 | Sonnenblume | 253 |
| 4.3.3 | Leindotter | 256 |
| 4.4 | Zuckerhaltige Pflanzen | 258 |
| 4.4.1 | Zuckerrübe | 258 |
| 4.4.2 | Zuckerhirse | 262 |
| 4.5 | Stärkehaltige Pflanzen | 265 |
| 4.5.1 | Kartoffel | 265 |
| 4.5.2 | Topinambur | 269 |
| 4.5.3 | Getreide | 272 |
| 4.5.4 | Mais | 275 |
| | Literatur | 280 |
| 5 | Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle | 285 |
| | Daniela Thrän, Martin Kaltschmitt, Theresa Siegmund und Tom Karras | |
| 5.1 | Holzartige Biomasse | 288 |
| 5.1.1 | Landschaftspflegeholz | 289 |
| 5.1.2 | Industrierestholz | 295 |
| 5.1.3 | Altholz | 297 |
| 5.2 | Halmgut- und krautartige Biomasse | 303 |
| 5.2.1 | Stroh | 304 |
| 5.2.2 | Weitere Erntereste aus der Landwirtschaft | 311 |
| 5.2.3 | Halmgüter aus der Landschaftspflege | 312 |
| 5.3 | Sonstige Biomassen | 316 |
| 5.3.1 | Exkrementen aus der Nutztierhaltung | 316 |
| 5.3.2 | Siedlungsabfälle | 318 |
| 5.3.3 | Produktionsspezifische Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle | 323 |
| 5.3.4 | Organisch belastete Abwässer | 329 |
| | Literatur | 333 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 6 | Bereitstellungskonzepte | 343 |
| | Hans Hartmann, Thomas Hoffmann, Martin Kaltschmitt, David Moosmann, Karl Stampfer und Daniela Thrän | |
| 6.1 | Einflussgrößen und Anforderungen | 345 |
| 6.2 | Bereitstellungsketten für Holzbrennstoffe | 360 |
| 6.2.1 | Brennholz (Stückholz) | 363 |
| 6.2.1.1 | Stückholz aus dem Wald | 363 |
| 6.2.1.2 | Stückholz aus Sägerestholz | 366 |
| 6.2.1.3 | Stückholz aus Altholz | 366 |
| 6.2.2 | Holzhackschnitzel (Holzhackgut) | 366 |
| 6.2.2.1 | Waldhackgut | 367 |
| 6.2.2.2 | Hackgut aus Kurzumtriebsplantagen | 374 |
| 6.2.2.3 | Hackgut aus Industrierestholz | 380 |
| 6.2.2.4 | Hackgut von Pflegeflächen | 380 |
| 6.2.3 | Schredderholz | 381 |
| 6.2.4 | Holzpellets und -briketts | 383 |
| 6.2.5 | Rinde | 384 |
| 6.3 | Bereitstellungsketten für Halmgutbrennstoffe | 384 |
| 6.3.1 | Ballen | 387 |
| 6.3.2 | Häckselgut | 391 |
| 6.3.3 | Sonstige Halmgutketten | 393 |
| 6.4 | Bereitstellungsketten für Biogassubstrate | 395 |
| 6.5 | Bereitstellungsketten für Ölsaaten | 398 |
| 6.6 | Bereitstellungsketten für zucker- und stärkehaltige Stoffe | 399 |
| 6.7 | Nachhaltigkeitszertifizierung | 401 |
| | Literatur | 408 |
| 7 | Ernteprozesse | 413 |
| | Hans Hartmann, Thomas Hoffmann, Martin Kaltschmitt und Karl Stampfer | |
| 7.1 | Holzartige Biomasse | 414 |
| 7.1.1 | Holz aus dem Wald | 414 |
| 7.1.1.1 | Manuelles Fällen und Aufarbeiten | 416 |
| 7.1.1.2 | Maschinelles Fällen und Aufarbeiten | 427 |
| 7.1.1.3 | Maschinelles Rücken | 433 |
| 7.1.1.4 | Kombi- und Spezialmaschinen | 439 |
| 7.1.1.5 | Beispielhafte Holzerntesysteme | 441 |
| 7.1.2 | Holz aus Kurzumtriebsplantagen | 446 |
| 7.1.3 | Holz aus der Landschaftspflege | 454 |
| 7.2 | Halmgutartige Biomasse | 455 |
| 7.2.1 | Erntemaschinen | 456 |
| 7.2.1.1 | Mähgut | 456 |
| 7.2.1.2 | Häckselgut | 459 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.2.1.3 | Ballen | 461 |
| 7.2.1.4 | Pellets | 464 |
| 7.2.2 | Berge- bzw. Transportmaschinen | 466 |
