

Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft  
und Gesellschaft

Przemyslaw Komarnicki  
Michael Kranhold  
Zbigniew A. Styczynski

# Sektorenkopplung – Energetisch-nachhaltige Wirtschaft der Zukunft

Grundlagen, Modell und  
Planungsbeispiel eines  
Gesamtenergiesystems (GES)

Inklusive  
SN Flashcards  
Lern-App

MOREMEDIA



Springer

---

# **Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft**

Die Frage nach der Energieversorgung ist entscheidend dafür, wie sich die Zukunft gestaltet – sowohl was technische Entwicklungsarbeit betrifft als auch wirtschaftliche Konzepte oder einen gesellschaftlichen Wandel. Je nach räumlicher Betrachtungsebene (global, national oder regional) stehen unterschiedliche Fragestellungen, Sichtweisen oder Herausforderungen im Vordergrund.

Die Titel dieser Buchreihe wollen somit auf neue Perspektiven aufmerksam machen, und in interdisziplinärer Weise Facetten rund um die Energieerzeugung, -nutzung, -verteilung, -wirtschaft und Wirtschaftlichkeit sowie zur Bedeutung für Umwelt und Gesellschaft beleuchten.

Um dies zu erreichen, bearbeiten in der Reihe *Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft* Autoren aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen zusammen ein Thema und entzünden gemeinsam eine Diskussion zu energiespezifischen Fragestellungen aus mehreren Blickwinkeln.

Weitere Bände in dieser Reihe: <http://www.springer.com/series/14344>

---

Przemyslaw Komarnicki • Michael Kranhold  
Zbigniew A. Styczynski

# Sektorenkopplung – Energetisch-nachhaltige Wirtschaft der Zukunft

Grundlagen, Modell und Planungsbeispiel  
eines Gesamtenergiesystems (GES)

Przemyslaw Komarnicki  
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb  
und -automatisierung IFF und Hochschule  
Magdeburg-Stendal  
Magdeburg, Deutschland

Michael Kranhold  
50Hertz Transmission GmbH  
Berlin, Deutschland

Zbigniew A. Styczynski  
Otto-von-Guericke-Universität  
Magdeburg, Deutschland

ISSN 2366-6242                      ISSN 2366-6250 (electronic)  
Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft  
ISBN 978-3-658-33558-8            ISBN 978-3-658-33559-5 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-33559-5>

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

Springer

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2021

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.

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Springer 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

*für Aneta, Anke und Maria  
die Autoren*

---

## Vorwort

Die **Sektorkopplung** ist eine kurze Beschreibung dessen, was in den kommenden Jahren in der gesamten Wirtschaft geschehen muss, um sie nachhaltig und **resilient** zu gestalten. Nachdem sich die **Energiewende** zu Beginn dieses Jahrhunderts als Schlagwort und auch als Markenzeichen der deutschen Art der Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen etabliert hat, kann die **Sektorkopplung** als eine **Erweiterung** dieser Idee auf die gesamte Energiewirtschaft verstanden werden.

Was die **Erzeugung elektrischer Energie** anbelangt, so steht die **Machbarkeit** eines zu **100 % erneuerbaren** Energiesystems heute **außer Zweifel**. Es gibt bereits zahlreiche Beispiele dafür, dass die 100 %ige Integration erneuerbarer Energien durch ein ausgeklügeltes Management der elektrischen Netze **ohne Verlust der Netzstabilität** und Versorgungszuverlässigkeit möglich ist. Es ist daher an der Zeit, angesichts des **Ausstiegs** aus der **Kernenergie** bis 2022 und der jüngsten Entscheidung, die Stromerzeugung aus **Kohle** bis 2035–2038 auslaufen zu lassen, darüber nachzudenken, wie die anderen Sektoren, abgesehen von der Elektrizitätswirtschaft, funktionieren werden, wenn **100 % der Energie als erneuerbarer Strom** geliefert wird. **Ist das überhaupt möglich?** Welche anderen Primärenergiequellen sind beispielsweise notwendig, um die hoch entwickelte Mobilität der Menschen oder die Industrielandschaft aufrechtzuerhalten? Diese und andere Fragen, z. B. **welcher Energiemix** für bestimmte Sektoren in **Zukunft** notwendig sein wird, müssen auf der Grundlage der Ergebnisse systematischer Studien beantwortet werden.

Solche **Studien** werden seit einiger Zeit von vielen nationalen Forschungsinstituten wie **acatech** oder **DENA** durchgeführt. **BDEW** und internationale Organisationen wie **CIGRE** oder **ENTSO-E** zeigen mit unterschiedlichen Schwerpunkten die positiven Perspektiven eines nachhaltigen Systems der Zukunft deutlich auf. In diesen Studien werden **mathematische Modellierungsmethoden** eingesetzt, um die **Plausibilitätsanalyse** der Ergebnisse zu verifizieren.

Als aktive **Zeitzeugen** begleiten die **Autoren** seit mehr als 20 Jahren die **Energiewende** in Deutschland und Europa. In Entwicklung, angewandter Forschung und industrieller Anwendung haben sie im Rahmen zahlreicher Verbundprojekte ein breites Themenspektrum auf diesem Gebiet untersucht. Die Autoren danken daher einer Reihe von

Kollegen und Diskussionspartnern für den lebhaften Fachaustausch, der ein notwendiger Bestandteil von Prozessen wie der Energiewende und der Sektorkopplung ist.

Besonders möchten wir an dieser Stelle Herrn **Dr.-Ing. Torsten Birth (IFF)**, für einen zielgerichteten **Beitrag**, insbesondere für die **Kap. 3 und 4**, sowie seine Expertise und Erfahrung im Bereich von Power-2-X-Projekten, die das Buch bereichern haben, danken.

Beim Herrn **Dr.-Ing. Martin Stötzer** bedanken sich die Autoren für seinen sehr wertvollen **Beitrag** zum praktischen Planen für den Ausbau der **H<sub>2</sub>-Infrastrukturen** im Deutschland.

Insbesondere möchten wir die folgenden Personen besonders erwähnen, deren Beiträge über die letzten Jahre für das Thema Sektorenkopplung gewürdigt werden sollen:

- **aus der CIGRE C6:** Dr. Bernd Michael Buchholz, Dr. Britta Buchholz, Nikos D. Hatziargyriou, Prof. Dr. Christine Schwaegerl
- **von der Fraunhofer Gesellschaft:** Prof. Dr. Gerhard Müller (IFF), Prof. Dr. Kurt Rohrig (IEE), Prof. Dr. Jürgen Schmitt (IWES), Prof. Dr. Christof Wittwer (ISE)
- **von acatech: Mitgliedern des TF DSM des ISIS-Projekts:** Dipl.-Ing. Thomas Aundrup, Prof. Dr. Jutta Hanson, Prof. Dr. Dirk Sauer, Prof. Dr. Dirk Westermann
- **aus dem Lehrstuhl Lena der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg (bis 2015):** Dr. Bartlomiej Arendarski, Dr. Stephan Balischewski, Prof. Dr. Jens Haubrock, Prof. Dr. Ines Hauer, Dr. Pio Lombardi, Prof. Dr. Antje Orths, Dr. Marc Richter, Prof. Dr. Krzysztof Rudion, Dr. Martin Stötzer, Dr. Christoph Wenge
- **von dem Projektpartner des Schaufensterprojektes WINDNODE, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie:** Dr. Frank Büchner (Siemens AG), Dr. Christoph Günter (InfraLeuna GmbH), Herr Markus Graebig (50Hertz Transmission GmbH) sowie Dr. Matthias Müller-Mienack (DNV-GL),

Das Buch ist in sieben Kapitel unterteilt.

**Kap. 1** diskutiert die **Motivation** für ein nachhaltiges Energiesystem vor dem Hintergrund der klimapolitischen Ziele. Anhand einer logischen Kette wird aufgezeigt, dass die heutige, nachhaltige Entwicklung eine lange Geschichte hat. Meilensteine dieser Entwicklung, wie der Bericht des **Club of Rome**, das **Kyoto-Protokoll** oder die **Energiewende**, werden in diesem Kapitel behandelt. Der Begriff der Sektorkopplung wird definiert.

Die Grundlagen für die Modellierung der Sektorkopplung werden in **Kap. 2** vorgestellt. Das **Energiehub-Modell** und Beispiele für Optimierungsmethoden werden in diesem Kapitel diskutiert.

Die Energieverbrauchssektoren und ihre Spezifika, insbesondere die **Struktur des Energieverbrauchs**, werden in **Kap. 3** aufgezeigt. Basierend auf historischen Daten werden die möglichen Perspektiven für die sektorale Energiemixgestaltung diskutiert. Auf den Ergebnissen ausgewählter Studien aufbauend werden die Wege zu einem **Net-Zero-Energy-System** dargelegt.

Diese finden ihre systematische Rechtfertigung in dem in **Kap. 4** vorgestellten Ansatz zur Hub-Modellierung. Es werden weiterhin **Substitutionsmöglichkeiten** und die Reversibilität von Energieumwandlungen diskutiert.

Das neu konzipierte, nachhaltige Energiesystem muss, wie das heutige, ein hohes Maß an Zuverlässigkeit, Sicherheit und Qualität der Energieversorgung gewährleisten. Da es auf einer stark volatilen Erzeugung basieren wird, sind neue **Flexibilitäts Optionen** erforderlich, um dies zu gewährleisten. Diese werden in **Kap. 5** erörtert.

Ein GES (Gesamtenergiesystem) ist ohne **Digitalisierung** nicht denkbar. **Kap. 6** rückt daher dieses wichtige Merkmal in den Fokus. Moderne Messtechnik, Online-Bilanzierung und Abrechnung bei der Erzeugung, dem Transport und der Verteilung von Energie – dies sind die Merkmale des zukünftigen Systems, die in diesem Kapitel diskutiert werden.

**Kap. 7** stellt die Perspektiven der GES im **internationalen Maßstab** dar. Da sich das Buch auf die deutschen Erfahrungen konzentriert, werden diese Bemühungen im siebten Kapitel in einen allgemeineren Kontext gesetzt.

Das Buch wurde durch die steigende Nachfrage des Marktes initiiert. Insbesondere unsere geschätzten Unterstützer, die **50Hertz Transmission GmbH Berlin**, das **Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb- und -automatisierung (IFF) Magdeburg** und **Steinbeis GmbH Stuttgart**, die selbst maßgeblich an der Gestaltung der Energiewende und der Sektorenkopplung beteiligt sind, haben uns ermutigt, dies auch im Jahr 2020 fortzusetzen. Auch der **Springer Verlag**, in Person von **Dr. Daniel Fröhlich**, hat Interesse an diesem Thema gezeigt und uns während des Prozesses sehr gut begleitet, wofür wir uns bei allen Beteiligten besonders bedanken möchten.

Unser **Dank** geht auch an Herr Dr **Tobias Hinrichs**, die das Manuskript sorgfältig revidiert hat, und an Frau M.Sc. **Polina Sokolnikova**, die die grafische Gestaltung übernommen hat.

Thematisch ist das Buch der **Reihe Energie in Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft** zugeordnet, was die Autoren sehr begrüßen. Die **Corona-Krise** im Jahr 2020 hat deutlich gezeigt, dass die größten Herausforderungen unserer Zeit, wenn sie transparent und zielgerichtet angegangen werden, auf **breite gesellschaftliche Unterstützung** stoßen werden. Das Gleiche war und wird auch bei der **Transformation der Energieversorgung** zur vollen Nachhaltigkeit und Resilienz der Fall sein. Diese findet auf einer etwas anderen Zeitskala statt, ist langsamer, aber der Ansatz ist ähnlich wie bei der Corona-Krise: Ein breites Spektrum der Gesellschaft muss die gleiche Linie verfolgen, die gleiche Sprache sprechen und jeder Einzelne auch einen kleinen Beitrag zum Gelingen leisten. Das ist hier der Fall, wie z. B. die jüngsten Entscheidungen zum Kohleausstieg gezeigt haben, und deshalb passt das Buch, das hauptsächlich technisch orientiert ist, gut in die oben erwähnte Reihe.

Das **Buch richtet sich an** Leser, die sich mit technischen Aspekten der Energiewende und der Sektorkopplung befassen. In erster Linie sind dies **Studenten** der technischen Fakultäten von **Universitäten und Hochschulen**, aber auch **Doktoranden** und in der

**Praxis tätige Ingenieure**, die das zukünftige System im Energiesektor und auf kommunaler Ebene entwerfen oder entwerfen werden.

Magdeburg/Berlin, Deutschland  
Dezember 2020

Przemyslaw Komarnicki  
Michael Kranhold  
Zbigniew A. Styczynski

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung – klimapolitische Ziele der nachhaltigen Energieversorgung . . . .</b>	<b>1</b>
1.1	Warum brauchen wir ein Gesamtenergiesystem (GES)? . . . . .	1
1.1.1	Weltbevölkerung, Energieressourcen und die „volle Welt“ . . . . .	1
1.1.2	Energieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Ausstoß: von Kyoto-Protokoll über Pariser Abkommen bis zu Green Deal . . . . .	7
1.1.3	Sektorenkopplung – was ist das? . . . . .	15
1.2	Paradigmenwechsel in der elektrischen Energieversorgung bedingt durch regenerative Erzeugung . . . . .	22
1.2.1	Leistung, Energie und Wirkungsgrad . . . . .	22
1.2.2	Potenziale der regenerativen Erzeugung . . . . .	28
1.2.3	Dunkelflauten und andere Besonderheiten . . . . .	34
	Literatur . . . . .	44
<b>2</b>	<b>Methodik und Modellaufbau zur Sektorenkopplung im Gesamtenergiesystem (GES) . . . . .</b>	<b>49</b>
2.1	Modellierung eines GES . . . . .	49
2.1.1	Energy-Hub-Modell . . . . .	49
2.1.2	Zeitliche Auflösung von Energieflüssen . . . . .	56
2.1.3	Substituieren von Energieträgern . . . . .	59
2.2	Optimierung eines GES . . . . .	61
2.2.1	Allgemeine Bemerkungen . . . . .	61
2.2.2	Ansätze zur Systemoptimierung . . . . .	64
	Literatur . . . . .	79
<b>3</b>	<b>Energienutzungssektoren und deren Energieverbrauch . . . . .</b>	<b>81</b>
3.1	Allgemeine Bemerkungen . . . . .	81
3.2	Energiebereitstellung (Gas, Strom, Wärme) sowie Rolle des Wasserstoffs (H <sub>2</sub> ) . . . . .	86
3.3	Industrie: Net-Zero-Factory . . . . .	90
3.4	Haushalt . . . . .	94
3.5	Verkehr: Elektromobilität . . . . .	97

3.6	Gewerbe – Handel – Dienstleistungen (GHD)	100
	Literatur	104
<b>4</b>	<b>Methodologie der Modellierung der Energiehubkomponenten</b>	<b>105</b>
4.1	Einführung	105
4.2	Methodologie der Modellierung von Erzeugungssektoren	108
4.2.1	Strom	108
4.2.2	Gas	118
4.2.3	Wärme	124
4.2.4	Energiemarktgestaltung, Marktrollen	128
	Literatur	131
<b>5</b>	<b>Flexibilität eines Gesamtenergiesystems (GES)</b>	<b>133</b>
5.1	Sicherer Betrieb des Gesamtenergiesystems (GES)	133
5.2	Energiespeicher	140
5.3	Bewertung der Flexibilität	148
5.3.1	Einführung	148
5.3.2	Flexgraphen	148
5.3.3	Puffercharakteristiken	150
5.3.4	Variable und fixe Leistungsprofile	151
5.3.5	15-min-Energiewerte	151
5.4	Rechtlicher Rahmen	154
5.4.1	Einführung	154
5.4.2	Abschaltbare Lasten	158
5.4.3	Unterbrechbare Verbrauchseinheiten	158
5.4.4	Zukünftige Flexibilität, systemseitige Bedarfsanalyse	158
	Literatur	162
<b>6</b>	<b>Rolle der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) – Digitalisierung der Energiewirtschaft</b>	<b>165</b>
6.1	Entwicklung der Bilanzierung im Energiesystem am Beispiel Strom	165
6.2	Aktuelle Bilanzierung für Strom, Gas und Wärmemärkte	169
6.2.1	Grundlagen der Energiebilanzierung am Beispiel Strom	169
6.2.2	Messstellenbetrieb: Rolle des Smart-Meter-Rollouts	183
6.2.3	Marktkommunikation und Messdatenanalyse	190
6.2.4	Bilanzierung: Vergleich zwischen Gas und Strom	193
6.3	Rolle der IKT und weiterer Innovationen in der Systemführung (Strom) der Zukunft	197
	Literatur	206
<b>7</b>	<b>Perspektiven des Gesamtenergiesystems (GES)</b>	<b>207</b>
7.1	Einführung	207
7.2	Europäische Perspektive	208
7.3	China Perspektive	212

---

7.4	USA Perspektive .....	216
7.5	Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft (Beispiel EU/Deutschland) .....	217
7.5.1	Einführung .....	217
7.5.2	Konzept für Deutschland .....	220
7.5.3	Regionale Konzepte am Beispiel des Landes Sachsen-Anhalt . . . .	221
	Literatur .....	222
<b>Anhang 1</b>	.....	<b>225</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	.....	<b>233</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

AbLaV	Verordnung zu ausschaltbaren Lasten
Acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIKO	Bilanzkreiskoordinator
BIP	Bruttoinlandprodukt
BK	Bilanzkreis
BKV	Bilanzkreisverantwortlicher
ANB	Ausspeisebetreiber
BNetzA	Bundesnetzagentur
BPO	Business Prozess Outsourcing
CCS	Carbon Capture and Storage
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques (Internationaler Rat für große elektrische Netze)
DENA	Deutsche Energie-Agentur
DNV-GL	Klassifikationsgesellschaften Det Norske Veritas (Norwegen) und Germanischer Lloyd (Deutschland)
DOD	Deep of Discharge
DSM	Demand Side Management
DSI	Demand Side Integration
DSR	Demand Side Response
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EEX	European Energy Exchange
EIC-Code	Energy Identification Code
EMS	Energy Management System
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
ENB	Einspeisebetreiber
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ENTSO-G	European Network of Transmission System Operators for Gas
EPEX	European Power Exchange

---

ESB	Ersatzschaltbild
EU	Europäische Union
EUROSAT	Das Statistische Amt der Europäischen Union
gMSB	grundzuständiger Messstellenbetreiber
GeLi Gas	Geschäftsprozesse Lieferantenwechsel Gas
GEODE	European Independent Distribution Companies of Gas and Electricity Assoziation
GES	Gesamtenergiesystem
GFC	Grid Forming Converter
GPKE	Geschäftsprozesse zur Kundenbelieferung mit Elektrizität
HDI-Index	Human Development Index
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MaBiS	Marktregeln für die Durchführung der Bilanzkreisabrechnung Strom
MaKo	Marktkommunikation
MES	Multimedial Energy System
MGV	Marktgebietsverantwortlicher (inBr Gaswirtschaft)
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MRL	Minutenregelleistung
MsbG	Messstellenbetriebsgesetz
MSB	Messstellenbetreiber
NABEG	Netzausbaubeschleunigungsgesetz
NEP	Netzentwicklungsplan
NRW	Nordrhein-Westfalen
PRL	Primärregelleistung
POG	Preisobergrenze
PST	Phasenschieber
PSW	Pumpspeicherwerk- Pumpspeicherkraftwerk
reBAP	regelzonenübergreifende Bilanzausgleichenergiepreis
rLM	registrierte Lastflussmessung
SaaS	Software as a Service
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SGD-Index	Sovereign Risk Score
SMES	Supraleitende Magnetische Energiespeicher
SNL	schnellausschaltbare Lasten
SOC	State of Charge
SOL	sofortausschaltbare Lasten
SRL	Sekundenregelleistung
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static VAR Compensator
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung

---

UML	Unified Modeling Language
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VBN	Verteilungsnetzbetreiber
VKU	Verband Kommunaler Unternehmen e.V.
wMSB	wettbewerblicher Messstellenbetreiber
WAMS	Wide Area Monitoring System



# Einführung – klimapolitische Ziele der nachhaltigen Energieversorgung

1

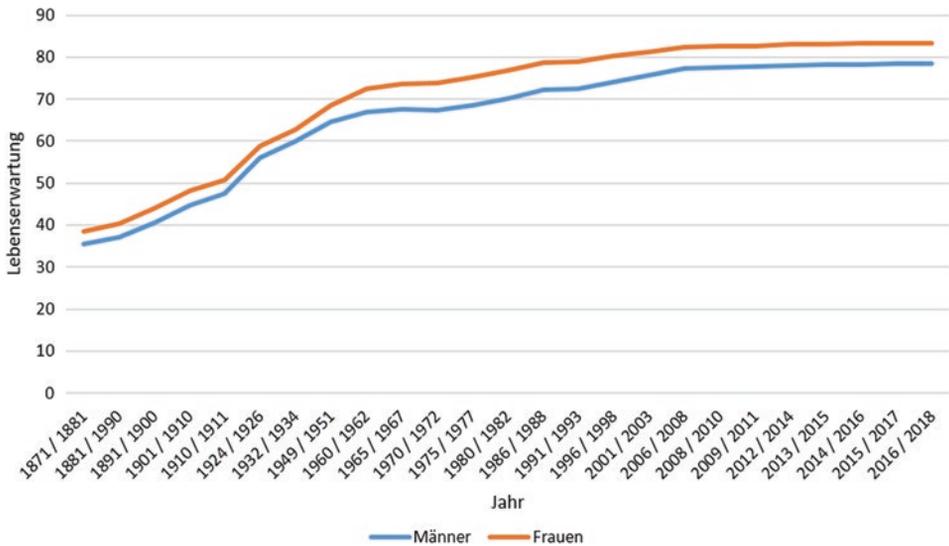
## 1.1 Warum brauchen wir ein Gesamtenergiesystem (GES)?

### 1.1.1 Weltbevölkerung, Energieressourcen und die „volle Welt“

In der Entwicklung der Menschheit lassen sich mehrere Phasen ausmachen, die seit jeher durch einen bedeutenden Fortschritt bei der Eroberung der Erde gekennzeichnet sind [1, S. 57]. Dadurch änderte sich das Verhalten der Menschen zumeist radikal. Ein Beispiel dafür ist die Entwicklung der Agrarkultur, die die Menschen von Sammlern und Jägern in sesshafte Züchter und Bauern verwandelte.

Jede dieser Veränderungen war auch mit sozialen und gesundheitlichen Verbesserungen im Leben der Menschen verbunden, wie es z. B. an der durchschnittlichen Lebenserwartung der Menschen im Zeitverlauf sichtbar wird. Die durchschnittliche Lebenserwartung stieg von etwa 20 Jahren in der Stein-, Bronze- und Eiszeit auf etwa 33 Jahre in der Antike [2] und im Mittelalter [3] und etwa 40 Jahre um die Jahrhundertwende 1900 und erreicht heute einen Wert von 80 Jahren (s. Abb. 1.1.).

Den letzten „Sprung“ in der Lebenserwartung verdanken die Menschen dem breiten Einsatz von Energie, der das Leben und seine Qualität revolutioniert hat. Ab 1850 war es die thermische Energie, die Bewegung und Arbeit mit Dampfmaschinen erleichterte, und ab etwa 1900 die elektrische Energie, die als veredelte Energieform sehr schnell überall ihre Verwendung fand. Auch heute, nach der rasanten Entwicklung der Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien (z. B. PV, Wind), die sicherlich auf den Fortschritt der Technik zurückzuführen ist, ist z. B. die Elektrifizierung des Verkehrs wieder, wie am Ende des 19. Jahrhunderts, attraktiv geworden.



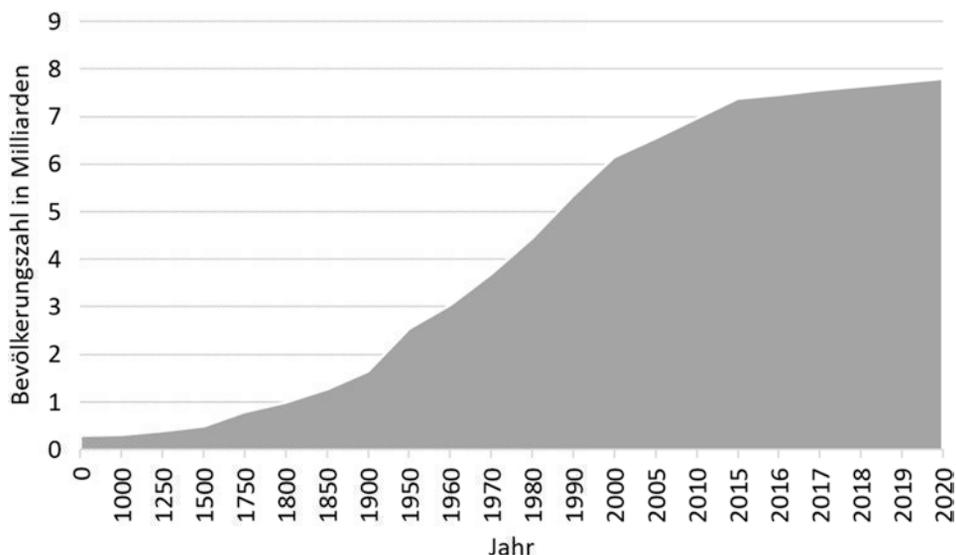
**Abb. 1.1** Lebenserwartung bei der Geburt in Deutschland. (Datenquelle: [3])

Elektrizität, die seit ca. 1880 häufiger zum Einsatz kam, wurde zunächst aus Wasserenergie erzeugt (Niagara-Kraftwerk, Inbetriebnahme 1895). Diese Energie konnte dann effektiv und effizient als Wechselstrom transportiert werden. Dies war ein entscheidender Sprung in der Entwicklung der modernen Zivilisation. Da die Ressourcen der Wasserkraft begrenzt waren, wurden schnell fossile Primärenergieträger für die Produktion von elektrischer Energie erschlossen. Später, weil die Weltbevölkerung rapide zunahm (s. Abb. 1.2), kam die Kernenergie hinzu. Beide Energieformen haben jedoch auch eine Schattenseite. Die Emissionen aus den fossilen Energien stiegen auf ein so hohes Niveau, dass es notwendig wurde, über ihre Reduzierung nachzudenken, während der Ruf nach dem Ausstieg aus der Kernenergie vor allem in den mittlerweile breit wahrgenommenen Risiken ihrer Nutzung und der Endlagerung von Atommüll begründet ist.

Seit dem ersten Bericht des Clubs of Rome (im Jahr 1968 als unabhängige Initiative gegründet; s. <https://clubofrome.org/> oder auch auf Deutsch unter <https://www.clubofrome.de/>) mit dem berühmten Titel *Die Grenze des Wachstums* (1972) hat das Bewusstsein für nachhaltiges Wachstum und eine nachhaltige Ökonomie wesentlich zugenommen. In der neusten Veröffentlichung mit dem Titel *Club of Rome. Der große Bericht* [5], die anlässlich des 50-jährigen Bestehens der Organisation im Jahre 2018 erschienen ist, finden die Prognosen aus dem Jahre 1968 durchaus ihre Bestätigung.

Besonders die letzten Jahre haben gezeigt, dass die Menschheit nicht mehr in einer *leeren Welt* lebt. Der Begriff *leere Welt* wurde vom Club of Rome kreiert und nimmt an, dass

„die Wirtschaft im Vergleich zu Ökosphäre relativ klein ist, wo unsere Technik der Extraktion und Ernte noch schwach sind und unsere Ziele gering. Fische vermehren sich schneller, als



**Abb. 1.2** Weltbevölkerung. (Datenquelle: [4])

wir sie fangen können, Bäume wachsen schneller, als wir sie fällen würden, Mineralien in der Erdkruste sind reichlich vorhanden, und die natürlichen Ressourcen sind nicht wirklich knapp. In der leeren Welt wurden die unerwünschten Nebenwirkungen unserer Produktionssysteme weit verteilt und wurden oft mit geringerem Aufwand absorbiert.“ [5, S. 394]

Auch wenn diese These vor 50 Jahren utopisch klang, sind wir heute z. B. wegen des durch den Temperaturanstieg sichtbar gewordenen Klimawandels mehr als überzeugt, dass unsere Welt nicht mehr unbegrenzt genutzt werden kann und dadurch eben eine *volle Welt* ist. Ein spürbares Zeichen hierfür ist die messbare Abgasverschmutzung in der Atmosphäre, die sich nicht mehr regenerieren kann und damit den o. g. Erderwärmungseffekt zementiert.

Im Laufe der Jahre entstand die Idee einer *New Economy*, die sich eine nachhaltige Entwicklung der Menschheit in einer vollen Welt zum Ziel nimmt. Das setzt zunächst voraus, dass komplexe und nicht einfache Wachstumsmessinstrumente zum Einsatz kommen. An Stelle des BIP (Bruttoinlandsprodukts), das praktisch keine Restriktionen berücksichtigt und am Gewinnmaximum orientiert ist, wurden andere Bewertungsfaktoren vorgeschlagen und eingeführt. Die Agenda 2030 der Vereinten Nationen beinhaltet siebzehn Nachhaltigkeitsentwicklungsziele (Sustainable Development Goals, SDGs) [6]. Diese können bei den Entwicklungsplänen bis zu den Kommunen angewendet werden, um bereits bei der Planung die hohe Komplexität des nachhaltigen Wachstums zu berücksichtigen. Dazu stehen unterschiedliche Werkzeuge zur Verfügung, die im Internet ausführlich beschrieben werden, z. B. unter [www.sdg-portal.de](http://www.sdg-portal.de).

Die SDGs 1–11 charakterisieren sozioökonomische Ziele. SDG 12 ist der nachhaltigen Konsumtion und Produktion gewidmet, die SDGs 13–15 formulieren das Umweltziel

und die SDGs 17 und 18 die Gerechtigkeit und Partnerschaft. Schon diese einfache Auflistung zeigt, dass diese Systematik sich nicht mit der eindimensionalen Logik des BIP ausdrücken lässt.

Nutzt man diese Systematik, können nicht nur Kommunen, sondern auch Länder nach den SDG-Prinzipien bewertet werden. Ausgehend von 100 als der maximal erreichbaren Zahl dieser multikriteriellen Bewertung wurden 2020 drei skandinavische Länder (Schweden, Dänemark und Finnland) mit einer Punktzahl zwischen 84,7 und 83,8 am höchsten bewertet [7]. Diese wurden von Frankreich (81,1) und Deutschland (80,8) gefolgt. Die USA mit 76,4 Punkten lag damals auf Platz 31, China mit 73,9 Punkten auf dem Platz 48, die Russische Föderation (71,9) auf Platz 57 und Indien (61,9) auf Platz 117. Das Schlusslicht bildete die Zentralafrikanische Republik mit 38,5 Punkten.

Aus der Diskussion der Agenda 2030 ist klargeworden, dass alle siebzehn Ziele gleichzeitig verfolgt werden müssen. Eine kohärente Politik ist erforderlich, um diese sozioökonomischen und umweltpolitischen Ziele gleichzeitig zu erreichen. Das bedeutet jedoch, die gegenwärtigen technologischen, wirtschaftlichen und politischen Ziele zu überarbeiten.

Um die Vergleichbarkeit der bisherigen ökonomischen Indices mit der Nachhaltigkeitsbewertung zu erreichen, hat die *New Economic Foundation* einen GPI-Index (Genuine Progress Indicator) entwickelt, der sowohl private Konsumausgaben (also Bestandteile des BIP) als auch 25 andere Komponenten, die die Nachhaltigkeit und den Lebenskomfort ausdrücken, beinhaltet [8]. Die ersten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der GPI-Faktor in den 1970er-Jahren vom BIP entkoppelt hat.

Der BIP stieg in der vollen Welt weiter an, während der GPI oder der SDG konstant blieben. Das macht deutlich, dass die Wohlfahrt der Menschen in einer vollen Welt anders gemessen werden muss als mit dem BIP. Nur so kann sich das Handeln an einer Wohlfahrtssteigerung ausrichten.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass nicht nur die technischen Begrenzungen, wie die Knappheit der Ressourcen bzw. steigende Emissionen, sondern auch sozioökonomische Zielsetzungen, die in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen haben, die Ziele der Umstellung (z. B. die Energiewende) noch stärker in den Vordergrund stellen werden. Nachdem sich die regenerative Stromerzeugung aus Fotovoltaik bzw. Windanlagen nach über 20 Jahren etablieren konnte und heute ohne Subventionen im Wettbewerb zu fossilen Techniken stehen kann, ist durchaus vorstellbar, dass in Zukunft auch komplexe Bewertungen, z. B. mit GPI-Faktor, erfolgreich eingesetzt werden, um die technischen Entwicklungen, wie z. B. bei der Elektromobilität, zu prägen. Deswegen ist es nicht sonderlich überraschend, dass die Elektromobilität momentan gerade in den skandinavischen Ländern die rasanteste Entwicklung erlebt. Dort herrscht eine entsprechend hohe Akzeptanz für die nicht nur am BIP orientierten Wohlfahrtsziele der Gesellschaft.

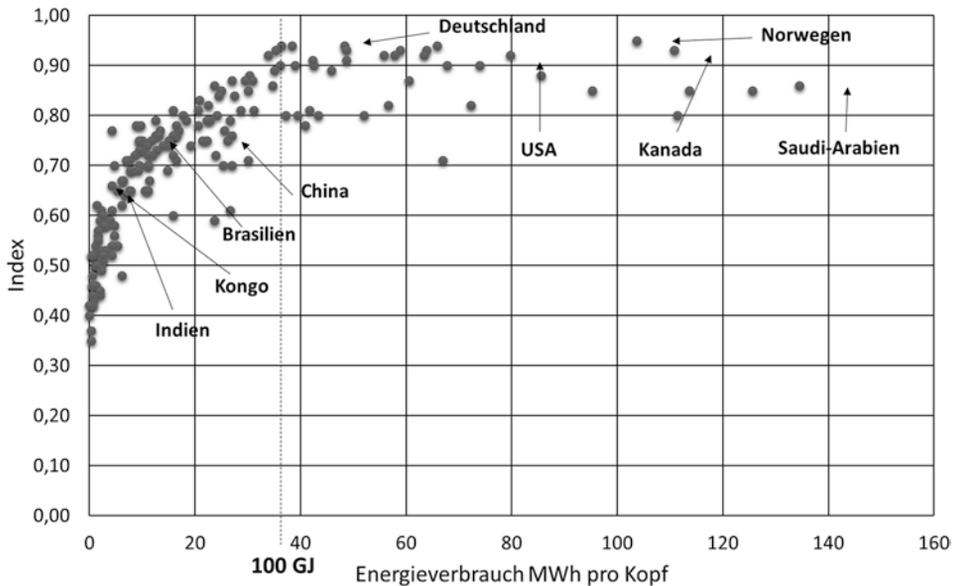
Ein weit verbreiteter Index, der die menschliche Entwicklung charakterisiert, der HDI (Human Development Index), kombiniert drei Gruppen von Indikatoren, wobei 1,0 der höchste erreichbare Wert ist. Diese Indikatoren sind: Lebenserwartung, Bildung und BIP (Bruttoinlandsprodukt). Im Einzelnen werden erfasst: Lebenserwartung bei der Geburt,

Alphabetisierung von Erwachsenen, Einschulungsraten im Primar-, Sekundar- und Tertiärbereich, Pro-Kopf-BIP. Er wird in jährlichen Berichten des Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen veröffentlicht, mit einer Vielzahl von zusätzlichen wirtschaftlichen, sozialen und politischen Daten [9].

In Abb. 1.3 werden die Werte der HDI-Indizes im Vergleich zum Energieverbrauch pro Kopf für unterschiedliche Länder vorgestellt.

Der direkte Zusammenhang zwischen diesen beiden Werten ist sichtbar: Hoher Energieverbrauch ist mit einem hohen HDI-Indexwert bis zu etwa 50 MWh PK (~100 GJ PK) verbunden. Der weitere Anstieg des PK-Energieverbrauchs führt nicht notwendigerweise zu einem Anstieg des HDI-Indexwertes. Der HDI-Index für Deutschland liegt z. B. bei 0,94 und ist damit offensichtlich besser als der HDI-Index für Saudi-Arabien (0,83). Dennoch hat Saudi-Arabien im Vergleich zu Deutschland einen mehr als doppelt so hohen PK-Energieverbrauch.

Die Angaben zum Energieverbrauch pro Kopf und Jahr (PK) werden in Abb. 1.3 in MWh ausgedrückt (in vielen Quellen werden sie dagegen in Gigajoule – GJ – angegeben: 1 MWh = 3,6 GJ), um einen direkten Vergleich zu allgemeingängigen Angaben in elektrischer Energietechnik zu gewährleisten. Das lässt sich an dem folgenden Beispiel verdeutlichen. In Deutschland kann ein jährlicher Verbrauch von etwa 50 MWh auf eine 25-Stunden-Volllastarbeit einer 2 MW-Windanlage umgerechnet werden. So kann eine 2 MW-Windanlage, unter der Annahme von 2000 Volllaststunden pro Jahr, den Energieverbrauch von etwa 100 statistischen (in dieser Pro-Kopf-Rechnung ist der gesamte Brutto-Energieverbrauch, Haushalt, Industrie usw., gemeint) deutschen Bürgern abdecken. Hierbei



**Abb. 1.3** Wohlstandindex versus Energieverbrauch pro Kopf und Jahr (PK). (Datenquelle: [10])

sind Volllaststunden ein mathematisches Maß für den Auslastungsgrad eines technischen Systems. Der Wert der Volllaststunden eines Kraftwerks (Erzeugungseinheit) wird berechnet, indem die jährlich erzeugte Energie durch die Nennleistung der Anlagen geteilt wird (s. auch Tab. 1.5).

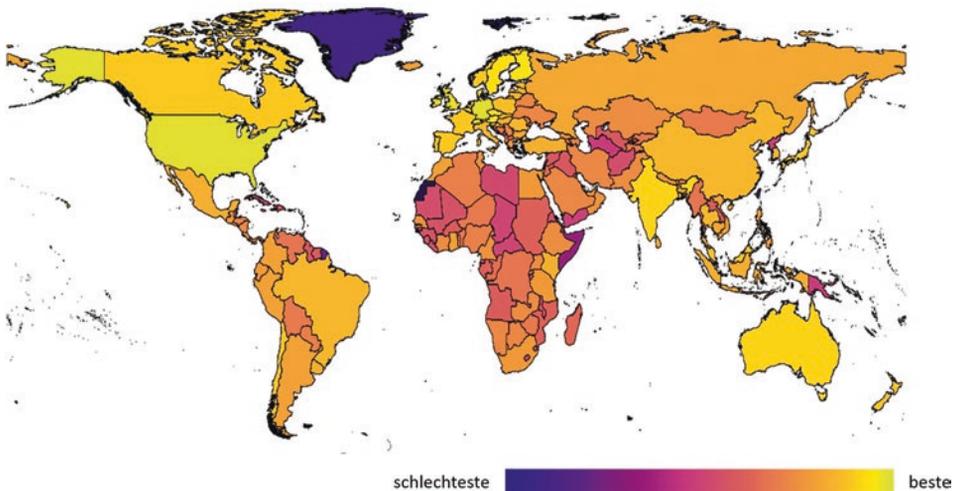
In Abb. 1.3 wird sichtbar, dass der Energieverbrauch pro Kopf beispielsweise in den USA immer noch etwa 2,5-mal höher als in China liegt. Saudi-Arabien führt mit einem Energieverbrauch von 134 MWh PK. Die afrikanischen Länder nutzen mit einem Verbrauch von 2,7 MWh PK vergleichbar am wenigsten Energie. Auch Indien hat mit einem Verbrauch von 6,7 MWh PK und einem Index von 0,61 einen großen Nachholbedarf im PK-Energieverbrauch in der Energienutzung.

Um den Wohlstand in Beziehung zum BIP und damit zur Energieversorgungssicherheit zu setzen, eignet sich einer der komplexesten Indizes, der Global-Energy-Security-Index, der aus 15 Einzelparametern besteht, die mehrere Faktoren berücksichtigen [11]. Der normalisierte Wert  $[0, \dots, 1]$  dieses Indizes wird durch die gewichtete Addition der einzelnen Parameter berechnet (wie in Gl. 1.1. dargestellt),

$$GESI = \sum_{i=1}^{15} (w_i \cdot P_i), \quad (1.1)$$

wobei  $w_i$  die Gewichtung und  $P_i$  der Wert des  $i$ -ten Parameters ist. Die Summe der Gewichtungsfaktoren ist gleich 1 ( $\sum_{i=1}^{15} w_i = 1$ ).

Der Index selbst wurde zuletzt im Jahr 2020 neu berechnet und ist in Abb. 1.4 grafisch dargestellt.



**Abb. 1.4** Global-Energy-Security-Index [11]

Der Global-Energy-Security-Index (Abb. 1.4) gibt eine vergleichende Bewertung einzelner Länder an, wie auch der HDI (Abb. 1.3). Die gelb markierten Länder in Abb. 1.4 (USA, EU, Australien usw.) gehören auch zu den Ländern, die den größten Energieverbrauch pro Kopf ausweisen (vgl. Abb. 1.3).

Selbstverständlich wurden und werden laufend weitere Indizes entwickelt, die den Wohlstand und den Energieverbrauch bewerten. Sie alle zu beschreiben, würde den Rahmen dieses Buches jedoch sprengen.

### 1.1.2 Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß: von Kyoto-Protokoll über Pariser Abkommen bis zu Green Deal

Wie schon im Abschn. 1.1.1 beschrieben, führte die gezielte Nutzung externer Energiequellen seit dem 19. Jahrhundert zur Steigerung des Wohlstands der Menschheit. Da die Energieerzeugung im Wesentlichen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe erfolgte, kann der Kohlenstoffausstoß als Verbrauchskennzahl herangezogen werden.

So veranschaulicht Abb. 1.5 die Geschichte der Industrialisierung anhand dieser Kennzahl.

Der erste Anstieg (s. Abb. 1.5a) auf das Niveau von etwa 1 Milliarde t wurde um 1900 erreicht und blieb über mehrere Jahre stabil. Nach dem Zweiten Weltkrieg ist jedoch ein ununterbrochener Anstieg der Emissionen zu beobachten, jedoch mit einem variierenden jährlichen Zuwachs wie oben beschrieben. Die jährlichen Kohlenstoffemissionen sind jedoch heute 36 Mal höher als im Jahr 1900.

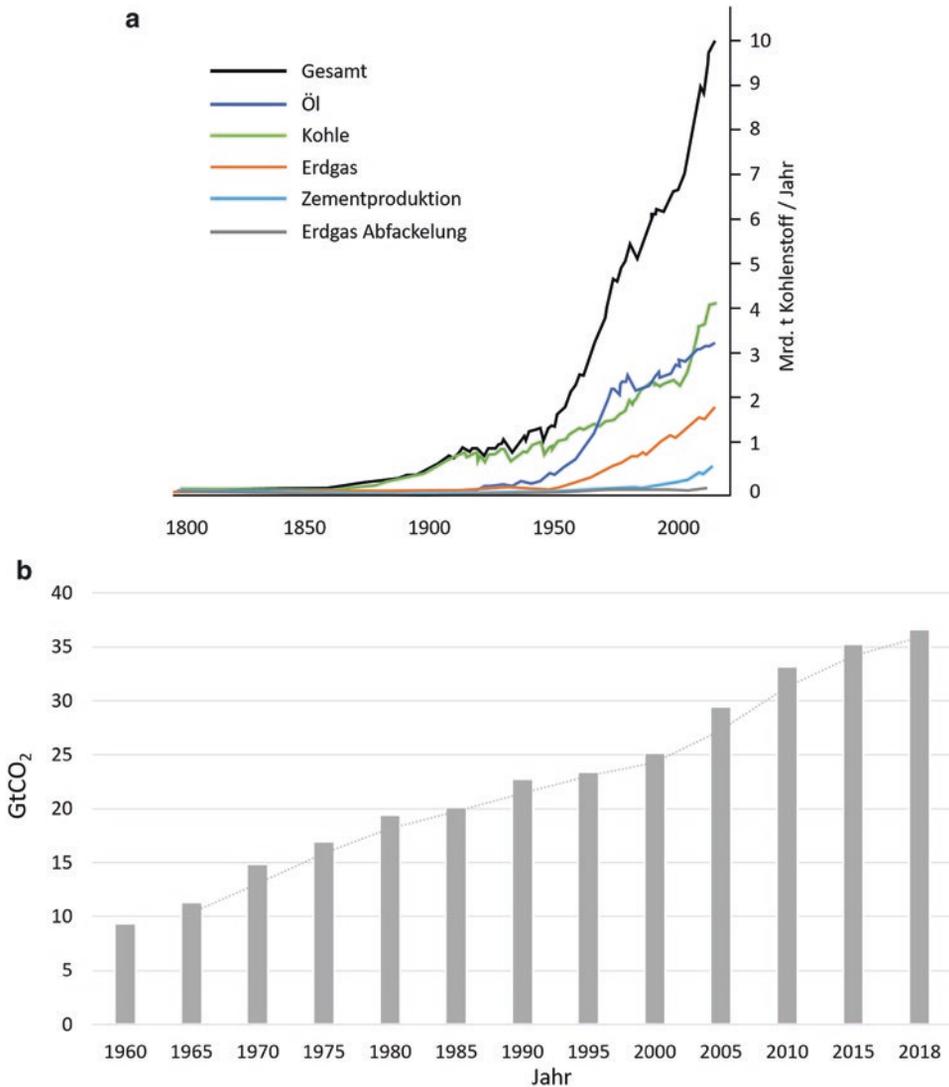
Emissionszunahmen waren in den Jahren 1960–1980 weltweit unterschiedlich. Sie stiegen um etwa 4 % jährlich in den Jahren 1980–2000. Dieser Trend verlangsamte sich in den Jahren 2000–2010 auf etwa 1 % jährlich (Kernkraft), stieg nach 2010 wieder auf 3,5 % jährlich (Elektrifizierung von China) und beträgt heute etwa 1,5 % jährlich, dank breiten Anstiegs von regenerativer Erzeugung.

Erst die immer breitere Erschließung der erneuerbaren Ressourcen, die gegenwärtig dank des technischen Fortschritts im großen Maßstab möglich [14] ist, ermöglicht den Ausstieg aus dem fossilen Zeitalter, was am abnehmenden Anstieg der Emissionen in den letzten Jahren sichtbar wird (s. Abb. 1.5b).

Es gibt drei Hauptgründe, die die Menschen zur nächsten Revolution, einer „grünen Revolution“, zwingen:

- die Knappheit der fossilen Ressourcen, sie reichen nur für etwa 100 Jahre (vgl. Tab. 1.1),
- der Klimawandel (vgl. Abb. 1.9),
- die Grenzen des Wachstums – volle Welt (vgl. Abschn. 1.1.1).

Jeder dieser Gründe reicht aus, um die Notwendigkeit der neuen, nachhaltigen Energiewirtschaft zu verstehen. Aufgrund der Tatsache jedoch, dass man, aus verschiedenen politischen und wirtschaftlichen Gründen (s. auch Abb. 1.8), ziemlich lange gewartet hat, be-



**Abb. 1.5** Globale Kohlenstoffemissionen aus fossilen Quellen (a) generell zwischen 1800 und 2007 [12] und (b) im Detail zwischen 1960 und 2018. (Datenquelle: [13])

**Tab. 1.1** Reichweite von Rohstoffen [15–17]

Rohstoff	Statistische Reichweite in Jahren	Reserven
Erdgas	54 (260)	202 Tm <sup>3</sup>
Rohöl	51 (140)	244 Gt
Steinkohle und Braunkohle	107	749 Gt
Uran	24	570 Mt

vor eine Wende in den Energiesystemen herbeigeführt worden ist, sind alle drei Gründe in den letzten Jahren sehr dringlich aktuell geworden.

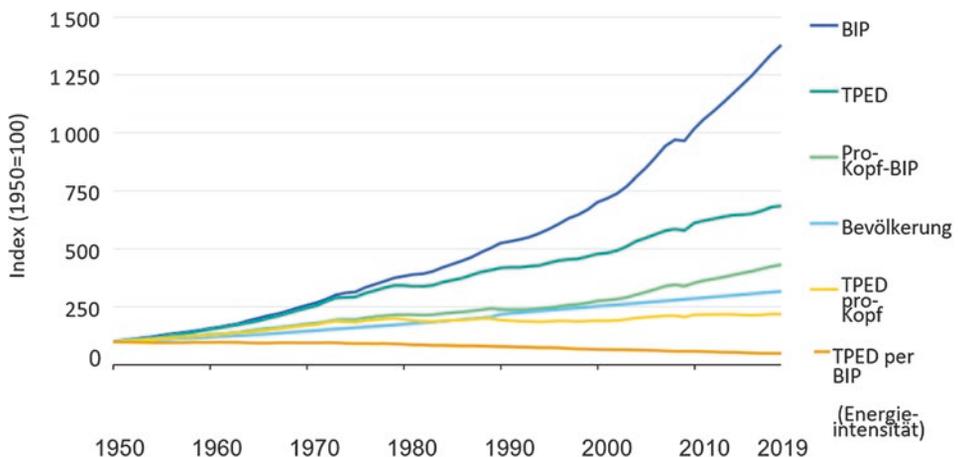
Um die Emissionen zu verkleinern, soll in erster Linie der Energieverbrauch gesenkt werden. Dieses Ziel widerspricht jedoch dem Streben der Menschen in der ganzen Welt nach mehr Wohlstand und ist deshalb im weltweiten Maßstab schwer zu erreichen.

Obwohl sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts der Pro-Kopf-Energieverbrauch stabilisiert hat (s. Abb. 1.6), ist dieser Trend wegen des riesigen Nachholbedarfs beim Lebensstandard in den Entwicklungsländern unterbrochen; der Anstieg des Energieverbrauchs in Asien und Afrika hat die angespannte Situation, was Emissionen angeht, in den letzten Jahren noch verschärft.

Eine Gesamtprimärenergienachfrage (TPED) verdoppelte sich in den letzten 70 Jahren kontinuierlich. Damit war der Anstieg aber weniger stark als das Weltbevölkerungswachstum in dieser Zeit, wo es zu einer Verdreifachung kam (s. Abb. 1.6). Diese durchaus positiv zu bewertende Entwicklung ist darauf zurückzuführen, dass trotz des jüngsten, mehr als zehnfachen Wachstums des BIP im gleichen Zeitraum das Verhältnis TPED/BIP aufgrund der Entkopplung des BIP vom Energieverbrauch etwa um die Zweifache gesunken ist. Das Wachstum des BIP stammt mehr und mehr aus nicht-energieintensiven Sektoren wie z. B. aus dem Dienstleistungssektor.

In Deutschland, wo traditionell die Hardwareproduktion (z. B. Autoproduktion) immer einen sehr hohen Anteil am BIP hat, sinkt das oben genannte Verhältnis aufgrund vieler innovativer Technologien und Techniken (wie z. B. hoher Automatisierungsgrad) kontinuierlich.

Zwischen 1990 und 2015 verzeichnete Deutschland einen Anstieg des BIP um 41 % bei gleichzeitiger Senkung des Energieverbrauchs um 11 % (s. Abb. 1.7a). Dies bedeutet eine



Anmerkung: TPED=total primary energy demand, Gesamter Primärenergiebedarf.

**Abb. 1.6** Verbrauch der Energie ist historisch gesehen von BIP und Bevölkerungszahlen getrieben [19]