

Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft

Franz Joos

Nachhaltige Energieversorgung: Hemmnisse, Möglichkeiten und Einschränkungen

Eine interdisziplinäre Statusbetrachtung

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>

Franz Joos

Nachhaltige Energieversorgung: Hemmnisse, Möglichkeiten und Einschränkungen

Eine interdisziplinäre Statusbetrachtung

 Springer

Franz Joos
Energietechnik
Helmut-Schmidt-Universität
Hamburg, Deutschland

ISSN 2366-6242 ISSN 2366-6250 (electronic)
Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft
ISBN 978-3-658-23201-6 ISBN 978-3-658-23202-3 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-23202-3>

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 Fachmedien Wiesbaden GmbH, 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.

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

Vorwort

Wir leben in einem Zeitalter eines historischen Umbruchs, der uns in vielerlei Hinsicht vor enorme Herausforderungen stellt. Neben vielen Aspekten, die es erfordern, unsere Lebensphilosophie neu zu definieren, stellt die Sicherstellung eines menschenwürdigen Lebens durch einen minimalen Wohlstand aller ein Ziel dar. Hierbei ist die Versorgung mit Nahrung und Energie von Bedeutung, aber auch die Erhaltung der Umwelt, insbesondere bezüglich der Belastungen und der Ressourcen.

Einerseits deutet sich durch den Klimawandel eine bisher einzigartige Bedrohung der Lebensgrundlagen der Menschheit an. Die gemessene CO₂-Konzentration ist in 2017 mit über 400 vppm auf einen Wert angestiegen, wie er zuletzt vor mehreren Millionen Jahren aufgetreten ist, zu Zeiten, als die ersten Hominiden auftraten.

Das Gebiet der nachhaltigen Energieversorgung erfährt derzeit einen rasanten Aufschwung. Die Sicherstellung der Energieversorgung, sowie die Einführung regenerativer Energien in die Energiewirtschaft eines Landes, liegen primär in der Verantwortung der Politik. Deshalb muss ein Überblick mit der politischen Situation der Volkswirtschaft beginnen. Um die Bedeutung einschätzen zu können, müssen die vorhandenen Formen der regenerativen Primärenergie zusammengestellt werden und in ihrer Mächtigkeit abgeschätzt werden. Hier kann es sich nur um Schätzwerte handeln, die je nach Absicht des Schätzenden stark unterschiedlich ausfallen. Dennoch müssen die sich zum Teil widersprechenden Daten dargestellt werden, allein um das Bewusstsein zu schärfen, dass es sich nur um Schätzwerte handeln kann. Aufgrund der unbeständigen Darbietung der regenerativen Primärenergie kann eine zuverlässige Nutzung nur dann erfolgen, wenn kurz-, mittel- und langfristige Speichermöglichkeiten der regenerativen Primärenergie zur Verfügung stehen. Die Energiespeicher sowie die Stromverteilung rücken nun verstärkt ins Zentrum der Aufmerksamkeit. Dies prädestiniert die dezentrale Energieversorgung außerhalb der Ballungsgebiete, während in industriellen Schwerpunkten aber auch in Großstädte eine zentrale Versorgung unumgänglich sein wird.

Der in der Energieversorgung verwendete Sprachgebrauch wie beispielsweise der Energiequelle oder des Energieverbrauchs ist aus thermodynamischer Hinsicht nicht korrekt. Energie kann lediglich umgewandelt, nicht verbraucht werden. Die Ausgangszustände der Energie und die Wandlungsprodukte hingegen ändern sich aber tatsächlich.

So wird in einem thermischen Kraftwerk durch Verbrennung chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt, also energieenthaltende Brennstoffe verbraucht und elektrische Energie bereitgestellt. Im Sprachgebrauch wird daraus der Verbrauch des Brennstoffes und die Quelle der elektrischen Energie. Im Folgenden soll der sich eingebürgerte Sprachgebrauch beibehalten werden, bewusst dass eigentlich der „elektrische“ Energieverbrauch und die „fossile“ Energiequelle gemeint sind.

Die Dokumentation der Umsetzung des Energiekonzepts sowie die dabei erzielten Fortschritte veröffentlicht die Bundesregierung im Spätherbst eines jeden Jahres in einem faktenbasierten Monitoring-Bericht und zudem alle drei Jahre in einem Fortschrittsbericht mit einer vertieften Analyse der Entwicklungen und Maßnahmen. Seit dem Jahr 2011 steht der Bundesregierung in diesem Prozess eine unabhängige Kommission aus vier Energieexperten beratend zur Seite. Die Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ legt jährliche Stellungnahmen zum Fortschritt der Energiewende vor, die den Monitoring-Berichten der Bundesregierung zur Energiewende beigelegt und dem Kabinett sowie dem Bundestag zugeleitet werden. Diese Publikationen geben jeweils einen aktuellen Überblick über den Stand der Umsetzung der Energiewende.

Die vorliegende Publikation entstand aus meinem Skript der Vorlesung Regenerative Energie, die ich in den letzten Jahren an der Helmut-Schmidt-Universität Universität der Bundeswehr in Hamburg gehalten habe. Den interessierten Diskussionen mit den Studierenden ist die interdisziplinäre Breite des Stoffes geschuldet. Für die vielen fruchtbaren Anregungen möchte ich mich hiermit bei den Studierenden bedanken. Dem Springer-Vieweg Verlag danke ich für die Unterstützung und Möglichkeit der Publikation. Ebenso bedanke ich mich bei den Inhabern der Urheberrechte für die Genehmigung zur Übernahme ihrer Abbildungen. Für den unermüdlichen Einsatz bei der Erstellung der vorliegenden Publikation bin ich meiner Sekretärin, Frau Gerds zu besonderem Dank verpflichtet.

Hamburg, im Herbst 2018

Inhaltsverzeichnis

1 Nachhaltige Energieversorgung	1
1.1 Energiebedarf	1
1.2 Nachhaltigkeit	6
1.2.1 Bedeutung, Grundlage und Reichweite von Nachhaltigkeit als Steuerungsinstrument	6
1.2.2 Nachhaltigkeitsmanagement	7
1.3 Nachhaltigkeit unter dem Aspekt der Energieversorgung	9
1.4 Die Energiewende	10
Literatur	13
2 Bewertungskriterien des Energieumsatzes	15
2.1 Wirkungsgrade, Nutzungsgrade	16
2.1.1 Energieformen und deren Umwandlung	17
2.1.2 Wirkungsgrad	21
2.1.3 Nutzungsgrad und Deckungsgrad	25
2.2 Ganzheitliche Bewertungsmethoden	29
2.2.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)	30
2.2.2 Ökobilanz	32
2.2.3 Externe Kosten	37
2.2.4 Der Erntefaktor, der Amortisationsfaktor	41
Literatur	44
3 Ethische Fragen zur Energieerzeugung	45
3.1 Einleitung	45
3.2 Ethische Grundprinzipien	46
3.2.1 Sozialverträglichkeit	46
3.2.2 Umweltverträglichkeit	47
3.2.3 Humanverträglichkeit	47

3.3	Ethische Vorzugsregeln	48
3.4	Konkretion für die Energieerzeugung und – nutzung	48
3.5	Fazit	49
	Literatur	49
4	Energieszenarien	51
4.1	Einleitung	51
4.2	Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung	52
4.3	Energieszenarien	56
4.4	Grundlegender Aufbau von Szenarien	57
4.5	Vorgehen bei der Formulierung	58
4.6	Modelle als Grundlagen von Szenarien	59
4.7	Aussagen eines Energieszenarios	60
4.8	Zusammenfassung	61
	Literatur	61
5	Die Energiewende – Handicap oder Chance?	63
5.1	Einleitung	64
5.2	Die jüngste Energiewende in Deutschland	70
5.3	Energieverbrauch und Importabhängigkeit	71
5.4	Kernenergie	74
5.5	Konventionelle Stromerzeugung als Brückentechnologie	77
5.6	Treibhausgase, Umwelt	88
5.7	Energieeffizienz	92
5.8	Verkehr	96
5.9	Regenerative Energien	99
5.10	Wende in der elektrischen Energieversorgung	103
5.11	Netzproblematik und Kraftwerkskapazitäten	108
	5.11.1 Netzausbau	117
	5.11.2 Flexible Erzeugung	118
	5.11.3 Flexibler Verbrauch durch steuerbare Lasten	118
	5.11.4 Energiespeicherung	119
5.12	Speicher	119
	5.12.1 Pumpspeicher	121
	5.12.2 Druckluftspeicher	122
	5.12.3 Wasserstoff-Speicher	123
	5.12.4 Redox-Flow Speicher	123
	5.12.5 Elektrische Batterien, Akkumulatoren	124
5.13	Sektorkopplung	125
	5.13.1 Sektor Stromerzeugung	126
	5.13.2 Sektor Wärme	126
	5.13.3 Sektor Verkehr	127
	5.13.4 Sektor Power to X	127

5.14	Energiepreise	129
5.15	Digitalisierung	136
5.16	BMWi-Förderprogramm „Schaufenster intelligente Energie – Digitale Agenda für die Energiewende“ (SINTEG)	139
5.17	Gesellschaftliches Verhalten	142
5.18	Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung	143
5.19	Fazit	146
5.20	Zusammenfassung	147
	Literatur	148
6	Wie kann der Einzelne zum Gelingen der Energiewende beitragen?	151
6.1	Status	151
6.2	Handlungsoptionen	152
6.3	Optimierung des Energiebedarfs der privaten Haushalte	155
6.4	Akzeptanz	156
6.5	Fazit	158
	Literatur	158
7	Resümee	159
	Sachwortverzeichnis	163

Abkürzungen

A	Anergie
AEE	Agentur Erneuerbare Energien e.V.
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AGEE-Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik
ASPO D e.V.	Association for the Study of Peak Oil and Gas, Deutschland
BBPIG	Gesetz über den Bundesbedarfsplan, Bundesbedarfsplangesetz
BDH	Bundesindustrieverband Deutschland Haus- Energie- und Umwelttechnik e.V.
BDSG	Bundesdatenschutzgesetz
BGBI	Bundesgesetzblatt
BHKW	Biomasseheizkraftwerk
BHKW	Blockheizkraftwerk
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BMU	Bundesumweltministerium
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BNetzA	Bundesnetzagentur
BSP	Bruttosozialprodukt
BWE	Bundesverband Windenergie
BWP	Bundesverband Wärmepumpe
CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage
CNG	Kryogenes Naturgas
DEA	Dezentrale Energieerzeugungsanlage
dena	Deutsche Energie-Agentur GmbH
DESERTEC	Nachfolgeorganisation der Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation (TREC)
DEWI	Deutsches Windenergie Institut GmbH Wilhelmshafen
DII	Desertec Industrial Initiative
DIN	Deutsche Industrienorm
DLR	Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt

DSM	Demand-Side-Management
E	Exergie
EE	Erneuerbare Energien
EEA	Einheitliche Europäische Akte, ein EG-Vertrag zum Ausbau der politischen und ökonomischen Integration
EEE	European Energy Exchange, europ. Strombörse Leipzig
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
EEWärmeG	Erneuerbare Energien Wärmegesetz
EnLAG	Energieleitungsausbaugesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EROJ, E_R	Energy returned on invested, Erntefaktor
ETS, EU ETS	EU-Emissionshandel, European Union Emissions Trading System
EWE	Energieversorgungsunternehmen, Ems-Weser-Elbe-Region, Bremen, Brandenburg, Ostseeinsel Rügen, Westpolen, Türkei
EWEA	European Wind Energy Association
FC	Brennstoffzelle, fuel cell
FCKW	Florchlorkohlenwasserstoffe
FEE	fluktuierende erneuerbare Energien
GuD	Gas- und Dampfturbinen Kombikraftwerk, Combined Cycle System
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung
HS	(thermodynamischer) Hauptsatz
HT	Hochtemperatur
HVDC	High Voltage Direct Current, Hochspannungsgleichstromübertragung
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoT	Internet der Dinge, Internet of Things
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Weltklimarat
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnologie
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KNA	Kumulierter Nichtenergetischer Aufwand
KPEV	Kumulierter Prozessenergieverbrauch
KWK	Kraft-Wärme Kopplung, Stromerzeugungsanlagen mit Abwärmenutzung
LCA	Abschätzung des Lebensdauerzyklus, Life Cycle Assessment
LCI	Sachbilanz, Life Cycle Inventory
LED	Leuchtdiode, light-emitting diode
LNG	flüssiges Naturgas
MAP	Marktanreizungsprogramm, BMWi
NAPE	Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz, BMWi

NEV	nichtenergetisch eingesetzte Energieträger
NMHC	Nicht-Methan Kohlenwasserstoffe
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
p	Druck
P	Leistung
PEB	Primärenergiebedarf
PEFC	Polymerelektrolytbrennstoffzelle
PEV	Primärenergieverbrauch
PME	Pflanzenmethylester
PROGNOS AG	Neben Studien und Untersuchungen aller Art gehören ökonometrische Analysen und Prognosen zu den Kerntätigkeiten der Prognos AG
PTL	Power to Liquid
Q	Wärme
S	Entropie
SEI	stoffgebundener Energieinhalt
SINTEG	Schaufenster intelligente Energie, BMWi-Programm
SOFC	Feststoffoxidbrennstoffzelle
STC	Standard Test Condition
T	Temperatur in /K/
t	Temperatur in /°C/ oder Zeit in /s/
THG	Treibhausgasemission
U	Innere Energie
UBA	Umweltbundesamt
UFA, URF	Ökologischer Bewertungsfaktor
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
V	Volumen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VKU	Verband kommunaler Unternehmen e.V.
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WEA	Windenergieanlage
Wi	Energie
WKA	Windkraftanlage
WP	Wärmepumpe
WWF	World Wide Fund
δ	Deckungsgrad
ϵ	Exergiegehalt
η	Wirkungsgrad
ζ	Nutzungsgrad



Nachhaltige Energieversorgung ist mit nachhaltiger Umweltpolitik untrennbar verbunden. Deshalb soll einleitend der umfassende Begriff der Nachhaltigkeit vergegenwärtigt werden. Umweltpolitik ist ein komplexer Aufgabenbereich. Ging es früher vor allem darum, Natur zu bewahren und Umweltschäden zu beheben, so ist heute das Spektrum erheblich erweitert. Es gilt vor allem, die Natur zu pflegen und Schäden gar nicht erst eintreten zu lassen.

Nachhaltigkeit betrifft alle Betrachtungsebenen, kann also lokal, regional, national oder global verwirklicht werden. Während aus ökologischer Perspektive zunehmend ein globaler Ansatz verfolgt wird, steht hinsichtlich der wirtschaftlichen und sozialen Nachhaltigkeit oft der nationale Blickwinkel im Vordergrund. Desgleichen wird für immer mehr Bereiche eine nachhaltige Entwicklung postuliert, sei es für den individuellen Lebensstil oder für ganze Sektoren wie Mobilität oder Energieversorgung.

Eine nachhaltige Handlungsweise ist aber nicht alleinige Aufgabe des Staates. Die nachhaltige Handlungsweise in einem freiheitlichen Staat kombiniert Eigenverantwortung von Wirtschaft und Bürgern, Markt und Wettbewerb mit verbindlichen Rechtsnormen und wirksamer Kontrolle.

1.1 Energiebedarf

Der Bedarf an Energie basiert auf verschiedenen Aspekten. Zum einen benötigen wir Energie zum Leben. Um zu leben, müssen wir chemische Energie in Form unserer Nahrung aufnehmen. Vom thermodynamischen Standpunkt ist der Grund dafür offensichtlich. Der Körper ist ein hochorganisiertes System mit niedriger Entropie, deren Wert nur auf Kosten einer Entropieerhöhung der Umgebung so niedrig gehalten werden kann. Dieser sogenannte Grundumsatz hängt davon ab, welche zusätzliche Arbeit der Mensch verrichtet. Ohne die Verrichtung von körperlicher Arbeit beträgt er im Mittel pro Kopf und Jahr etwa

$0,8 \cdot 10^3$ kWh/a. Verglichen mit dem zusätzlichen Energiebedarf der Menschheit, ist das vernachlässigbar wenig.

Wir benötigen zum anderen deutlich mehr Energie für ein angenehmes Leben. Die Frage, wann das Leben als angenehm zu bezeichnen ist, wird sicher von jedem Menschen verschieden beantwortet. Im Allgemeinen wird aber die Mehrzahl der Weltbewohner darin übereinstimmen, dass für die Allgemeinheit das Leben umso angenehmer ist, je höher der Lebensstandard eines Landes ist. Der Lebensstandard ist in diesem Sinn eine messbare Größe, denn sie wird von zwei anderen messbaren Größen bestimmt

1. dem Bruttosozialprodukt (BSP) eines Landes,
2. dem Primärenergiebedarf (PEB) eines Landes.

In Abb. 1.1 ist dargestellt, welche Faktoren das Bruttosozialprodukt bestimmen (links) und welche Faktoren den Primärenergiebedarf eines Landes (rechts). Die Liste dieser Faktoren ist keineswegs vollständig und ließe sich weiter ergänzen. Diese Faktoren sind letztlich mitbestimmend für den Lebensstandard, den die Bewohner eines Landes erreichen.

Es wäre sicherlich in unserem Zusammenhang sinnvoller, den Endenergiebedarf als die wichtige Größe anzusehen, denn dies ist die Energie, die wir letztendlich benötigen, um ein angenehmes Leben zu führen. Der Bedarf an Endenergie ist allerdings nicht so leicht messbar. Leichter ist zu bilanzieren, wie viel Primärenergie pro Jahr auf der Welt benötigt wurde. Am Ende des 20. Jahrhunderts bestand ein weltweiter Primärenergiebedarf von $1,4 \cdot 10^{14}$ kWh/a.

Der Bedarf an Energie pro Kopf ist aber nicht in allen Ländern dieser Erde gleich groß (Abb. 1.2).



Abb. 1.1 Der Lebensstandard wird durch Bruttosozialprodukt und Primärenergiebedarf bestimmt

Spezifischer Energieverbrauch pro Einwohner 2005

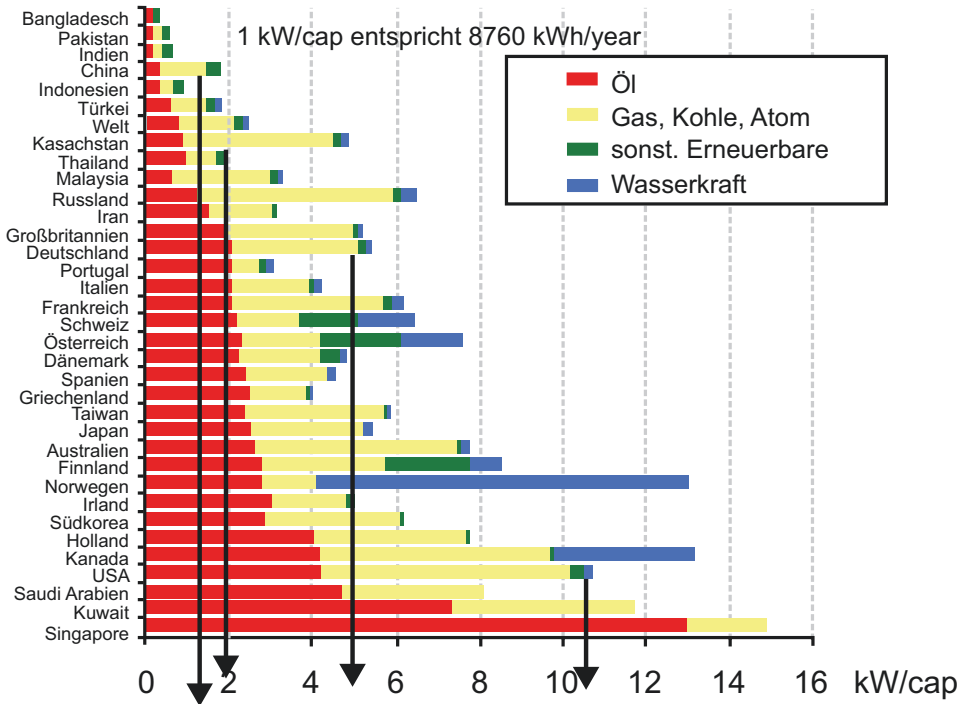


Abb. 1.2 Pro-Kopf Energieverbrauch verschiedener Länder. Der Verbrauch ist in kW pro Einwohner angegeben und entspricht der Jahresdauerleistung eines Bewohners (ASPO D e.V.)

Vielmehr ergibt sich eine Korrelation zwischen Primärenergiebedarf (PEB) und Brutto-sozialprodukt (BSP) eines Landes: Je größer der Primärenergiebedarf pro Kopf eines Landes ist, umso höher ist auch sein Brutto-sozialprodukt pro Kopf und damit der (messbare) Lebensstandard (Abb. 1.3).

Das Brutto-sozialprodukt ist der Wert aller in einem Land hergestellten Güter und erbrachten Dienstleistungen in einem Jahr. Für die einzelnen Länder treten erhebliche Abweichungen von dem mittleren Verhalten auf. Die Schwankungen in dem Verhältnis Brutto-inlandsprodukt und Energieverbrauch sind nicht überraschend, denn beide Größen hängen von vielen Faktoren ab, die in jedem Land verschieden sind. Außerdem verändern sich die Verhältnisse im Laufe der Zeit.

Seit etwa 1980 veränderte sich der Primärenergiebedarf in Deutschland nur noch wenig, während das Brutto-sozialprodukt weiter angestiegen ist. Das bedeutet: Am Ende des 20. Jahrhunderts benötigten wir nur noch etwa $\frac{2}{3}$ so viel Primärenergie, um den gleichen Lebensstandard zu gewährleisten, den wir 1970 besaßen. Dafür sind verschiedene Gründe verantwortlich. Bessere Techniken haben den Nutzungsgrad von der Primärenergie zur Nutzenergie erhöht, z. B. durch den Einbau neuer und besserer Heizungsanlagen. Es wurde

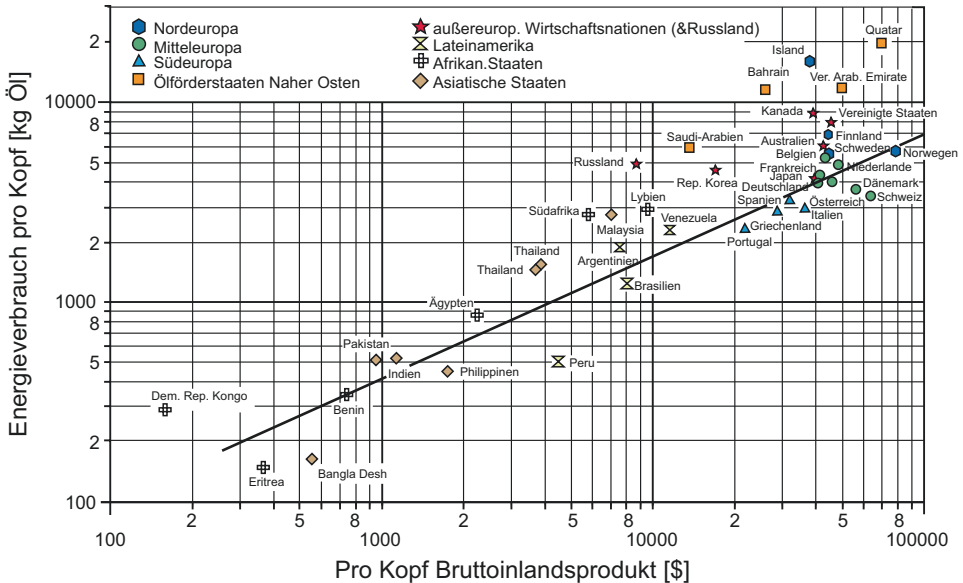


Abb. 1.3 Jährlicher pro Kopf Energieverbrauch in Kilogramm Öl als Funktion des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf und Jahr in US-Dollar (US \$) für verschiedene Länder (Weltbank 2009). Je weiter rechts von der Mittellinie ein Land eingetragen ist, umso effektiver wird die Energie eingesetzt [1]

Nutzenergie eingespart, z. B. durch eine bessere Wärmeisolation. Zum Anderen wurden aber auch energieintensive Prozesse zur Herstellung von Halbzeug vorwiegend in die Rohstoff exportierenden Länder verlagert.

Die Entkopplung des Bruttoinlandsprodukts vom Primärenergieverbrauch wird als Zeichen einer hoch industrialisierten Gesellschaft angesehen. Abb. 1.4 zeigt die Entwicklung dieses Zusammenhanges in Deutschland und das angestrebte Ziel für 2050 nach dem gültigen Energiekonzept im Vergleich mit dem Status anderer Staaten. Auffallend ist, dass sowohl Dänemark als auch die Schweiz sich diesem Ziel schon stärker angenähert haben als Deutschland. Ebenso sichtbar ist aber auch die Position von USA und Kanada, die einen weit überhöhten Primärenergieverbrauch im Vergleich zum erwirtschafteten Bruttoinlandsprodukt aufweisen.

Im Folgenden soll ein grober Vergleich der benötigten Primärenergie mit der zur Verfügung stehenden regenerativen Primärenergie vorgenommen werden.

Der mittlere Erdradius beträgt $r_{Erde} = 6,37 \cdot 10^6$ m. Wenn wir vereinfachend annehmen, dass die Erde eine Kugel ist, dann ergibt sich für die Erdoberfläche $A_m = 510 \cdot 10^{12}$ m². Davon bedecken die Ozeane eine Fläche von $A_w = 361 \cdot 10^{12}$ m² (d. h. 71 % Wasseroberfläche), die Landfläche beträgt $A_L = 149 \cdot 10^{12}$ m² (d. h. 29 % Landoberfläche).

Wichtig für die weiteren Betrachtungen ist, welche Anteile dieser Landfläche für welche Zwecke genutzt werden (Tab. 1.1).

Für die Zukunft lässt sich voraussagen, dass der Anteil der genutzten Fläche stetig zu Gunsten der ungenutzten Fläche (Ausbreitung von Wüsten, Landverödung durch Erosion) und des Siedlungsraums (Bevölkerungswachstum) abnehmen wird. Dieser Verlust an

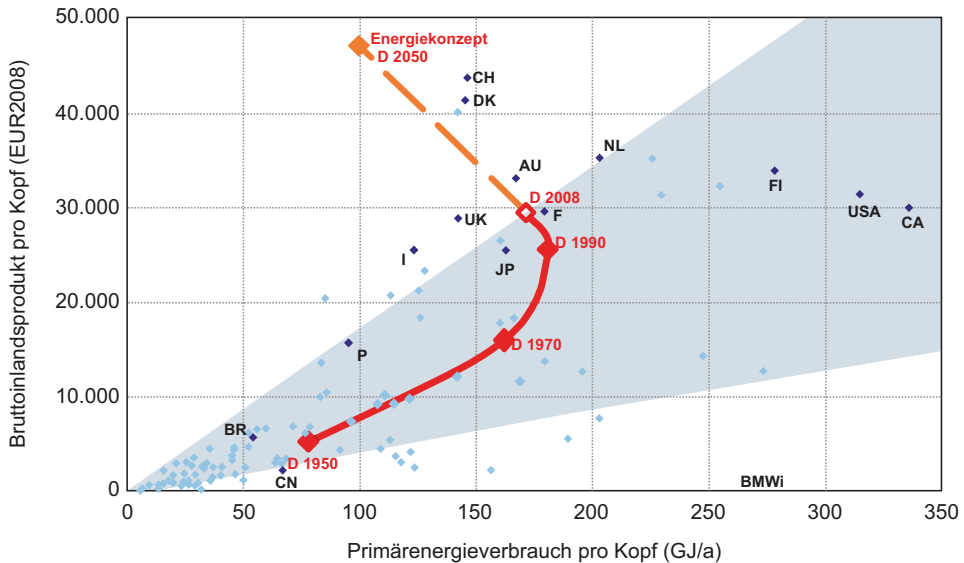


Abb. 1.4 Wirtschaftliche Entwicklung und Energieverbrauch in ausgewählten Ländern 2008 und der energiewirtschaftliche Kurs Deutschlands von 1950 bis 2050, (CA Kanada, CN China, FI Finnland); © BMWi 2017

Tab. 1.1 Aufteilung der Erdoberfläche (Land)

Genutzte Flächen (m ²)			Ungenutzte Flächen (m ²)			
Ackerland	Waldland	Grün-/Weidland	Wüsten/Gebirge	Flüsse/Seen	Eisgebiete	Siedlungsraum
41 · 10 ¹²	14 · 10 ¹²	31 · 10 ¹²	35 · 10 ¹²	3 · 10 ¹²	15 · 10 ¹²	41 · 10 ¹²
(27,5 %)	(9,4 %)	(20,8 %)	(23,5 %)	(2,0 %)	(10,1 %)	(6,7 %)

nutzbarer Fläche beträgt etwa 0,5 % im Jahr. Er soll im Folgenden außer Acht gelassen werden. Die Frage stellt sich, ob mit den heute zur Verfügung stehenden Flächen die Bereitstellung der für die wachsende Erdbevölkerung benötigten Nahrungsmittel und die Bereitstellung des wachsenden Primärenergiebedarfs zu decken sind. Bei beiden Aufgabenstellungen handelt es sich um die Bereitstellung der notwendigen Energie. Allerdings sind die Größenordnungen dieser Anforderungen ganz unterschiedlich.

Bei der Verrichtung von Arbeit erhöht sich der Grundumsatz des Menschen durchschnittlich auf das Doppelte des Ruhewerts. Bei einer maximalen Bevölkerungszahl von $n = 10,5 \cdot 10^9$ ergibt sich daher ein Energiebedarf von $1,7 \cdot 10^{13} \text{ kWh a}^{-1}$, der durch Nahrungsmittel zu decken ist.

Der Primärenergiebedarf hingegen erreicht einen über zehnfachen Wert von $20 \cdot 10^{13} \text{ kWh a}^{-1}$. Er muss aus den sonstigen zur Verfügung stehenden Energiequellen gedeckt werden.

Aufgrund der niedrigen Leistungsdichte der Solarstrahlung von ca. $1,46 \cdot 10^3 \text{ kWh/a m}^2$, ist die zum Anbau zur Verfügung stehende Fläche bei der Lösung der Energieversorgung von besonderer Bedeutung.