| 7.3 | Zucker- und stärkehaltige Pflanzen | 472 |
| 7.3.1 | Getreidekörner | 472 |
| 7.3.2 | Körnermais | 474 |
| 7.3.3 | Zuckerrüben | 475 |
| 7.3.4 | Zuckerhirse | 476 |
| 7.3.5 | Kartoffeln und Topinambur | 476 |
| 7.4 | Ölhaltige Pflanzen | 477 |
| 7.4.1 | Raps | 477 |
| 7.4.2 | Sonnenblumen | 478 |
| | Literatur | 478 |
| 8 | Mechanische Aufbereitungsprozesse | 481 |
| | Roman Adam, Martin Englisch, Hans Hartmann, Hermann Hofbauer, Martin Kaltschmitt, Volker Lenz und Karl Stampfer | |
| 8.1 | Zerkleinerung | 482 |
| 8.1.1 | Einteilung und Prinzipien | 482 |
| 8.1.2 | Brennholzaufbereitung | 486 |
| 8.1.2.1 | Schneiden | 486 |
| 8.1.2.2 | Sägen | 487 |
| 8.1.2.3 | Spalten | 491 |
| 8.1.2.4 | Stapel- und Umschlagshilfen | 503 |
| 8.1.3 | Holzhackgut- und Holzschredderguterzeugung | 505 |
| 8.1.3.1 | Hacker | 505 |
| 8.1.3.2 | Schredder | 517 |
| 8.1.3.3 | Zerspaner | 519 |
| 8.1.4 | Mahlzerkleinerung | 519 |
| 8.1.5 | Ballenauflösung | 523 |
| 8.2 | Trennung von Feststoffgemischen | 524 |
| 8.2.1 | Siebklassierung | 529 |
| 8.2.2 | Windsichtung | 535 |
| 8.2.3 | Weitere Sortierungen | 540 |
| 8.3 | Waschung | 543 |
| 8.4 | Kompaktierung | 545 |
| 8.4.1 | Grundlagen | 546 |
| 8.4.1.1 | Bindungsmechanismen | 546 |
| 8.4.1.2 | Einflussmöglichkeiten | 551 |
| 8.4.2 | Pelletier- und Brikettiertechniken | 568 |
| 8.4.3 | Verfahrenstechnische Einbindung | 579 |
| | Literatur | 590 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 9 | Transportprozesse | 603 |
| | Karl Stampfer, Ferdinand Hönigsberger und Martin Kaltschmitt | |
| 9.1 | Straßentransporte | 605 |
| 9.2 | Schienentransporte | 610 |
| 9.3 | Wassertransporte | 612 |
| | Literatur | 617 |
| 10 | Trocknungsprozesse für biogene Festbrennstoffe | 619 |
| | Hans Hartmann, Jörg B. Ressel, Klaus Richter und Alfred Teischinger | |
| 10.1 | Grundlagen Biomasse-Wassergehalt | 620 |
| 10.2 | Grundlagen Trocknungsvorgang | 627 |
| 10.3 | Natürliche Trocknung | 636 |
| 10.4 | Technische Trocknung | 639 |
| 10.5 | Trocknungseinrichtungen | 644 |
| | 10.5.1 Ventilatoren und Gebläse | 645 |
| | 10.5.2 Trocknersysteme ohne Gutförderung | 647 |
| | 10.5.3 Trocknersysteme mit Gutförderung | 650 |
| | Literatur | 658 |
| 11 | Lagerungsprozesse | 661 |
| | Christiane Dieckmann, Hans Hartmann, Thomas Hoffmann, Martin Kaltschmitt, Thomas Kirisits und Daniel Kuptz | |
| 11.1 | Lagerung biogener Festbrennstoffe | 661 |
| | 11.1.1 Biologische Vorgänge | 663 |
| | 11.1.2 Lagerungsrisiken | 667 |
| | 11.1.3 Lagerungstechniken | 689 |
| | 11.1.3.1 Bodenlagerung | 689 |
| | 11.1.3.2 Hallen (Flachlager) | 691 |
| | 11.1.3.3 Behälter und Silos | 692 |
| | 11.1.3.4 Lagerräume | 695 |
| | 11.1.4 Lagerbeschickung und -entleerung | 697 |
| 11.2 | Lagerung und Konservierung von Biogassubstraten (Silage) | 705 |
| | 11.2.1 Grundlagen und Voraussetzungen | 706 |
| | 11.2.2 Silagetechniken | 711 |
| | 11.2.3 Anwendungen | 714 |
| | Literatur | 715 |
| 12 | Algenbiomasse | 721 |
| | Sinah Kammler, Dorina Strieth und Martin Kaltschmitt | |
| 12.1 | Biologische Grundlagen | 723 |
| | 12.1.1 Ressourcenbasis | 725 |
| | 12.1.2 Wachstumsbestimmende Eigenschaften | 736 |

