



Matthias Günther

Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien

Möglichkeiten, Potenziale, Systeme

 Springer Vieweg

Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien

Matthias Günther

Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien

Möglichkeiten, Potenziale, Systeme

Matthias Günther
Kassel, Deutschland

ISBN 978-3-658-06752-6 ISBN 978-3-658-06753-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-06753-3

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

In Erinnerung an Jürgen Schmid

Dieses Buch entstand auf Anregung von Jürgen Schmid. Neben vielen anderen Themen, die ihn als Direktor des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik in Kassel beschäftigten, waren es die Effizienzeffekte regenerativ basierter Energieversorgung, die ihn in den letzten Jahren besonders interessierten. Als er mir eine Stelle als wissenschaftlicher Referent anbot, trug er mir sein Anliegen vor, ihn auch bei der Verfassung von Texten zu diesem Thema zu unterstützen. Nach kürzeren Aufsätzen, die in verschiedenen Kontexten und Medien veröffentlicht wurden, ist dieses Buch als Hauptergebnis dieses Arbeitsauftrags anzusehen.

Nach dem plötzlichen Tod von Jürgen Schmid im Mai 2013 wurde die weitere Arbeit an diesem Buch kontrovers im Institut diskutiert. Dabei war nicht der Kerninhalt des Textes umstritten. Vielmehr wurde befürchtet, das Buch könne Einstellungen fördern, die weder von Jürgen Schmid noch von mir noch vom Institut unterstützt werden. Die Sorge lautete, die Darstellung der enormen Effizienzeffekte, die allein durch die verstärkte Nutzung regenerativer Energiequellen erzielt werden, könnte den Eindruck erwecken, sonstige Anstrengungen, die Effizienz im Energiesystem zu erhöhen, seien überflüssig. Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen allein würde als Nebeneffekt und quasi automatisch Ineffizienzen in der Energieversorgung beseitigen. Dabei war klar, dass Jürgen Schmid *selbst* dieser Schluss fern lag. Die Sorge war vielmehr, der Text könne den Schluss den *Lesern* nahelegen. Ich habe im Text versucht, dieser Sorge Rechnung zu tragen und der Schlussfolgerung vorzubeugen. Verabredet wurde mit der neuen Institutsleitung, den Text unter meine alleinige Autorenschaft zu stellen und mir den Hinweis auf seine Entstehungsgeschichte und insbesondere auf die Ideenurheberschaft durch Jürgen Schmid offenzuhalten. Jürgen Schmid selbst hat leider nur die Entstehung des Kernkapitels 5 begleiten können.

Hauptthema des Buchs sind die Effizienzeffekte der Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Diese Effekte spiegeln sich nicht in der zentralen Motivationsarchitektur der

Energiewende. Das Interesse an der Nutzung erneuerbarer Energiequellen beruht nicht primär auf der Absicht, die in diesem Buch benannten Effizienzeffekte auszunutzen. Das zentrale Kapitel, das Kapitel 5, bewegt sich daher auf einem Nebenschauplatz der Energiewende. Doch gerade die Tatsache, sich auf einem Nebenschauplatz zu bewegen, liefert ein Argument für die Verfassung dieses Buchs. Denn im Gegensatz zu den Hauptschauplätzen sind es häufig die Nebenschauplätze, die noch nicht systematisch ausgeleuchtet wurden. Die Vermutung liegt nahe, Jürgen Schmid habe – gerade auch in seiner Funktion als Politikberater im Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen – die Effizienzeffekte der regenerativen Energiegewinnung als zusätzliches Nebenargument für das konsequente Angehen der Energiewende positionieren wollen. Die Umstellung auf eine regenerative Energieversorgung würde schon als solche ganz enorm dazu beitragen, ambitionierte Effizienzziele zu erreichen, die im politischen Diskurs formuliert wurden. Leider ließ der Tod von Jürgen Schmid den Gesprächsfaden reißen, ohne dass ich mir diese Vermutung von ihm hatte bestätigen lassen.

Ich habe mich entschlossen, um das zuerst entstandene Kapitel 5 herum auf einige der zentralen Themen der Transformation des Energieversorgungssystems einzugehen und den Kerngehalt des Buchs somit in den gewohnten und typischen Energiewende-Kontext einzubetten. Dabei habe ich versucht, auch einige sehr grundlegende begriffliche, physikalische und wirtschaftliche Aspekte zu beleuchten. Ich kann sagen, dass ich die Verfassung dieses Texts auch genutzt habe, um die Systematik der Energiewende für mich selbst zu ordnen. Ich hoffe, der Leser kann den Text als Ergebnis eines solchen Ordnungsprozesses anerkennen und möglicherweise für sein eigenes Verständnis zumindest punktuell nutzbar machen. Die thematische Breite der Darstellung brachte es mit sich, dass viele Aspekte nur oberflächlich angerissen werden konnten. Mehr Tiefe haben weder der zeitliche Rahmen der Verfassung dieses Buches noch der Wunsch nach einem leserfreundlichen Umfang erlaubt.

Ich möchte mich besonders auch bei Jürgen Schmid's Nachfolger Clemens Hoffmann bedanken, der mir den Freiraum gelassen hat, an der Fertigstellung des Buches zu arbeiten.

Inhalt

Einleitung	11
1. Energie in Physik und Wirtschaft	13
1.1 Energie als physikalische Größe.....	13
1.2 Energie als Lebensgrundlage für Gesellschaften und als Wirtschaftsgut	15
2. Warum brauchen wir ein neues Energiesystem?	19
2.1 Energieverbrauch	19
2.2 Allgemeine Anforderungen an das Energiesystem.....	22
2.3 Motive für den Umbau des Energiesystems	24
2.4 Strategien zum Umbau des Energiesystems	32
2.4.1 Dekarbonisierung durch die Nutzung erneuerbarer Energiequellen	32
2.4.2 Energieeffizienz	35
2.4.3 Suffizienz	36
2.4.4 Regionalisierung.....	37
2.4.5 Die besondere Bedeutung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz	38
3. Energieeffizienz	45
3.1 Spielarten der Energieeffizienz	45
3.1.1 Wandlungseffizienz.....	46
3.1.2 Nutzungseffizienz.....	46
3.1.3 Gesamteffizienz	47
3.2 Primärenergie	48
3.3 Endenergie	54

4. Erneuerbare Energien	57
4.1 Begriffsbestimmung.....	57
4.2 Erneuerbare Energiequellen	60
4.3 Erneuerbare Energiequellen und Treibhausgas-Emissionen	61
4.4 Erneuerbare Energiequellen und ihre technische Nutzung	62
4.4.1 Direkte Nutzung der Solarstrahlung	62
4.4.2 Indirekte Nutzung der Solarstrahlung	81
4.4.3 Nutzung der Erdwärme.....	88
4.4.4 Nutzung der Meeresenergie.....	90
5. Effizienzgewinne durch erneuerbare Energien	93
5.1 Effizienzgewinne durch direkte Stromerzeugung.....	95
5.1.1 Direkte Stromerzeugung	95
5.1.2 Effizienzgewinne durch die Elektrifizierung der Mobilitäts- und Wärmeversorgung	103
5.1.3 Fazit: Effizienzpotenziale der direkten Stromerzeugung	112
5.2 Effizienzgewinne durch Nutzung von solarer und Umweltwärme.....	114
5.2.1 Wärmepumpen.....	115
5.2.2 Solarthermische Systeme	123
5.2.3 Energetische Optimierung von Gebäuden	124
6. Effiziente Angleichung von Angebot und Nachfrage im Stromsektor.....	127
6.1 Qualitätsunterschiede zwischen den verschiedenen erneuerbaren Energiequellen.....	128
6.2 Wind- und Solarenergie in der zukünftigen Stromversorgung in Deutschland.....	132
6.3 Lastmanagement	136
6.4 Angebotsmanagement	142
6.4.1 Netze	142
6.4.2 Regelbare Kraftwerke.....	146
6.4.3 Speicher	149
6.4.4 Wärmeerzeuger als Netzstabilisatoren	157
7. Energieeffizienz im regenerativ basierten Energiesystem.....	163
7.1 Energieeffizienz und hohe Anteile erneuerbarer Energien – ein Konflikt?	163
7.2 Ist Energieeffizienz langfristig wichtig?.....	167
8. Kosten	173
Fazit	187
Literatur	189

Einleitung

Die Energiewende, die Deutschland vollziehen will, beruht hauptsächlich auf zwei Strategien: dem Ausbau der Nutzung regenerativer Energiequellen und der Erhöhung der energetischen Effizienz des Energieversorgungssystems. Das wesentliche Ziel ist dabei, die Nutzung fossiler und nuklearer Energieressourcen zu reduzieren.

2010 hat die Bundesregierung das „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ präsentiert. Die Energiewende ist nicht erst mit diesem Konzept offizielle Politik geworden, doch sie hat seitdem eine konkretere und verbindlichere Gestalt angenommen. Zum Beispiel spricht sich das Energiekonzept nicht nur allgemein für die Neuformierung des Energieversorgungssystems aus, sondern enthält auch quantitative Zielvorgaben. Zahlen und Fahrpläne werden sowohl für den Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energiequellen als auch für die Verringerung des Energiebedarfs angegeben. Unter den quantitativen Zielvorgaben finden sich einige ambitionierte. Und es finden sich auch *erstaunlich* ambitionierte. Zu den erstaunlich mutigen sollte die folgende gehören: Bis 2050 soll der deutsche Primärenergiebedarf *halbiert* werden! Der Primärenergiebedarf ist, vereinfacht formuliert, der Gesamtenergieaufwand, mit dem die Lebensprozesse einer Gesellschaft aufrechterhalten werden. Und dieser Aufwand soll in Deutschland halbiert werden. Wie soll das möglich sein? Soll sich das Land deindustrialisieren? Das wird kaum Ziel der offiziellen Politik sein. Oder sollen die Bürger ihren Energiekonsum radikal reduzieren? Das würde für die meisten eine drastische Änderung ihrer Lebensweise bedeuten. Vor allem einen Einschnitt in den gewohnten Komfort. Doch wie sollte eine solche Änderung des Lebensstils politisch motiviert werden? Genügsamkeit kann schlecht *verordnet* werden. Wenn aber weder Deindustrialisierung noch Komfortverzicht als politische Zielvorgaben plausibel sind, wie kann dann die im Energiekonzept der Bundesregierung festgehaltene Absicht verständlich gemacht werden, den gesamtgesellschaftlichen Energieaufwand zu halbieren?

Es gibt verschiedene Hebel, die in Bewegung gesetzt werden können, um den Energiebedarf zu senken. Zurzeit tauschen wir Glühbirnen gegen Energiesparlampen oder besser noch gegen LEDs aus; viele von uns haben sparsamere Autos als noch vor zehn Jahren;

Häuser werden gedämmt und Dreifachverglasungen werden eingesetzt etc. Damit und mit ähnlichen Maßnahmen mag der Energiebedarf um den einen oder anderen Prozentpunkt gedrückt werden. Doch eine Halbierung? Es fällt schwer sich vorzustellen, dass solche Maßnahmen den Energiebedarf wirklich halbieren könnten. Es müssen schon andere Hebel in Bewegung gesetzt werden, um solch drastische Reduktionen zu realisieren. Doch welche Hebel sollten dies sein?

Ein besonders langer und kräftiger Hebel soll in diesem Buch beschrieben werden: die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Auf den ersten Blick mag die These verwunderlich anmuten, die erneuerbaren Energien hätten *als solche* etwas mit dem Thema der Energieeinsparung zu tun. Bedeutet die Nutzung erneuerbarer Energiequellen nicht einfach die *Substitution* der Nutzung fossiler und nuklearer Energieträger? Wieso sollte es einen Effekt der Energieeinsparung geben, wenn nur die Energiequellen *ersetzt* werden? Benötigen wir *weniger* Energie, nur weil wir sie aus anderen Quellen beziehen? Welcher Zusammenhang sollte da bestehen?

In der Tat gibt es einen solchen Zusammenhang. Der Energieumsatz im Energieversorgungssystem, der energetische Aufwand, der betrieben wird, um die Energieversorgung sicherzustellen, kann drastisch sinken, wenn andere Energiequellen genutzt werden. Die Einspareffekte sind dabei nicht einer Reduktion der Energiedienstleistungen zuzurechnen, sondern der *Effizienz*, mit der letztere erbracht werden. Es handelt sich also um den besonders wünschenswerten Fall einer Energieeinsparung ohne – oder ohne größeren – Komfortverlust seitens der Energiekonsumenten.

Die Art der Gewinnung nutzbarer Energie ist *nicht* neutral hinsichtlich der Effizienz des Energiesystems. Sie ist eine Stellschraube für die Effizienz im Energiesystem, und zwar eine ganz wesentliche. Es ist vor allem die Energiegewinnung aus regenerativen Quellen, die das Potenzial hat, die Effizienz im Energiesystem enorm zu steigern. Das zentrale Kapitel 5 wird dies darlegen. Einige vorbereitende Kapitel führen zu diesem Kapitel hin. Zunächst wird der Energiebegriff selbst erläutert (Kapitel 1). Anschließend werden Motivation und allgemeine strategische Ausrichtung der Energiewende diskutiert (Kapitel 2). Dabei wird herausgestellt, dass eine zunehmende regenerativ basierte Energiegewinnung und die Erhöhung der Energieeffizienz die beiden hauptsächlichen Strategien der Energiewende sein sollten. In den nächsten zwei Kapiteln werden die Themen Energieeffizienz und erneuerbare Energien genauer behandelt (Kapitel 3 und 4). Nach dem zentralen Kapitel 5, in dem unter anderem dargelegt werden wird, dass ein effizientes zukünftiges Energiesystem vorrangig auf regenerativ erzeugtem Strom beruht, werden in Kapitel 6 einige Details eines solchen Energiesystems dargestellt. In Kapitel 7 werden Probleme der Energieeffizienz unter den Bedingungen eines zukünftigen vorrangig regenerativ basierten Energiesystems diskutiert. Einige kurz gehaltene Worte zu den Kosten der Energiewende schließen das Buch ab (Kapitel 8).

Energie ist eine grundlegende physikalische Größe. Gleichzeitig ist Energie ein wichtiges Thema in Politik, Wirtschaft und Ökologie.

1.1 Energie als physikalische Größe

Energie wird oft als die Fähigkeit beschrieben, Arbeit zu verrichten. Die in einem System vorhandene Energie impliziert die Möglichkeit, dass es Arbeit verrichtet. Der Begriff der Arbeit – physischer Arbeit – ist in der allgemeinen Umgangssprache und in der Sprache der Alltagsphysik schärfer umrissen als der der Energie. Daher wird in vielen Kontexten die Rückführung des Begriffs der Energie auf den Begriff der Arbeit als Erklärung akzeptiert.

Die Bestimmung des Energiebegriffs als Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, sagt nichts darüber aus, wie diese Fähigkeit instantiiert ist, wie die Zustände aussehen, die ein System befähigen, Arbeit zu verrichten. In der Tat sind diese Zustände sehr verschieden voneinander und lassen sich phänomenologisch gar nicht unter eine Klammer bringen. Energie kann in sehr verschiedenen Formen instantiiert sein, z. B. als die Bewegung eines Körpers oder als seine Lage etwa im Schwerfeld der Erde, sie kann sich in der Temperatur manifestieren, die ein Körper hat, und sie liegt im elektrischen Feld eines Kondensators vor oder in den chemischen Bindungen in einem Material. Energie gibt es u. a. in Form von Bewegungsenergie, Lageenergie, Wärmeenergie bzw. thermischer Energie¹, elektrischer Energie, chemischer Energie. Die Bündelung solch phänomenologisch verschiedener Zustände unter einen Begriff kann nur dadurch motiviert sein, dass die Energiezustände

¹ *Wärme* zur Bezeichnung einer Energieform zu benutzen ist entsprechend den terminologischen Bestimmungen in der Physik nicht richtig. Wärme ist nämlich als Prozessgröße beim Übergang von thermischer Energie von einem Körper auf einen anderen bestimmt, nicht als Zustandsgröße. *Thermische Energie* ist die korrekte Bezeichnung für die Energieform, deren Quantität sich phänomenologisch in der höheren oder niedrigeren Temperatur eines Körpers zeigt.

ein gemeinsames Merkmal jenseits ihrer sehr verschiedenen Realisierung aufweisen. Und als dieses gemeinsame Merkmal wird eben häufig angegeben, dass es sich bei den genannten Zuständen von Bewegung, Lage, Temperatur, Ladungsverteilung, chemischer Bindung etc. um Zustände handelt, die den Systemen erlauben, Arbeit zu verrichten. Durch den Rückgriff auf den anschaulicheren Begriff physischer Arbeit wird der Energiebegriff dabei selbst anschaulicher.

Außer dem verbindenden Merkmal, dass Energiezustände solche Zustände sind, die es einem System erlauben, Arbeit zu verrichten, gibt es noch ein weiteres wichtiges verbindendes Merkmal: Energiezustände können prinzipiell ineinander umgewandelt werden. Wir können daher auch formulieren, dass es plausibel ist, die phänomenologisch so verschiedenen Zustände unter eine gemeinsame Kategorie zu fassen, weil sie ineinander transformierbar sind. Und die Menge dieser ineinander transformierbaren Zustände ist die Menge der Energiezustände. Hinzu kommt, dass Energie zwar von einer Form in eine andere umgewandelt werden kann, dass sie aber in einem abgeschlossenen System² nicht entstehen oder verschwinden kann. D. h. wir können noch stärker formulieren, dass die voneinander sehr verschiedenen Energiezustände plausibel unter dem Begriff der Energiezustände zusammengefasst werden können, weil sie gemeinsam eine Erhaltungsgröße bilden.

Energie ist eine Erhaltungsgröße in abgeschlossenen Systemen. Sie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden; sie kann nur von einer Form in eine andere gewandelt werden. Außerdem kann sie innerhalb des Systems von einem Teilsystem auf ein anderes übertragen werden.

Nun haben wir zwei voneinander verschiedene Charakterisierungen des Energiebegriffs benannt. Zunächst haben wir Energie als die Fähigkeit vorgestellt, Arbeit zu verrichten. Und dann haben wir Energie als eine Erhaltungsgröße vorgestellt. Tatsächlich sind diese beiden Charakterisierungen nicht unabhängig voneinander: Energie ist eine Erhaltungsgröße; sie kann also nicht entstehen oder verschwinden, sie kann aber von einer Form in eine andere gewandelt und von einem Körper auf einen anderen übertragen werden. Einige dieser Übertragungsprozesse haben aber die Form von Arbeit. Der Zusammenhang lautet also, dass Energie stets so gewandelt werden kann (Energieerhaltung), dass sie in Arbeitsprozessen übertragen werden kann (Energie als Fähigkeit, Arbeit zu verrichten).

Wir werden später sehen, dass die Arbeitsfähigkeit in vielen Fällen eher theoretischer Natur ist und unter realen Bedingungen nicht immer vollständig gegeben ist. So lässt sich thermische Energie unter realen Bedingungen nicht vollständig zur Verrichtung von Arbeit nutzen. Dieser Gesichtspunkt wird im Weiteren noch sehr wichtig werden, doch für die physikalische Kennzeichnung von Energie können wir ihn erst einmal beiseitelassen.

Was ist nun aber Arbeit, bzw. genauer mechanische Arbeit? Arbeit ist die mechanische Übertragung von Energie. Arbeit wird verrichtet, wenn ein Körper mit Kraftaufwand bewegt wird. Dabei wird Energie auf ihn übertragen. Die übertragene Energie kann in

² Ein System ist genau dann abgeschlossen, wenn es keinen Energieaustausch (und keinen Stoffaustausch) über die Systemgrenzen hinweg gibt.

verschiedenen Formen vorliegen. Sie kann z. B. in Form von Bewegungsenergie, kinetischer Energie, vorliegen. Dies ist dann der Fall, wenn die aufgewandte mechanische Energie zur Beschleunigung des Körpers führt. Sie kann auch als Lageenergie, potentielle Energie, vorliegen, wenn der Körper in eine erhöhte Lage im Schwerfeld der Erde (oder in einem anderen konservativen Kraftfeld³) angehoben wird. Sie kann aber auch als thermische Energie vorliegen, wenn der Körper auf einer rauen Unterlage horizontal verschoben wird und sich Unterlage und bewegter Körper durch die zwischen ihnen auftretende Reibung erwärmen. Beschleunigen, anheben, verschieben – dies sind auch im umgangssprachlichen Verständnis des Begriffs physischer Arbeit paradigmatische Fälle von Arbeit.

Der Zusammenhang von Energie und Arbeit ist damit ein Stück klarer geworden: Energie liegt in verschiedenen Formen vor und kann prinzipiell von einer in die andere umgewandelt werden; sie kann außerdem von einem Körper auf einen anderen übertragen werden, wobei *eine* Art der Energieübertragung mechanische Arbeit ist. Arbeit kann nur dann verrichtet werden, wenn Energie vorhanden ist, die übertragen werden kann. Energie ist eine notwendige Bedingung dafür, dass Arbeit verrichtet werden kann.

Nun ist Arbeit nicht die einzige Art der Energieübertragung. Energie kann z. B. auch durch Wärme oder durch Strahlung übertragen werden. Wir können daher die Formulierung, dass Energie die Fähigkeit ist, Arbeit zu verrichten, auch verallgemeinern zu der Aussage, dass Energie die Fähigkeit ist, Energieübergänge zu ermöglichen, und das heißt Arbeit zu verrichten, Wärme abzugeben, Strahlung auszusenden etc. Manchmal wird in diesem verallgemeinerten Sinne formuliert, Energie sei die Fähigkeit, *Wirkungen* hervorzubringen.

