

Holger Dau · Philipp Kurz  
Marc-Denis Weitze

# Künstliche Photosynthese



Besser als  
die Natur?

 Springer

---

# Technik im Fokus

- Die Buchreihe Technik im Fokus bringt kompakte, gut verständliche Einführungen in ein aktuelles Technik-Thema.
- Jedes Buch konzentriert sich auf die wesentlichen Grundlagen, die Anwendungen der Technologien anhand ausgewählter Beispiele und die absehbaren Trends.
- Es bietet klare Übersichten, Daten und Fakten sowie gezielte Literaturhinweise für die weitergehende Lektüre.

Weitere Bände zur Reihe finden Sie unter <http://www.springer.com/series/8887>

---

Holger Dau • Philipp Kurz  
Marc-Denis Weitze

# Künstliche Photosynthese

Besser als die Natur?

 Springer

Holger Dau  
Fachbereich Physik/Biophysik  
Freie Universität Berlin  
Berlin, Deutschland

Philipp Kurz  
Institut für Anorganische und  
Analytische Chemie  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Freiburg, Deutschland

Marc-Denis Weitze  
acatech – Deutsche Akademie der  
Technikwissenschaften  
München, Deutschland

ISSN 2194-0770

ISSN 2194-0789 (electronic)

Technik im Fokus

ISBN 978-3-662-55717-4

ISBN 978-3-662-55718-1 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-55718-1>

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

Springer

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

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

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.

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort

Ein sonniger, heißer Julitag im Sommer 2015: In einem Tegernseer Café versammeln sich auf Einladung der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften Interessierte, um sich über Künstliche Photosynthese zu informieren. Sie diskutieren Chancen und Risiken einer Technologie, die es bislang nur in den Köpfen einiger Forscher gibt. Sie entwickeln Technikzukünfte, also mögliche Ausprägungen der Künstlichen Photosynthese, folgen narrativen Darstellungen eines Wissenschaftsjournalisten und kommen ins Gespräch.

Im Jahr darauf stellt acatech die Ergebnisse des Projekts „Frühzeitige Einbindung der Öffentlichkeit am Beispiel der Künstlichen Photosynthese“ auf einer Veranstaltung mit der Evangelischen Akademie Tutzing vor [1]. Gleichzeitig wird eine neue Arbeitsgruppe der Wissenschaftsakademien gebildet, die den Forschungsstand, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven zu diesem Thema ausführlich untersuchen und bewerten soll. Nach zwei Jahren langer Diskussionen der gemeinsamen Kommission zu Definitionsfragen, globaler Energieversorgung, Lichtabsorption und Ladungstrennung, zu Katalysereaktionen, Synthetischer Biologie, Effizienzen und ethischen Aspekten stellt die Akademien-AG das Ergebnis ihrer Arbeit in Form einer 79seitigen Stellungnahme vor [2].

Als drei der an dieser Akademien-AG beteiligten Wissenschaftler haben wir für dieses Buch das Material nochmals gesichtet und weitere Quellen erschlossen. Ziel war es, das Thema in einer etwas ausführlicheren Form, als es in einer Stellungnahme möglich ist, zu beleuchten, neue Akzente zu setzen und so hoffentlich einen

noch größeren Kreis an Interessierten (Studierende, Lehrer, Journalisten und weitere) für die Künstliche Photosynthese zu gewinnen. Gleichzeitig möchten wir aus diesem neuen Blickwinkel einen Beitrag zur Diskussion um die Energie- und Rohstoffversorgung der Zukunft liefern.

Unser Dank geht an die Mitglieder der Akademien-AG, insbesondere an die weiteren Mitglieder der Redaktionsgruppe Matthias Beller, Tobias Erb und Bärbel Friedrich. Erst im Rahmen der Diskussionen in dieser Gruppe wurden die verschiedenen Perspektiven auf dieses Thema und die unterschiedlichen Akzentuierungen bereits innerhalb der Wissenschaft deutlich. Wertvolle Anregungen brachten uns darüber hinaus Diskussionsbeiträge von VertreterInnen aus Industrie, Politik und Zivilgesellschaft sowie BesucherInnen öffentlicher Veranstaltungen zum Thema.

Viele der Abbildungen dieses Buchs wurden durch Marie-Luise Grutza, Jens Melder, Luise Mintrop, Jann Sonnenfeld und Daniela Winkler von der Universität Freiburg und Yvonne Zilliges von der Freien Universität Berlin (FUB) bereitgestellt. Wolfgang Goede, Marco Ninow und Christoph Uhlhaas (acatech), Katharina Klingan und Dennis Nürnberg (FUB) sowie Wolfgang Lubitz (MPI für Chemische Energiekonversion) haben das Manuskript gelesen und wertvolle Anregungen zum Text gegeben. Dankeschön!

*Die Autoren*

---

## **Literatur**

- [1] acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): Technik gemeinsam gestalten. Frühzeitige Einbindung der Öffentlichkeit am Beispiel der Künstlichen Photosynthese (acatech IMPULS). Herbert Utz Verlag, München (2016)
- [2] acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): Künstliche Photosynthese. Forschungsstand, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven. München (2018)

---

## Leitfaden zum Buch

Insbesondere für diejenigen, die Bücher nicht von der ersten bis zur letzten Seite lesen, mag der folgende Leitfaden hilfreich sein.

**Kapitel 1:** Energie ist nicht alles, aber ohne Energie läuft gar nichts. Hierbei hat jedoch die Energieversorgung der heutigen technisierten Gesellschaften tief-dunkle Wurzeln. Sie beruht auf der Ausbeutung unterirdischer Lager von Kohle, Erdöl und Erdgas. Das erste Kapitel beschreibt die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und die daraus resultierenden globalen Probleme: i) internationale Sicherheit und ökonomische Stabilität, ii) Gesundheitsschäden, iii) leidvolle und kostspielige „Umweltunfälle“ und iv) Klimawandel. Des Weiteren führt das erste Kapitel in das Energiespeicherproblem ein. Die Speicherung von Wind- und Solarstrom in Batterien ist durch deren geringe Energiespeicherdichte eingeschränkt. Durch Informationen zur problematischen Nutzung fossiler Brennstoffe und dem Energiespeicherproblem motiviert das erste Kapitel die Entwicklung von Alternativen.

**Kapitel 2:** „Wer Visionen hat, sollte zum Arzt gehen“ sagte Ex-Bundeskanzler Helmut Schmidt. Ohne Visionen jedoch bewegt sich nichts. Daher wagt sich das zweite Kapitel an die Visionen einer Energieversorgung jenseits fossiler Brennstoffe. Es schließt die literarischen Visionen von Jules Verne bis hin zu Ian McEwan zur Künstlichen Photosynthese ein. Bei den wissenschaftlichen-technischen Visionen wird der Bogen von den historischen Dachgartenversuchen des italienischen Photochemikers Giacomo Ciamician bis hin zu den nordafrikanischen Solarenergiefeldern im Desertec-Projekt gespannt. Das zweite Kapitel zeigt, dass die Idee der

Künstlichen Photosynthese neben der aktuellen Forschung noch weitere Wurzeln hat. Diese historischen, literarischen und visionär-planerischen Visionen sind erste Bausteine eines Narrativs, das die Entwicklung der Künstlichen Photosynthese begleiten und unterstützen kann und in dem Argumente für oder gegen spezifische Technologien und Anwendungen sichtbar werden. Gleichzeitig warnt Kap. 2 aber auch vor überzogenen Versprechungen und „Hyping“.

**Kapitel 3:** „Wasser, Luft und Licht als Rohstoff“ – das ist das Grundprinzip sowohl der biologischen als auch der Künstlichen Photosynthese. Auf eine naturgeschichtliche Einführung in die Entwicklung der Photosynthese folgt im dritten Kapitel eine Beschreibung der chemischen Schlüsselprozesse. Hieraus leiten sich die Grundprinzipien der Künstlichen Photosynthese ab. Es folgt ein Überblick über die Komplexität des biologischen Systems und ein Glanzlicht der aktuellen Forschung zur biologischen Solarenergienutzung. Neben die Beschreibung der faszinierenden biologischen Organismen tritt eine Diskussion ihrer „Defizite“ – aus einer anthropozentrischen nutzungsorientierten Perspektive. Hierzu wird die für technische Systeme wichtige Größe der Effizienz („solar energy conversion efficiency“) eingeführt und diskutiert.

**Kapitel 4:** Kann die Natur verbessert werden? Die Antwort lautet: Ja – wenn es um die Produktivität von Organismen im Wirtschaften der Menschen geht. Gezüchtete Kühe geben mehr Milch, gezüchtetes Getreide bringt reichere Ernten. Gentechnisch modifizierte Bakterien können heute Medikamente wie Insulin kostengünstig und in großen Mengen produzieren. Freilich waren und sind mit solchen Anwendungen große gesellschaftliche Kontroversen verbunden. Dennoch liegt der Gedanke nahe, gentechnisch modifizierte photosynthetische Algen oder Cyanobakterien zu nutzen, um Brenn- und Wertstoffe in wirtschaftlich relevanten Mengen zu produzieren. Kap. 4 deutet die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen und potenziellen Probleme der modifizierten biologischen Photosynthese durch Mikroorganismen an, die in Photobioreaktoren Licht nutzen.

**Kapitel 5:** Wie gelingt ein nachhaltiger Energiestoff-Kreislauf? Zur Beantwortung dieser Frage wird der Blick auf den großen Zusammenhang von vier Milliarden Jahren Erdgeschichte

gerichtet. Der globale Kohlenstoff-Sauerstoff-Kreislauf hat im Holozän, dem Erdzeitalter der letzten 10.000 Jahre, eine außerordentliche Stabilität der Atmosphäre ermöglicht, gerät aber durch massive Nutzung fossiler Brennstoffe aus der Balance. Ein paralleler, nicht-biologischer Kreislauf durch Künstliche Photosynthese könnte diese Balance wiederherstellen. Anschließend fasst Kap. 5 zusammen, welche „Defizite“ der biologischen Photosynthese vermieden werden müssen, damit eine attraktive Künstliche Photosynthese gelingen kann. In Analogie zur Entwicklung vom Vogelflug zum Flugzeug wird eine „lockere Biomimetik“ vorgeschlagen. Es folgen „Fünf Wege zu nicht-fossilen Brennstoffen“, zusammen mit einer kurzen Einschätzung der jeweiligen Stärken und Schwächen bzw. offenen Fragen.

**Kapitel 6:** Wie genau gelingt nun diese Künstliche Photosynthese durch lockere Biomimetik? Kap. 6 gibt dazu Antworten. Die Kunst der Katalyse steht im Mittelpunkt: Reaktionen werden derart beschleunigt, dass sie nicht in Millionen Jahren sondern in Tausendstel Sekunden ablaufen. Die Natur beherrscht diese Kunst perfekt. Kompliziert aufgebaute und hochgradig spezialisierte Enzyme können diese Aufgaben passgenau wahrnehmen. In der Forschung zur Künstlichen Photosynthese wählen die WissenschaftlerInnen technisch umsetzbare Wege. Hier schlägt die Stunde von Chemie, Physik und Materialforschung. Wie auch das Kap. 3 zur biologischen Photosynthese können Leser mit spezifischen Interesse an naturwissenschaftlichen Fragen das Kap. 6 mit besonderem Gewinn lesen.

**Kapitel 7:** Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Während in Kap. 6 die Teilprozesse der Künstlichen Photosynthese Thema waren, geht es in der aktuellen Forschung und Entwicklung um erste Schritte zu Größerem, d. h. zu Modulen, Geräten und Anlagen der Künstlichen Photosynthese. Jetzt kommen die Ingenieure ins Spiel. Die Möglichkeiten reichen von photokatalytischen Nanopartikeln, die wie Algen im Wasser herumschwimmen, über sogenannte Künstliche Blätter bis hin zu großen Anlagen, in denen Bakterienkulturen Solarstrom für die Synthese nutzen. Zum Abschluss die Frage „Wo soll das alles hinführen?“. Sowohl visionäre „KPh-Module“ als auch die mögliche Rolle der Künstlichen Photosynthese im Energiesystem der Zukunft werden vorgestellt.

**Kapitel 8:** Global denken, lokal kommunizieren. Bei der Künstlichen Photosynthese geht es nicht alleine um Moleküle, Photokatalyse und weitere naturwissenschaftlich-technische Themen, sondern auch um ethische und gesellschaftliche Fragen. Kap. 8 beschreibt, wie man ohne Formeln und technische Details mit interessierten gesellschaftlichen Gruppen hierzu in Dialog treten kann. Science Cafés und Comics können Ansatzpunkte sein, verschiedene Perspektiven zu dem Thema sichtbar zu machen, und können das Anliegen unterstützen, Technik gemeinsam zu gestalten. Im Kontext globaler Klimaveränderungen haben wir es auch mit großen Themen wie globalen Zukunftsperspektiven und Generationengerechtigkeit zu tun. Kap. 8 zeigt, dass auch Gerechtigkeitsfragen ein wichtiges Dialogthema sind, insbesondere wenn es um die Verteilung von Belastungen (Kosten) bei dem Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen geht.

**Kapitel 9:** „Es gibt nichts Gutes, außer: Man tut es.“ Das Epigramm von Erich Kästner spricht eine Herausforderung an, die in den vorhergehenden Kapiteln nur gestreift wurde. Es ist die Frage, ob und wie und wann die Künstliche Photosynthese den Schritt von der Vision zu einem Pfeiler der Energiewende schaffen kann. Unter der Überschrift „Was tun?!“ zeigen sechs Thesen Schritte zur Realisierung der Künstlichen Photosynthese - als ein neuer Pfad in der Energiewende hin zum nachhaltigen Energiesystem der Zukunft. Die Thesen lehnen sich an Empfehlungen der deutschen Wissenschaftsakademien zur Künstlichen Photosynthese an [1] und beziehen sich auf langfristige Strategien, bei deren Gestaltung letztendlich der Dialog zwischen Wissenschaft, Öffentlichkeit, Politik und Wirtschaft entscheidend sein wird.

---

## Literatur

- [1] acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): Künstliche Photosynthese. Forschungsstand, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven. acatech, München (2018)

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Globale Herausforderung: Ersatz fossiler durch regenerative Brennstoffe</b> .....	1
1.1 Fossile Brennstoffe dominieren die Energieversorgung .....	1
1.1.1 Energieversorgung global .....	1
1.1.2 Energieversorgung in Deutschland .....	3
1.2 Warum der Ersatz fossiler Brennstoffe wichtig ist .....	6
1.2.1 Begrenzte Verfügbarkeit und kurzfristige Versorgungsrisiken .....	6
1.2.2 Gesundheitliche und ökologische Schäden .....	11
1.2.3 Umweltzerstörung und ökologische Katastrophen .....	13
1.2.4 Globale Erwärmung durch CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	15
1.3 Das Problem der Speicherung von Wind- und Solarenergie .....	19
Literatur .....	22
<b>2 Die Vision: Nutzung der Solarenergie nach dem Vorbild der Natur</b> .....	25
2.1 Das Potenzial der Solarenergie .....	25
2.2 Die Vision der Künstlichen Photosynthese in Wissenschaft, Literatur, Kunst und Medien .....	26

2.3	„Desertec“: Lehren aus einer vorerst gescheiterten Vision . . . . .	34
2.4	Fazit: Mehr als große Versprechungen und gescheiterte Visionen . . . . .	35
	Literatur . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Photosynthese: Das biologische Vorbild</b> . . . . .	<b>39</b>
3.1	Wasser, Luft und Licht als Rohstoffe . . . . .	39
3.1.1	Nachhaltige Energieversorgung der biologischen Welt . . . . .	39
3.1.2	Summenformel und Schlüsselprozesse . . . . .	43
3.2	Photosynthese im Licht und im Dunkeln . . . . .	47
3.2.1	Architektur der Lichtreaktionen . . . . .	47
3.2.2	Die Dunkelreaktionen . . . . .	51
3.3	Ein Glanzpunkt aktueller Forschung . . . . .	52
3.4	Wie effizient ist die biologische Solarenergienutzung? . . . . .	55
3.4.1	Maximale Effizienz der Photosynthese . . . . .	55
3.4.2	Ursachen der geringen mittleren Effizienz der photosynthetischen Biomassebildung . . . . .	61
3.4.3	Fazit: Effizienz der photosynthetischen Biomassebildung . . . . .	66
	Literatur . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Modifizierte Photosynthese: Neue Algen und Cyanoakterien</b> . . . . .	<b>69</b>
4.1	Photosynthese modifizieren – Warum und Wie? . . . . .	69
4.2	Kleine Algen und Cyanobakterien verwenden . . . . .	70
4.3	Verbesserung der Effizienz . . . . .	72
4.4	Maßgeschneiderte Produkte . . . . .	76
4.5	Fazit: Komplexe Wertstoffe statt Photobiowasserstoff . . . . .	79
	Literatur . . . . .	80

---

<b>5 Nachhaltige Energiekreisläufe: Von der biologischen zur Künstlichen Photosynthese</b> . . . . .	81
5.1 Naturgeschichte und globaler Kohlenstoffkreislauf . . . . .	81
5.2 Vorbild Biologie . . . . .	86
5.2.1 Defizite des biologischen Vorbilds erkennen und vermeiden . . . . .	86
5.2.2 Vom Vogelflug zum Flugzeug: Biologie als Inspirationsquelle . . . . .	88
5.3 Fünf Wege zu nicht-fossilen Brenn- und Rohstoffen . . . . .	91
5.4 Solarenergienutzung durch Photovoltaik und Künstliche Photosynthese im Vergleich . . . . .	94
Literatur . . . . .	96
<b>6 Künstliche Photosynthese: Eine Analyse in Teilprozessen</b> . . . . .	97
6.1 Definition und Überblick . . . . .	98
6.2 Lichtabsorption und primäre Ladungstrennung . . .	101
6.3 Katalyse der Wasseroxidation . . . . .	108
6.4 Katalyse der Wasserstoff-Bildung . . . . .	112
6.5 Katalyse der Kohlendioxid-Reduktion . . . . .	116
6.6 Katalyse der Ammoniak-Synthese . . . . .	123
6.7 Fazit: Einige Schlüsselprozesse sind bereits einsatzbereit . . . . .	124
Literatur . . . . .	125
<b>7 Vom Künstlichen Blatt zum Energiesystem: Die technische Umsetzung</b> . . . . .	129
7.1 Photokatalyse auf Halbleiterpartikeln . . . . .	130
7.2 Künstliche Blätter . . . . .	133
7.3 Direkte Kopplung von Photovoltaik und Elektrolyse . . . . .	138
7.4 Power-to-X . . . . .	142
7.5 Integration der Künstlichen Photosynthese ins Energiesystem . . . . .	146
7.6 Fazit: Beim Apparatebau stockt es (noch?) . . . . .	149
Literatur . . . . .	150

<b>8 Künstliche Photosynthese gemeinsam gestalten . . . .</b>	<b>153</b>
8.1 Frühzeitige Einbindung der Gesellschaft . . . . .	153
8.2 Darstellungen von Technikzukünften der Künstlichen Photosynthese . . . . .	156
8.3 Künstliche Photosynthese und globale Klimaveränderungen als ethische Herausforderung . . . . .	158
8.4 Fazit: Dialog zur Künstlichen Photosynthese . . . .	162
Literatur . . . . .	163
<b>9 Was tun?! . . . . .</b>	<b>165</b>
Literatur . . . . .	171
<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>173</b>



# Globale Herausforderung: Ersatz fossiler durch regenerative Brennstoffe

# 1

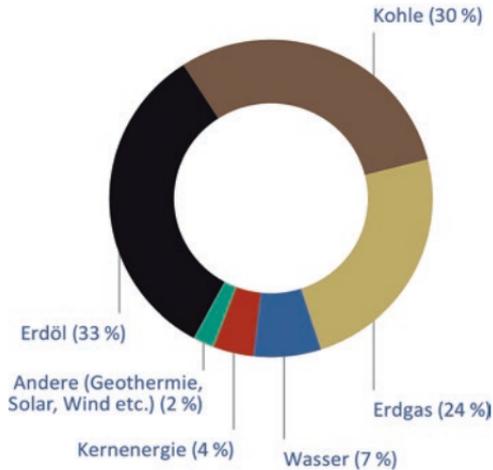
## 1.1 Fossile Brennstoffe dominieren die Energieversorgung

### 1.1.1 Energieversorgung global

Der jährliche globale Energiebedarf der Weltbevölkerung (Brennstoffe, Treibstoffe und Elektrizität) ist heute ungefähr 30-mal größer als am Ende des 19. Jahrhunderts und steigt weiterhin stark an [1]. Eine weitere Verdopplung binnen 25 Jahren ist zu erwarten. Dieser dramatische Energiehunger wird zum weit überwiegenden Teil mit fossilen Rohstoffen gestillt, also durch Förderung und Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas. Fossile Rohstoffe wurden und werden dabei auf vielfältige Weise genutzt. Im Folgenden unterscheiden wir meist nicht zwischen den Brennstoffen zur unmittelbaren Wärmeerzeugung einerseits und den Treibstoffen zum Antrieb von Motoren und Generatoren andererseits, sondern sprechen zusammenfassend von Brennstoffen.

Parallel zu fossilen Brennstoffen wurden und werden nicht-fossile, regenerative Energieressourcen genutzt. Zu nennen ist insbesondere die Verbrennung von Biomasse (meist Holz, in Abb. 1.1 unberücksichtigt) sowie die Nutzung der Energie aufgestauten

**Abb. 1.1** Globale Versorgung mit kommerziell gehandelten Energieträgern für das Jahr 2016 (Primärenergieverbrauch in Prozent). (Quelle: [2, 25])



Wassers zur Stromerzeugung. Lokal spielt der traditionelle Brennstoff Holz nach wie vor eine wichtige Rolle. Wenn die Geographie es erlaubt, leistet auch die Wasserkraft wesentliche Beiträge zur Stromerzeugung, z. B. in Norwegen oder der Schweiz. Insgesamt wird dennoch auch heute der dominierende Teil des globalen Energiebedarfs über fossile Brennstoffe abgedeckt (derzeit über 85 %, Abb. 1.1), denn auch die Kernenergie sowie neue Technologien zur nachhaltigen Stromerzeugung unter Nutzung von Wind- und Solarenergie tragen bis heute nur vergleichsweise wenig zur Deckung des Weltenergiebedarfs bei. Schließlich ist zu erwähnen, dass vor allem Erdöl und Erdgas nicht allein als Brennstoffe eingesetzt werden, sondern auch als Ausgangsverbindungen für die Herstellung von Wertstoffen wie zum Beispiel Kunststoffe (Plastik) durch die chemische Industrie dienen. Dieser Anteil an der Nutzung fossiler Ressourcen ist jedoch mit ca. 3 % vergleichsweise gering.

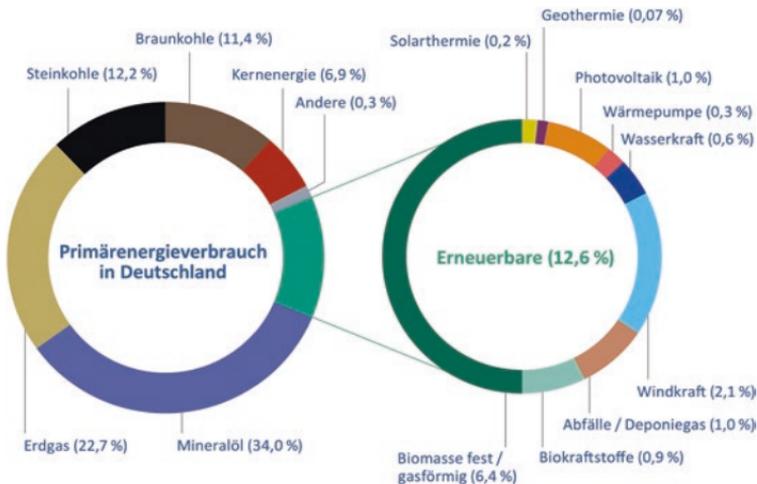
### Kasten 1.1 Der Siegeszug fossiler Rohstoffe [3]

Über die Verbrennung vor allem von Kohle und Erdgas lassen sich extrem hohe Temperaturen erreichen, wie sie unter anderem für die Gewinnung und Verarbeitung von Metallen benötigt werden. Der Betrieb großer Hochöfen für die Eisen- und Stahlproduktion, der für den Aufbau der Schwerindustrie im 19. Jahrhundert zentral war, wäre mit Holzkohle nicht möglich gewesen.

Die großtechnische industrielle Nutzung fossiler Brennstoffe umfasst auch andere Zweige wie die energieintensive Produktion von Zement oder Kunstdünger. Seit Ende des 19. Jahrhunderts wurden fossile Brennstoffe auch zunehmend zur Heizung von Gebäuden genutzt. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe hat in den industrialisierten Staaten das Heizen mit Holz oder anderen Biomasse-Produkten wie Stroh oder Dung weitgehend ersetzt. Ein weiterer zentraler Bereich ist die Nutzung fossiler Rohstoffe als Treibstoff in Verbrennungsmotoren, angefangen von der Dampfmaschine über den Benzin- und Dieselmotor bis zum Düsenantrieb moderner Flugzeuge. Hinzu kommt der Antrieb von Generatoren zur Stromerzeugung.

### 1.1.2 Energieversorgung in Deutschland

Auf der nationalen Ebene ist in Deutschland die Situation nicht grundlegend verschieden vom oben skizzierten globalen Bild [4]. Nach wie vor decken auch hier die fossilen Energieträger ca. 80 % des Primärenergieverbrauchs (Abb. 1.2, s. auch Kasten 1.2) und der Anteil neuer regenerativer Energien, also Wind- und Solarenergie liegt bei unter 3,5 %.



**Abb. 1.2** Primärenergieverbrauch in Deutschland nach Erzeugungstyp für das Jahr 2017. (Quelle: [4, 25])

### Kasten 1.2 Primärenergieverbrauch

Der Primärenergieverbrauch (oder Primärenergiebedarf) ist die gesamte einer Volkswirtschaft jährlich zugeführte Energiemenge. Dabei gehen Kohle, Erdöl (nicht raffiniertes Rohöl), Erdgas, Biomasse (z. B. Holz), Solar-, Wind- und Wasserstrom jeweils über den Heizwert in die Rechnung ein. Es wird also die Energie berücksichtigt, die bei Verbrennung oder elektrischer Heizung als Wärme freigesetzt werden würde. Bei der Kernenergie wird angenommen, dass der Heizwert dreimal höher liegt als die im Kernkraftwerk erzeugte elektrische Energie. Primärenergieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas, Biomasse, ...) können unter Energieverlust in Sekundärenergieträger wie z. B. Kohlebriketts, Benzin, Fernwärme oder Strom umgewandelt werden.

Die vom Verbraucher letztendlich genutzte Energie ist die Endenergie. Wenn z. B. im Kraftwerk nach Kohleverbrennung mit einem Wirkungsgrad von 35 % Strom erzeugt wird, dann ist die Sekundärenergie um 65 % geringer als die Primärenergie. Durch Leitungsverluste kommen weiter Energieverluste hinzu, so dass die vom Verbraucher genutzte Endenergie beispielsweise nur 30 % der Primärenergie beträgt.

Sowohl der Primär- als auch der Endenergieverbrauch werden meist in Joule bzw. Petajoule (1 PJ =  $10^{15}$  J) je Jahr gemessen. Aber auch andere (ältere) Einheiten sind gebräuchlich, wie z. B. Millionen kWh oder Millionen „Fass Öl“ (jeweils je Jahr).

Der Blick auf den Elektrizitätssektor zeigt eine andere Gewichtung. Hier erreicht Deutschland bereits heute einen Beitrag der erneuerbaren Energien von fast 40 % (38 % in 2017) [5]. Dies ist ein für eine Industrienation ohne die Option massiver Wasserkraftnutzung erstaunlich hoher Anteil, der daher auch international viel Beachtung findet. Der Anstieg der erneuerbaren Energien für die Stromerzeugung geht hierzulande primär auf den Ausbau von Wind- und Solarenergieanlagen zurück.

Der vergleichsweise hohe Anteil erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung führt in der öffentlichen Wahrnehmung allerdings zu einer Überschätzung ihrer derzeitigen Rolle im Gesamt-Energiesystem. Denn insgesamt trägt der Stromverbrauch nur zu ca. 30 % zum gesamten Endenergiebedarf Deutschlands bei (29 % in 2015). Im Gegensatz zur Stromerzeugung ist der Anteil erneuerbarer Energien in den Bereichen Verkehr und Wärme (welche zusammen die restlichen ca. 70 % der Energiebilanz ausmachen) weitaus kleiner.