| | |
|--|------------|
| 12.2 Algenproduktion | 742 |
| 12.2.1 Systemaspekte | 743 |
| 12.2.2 Produktionssysteme | 753 |
| 12.3 Ernte | 774 |
| 12.3.1 Mikroalgen und Cyanobakterien | 774 |
| 12.3.2 Makroalgen | 775 |
| Literatur | 778 |
| Stichwortverzeichnis | 787 |

Die Autoren

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

Dr.-Ing. Christiane Dieckmann BASF Polyurethanes GmbH, Lemförde, Deutschland

Dipl.-Ing. Dr. techn. Martin Englisch BEA Institut für Bioenergie GmbH, Wien, Österreich

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 (TUW), Wien, Österreich

Dr. rer. agr. Thomas Hoffmann Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V., Potsdam, Deutschland

Dipl.-Ing. Ferdinand Hönigsberger Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Wien, Österreich

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

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

Tom Karras, M.Sc. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Leipzig, Deutschland

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Thomas Kirisits Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz (IFFF), Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Wien, Österreich

Prof. Dr. Thomas Knoke Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung, Technische Universität München (TUM), Freising, Deutschland

Prof. Dr. Michael Köhl Weltforstwirtschaft, Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland

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

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

Prof. Dr. Iris Lewandowski Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Fachgebiet Nachwachsende Rohstoffe in der Bioökonomie, Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland

Dr. David Moosmann Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Leipzig, Deutschland

Prof. Dr. Jörg B. Ressel Mechanische Holztechnologie, Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland

Prof. Dr. Klaus Richter Lehrstuhl für Holzwissenschaft, Technische Universität München (TUM), München und Freising, Deutschland

Jana Schultz, M.Sc. 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

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Karl Stampfer Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Wien, Österreich

Dr.-Ing. Dorina Strieth Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Kaiserslautern, Deutschland

Univ.-Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Dr. h. c. Alfred Teischinger Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Tulln an der Donau, Österreich

Prof. Dr.-Ing. Daniela Thrän Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Universität Leipzig, Leipzig, Deutschland

Prof. Dr. Christian Wilhelm Institut für Biologie, Universität Leipzig, Leipzig, Deutschland

Prof. Dr. Christian Zörb Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Fachgebiet Qualität pflanzlicher Erzeugnisse, Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland