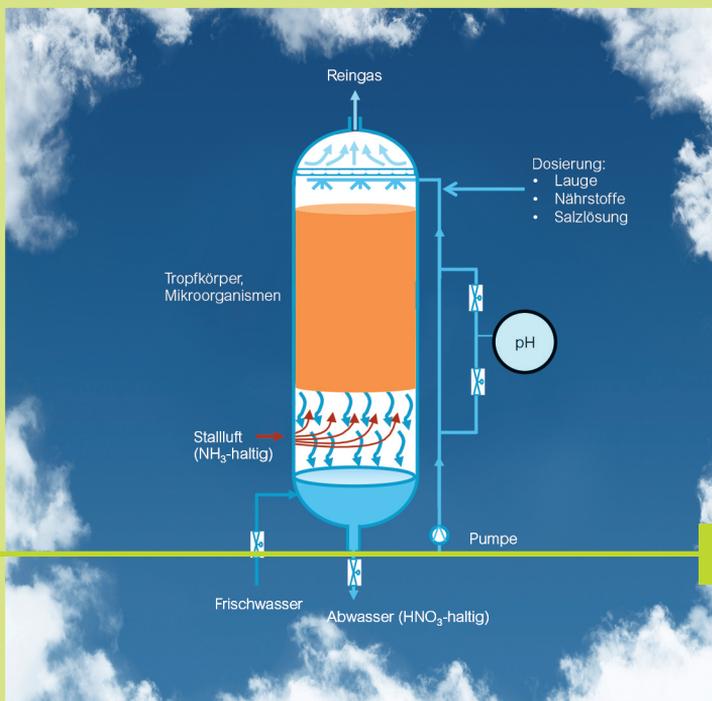


Janet Nagel

# Nachhaltige Verfahrenstechnik

Grundlagen, Techniken, Verfahren und Berechnung



HANSER

Janet Nagel  
**Nachhaltige Verfahrenstechnik**



**Blieben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Janet Nagel

# **Nachhaltige Verfahrenstechnik**

**Grundlagen, Techniken, Verfahren und  
Berechnung**

**HANSER**

Die Autorin: Prof. Dr.-Ing. Janet Nagel lehrt auf dem Fachgebiet Regenerative Energien der Beuth Hochschule für Technik Berlin



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

ISBN 978-3-446-44387-7

E-Book ISBN 978-3-446-44415-7

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen.

Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgend-eine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2015 Carl Hanser Verlag München Wien

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Seitenlayout und Herstellung: Der Buchmacher, Arthur Lenner, München

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, Rebranding, München, Germany

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

# Vorwort

Das Thema Nachhaltigkeit hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Die Diskussion um die Energiewende wie auch die Bereitstellung von Ressourcen zur Deckung des Bedarfs an neuer Technik im Bereich der Nanotechnologie machen dieses Thema allgegenwärtig. Dies stelle ich auch in meinem Fachkreis für „Nachhaltigkeit und Qualitätsmanagement“ bei der Deutschen Gesellschaft für Qualität immer wieder fest.

In den letzten Jahren ging es dabei nicht mehr nur noch um das Thema Umwelt, sondern der Bogen wird sehr viel weiter gespannt; es treten auch soziale und gesellschaftsrelevante Themen mehr in den Vordergrund. Und doch ist das Thema der Schonung der Umwelt und der Ressourcen eine wichtige Basis, denn ohne die Lösung dieser Aufgaben treten die anderen Themen in den Hintergrund.

Die Verfahrenstechnik ist die Wissenschaft, die sich mit all jenen Vorgängen auseinandersetzt, bei denen Stoffe in ihrer Stoffeigenschaft, -zusammensetzung oder auch Stoffart verändert werden. Dabei reicht die Verfahrenstechnik in viele Anwendungsgebiete hinein, z. B. die Lebensmittelindustrie, die Chemische Industrie wie auch die Steine-Erden-Industrie, die Umwelt- und Biotechnologie und viele andere Bereiche bis hin zur Energietechnik.

Die Verfahrenstechnik ist als interdisziplinäres Fachgebiet sehr komplex. Dies verleiht ihr ein hohes Potenzial, um einen wesentlichen Beitrag zur Schaffung einer nachhaltigen Gestaltung von Produktionsabläufen bis hin zur Entsorgung von Produkten zu leisten. Dabei gestaltet die Verfahrenstechnik nicht nur die Abläufe der Herstellung, sondern sie kümmert sich auch um die während der Produktion auftretenden Stoffströme, wie z. B. umweltschädliche Abluftströme, für deren Aufbereitung angemessene Verfahren entwickelt werden müssen.

Wenn es um das Thema „Nachhaltige Verfahrenstechnik“ geht, kommt der Verwendung von Mikroorganismen ebenso wie dem Einsatz nachwachsender Rohstoffe bzw. Einsatzstoffe auf biogener Basis eine wesentliche Rolle zu. Aus diesem Grund widmet sich dieses Buch der Beschreibung von Verfahren, die auf diesen Ausgangsstoffen bzw. die auf der Mitwirkung von Mikroorganismen beruhen. Doch nicht jedes Verfahren, das auf diesen Ansätzen beruht, ist gleich nachhaltig. Um dies bewerten

zu können, findet eine intensive Auseinandersetzung mit dem Thema Nachhaltigkeit statt. Um Diskussionen, die auch in der Gesellschaft geführt werden, Rechnung zu tragen, wird nicht nur auf den ökologischen Aspekt der Nachhaltigkeit eingegrenzt, sondern wird das Thema in seiner vollen Breite vorgestellt.

Aufgrund der momentan intensiv geführten Diskussionen zur Energiewende wird auf das Thema der Energieverfahrenstechnik ein besonderes Augenmerk gelegt. Die Novellierung des EEG (Erneuerbaren Energie Gesetz) fiel mitten in die Ausarbeitung dieses Buchs, so dass die gesetzlichen Änderungen nur eingeschränkt Eingang gefunden haben. Doch auch mit dem neuen EEG und der weiterhin bestehenden Zustimmung zur Energiewende kann gerade die Biogaserzeugung einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der politisch gesetzten Ziele leisten. Es werden zukünftig aufgrund der neuen Nachfrage, hervorgerufen durch die neuen politischen Gegebenheiten, neue Verfahren entwickelt werden müssen. Dieser Trend hat in der Vergangenheit bereits begonnen, was sich an den Entwicklungen in der Abfallbehandlung erkennen lässt. Dort wird die Biogaserzeugung zur Schaffung eines Mehrwertes bei der Behandlung von biologischem bzw. organischem Abfall zukünftig eine immer wichtigere Rolle spielen. Insgesamt ist die Branche der Abfallbehandlung in großem Aufbruch, was in diesem Buch durch einen aktuellen Beitrag belegt wird. Das erzeugte Biogas bzw. Biomethangas kann als ein speicherbares Medium einen wichtigen Beitrag dazu leisten, flexibel den Bedarf an Strom und auch an Wärme zu decken. Die Speicherung des Gases im Erdgasnetz hat Potenzial, das noch weiter ausgebaut werden kann.

Kraftstoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe zur Schonung fossiler Ressourcen sind in Zeiten der „grenzenlosen“ Mobilität natürlich ebenfalls ein wesentliches Thema. Ausschlaggebend wird das Zusammenspiel mit der Automobiltechnik zur Weiterentwicklung bzw. Neuentwicklung von Verfahren sein. Es wird u. a. auf die Politik ankommen, welche Weichen zukünftig gestellt werden.

Auch im Fahrzeugbereich finden Kunststoffe immer mehr Einsatz. In Summe sind sie aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Der Trend zurück zu biologischen Kunststoffen hat auch hier bereits vor längerer Zeit begonnen. Doch sind noch viele Fragen offen, wie die Aspekte der Ressourcenschonung und der Umweltverträglichkeit besser berücksichtigt werden können. Neueste Untersuchungen beschäftigen sich mit Mikroplastik in Meeren, die durch Abrieb oder Verwendung in Kosmetikprodukten, wie Peelings oder Zahnpasten, hervorgerufen werden. Oder denken wir an das Waschen moderner Kleidung aus Kunstfasern aller Art, über das bis zu 2000 Kunstfasern pro Waschgang ins Waschwasser gelangen. Daraus ergeben sich viele Themen, die noch zu bearbeiten sind.

Die Beschäftigung mit Abwasser- und Abluftströmen spielt in der Umweltverfahrenstechnik von jeher eine wichtige Rolle. Da die Abwassertechnologie ein sehr umfangreiches Fachgebiet ist, konzentriert sich dieses Buch auf die Luftreinhaltung auf bio-

logischer Basis. Während diese Technologie früher vorrangig zur Beseitigung von Geruchsstoffen durch Mikroorganismen eingesetzt wurde, werden heute auch immer mehr giftige Stoffe in der Abluft mit dieser Technologie abgebaut.

Zu guter Letzt schauen wir noch auf die Herstellung von sogenannten Bodenhilfsstoffen. Die Wirkweise dieser Bodenhilfsstoffe beruht auf der Aktivität von Mikroorganismen. Eine Beurteilung des Einsatzes von Bodenhilfsstoffen unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit ist Thema laufender Untersuchungen, so dass an dieser Stelle zunächst erste Zwischenergebnisse vorgestellt werden können. Dieses Thema kann zukünftig auf die Verwendung von Gärprodukten anstelle oftmals eingesetzter Steinwollewürfel ausgeweitet werden. Dabei spielen die Auswirkungen sowohl auf die ökologischen Aspekte, aber vor allem auch auf die gesellschaftspolitischen Aspekte, nämlich der Steigerung des Geschmacks, eine wichtige Rolle.

Wie wir sehen können, spielen viele aktuelle Themen in diesem Buch eine wichtige Rolle. Ohne den Austausch und die Unterstützung namhafter Experten wäre dieses Buch nicht zustande gekommen. Alle Personen, die an diesem Buch mitgewirkt haben, haben mir durch ihre Bereitschaft, mir ihre knappe Ressource Zeit zur Verfügung zu stellen und mich durch den fachlichen Austausch und zum Teil durch die Bereitstellung interessanter Bilder an ihrem Wissen teilhaben zu lassen, eine sehr große Ehre erwiesen. All diesen mir wichtigen Persönlichkeiten möchte ich meine größte Hochachtung und Wertschätzung aussprechen. Dabei möchte ich im Besonderen folgenden Menschen sehr herzlich danken:

Ganz zu Beginn möchte ich meinen Eltern für ihre Unterstützung auf meinem bisherigen Weg danken. Im Besonderen danke ich meiner Familie. Ohne ihr Verständnis, aber auch das Interesse und die aktive Beteiligung bei der Bearbeitung und Fertigstellung dieses Buches, hätte ich mich dieser Aufgabe nicht erfolgreich stellen können.

Weiterhin danke ich meinem Verlag, vertreten durch Volker Herzberg, der dieses Thema und die damit verbundene Aufarbeitung als Buchprojekt übernommen hat. Im Besonderen möchte ich Herrn Herzberg für sein stets offenes Ohr danken; durch seine Beiträge gerade bei der Erstellung der Grafiken hat er mich sehr inspiriert.

Einen roten Faden durch die gesamte Arbeit stellte die Zuarbeit von Dr. Silvia Porstmann, Geschäftsführerin der Seramun Diagnostica GmbH, dar. Sie hat umfangreich alle Kapitel gegengelesen, sich der Literatur angenommen und im Besonderen das Kapitel 2, Biologische Grundlagen, redigiert. Ohne ihr Mitwirken hätte dieses Buch einen sehr viel längeren Zeitraum zur Fertigstellung benötigt.

Im Kapitel 3, Thermische Prozesse, stand mir mein früherer Professor für Thermodynamik Prof. Dr.-Ing. Prof. e. h. Dr. h. c. George Tsatsaronis vom Institut für Energietechnik der TU Berlin zur Seite. Durch seinen konstruktiv kritischen Blick war es mir möglich, das notwendige Fachwissen darzulegen.

In enger Diskussion mit Dr. Matthias Plöchl, Geschäftsführer der Bioenergie-Beratung Bornim GmbH, entstand das Kapitel 4 der Energieverfahrenstechnik. Auch hier sind wichtige komplexe Zusammenhänge dargestellt, die durch den fachlichen Exkurs auf ihre Richtigkeit hin geprüft wurden.

Im Bereich der ORC Anlagen unterstützten mich Professor Piero Colonna, Professor of Propulsion and Power der Delft University of Technology, und Dr. Wilhelm Althaus vom Fraunhofer-Institut Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) mit hilfreichen Anmerkungen und Beiträgen zu diesem sehr aktuellen Thema.

Sehr intensiv hat sich Andreas Warnstedt, Rhein-Lahn-Kreis Eigenbetrieb Abfallwirtschaft, mit dem Thema der biologischen Abfallbehandlung im Kapitel 5 beschäftigt. Er gab mir wichtige Impulse zur Darstellung des Themas. Durch die Diskussion und die Beiträge von ihm wie auch von Herrn Dr. Ketel Ketelsen, Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft und Energietechnik (iba) GmbH, können die aktuellen Entwicklungen in diesem Bereich vorgestellt werden.

Ebenfalls in Kapitel 5 wurde ich von Dr. Ralf Forkmann, Geschäftsführer der TS Umweltanlagenbau GmbH und Jens Oliver Ortlinghaus, Beratender Ingenieur, Labor für innovative Umwelttechnik (Liutec) UGh, intensiv beim Thema der biologischen Abluftbehandlung unterstützt.

Das Kapitel 6 „Bioverfahrenstechnik“ mit dem Thema der Biokunststoffe wurde durch das Vertrauen und die intensive Zuarbeit von Kollegen Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres, Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe der Hochschule Hannover (IfBB), geprägt. Durch die Unterstützung bei der thematischen Auseinandersetzung mit diesem Thema als auch die Bereitstellung von Grafiken aus seinem aktuellen Buch „H.-J. Endres, A. Siebert-Raths: Technische Biopolymere“ konnte dieses Kapitel fachlich abgerundet werden.

Beim Thema Bodenhilfsstoffe in Kapitel 6 wurde ich von Dr. Helmut Junge, Geschäftsführer der ABiTEP GmbH, und seinem Produktionsleiter Dipl. Ing. Oliver Mucha, unterstützt. Das Interesse am Thema Nachhaltigkeit führte bei der ABiTEP GmbH zu umfangreichen Investitionen für eine Einsparung von Ressourcen im Produktionsprozess von Bodenhilfsstoffen.

Meinen Lesern wünsche ich nun viel fachlichen Input und eine interessante Auseinandersetzung mit dem komplexen Thema der nachhaltigen Verfahrenstechnik. Ich hoffe, dass dieses Buch dazu beitragen kann, das Bewusstsein für die zukünftigen Aufgaben für uns als Ingenieure in Richtung eines ganzheitlichen Ansatzes weiter zu steigern, so dass die notwendigen Schritte auch gegangen werden können.

# Inhalt

|   |    |
|---|----|
| <b>Vorwort</b> .....  | V  |
| <b>1 Einführung</b> .....                                       | 1  |
| 1.1 Nachhaltigkeit .....  | 3  |
| 1.2 Möglichkeiten der Verfahrenstechnik .....                   | 6  |
| 1.3 Ökobilanzen .....   | 9  |
| 1.3.1 Vorausgehende Definition der Zielstellung .....           | 12 |
| 1.3.2 Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz .....          | 13 |
| 1.3.3 Sachbilanz .....  | 17 |
| 1.3.4 Wirkungsabschätzung .....                                 | 19 |
| 1.3.5 Auswertung .....  | 24 |
| 1.4 Carbon Footprint von Produkten (CFP) .....                  | 25 |
| 1.4.1 Beachtung spezifischer Treibhausgasemissionen .....       | 28 |
| 1.4.2 Berichterstattung des CFP .....                           | 30 |
| 1.5 Nachhaltigkeitsbericht .....                                | 34 |
| 1.6 Ansätze zur Einbeziehung ökonomischer Aspekte .....         | 39 |
| 1.7 Kritische Würdigung der Ansätze .....                       | 46 |
| <b>2 Biologische Grundlagen</b> .....                           | 49 |
| 2.1 Mikroorganismen .....                                       | 49 |
| 2.1.1 Klassifizierung von Mikroorganismen .....                 | 50 |
| 2.1.2 Struktureller Aufbau der Zellen .....                     | 57 |
| 2.1.3 Technischer Einsatz von Bakterien, Hefen und Pilzen ..... | 61 |
| 2.2 Stoffwechsel und Energieumwandlung .....                    | 63 |
| 2.2.1 Thermische Prozesse der Zelle .....                       | 63 |
| 2.2.2 Energiegewinnung im Rahmen des Stoffwechsels .....        | 69 |
| 2.2.3 Die Bedeutung der Stickstoffe und Phosphate .....         | 77 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 2.3      | Anaerobe Prozesse .....  | 80         |
| 2.3.1    | Gärung .....   | 82         |
| 2.3.2    | Methanogenese .....  | 84         |
| 2.4      | Funktionsweise der Enzyme .....  | 86         |
| 2.5      | Reaktionskinetik .....   | 88         |
| 2.5.1    | Wachstum und Vermehrung .....  | 89         |
| 2.5.2    | Wachstumskurve .....   | 91         |
| 2.5.3    | Monod-Kinetik .....  | 94         |
| 2.6      | Modellierung der Reaktionskinetik .....                                  | 96         |
| 2.6.1    | Reaktorfahrweisen .....  | 97         |
| 2.6.2    | Batchreaktor .....   | 99         |
| 2.6.3    | Bilanzierung .....   | 101        |
| 2.7      | Stofftransport .....   | 110        |
| 2.8      | Bioreaktoren .....   | 114        |
| 2.8.1    | Submersreaktoren .....   | 115        |
| 2.8.2    | Bettreaktoren .....  | 123        |
| 2.8.3    | Membranbioreaktor .....  | 127        |
| 2.8.4    | Methoden zur Immobilisierung .....                                       | 128        |
| <b>3</b> | <b>Thermische Prozesse .....</b>   | <b>129</b> |
| 3.1      | Thermodynamische Grundlagen .....  | 132        |
| 3.1.1    | Systeme in der Thermodynamik .....                                       | 132        |
| 3.1.2    | Der Begriff „Zustand“ in der Thermodynamik .....                         | 134        |
| 3.1.3    | Arbeit und Wärme .....   | 138        |
| 3.1.4    | Erster Hauptsatz der Thermodynamik (1. HS) .....                         | 141        |
| 3.1.5    | Thermische Zustandsänderungen .....                                      | 144        |
| 3.1.6    | Energieumwandlung – Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik<br>(2. HS) ..... | 149        |
| 3.1.7    | Kreisprozesse .....  | 153        |
| 3.1.8    | Thermischer Wirkungsgrad .....   | 154        |
| 3.1.9    | Exergie und Anergie .....  | 155        |
| 3.1.10   | Dampfprozesse .....  | 157        |
| 3.2      | Konzepte zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) .....                            | 164        |
| 3.2.1    | Blockheizkraftwerk (BHKW) .....  | 167        |
| 3.2.2    | Gas-Otto-Motoren .....   | 170        |
| 3.2.3    | Zündstrahlmotoren .....  | 172        |
| 3.2.4    | Stirling-Prozess .....   | 173        |
| 3.2.5    | Gasturbinen .....  | 178        |
| 3.2.6    | Organic Rankine-Cycle (ORC) .....  | 187        |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>4</b> | <b>Energieverfahrenstechnik</b>   | 193 |
| 4.1      | Energiegewinnung aus Biomasse   | 202 |
| 4.2      | Ethanolherstellung aus Biomasse   | 203 |
| 4.2.1    | Schritte der Vorbehandlung bei der Ethanolproduktion                            | 204 |
| 4.2.2    | Alkoholische Gärung (Fermentation)  | 210 |
| 4.2.3    | Destillation und Rektifikation  | 214 |
| 4.2.4    | Entwässerung  | 225 |
| 4.2.5    | Aufbereitung des Reststoffs   | 228 |
| 4.2.6    | Bioethanol aus der Sicht der Nachhaltigkeit                                     | 229 |
| 4.3      | Biogas  | 235 |
| 4.3.1    | Mikrobiologischer Prozess   | 236 |
| 4.3.2    | Einsatzstoffe   | 243 |
| 4.3.3    | Lebensbedingungen für Bakterien   | 255 |
| 4.3.4    | Verfahrenskette   | 260 |
| 4.3.5    | Prozessparameter  | 269 |
| 4.3.6    | Biogasreinigung und -aufbereitung   | 275 |
| 4.3.7    | Gärprodukt  | 279 |
| 4.3.8    | Einsatzmöglichkeiten für Biogas   | 281 |
| 4.3.9    | Diskussion der Nachhaltigkeit für die Erzeugung von Biogas                      | 285 |
| <b>5</b> | <b>Umwelttechnik</b>  | 293 |
| 5.1      | Biologische Verfahren zur Luftreinhaltung                                       | 293 |
| 5.1.1    | Biofilter   | 300 |
| 5.1.2    | Biowäscher  | 310 |
| 5.1.3    | Biorieselbettreaktoren  | 314 |
| 5.1.4    | Biomembranverfahren   | 315 |
| 5.1.5    | Nachhaltigkeitsaspekte biologischer Luftreinhaltung                             | 317 |
| 5.2      | Biologische Abfallbehandlung als Element der Kreislaufwirtschaft                | 321 |
| 5.2.1    | Abfallbehandlung – allgemeine Betrachtungen                                     | 321 |
| 5.2.2    | Kompostierung – Prinzipdarstellung  | 325 |
| 5.2.3    | Mieten als Verfahrensvariante   | 331 |
| 5.2.4    | Prozessschritte der MBA   | 332 |
| 5.2.5    | Konzepte zur Nachhaltigkeit Mechanisch-Biologischer<br>Abfallbehandlungsanlagen | 342 |
| <b>6</b> | <b>Bioverfahrenstechnik</b>   | 359 |
| 6.1      | Biokunststoffe  | 359 |
| 6.1.1    | Übersicht Biokunststoffe  | 364 |
| 6.1.2    | Nachwachsende Rohstoffe   | 367 |
| 6.1.3    | Herstellungsprozesse von Biokunststoffen  | 369 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 6.1.4 | Zertifizierung „biobasiert“ .....   | 377 |
| 6.1.5 | Nachhaltigkeit von Biokunststoffen .....  | 378 |
| 6.2   | Bodenhilfsstoffe .....  | 391 |
| 6.2.1 | Pflanzenernährung .....   | 391 |
| 6.2.2 | Bedeutung des Bodens .....  | 395 |
| 6.2.3 | Einsatz spezifischer Mikroorganismen für eine<br>ökoefiziente Pflanzenernährung .....                 | 398 |
| 6.2.4 | Mikrobielle Nutzorganismen .....  | 400 |
| 6.2.5 | Herstellungsprozess eines Bodenhilfsstoffs am Beispiel des<br><i>Bacillus amyloliquefaciens</i> ..... | 402 |
| 6.2.6 | Exkurs: Chemische Dünger .....  | 410 |
| 6.2.7 | Aspekte zur Nachhaltigkeit von Produkten zur Verbesserung<br>des Pflanzenwachstums .....              | 415 |
|       | <b>Literatur</b> .....  | 421 |
|       | <b>Index</b> .....  | 437 |

# 1

## Einführung

Der Mensch befindet sich in einer intensiven Wechselwirkung mit seiner Umwelt. Durch den Einsatz von Technik wird diese stark genutzt. Wichtige Ressourcen werden der Erde entnommen und Abfall- und Reststoffe an sie zurückgegeben. Aus dem Umgang mit der Umwelt gehen drei wesentliche Probleme hervor:

- Ressourcenverbrauch
- Zerstörung von Ökosystemen
- Umweltverschmutzung

Diese Probleme sind bereits seit vielen Jahren erkannt und es werden unterschiedliche Maßnahmen zu deren Vermeidung oder Abschwächung eingeleitet, wie z. B. die Einführung des CO<sub>2</sub>-Handels in Europa. Durch diesen Handel sollen Unternehmen motiviert werden, die ökologischen Auswirkungen ihrer Produktion auf die Umwelt zu analysieren und ihre Produktionswege entsprechend umzustellen, wodurch Ressourcen geschont und CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden.

Um die Produktionswege umzustellen, bedarf es neuer Verfahren und Prozesse. Einen wichtigen Beitrag dazu kann die Verfahrenstechnik leisten.

Wie gehören Nachhaltigkeit und Verfahrenstechnik zusammen? Eine erste Bestimmung der beiden Begrifflichkeiten bildet den Einstieg in das Thema.

Der Begriff Nachhaltigkeit wird in Kap. 1.1 vertiefend aufgegriffen. Dieser fasst die drei Bereiche Ökologie, Ökonomie und Soziales zusammen. Ziel für die Zukunft ist es, dass die Unternehmen neben der Betrachtung der Ökonomie auch die Aspekte der Ökologie und vor allem des Sozialen in ihren Fokus nehmen. Durch die Möglichkeit der Erstellung eines Nachhaltigkeitsberichts erhalten Unternehmen z. B. eine Anleitung, worauf in diesem Zusammenhang zu achten ist. Viele große wie kleine Unternehmen in Deutschland sind diesen Weg bereits gegangen, z. B. Großunternehmen wie Audi oder Siemens und kleine Unternehmen wie Märkisches Landbrot sowie die Reederei Riedel. Es wären an dieser Stelle viele weitere Unternehmen zu nennen. Die Berichte sind oftmals im Internet herunterzuladen. Für viele Unternehmen ist die Ökologie ein zentraler Ausgangspunkt. Bemühungen zur Verbesserung der Produktionsprozesse hin zu umweltfreundlicheren Prozes-

sen bestehen schon seit vielen Jahren. Aus diesem Grund werden in diesem Buch unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit die Schonung von Ressourcen und die Auswirkungen des Lebenszyklus eines Produktes oder eines Produktionsprozesses auf das Ökosystem zentral betrachtet.

Das Aufgabengebiet der Verfahrenstechnik beschäftigt sich mit der Stoffumwandlung, -konzentrierung und -abscheidung (s. Kap. 1.2). Dazu werden Prozesse aufgesetzt, in denen ein Stoffgemisch, z. B. durch Temperatur- oder Druckänderung, in einen neuen, anderen Stoff bzw. in ein Stoffgemisch umgewandelt wird. Es erfolgt eine Änderung von Stoffart, Stoffeigenschaft und Stoffzusammensetzung. Alle in diesen Prozessen eingesetzten technischen Systeme, wie z. B. Rührwerke oder Kessel, zählen zum Bereich der Verfahrenstechnik. Einen zukunftsorientierten Aspekt bildet die Nutzung von Mikroorganismen, die zur Herstellung neuer Stoffe oder als Ersatz bestehender Stoffe bzw. zum Abbau von Stoffen eingesetzt werden können. Auch der Einsatz nachwachsender Rohstoffe, nicht nur bei der Energieerzeugung, sondern auch in anderen Bereichen, wie der Kunststoffherstellung, ist von hoher Wichtigkeit. Damit setzt die Verfahrenstechnik genau an den Punkten Ressourcenschonung und Entwicklung alternativer Prozesse und Produkte an, die eine positivere Auswirkung auf das Ökosystem besitzen.

Durch die Verbindung der beiden Begrifflichkeiten zu „nachhaltiger Verfahrenstechnik“ wird ein Verständnis für die in diesem Buch erfolgte Eingrenzung auf biologische Prozesse geschaffen. Biologische Verfahren beruhen auf Prinzipien der Ökologie. Diese unterliegen einem Kreislauf. Alles und jedes ist wieder ein Ausgangsstoff für einen anderen Prozess. Abfall, so wie wir ihn kennen, gibt es in natürlichen ökologischen Prozessen nicht. Die Prozesse des Stoffauf- und -abbaus befinden sich in einem ökologischen Gleichgewicht. Durch den Einfluss des Menschen, insbesondere durch den Einsatz von Technik, kann dieses Gleichgewicht deutlich gestört sein.

Für eine Bewertung in Bezug auf Umweltfreundlichkeit, Verbesserung der Klimabilanz, Sicherung der ökonomischen Unternehmensbasis usw. stehen mehrere Ansätze zur Verfügung. Es wurden drei zentrale Bewertungsansätze ausgewählt, die nachfolgend vorgestellt werden. Dazu zählen die Ökobilanz, der Product Carbon Footprint (CO<sub>2</sub>-Fußabdruck - eine Ökobilanz auf Produktebene, welche die CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit die Klimarelevanz der Produktion betrachtet) und der Nachhaltigkeitsbericht. Weiterhin werden Ansätze betrachtet, die die ökonomische Seite beleuchten, wie z. B. das Konzept der Lebenszykluskosten (Life Cycle Costing).

Um die verfahrenstechnischen Prozesse besser zu verstehen, sind einige Grundlagen wichtig, die in den ersten beiden Kapiteln vermittelt werden. Darauf folgt die Beschreibung konkreter Beispiele, in denen die Grundlagen Anwendung finden. Eine Diskussion zur Beantwortung der Frage, ob diese Prozesse nachhaltig sind, schließt die jeweiligen Kapitel ab.

Ziel des Buches ist die Vorstellung von Verfahren, in denen Mikroorganismen wichtiger Bestandteil sind. Die eigentliche Stoffwandlung oder Produktion von Stoffen ist das Ergebnis des Stoffwechsels von Mikroorganismen. Nicht Bestandteil sind gentechnische Veränderungen von Mikroorganismen, obwohl dies heutzutage ebenfalls eine wichtige Rolle spielt. Wenn es um den Aspekt der Nachhaltigkeit geht, ist der Einsatz nachwachsender Rohstoffe ebenfalls relevant. Nachwachsende Rohstoffe geben nur den Betrag an  $\text{CO}_2$  nach Beendigung des Lebenszyklus wieder frei, den sie zuvor beim Wachstum aufgenommen haben. Diese Bilanz ist somit  $\text{CO}_2$ -neutral. Zudem können sie am Ende des Lebenszyklus durch Mikroorganismen abgebaut werden. Nachwachsende Rohstoffe stellen damit einen wichtigen Beitrag auf dem Weg der Verbesserung der Nachhaltigkeit von Prozessen dar. Prozesse, in denen diese Rohstoffe Eingang finden, werden ebenfalls berücksichtigt.

## ■ 1.1 Nachhaltigkeit

Der Begriff der Nachhaltigkeit stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft. Hans Carl von Carlowitz (1645 - 1714), Oberberghauptmann aus Freiberg (Sachsen), hat diesen Begriff geprägt. Er gilt als der Begründer des Prinzips der Nachhaltigkeit. Aufgrund einer drohenden Rohstoffkrise war es sein Ansinnen, das Bewusstsein der Menschen dahin zu lenken, dass unsere Ressourcen auf dem Planeten eine gewisse Begrenztheit haben. 1713 formulierte von Carlowitz erstmals in seinem Werk „*Sylvicultura oeconomica*“: Es solle immer nur so viel Holz geschlagen werden, wie durch planmäßige Aufforstung, durch Säen und Pflanzen nachwachsen könne (von Carlowitz 1713).

Dieser Ansatz wurde 1987 im so genannten Brundtland-Bericht wieder aufgegriffen und für eine breite Anwendung definiert. Dort heißt es, dass die jetzige Generation ihre Bedürfnisse befriedigen soll, ohne die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen (Hinrichsen 1987).

Dieser Gedankenansatz prägt das vorliegende Buch. Nicht nur, wenn es darum geht, fossile und andere Ressourcen einzusparen, sondern auch dann, wenn pflanzliche, nachwachsende Rohstoffe eingesetzt werden. Dies ist der Fall z. B. im Zusammenhang mit der Produktion von Biokunststoffen oder der Bereitstellung von Energie auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Dies gibt dem Ausdruck der Nachhaltigkeit in diesem Buch eine zentrale Bedeutung: Die Produktion ist so ausgerichtet und die Produkte sind so gestaltet, dass sie Ressourcen schonen und Emissionen vermeiden und damit die Klimabilanz verbessern und die Basis für die Gestaltung des Lebens zukünftiger Generationen bilden.

Im deutschen Sprachgebrauch wird der Begriff Nachhaltigkeit überstrapaziert. Oft ist damit gemeint, dass Produkte, Zustände oder auch Prozesse langlebig bzw. mit längerer Wirkung gestaltet sein sollen. So werden z. B. im Buch „Nachhaltigkeit in Training und Beratung“ Methoden und Interventionen vorgestellt, wie Seminarverläufe nachhaltig gestaltet oder wie Trainingstheorien nachhaltiger vermittelt werden können (Keller 2013). Doch im sozialökologischen Kontext ist der Bogen weiter gespannt. Aus den Diskussionen der letzten Jahre, in denen wir merken, welche Auswirkungen unser Handeln hat, werden wir uns bewusst, dass ein Verhalten, wie wir es aus der Vergangenheit kennen, so nicht weitergeführt werden kann.

Im technischen Bereich hat man schon vor langer Zeit erkannt, dass ein Ressourcen-orientiertes Denken die Basis für wirtschaftlichen Erfolg ist. Daraus haben sich in den letzten Jahren drei zentrale Gedankenmodelle etabliert. Neuere Betrachtungen sprechen in diesem Zusammenhang von:

- „cradle to grave“ („von der Wiege bis zur Bahre“). Das Modell geht davon aus, dass im Rahmen der Wertschöpfungskette die Einsatz- oder Ausgangsstoffe bis zu ihrer Entsorgung gelenkt und geleitet werden sollen. Somit wird der gesamte Lebensweg eines Produktes von den Vorketten des Anbaus und der Förderung der Rohstoffe über deren Verarbeitung und den nachfolgenden Einsatz in der Produktion mit anschließendem Transport zum Vertrieb/Großhandel über den Endabnehmer bis zur Produktentsorgung, z. B. auf einer Deponie oder in einer Müllverbrennungsanlage, betrachtet.
- „cradle to gate“ („von der Wiege bis zum Tor“). Dies grenzt den Ansatz „cradle to grave“ dahingehend ein, dass der Betrachtungsrahmen ausgehend von den erforderlichen Vorketten der Rohstoffbeschaffung nur bis zum Fabriktor statt bis zum Lebensende eines Produkts gesetzt wird.
- „cradle to cradle“ („von der Wiege bis zur Wiege“). Durch diesen Gedankenansatz werden neue Räume eröffnet, die im Wiederverwertungsprozess des Recycling bereits aufgegriffen, aber nicht ausreichend weitergedacht wurden. Die bisherigen Bestrebungen sind damit noch zu kurzfristig gedacht. Es wird nicht das Nutzungsende eines Produktes als vermeintliches Ende definiert. Es geht jetzt darum, erst gar keinen Abfall entstehen zu lassen, sondern alles in einer weiteren Wertschöpfung für die Gesellschaft münden zu lassen. Es ist das Bestreben, aus jedem Produkt wieder ein Produkt für den Wertschöpfungskreislauf herzustellen (Klein 2011).

Braungart und McDonough prägen dieses neue Bestreben und entwickelten ein Konzept, indem es um die Ökoeffektivität geht. Ziel ist es, aus gebrauchten Produkten neue Produkte bzw. Ausgangsstoffe entstehen zu lassen, um diese wieder im Wertschöpfungskreislauf einzusetzen (Braungart 2011).

Den skizzierten Ansätzen liegen unterschiedliche Gedankenmodelle zugrunde. Während früher darauf geachtet wurde, dass Produkte ein Lebensende haben, liegt

heute der Fokus darauf, dass Produkte nach ihrer Nutzungsphase nochmals als Produkt dienen sollen. Darauf gründet letztlich auch der Gedanke des Recycling, doch bestehen hier noch weitere Potenziale. Es geht heute darum, in kompletten Kreisläufen zu denken und erst gar keinen Abfall entstehen zu lassen. Dazu werden Produkte so hergestellt, dass alles verwendete Material nach Gebrauch weiterverwendet oder zumindest mit einem weiteren Nutzen für die Gesellschaft ohne große schädliche Auswirkungen auf die Umwelt entsorgt werden kann. Das Wesentliche ist der Nutzen für die Gesellschaft, den das Produkt am Lebensende noch einmal erbringen soll. Eine reine Kompostierung von Stoffen ist in diesem Zusammenhang, wie wir später in Kap 5.7 sehen werden, nicht mehr ausreichend.

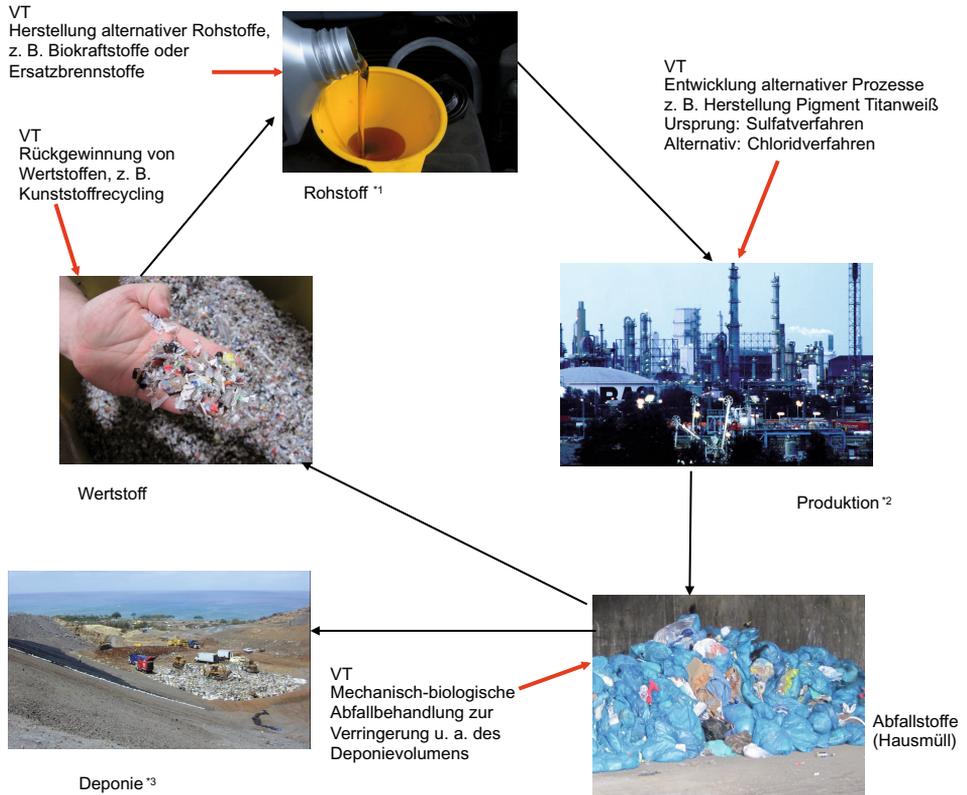
Unabhängig von diesen Gedankenmodellen besteht schon seit vielen Jahren das Bestreben, die Nachhaltigkeit der Produktion bzw. der Produkte zu dokumentieren. Dieses mündete in dem Ansatz der Aufstellung einer Lebenszyklusanalyse, bekannt als Life Cycle Assessment oder Ökobilanz. Dieser Ansatz ermöglicht es Unternehmen, Reduktionspotenziale beim Energieeinsatz zu entdecken und die Quellen sowie die Höhe von Emissionen zu identifizieren. Beides hilft Unternehmen, Kosten zu sparen und Entscheidungen für zukünftige Investitionen fundiert fällen zu können. Über die Zertifizierung nach ISO 14001 (Zertifizierung des Umweltmanagementsystems) erhalten Unternehmen die Möglichkeit, auch Kunden, mögliche Interessenten und die Gesellschaft über ihr Bestreben zu informieren und sich so am Markt eine gute Position bzw. ein gutes Image zu erarbeiten. Auch der Product Carbon Footprint ist ein wichtiges Instrumentarium bei dem Bestreben, Ressourcen zu schonen und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden. Das Modell des Life Cycle Costing (Lebenszykluskostenrechnung) bezieht neben den ökologischen Auswirkungen die Kosten mit ein.

Die Weiterentwicklung in Richtung einer Nachhaltigkeitsanalyse bedeutet, dass nicht mehr nur die ökologischen Aspekte betrachtet werden, sondern auch soziale bzw. gesellschaftspolitische Aspekte in den Fokus rücken. In einem Nachhaltigkeitsbericht können Unternehmen ihre Anstrengungen im Bereich dieser Themenfelder dokumentieren und veröffentlichen. Denken wir an das Beispiel der Produktion pflanzlicher Rohstoffe und Energieträger. In diesem Zusammenhang bedeutet Nachhaltigkeit, ein Gleichgewicht zu finden zwischen ökonomischer Erfordernis (hohe und sichere Biomasseerträge) und ökologischer Verträglichkeit, also dem, was die Natur in der Lage ist, ökologisch verträglich zu geben. Der soziale Aspekt steckt z.B. in neuen Einkommensverhältnissen, Schaffung sozialverträglicher Arbeitsplatzbedingungen wie auch der Mitgestaltung und Teilhabe an Wertschöpfungsprozessen. Durch die Einsparung von Ressourcen und die Verbesserung der Produktion können Kosten eingespart werden. Damit sind alle drei Aspekte der Nachhaltigkeit abgedeckt.

Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze vorgestellt, die die Möglichkeit einer Bewertung der Nachhaltigkeit von Produktion und Produkt erlauben.

## ■ 1.2 Möglichkeiten der Verfahrenstechnik

Die Verfahrenstechnik mit dem Ziel der Stoffumwandlung, -konzentrierung und -abscheidung setzt je nach Produkt bzw. Produktionsprozess an jeder Stelle des Lebensweges eines Produktes ein (s. Bild 1.1).



**Bild 1.1** Verbindung des Lebensweges eines Produktes mit der Verfahrenstechnik (VT);  
<sup>1</sup> (Dvortygirl 2007), <sup>2</sup> (Zinke 2006), <sup>3</sup> (Guinther 2003)

Unter der Voraussetzung biologischer Prozesse bzw. Produkte lassen sich drei wesentliche Kategorien verfahrenstechnischer Ansätze betrachten:

1. Energieverfahrenstechnik
2. Umweltverfahrenstechnik
3. Bioverfahrenstechnik

Dabei stellt sich die Frage, welche Zielstellung biologische Verfahren in diesem Rahmen haben.

- Können konventionelle Verfahren, die zumeist auf chemischer Basis ablaufen, ersetzt werden?
- Kann ein erprobtes biologisches Verfahren beibehalten und optimiert werden?
- Besteht die Möglichkeit, einzelne Inhaltsstoffe eines Produktes durch biologisch besser abbaubare oder weniger toxische Stoffe auf biologischer Basis zu ersetzen?

Eine tiefere Betrachtung macht deutlich, dass „Bio“ allein nicht ausreicht. Werden zum Beispiel große Mengen an Pestiziden eingesetzt, um biogene Stoffe anzubauen, oder werden Regenwälder abgeholzt, um neue Anbauflächen zu schaffen, sind die Begriffe „biologisch“ oder „nachhaltig“ stark in Frage zu stellen. In solchen Fällen verpufft der ökologische Vorsprung nachwachsender Rohstoffe z. B. gegenüber solchen aus der Erdölchemie sehr schnell (ÖKO-TEST 2009).

Eine Bewertung der biologischen Prozesse ist nur möglich, wenn die Eingangsstoffe, der Herstellungsprozess, die Auswirkungen auf die Umwelt bei Nutzung der Produkte sowie die Wege der Entsorgung oder des Recycling bekannt sind.

Dabei ist es nicht immer von zentraler Bedeutung, dass die Produkte durch den Einsatz von Mikroorganismen hergestellt werden, wie dies z. B. beim Biogas als Substitutionsprodukt zu konventionellem Erdgas der Fall ist. Manche Produkte basieren auf biogenen Ausgangsstoffen, wodurch diese nach Beendigung des Lebenszyklus biologisch abgebaut werden können, wie z. B. im Bereich der Biokunststoffe. So werden in der Bio- und Energieverfahrenstechnik Produkte gefertigt, die auf der einen Seite mikrobiell hergestellt sind oder auf der anderen Seite aus in der Natur bestehenden Ausgangsstoffen produziert werden. Grund ist, dass konventionelle Produkte entweder auf fossilen Energieträgern basieren oder biologisch nicht oder nur schlecht abbaubar sind.

Ziele der Umweltverfahrenstechnik sind saubere Luft, sauberes Wasser und sauberer Boden. Diese stellen auch gleichzeitig das Produkt der verfahrenstechnischen Prozesse dar. Mikroorganismen sind ein wichtiger Bestandteil des Reinigungsprozesses. Im Rahmen des Reinigungsprozesses produzieren sie keine weiteren umweltschädlichen Stoffe, die wieder einem neuen aufwendigen Umwandlungs- bzw. Reinigungsprozess unterzogen werden müssen.

Wie sieht das Produkt bei der Beseitigung von Abfall aus? Diese Antwort ist nicht einfach. Die Abfallbehandlung ist eine wichtige Aufgabe der Umweltverfahrenstechnik. Biologische Verfahren ergänzen oder verbessern klassische Verfahren, wie die Müllverbrennung oder -deponierung. Aus früherer Sicht ging es bei der Abfallentsorgung darum, ein gebrauchtes Produkt zu entsorgen und Abfallmengen zu verringern. Aus Sicht der Nachhaltigkeit wird der Weg eingeschlagen, sich von der Abfallvermeidung und Abfallmengenverringerung hin zu einem Produkt aus

Abfall zu bewegen. Durch diesen Weg wird das Ziel verfolgt, dass Produkte am Ende ihres Lebensweges noch einmal einen Mehrwert leisten, indem z. B. ein Energieträger daraus erzeugt werden kann.

Unser Kreislaufgedanke entstammt der Natur. Denn beim Einsatz von Mikroorganismen muss dem Fakt Rechnung getragen werden, dass Mikroorganismen immer mindestens ein erwünschtes und ein „unerwünschtes“ Produkt erzeugen. Im Zusammenwirken mit ihrer Umwelt findet sich jedoch meist ein anderer Organismus, der mit dem „unerwünschten“ Produkt etwas anfangen kann. Ein Beispiel hierfür ist der Abbau von Zucker, wie z. B. Glucose  $C_6H_{12}O_6$ , durch Mikroorganismen. Die Mikroorganismen wandeln im Rahmen ihres Stoffwechsels den Zucker unter anderem in anorganische Stoffe mit dem niedrigsten Energiegehalt, wie  $CO_2$ , um. Dieses „unerwünschte“ Produkt kann z. B. unter Zufuhr von Energie in Form von Sonnenenergie ein Produkt für eine Pflanze sein, die das  $CO_2$  im eigenen Stoffwechsel zum Aufbau organischer Stoffe mit hoher Energie nutzt. Die Basis für diesen Ablauf liegt darin begründet, dass Systemen, Stoffen und Prozessen der Natur immer ein Gleichgewichtszustand mit dem höchsten Energiebetrag innewohnt. Dabei gilt der erste Hauptsatz der Thermodynamik, nach dem Energie nicht verloren geht, sondern nur von einer in eine andere Form gewandelt wird. Dieses Gesetz lässt sich auch auf den Energieaustausch von Mikroorganismen anwenden (s. Kap. 2.2.1). Eine wichtige Voraussetzung sind die passenden Milieu-Bedingungen, die von Mikroorganismus zu Mikroorganismus unterschiedlich sein können, wie z. B. ein anderer pH-Wert (Kunz 1992).

So entsteht der Kreislaufgedanke, der uns trägt. Jedoch müssen auch bei uns wie in der Natur die Rahmenbedingungen stimmen. Denn das „unerwünschte“ Produkt ist, wie beschrieben, für andere technische Prozesse, Organisationen oder Kunden vielleicht erst unter veränderten Randbedingungen interessant.

Im Sinne der Nachhaltigkeit ist es für uns Menschen nicht einfach, einen solchen Kreislauf aufzubauen. Bei jedem Eingriff in die Natur wird das Gleichgewicht durch Stoff- und Energieänderung zerstört. Grundsätzlich ist es eine Frage der Zeit, bis sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Doch sind unsere Eingriffe in die Umwelt so stark und schnell, dass die Natur keine Zeit findet, ein Gleichgewicht einzustellen. In der Zwischenzeit kommt es zu Veränderungen in der Umwelt und es ist die Frage, wie wir Menschen mit den neuen Bedingungen zurechtkommen.

Die Herstellung eines ökologischen und energetischen Gleichgewichtes ist eine wichtige Aufgabe der Verfahrenstechnik, indem sie die notwendigen Prozesse aufsetzt und die ökologisch und energetisch sinnvollen Produkte erzeugt.

Sind die Produkte bzw. Prozesse definiert, kann eine entsprechende Bewertung der Nachhaltigkeit erfolgen. Dazu stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Als Beispiel werden im Folgenden die Ökobilanz, der Product Carbon Footprint und der Nachhaltigkeitsbericht sowie ökologische Ansätze, wie z. B. das Konzept der Lebenszykluskosten, vorgestellt.

## ■ 1.3 Ökobilanzen

Die Ökobilanz ist ein auf die Umwelt bezogenes Instrument. Es dient zur Abschätzung und Bewertung der Einflüsse im Rahmen der Produktion und der folgenden Auswirkungen der Anwendung der Produkte (Nutzungsphase bzw. Lebensweg) auf die Umwelt. Im Englischen wird sie Life Cycle Assessment (LCA) genannt. Prinzipiell können Ökobilanzen auch für Dienstleistungen erstellt werden, wobei in diesem Buch ausschließlich auf Produkte und Prozesse fokussiert wird.

In den Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 werden die Grundsätze und Rahmenbedingungen ebenso wie Anforderungen und Anleitungen zu deren Erstellung gegeben. Im Folgenden wird allgemein nur noch von ISO gesprochen. Der Begriff der Ökobilanz ist nach der ISO 14040 wie folgt definiert (DIN EN ISO 14040 2009):

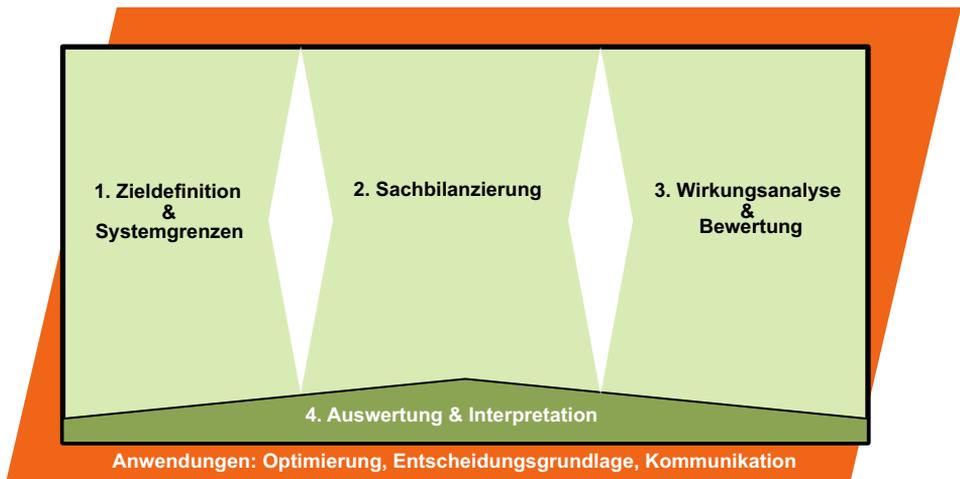
„Die Ökobilanz ist die Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse (Stoff- sowie Energieströme, die in den Prozess mit eingehen und die aus dem Prozess hervorgehen) und der potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges oder eines Abschnitts des Lebensweges.“

Bei der Erstellung der Ökobilanz sind vier Schritte relevant (s. Bild 1.2).

1. Basis ist die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. Hierdurch wird für die folgende Analyse die Systemgrenze festgelegt.
2. Der Zieldefinition folgt die Aufstellung der Sachbilanz. Diese erfasst die Input- und Outputströme.
3. Über die Wirkungsanalyse mit folgender Bewertung werden unterschiedliche Auswirkungen eines Produktes bzw. seiner Produktion auf die Umwelt, den Menschen und andere Aspekte bezogen.
4. Im vierten Schritt erfolgt abschließend die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse.

Auf dem Weg der Aufstellung der Ökobilanzen können neue Aspekte oder Datenlücken auftreten, die es erforderlich machen, die Zieldefinition oder Systemgrenzen neu auszulegen. Da dies auf jeder Stufe des Entwicklungsprozesses möglich ist, liegt ein iteratives Vorgehen zugrunde.

Die Schritte 1 bis 3 sind verbindlich durchzuführen, während Schritt 4 optional ist.



**Bild 1.2** Schritte der Ökobilanz (nach DIN EN ISO 14040 2009)

Beim ersten Schritt wird der grundsätzlichen Frage nachgegangen, was in der Ökobilanz betrachtet werden soll. Dies ist die Basis für die Formulierung einer Systemgrenze. Drei Ansätze sind dabei von Bedeutung:

▪ **Produkt-Ökobilanz:**

Steht das Produkt im Mittelpunkt des Interesses, wird von LCA („Life Cycle Assessment“ = Lebenszyklusanalyse) gesprochen. Hierbei ist es wichtig, alle Energie- und Rohstoffflüsse von der Gewinnung der Rohstoffe über die Herstellung von Hilfs- und Betriebsstoffen, deren Transport zur Produktionsstätte, die Produktion und den Weg der folgenden Entsorgung systematisch zu erfassen. Auch die während der Nutzung des Produktes verursachten Stoff- und Energieströme fließen in die Bilanz ein. Je nach zu beantwortender Fragestellung ist die zugehörige Systemgrenze zu ziehen.

▪ **Prozess-Ökobilanz:**

In manchen Fällen ist der Prozess der Produktion von Bedeutung. Diese Bilanz ermöglicht eine Analyse alternativer Prozesse hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen.

▪ **Betriebs-Ökobilanz:**

Ist es für ein Unternehmen oder eine Organisation wichtig, nur den eigenen Teil der Produktion zu betrachten, dann bildet der „Betriebszaun“ die zugehörige Systemgrenze. Es ist möglich, dass sich darin mehrere Produktionsstränge befinden. Alle Rohstoff- und Energieströme sowie die Anwendung und Entsorgung von Produkten, also alles außerhalb des Unternehmens, werden hier nicht betrachtet.

Die Betriebs-Ökobilanz bildet die Kernbilanz. Um relevante Aspekte außerhalb der Grenzen in die Bilanz einzubeziehen, kann eine sogenannte Komplementär-

Bilanz aufgestellt werden. In dieser werden all jene Prozesse berücksichtigt, die in Drittunternehmen und Haushalten stattfinden und die indirekt auf die Tätigkeit des Unternehmens zurückzuführen sind. Dazu gehören z. B. Personal, Zulieferer von Material oder Dienstleistungen, unternehmensexterne Transporte und Gebrauch bzw. Entsorgung der Produkte.

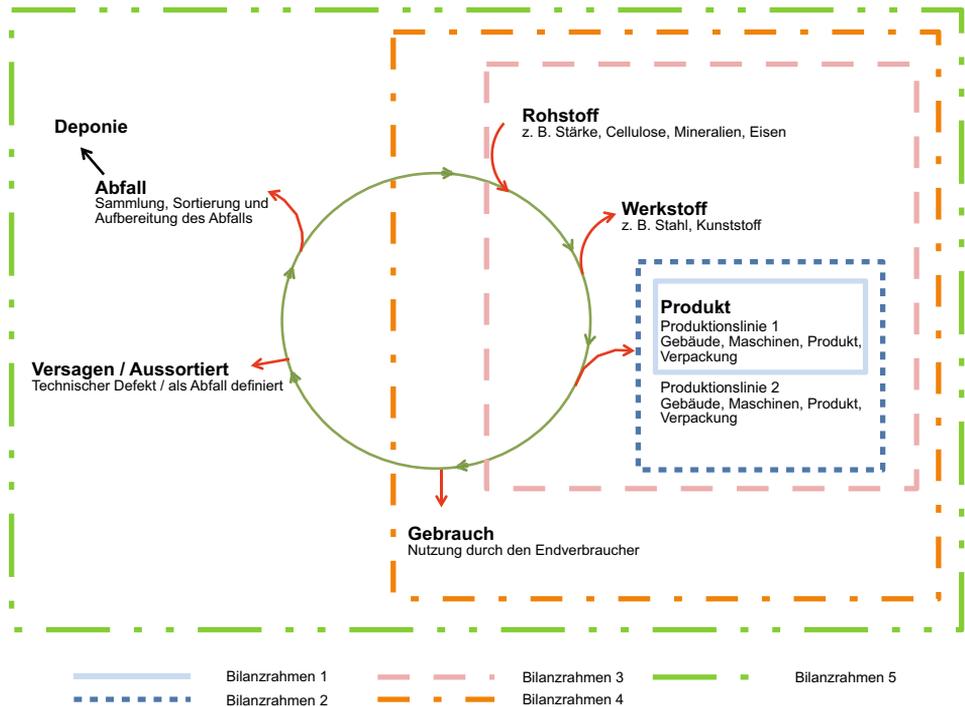
Aus diesen Bilanzrahmen lassen sich zu den in Kap. 1.1 aufgestellten Gedankenmodellen weitere Ansätze formulieren:

- „cradle to user“ – es wird der Weg von der Wiege bis zum Nutzer/Endabnehmer durchlaufen. Der Betrachtungsrahmen zieht sich somit von den Vorketten des Anbaus und der Bereitstellung der Rohstoffe über die Produktion und die Verteilung (Distribution) bis zum Endverbraucher.
- „gate to gate“ – dies stellt quasi eine reine Betriebsbilanz dar. Es werden die Auswirkungen nur innerhalb des eigenen Unternehmens betrachtet. Alles, was davor und danach passiert, ist nicht im Betrachtungsrahmen. Nach diesem Ansatz geht es darum, statt in Produktionsabläufen in Produktionskreisläufen zu denken, so dass kein Abfall mehr entsteht.

Eine grafische Darstellung der unterschiedlichen Bilanzrahmen einer Ökobilanz erleichtert die Vorstellung. Bild 1.3 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Möglichkeiten:

- Bilanzrahmen 1: kennzeichnet die Prozess-Ökobilanz, welche nur innerhalb des Werkszauns um eine einzelne Produktionslinie eines Unternehmens gezogen wird.
- Bilanzrahmen 2: ist eine Erweiterung von 1 auf die Betriebs-Ökobilanz. Sie nimmt den gesamten Produktionsbetrieb mit all seinen Produktionslinien in den Fokus.
- Bilanzrahmen 3: stellt das Prinzip „cradle to gate“ dar. Dieser öffnet den Bilanzrahmen in Richtung Rohstoffbereitstellung, endet jedoch immer noch am Betriebstor.
- Bilanzrahmen 4: wird beginnend von den Vorketten der Rohstoffbereitstellung bis zum Nutzer/Endabnehmer gezogen, „cradle to user“.
- Bilanzrahmen 5: Durch diesen Bilanzrahmen wird die klassische Produkt-Ökobilanz „cradle to grave“ abgebildet, die den gesamten Lebenszyklus eines Produktes bis zur Entsorgung umfasst.

Die Prozess- und Betriebsökobilanz verbindet, dass sie zeitlich eingegrenzt betrachtet werden. Meist wird ein Bilanzjahr zugrunde gelegt.



**Bild 1.3** Darstellung möglicher Bilanzrahmen für Ökobilanzen (nach Endres 2009)

### 1.3.1 Vorausgehende Definition der Zielstellung

Jeder Studie zu einer Ökobilanz geht eine bestimmte Zielstellung voraus. Diese ist auf eine zuvor definierte Zielgruppe abgestimmt. Aus dem Ziel lässt sich der Untersuchungsrahmen (Bilanzrahmen) ableiten. Die Zielstellung muss deutlich, klar und transparent definiert sein. Nur ein klares, transparentes Ziel ermöglicht ein strukturiertes, definiertes Vorgehen. Ebenso können nur dann die Ergebnisse nachvollzogen, interpretiert und klar eingeordnet werden. Aus diesem Grund legt jede Studie zu Beginn die Gründe für die Durchführung der Studie mit dem verfolgten Ziel und der Zielgruppe dar.

Die zu Beginn einer Studie vorgestellten Rahmenbedingungen, unter denen die Erarbeitung der Studie erfolgt, geben die Tiefe und Breite des Untersuchungsrahmens wieder. Folgende Punkte werden darin betrachtet (DIN EN ISO 14044 2006):

- Was ist das zu untersuchende Produktsystem?
- Welche Funktion besitzen das Produktsystem bzw. die Produktsysteme, wenn diese verglichen werden?
- Wie lautet die funktionelle Einheit (die Größe, auf die alle Ergebnisse am Ende bezogen werden, wie z.B. 1 Tonne Mais)?

- Wo liegt die Systemgrenze?
- Welches Allokationsverfahren (Zuteilen von Emissions- und Energieströmen zu der eigentlichen Quelle) wird angewendet?
- Welche Wirkungskategorien werden angewendet und mit welcher Methode erfolgt die Wirkungsabschätzung?
- Welchen Anforderungen unterliegen die Daten?
- Werden bestimmte Annahmen getroffen?
- Welche Einschränkungen sind gemacht worden?
- In welcher Qualität sind die Daten zu erheben?
- Auf welche Art erfolgt die kritische Prüfung?
- Wie ist der Bericht aufgebaut?

### 1.3.2 Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz

Zunächst müssen wir uns die Frage nach dem genauen Ziel einer Ökobilanz stellen, bevor wir eine Ökobilanz zur Analyse heranziehen oder eine eigene erstellen können. Das Ziel ist abhängig vom Auftraggeber bzw. der Zielgruppe. Wird der Auftrag etwa durch eine politische Behörde gestellt, dient eine Ökobilanz dazu, aus ihr Grundlagen für politische Entscheidungen herauszulesen. Ist es hingegen ein Unternehmen, so ist dessen Ziel womöglich, eigene Potenziale in Hinblick auf Ressourcen und Energie zu finden. Dies führt zu unterschiedlichen Bilanzrahmen, Detailierungsgraden und Bewertungsaussagen.

Bei der Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens sind mehrere Faktoren zu beachten, wie die Benennung einer Funktion bzw. funktionellen Einheit oder des Systems, der Systemgrenzen und der darin enthaltenen Stoffströme. Diese werden folgend vorgestellt.

#### Funktion und funktionelle Einheit

Um eine Bewertung durchführen zu können, ist es wichtig, dass der konkrete Bilanzgegenstand oder die Systemfunktion und die Bezugsgröße definiert werden. Dies erfolgt über die Definition einer so genannten funktionellen Einheit, die die untersuchte Funktion des Systems widerspiegelt. So wird bei Prozessen die betrachtete Funktion zugrunde gelegt und bei Bauteilen die funktionelle Einheit. Die funktionelle Einheit als Bezugsgröße beinhaltet den durch das Produktionssystem bereitgestellten Nutzen. Der Nutzen eines Produktionssystems zur Bereitstellung von Biogas als biogener Energieträger ist die Menge des erzeugten Biogases. Somit könnte als funktionelle Einheit z. B. 1 m<sup>3</sup> Biogas definiert werden. Auf diese Größe beziehen sich im weiteren Verlauf der Ökobilanz alle über den betrachteten Lebensweg entstehenden In- und Outputströme. Die funktionelle Einheit ermöglicht

dadurch einen Vergleich unterschiedlicher Ergebnisse von Ökobilanzen (DIN EN ISO 14044 2006, DIN EN ISO 14041 1998).

### **System, Systemgrenzen und Stoffströme**

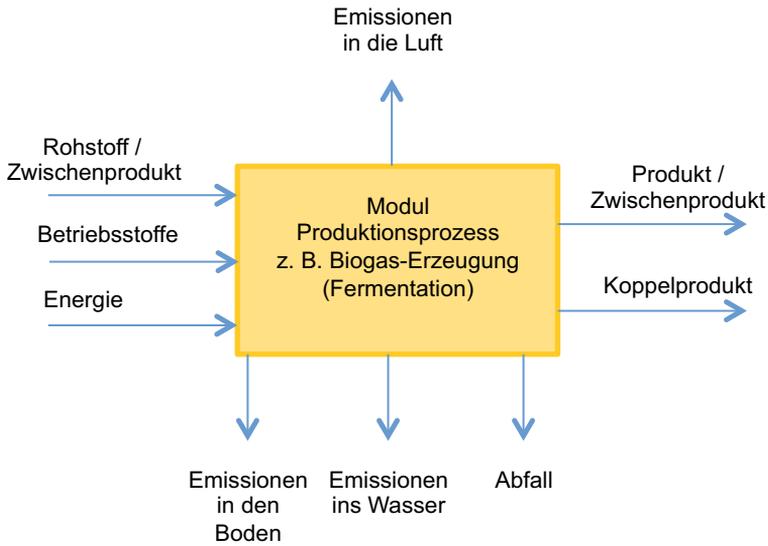
Ein System stellt ein funktionales Gebilde einzelner Elemente dar, die miteinander verbunden sind. Ein System kann entsprechend bilanziert werden. Welche Bilanzrahmen in Bezug auf eine Ökobilanz gezogen werden können, wurde bereits vorgestellt. Bilanzrahmen stellen Systemgrenzen dar, durch die der Bilanzraum festgelegt wird. Systemgrenzen sind imaginär gezogene Grenzlinien, über die im technischen Sinne Energie- und Stoffströme treten können, ohne dass eine Speicherung erfolgt.

Stoffströme setzen sich aus unterschiedlichen Strömen zusammen. Sie treten im Prozess bzw. in der Produktion durch die eingesetzten Materialien, wie Metalle oder Holz, auf. Einen wichtigen Stoffstrom stellt der Transport von Energie bzw. Energieträgern dar. Ebenso werden Stoffströme durch den Einsatz von Betriebsmitteln, wie Schmieröle oder Putzmittel, erzeugt. Emissionen, z. B. Chlorgehalte in der Abluft, aber auch Immissionen, etwa durch Stoffe in der Luft, sind Stoffströme.

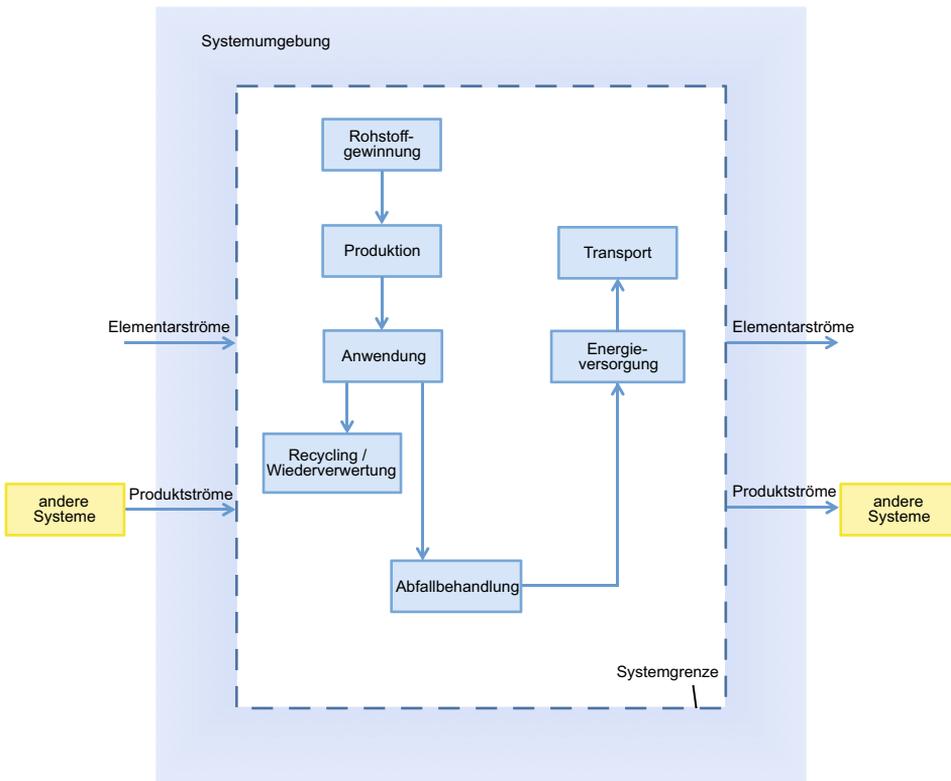
Stoffströme fließen sowohl in einen Prozess hinein wie auch aus diesem heraus. Dabei fallen auch Koppelprodukte an, bei der Weinherstellung zum Beispiel Trester (feste Rückstände), der als Tierfutter verkauft werden kann (oder auch für die Grappaherstellung genutzt wird). Bei der Erzeugung von Strom im Blockheizkraftwerk wird als Koppelprodukt Wärme erzeugt. Auch das muss entsprechend berücksichtigt werden.

Dies bedeutet, dass Systeme in einer Wechselwirkung mit ihrer Umwelt oder einem anderen System stehen. Innerhalb der Systemgrenze finden für den Lebensweg eines Produktes unterschiedliche Wandlungsprozesse, wie Rohstoffgewinnung und Aufbereitung, Produktion usw. statt. Ebenso erfolgen Transportvorgänge. Die einzelnen Wandlungsprozesse oder auch Arbeitsschritte werden als Module bezeichnet und modelliert. Bild 1.4 gibt eine solche Modulbeschreibung anhand eines Fermentationsprozesses wieder, wie er in diesem Buch im Mittelpunkt steht. Für jedes Modul werden dessen individuelle Stoff- und Energieströme aufgestellt. In das Modul hinein gehen die Roh- und Betriebsstoffe, wie beispielsweise Energie. Aus dem Modul hinaus treten Zwischenprodukte gemeinsam mit weiteren Strömen, wie Emissionen in die Luft, das Wasser, den Boden und Abfall. Auch können Koppelprodukte erzeugt werden, welche ebenfalls aus dem Modul heraustreten.

Ein System setzt sich meist aus mehreren solcher Module zusammen, wie dies in Bild 1.5 beispielhaft für den Lebensweg eines Biopolymers als Produkt dargestellt ist.



**Bild 1.4** Beispielhafte Darstellung eines Moduls mit seinen Stoffströmen anhand des Lebensweges eines Biopolymers (nach Endres 2009)



**Bild 1.5** Detaillierte Darstellung eines Produktsystems für eine Ökobilanz mit den zugehörigen Elementarströmen aus Energie- und Stoffstrom (nach Kranert 2010)

Eine sinnvolle Modellierung eines Systems ist so aufgebaut, dass an den Systemgrenzen nur noch Elementarströme auftreten. Elementarströme stellen Stoff- und Energieströme dar, die ohne vorherige technische Aufbereitung durch den Menschen aus der Umwelt entnommen oder an diese ohne Vorbehandlung wieder abgegeben werden können (DIN EN ISO 14044 2006, DIN EN ISO 14041 1998). Zu einem abgehenden unbehandelten Elementarstrom würden z. B. unbehandelte saubere Abluft oder unbehandeltes sauberes Abwasser zählen.

Im Rahmen dieser Auseinandersetzung mit dem System und der zugehörigen Zielstellung muss definiert werden, ob ein Verarbeitungsprozess ohne die zur Verarbeitung erforderlichen Stoff- und Energieströme betrachtet wird oder ob auch die Energie- und Stoffströme mit in die Bilanz einbezogen werden, die z. B. zur Herstellung der Maschine erforderlich waren. Dies gibt die Bilanzierungstiefe der Systemgrenze wieder. Maschinen werden in Hallen produziert, die aus Stahl, Beton und Glas bestehen. Zur Herstellung der Hallen sind ebenfalls Maschinen und weitere Einsatzstoffe erforderlich. An irgendeiner Stelle muss im Rahmen der Ökobilanz transparent eine Grenze gezogen werden. Es sind entsprechende Abschneidekriterien zu definieren, die angeben, welche Stoff-, Energieströme oder welcher Grad von Umweltrelevanz aus der Bilanz ausgeschlossen werden (DIN EN ISO 14044 2006, DIN EN ISO 14040 2009).

### **Koppelprodukte**

Bei einer Produktion wird in manchen Fällen mehr als ein Produkt erzeugt oder es entstehen Nebenprodukte, die so genannten Koppelprodukte. Auch für diese Produkte müssen Regelungen für das Einbinden in eine Ökobilanz gefunden werden. Ein klassisches Beispiel für ein Koppelprodukt ist der Prozess der Kraft-Wärme-Kopplung, z. B. in einem Blockheizkraftwerk oder einer Brennstoffzelle, mit dem Koppelprodukt Wärme, während Elektrizität das eigentliche Zielprodukt ist (Scheub 2003, Erdmann 2010). Ein weiteres typisches Koppelprodukt ist der Treber bei der Bierherstellung, der als Futtermittel eingesetzt wird.

Koppelprodukte werden demnach neben dem gewünschten Produktoutput erzeugt und finden in anderen Prozessen Verwendung. Die in einem solchen Prozess entstehenden Umweltauswirkungen sind nach einem bestimmten Verfahren anteilig allen Koppelprodukten zuzurechnen. Die in dem Prozess anfallenden Abfälle sind keine Koppelprodukte.

Für die Zuordnung von Umweltauswirkungen auf die Koppelprodukte sind zwei Verfahren besonders hervorzuheben:

- **Allokationsverfahren:**

In Allokationsverfahren finden Aufteilungsverfahren Anwendung, in denen die entstehenden Umweltwirkungen nach einem bestimmten Verteilungsschlüssel den einzelnen Koppelprodukten zugeordnet werden. Verteilungsschlüssel kön-

nen sich beispielsweise an den Input-Output-Beziehungen, etwa aufgeteilt nach Energieinhalten, Massen oder Kennwerten, z.B. Marktpreise der Koppelprodukte, orientieren.

- Gutschriftverfahren:  
Kommt es zu einer Substitution eines Produktes einer anderen Produktlinie durch ein bei einem betrachteten Produkt zusätzlich entstandenes Koppelprodukt, werden die mit der anderen Produktlinie verbundenen Umweltauswirkungen vermieden. Diese Umweltauswirkungen werden dem betrachteten Produkt gutgeschrieben.

### 1.3.3 Sachbilanz

Kernaufgabe der Sachbilanz ist die Datensammlung und Berechnung von Input- und Outputströmen. Dies ermöglicht die Bestimmung der Umweltbelastungen, die über den betrachteten Lebensweg bzw. Lebensabschnitt eines Produktes entstehen. Zuvor ist eine Auseinandersetzung mit den einzelnen Arbeitsschritten erfolgt. Arbeitsschritte werden, wie zuvor beschrieben, in Modulen zusammengefasst und festgelegt. Diese können mit ihren prozessspezifischen Stoff- und Energieströmen modelliert werden. Es werden dabei – ausgehend von der Systemgrenze – alle Größen, die in das System ein- oder austreten, bilanziert.

Die Datensammlung umfasst die Luft-, Wasser- und Bodenbelastungen durch Schadstoffe sowie den Verbrauch an Energie, Wasser, Rohstoffen und Flächen. Ebenso werden Belastungen durch Lärm und Abfallströme einbezogen.

Es empfiehlt sich, wie in Bild 1.6 dargestellt, bei der Erstellung der Datensammlung ein strukturiertes Vorgehen zu wählen.

Die zuvor aufgrund des Arbeitsablaufes definierten Module werden in einem ersten Schritt miteinander verbunden. Dabei existieren Stoff- und Energieströme, die zwischen Modulen ausgetauscht werden, und solche, die über die Bilanzgrenze das Gesamtsystem verlassen. Für die folgende Bilanzierung sind die Ströme relevant, die in die Bilanzgrenze eintreten, wie etwa Dieselkraftstoff für den Antrieb eines Traktors als Ressourcenverbrauch für die Bereitstellung von Mais bei der Biogasproduktion. Ebenso werden die Ströme betrachtet, welche die Bilanzgrenze nach außen in die Umwelt verlassen, z.B. CO<sub>2</sub>-Emissionen. Es wird in diesem Zusammenhang von Inputströmen (treten in die Bilanzgrenze ein) und Outputströmen (treten aus der Bilanzgrenze heraus) gesprochen. Diese Ströme werden nun über den gesamten Lebensweg eines Produktes notiert und anschließend aufsummiert. Die Daten werden auf die zuvor gewählte funktionelle Einheit bezogen, z.B. 1 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Biogas.