1.2 Energie als Lebensgrundlage für Gesellschaften und als Wirtschaftsgut

Die Bestimmung von Energie als Fähigkeit, Wirkungen hervorzubringen – Arbeit zu verrichten, Wärme abzugeben, Strahlung, z. B. Licht, auszusenden –, gibt einen deutlichen Hinweis darauf, warum der Begriff der Energie auch in wirtschaftlichen, politischen und sozialen Kontexten von enormer Bedeutung ist. Jeder Vorgang hängt von vorhandener Energie ab. Energie ist der Treibstoff für jedweden Prozess. Wo Veränderungen geschehen sollen, müssen Wirkungen erzielt werden, ist also Energie nötig. Wo mechanische Arbeit verrichtet werden soll, wird Energie benötigt. Und wo etwas erwärmt oder gekühlt werden soll, Strom fließen oder eine Lampe brennen soll, muss ebenfalls Energie verfügbar sein. Energie ist eine Grundlage für alle Lebensprozesse von Gesellschaften und den Menschen in ihnen. Es ist daher von höchster Priorität für jede Gesellschaft und für jedes einzelne

³ Konservative Kraftfelder sind Felder, in denen ein Körper beim Durchlaufen eines in sich geschlossenen Weges weder Energie gewinnt noch verliert. Kehrt beispielsweise ein reibungsloses Pendel in einem Gravitationsfeld nach einer Periode an seinen Umkehrpunkt zurück, dann hat es die gleiche Energie (in diesem Fall: die gleiche potenzielle Energie) wie beim vorangehenden Erreichen des gleichen Umkehrpunkts.

ihrer Mitglieder, über einsetzbare Energie zu verfügen – und diese Verfügbarkeit auch sicherzustellen.

Energie ist ein wertvolles Gut. Wie die meisten wertvollen Güter ist Energie auch ein Wirtschaftsgut. Nutzbare Energie wird in modernen Gesellschaften in komplexen Energieversorgungssystemen erzeugt, transportiert, verteilt und verkauft. Ein leistungsfähiges Energiesystem ist heute eine ganz wesentliche Voraussetzung für eine leistungsfähige Gesellschaft. Und für jeden Einzelnen ist eine funktionierende Anbindung an das jeweils gegebene Energiesystem eine Voraussetzung dafür, dass er seine Handlungsmöglichkeiten in dem Maße realisieren kann, wie es in der ihn umgebenden Gesellschaft üblich ist. Probleme bei der Energieversorgung lähmen Gesellschaften und beschneiden Individuen in ihren Handlungsmöglichkeiten.

Energie ist nicht einfach ein Wirtschaftsgut unter anderen, sondern ein besonderes Gut. Sie ist ein besonders grundlegendes Gut. Indem sie eine notwendige Bedingung dafür ist, Arbeit zu verrichten sowie Wärme und Licht zu erzeugen, ist sie eine Basis für das Funktionieren der Wirtschaft insgesamt. Da, allgemeiner noch, Energie eine Grundlage für das Funktionieren von Gesellschaften überhaupt darstellt, ist sie so wertvoll, dass sie in vielen Fällen nicht dem freien Wirtschaftstreiben überantwortet, sondern in einen besonderen öffentlichen Schutzraum gestellt wird. Es gibt ein öffentliches Interesse an einer funktionierenden Energieversorgung. In vielen Ländern wird die Energieversorgung als staatliche Aufgabe angesehen. Und in den Ländern, in denen sie privatisiert ist, wird das Marktgeschehen vergleichsweise stark reglementiert.⁴

Manchmal wird die Energieversorgung zur Aufgabe einer gesamtgesellschaftlichen Daseinsfürsorge gezählt und somit auf eine Bedeutsamkeitsstufe mit der Wasserversorgung, dem Bildungswesen oder dem Gesundheitssektor gesetzt. Allerdings gibt es da auch Unterschiede: Bildungswesen und Gesundheitssektor werden zumindest in großen Teilen des europäischen Kulturraums als öffentliche Aufgabenbereiche angesehen, die der Marktlogik weitgehend entzogen werden müssen. Offensichtlich würde eine stark marktwirtschaftliche Strukturierung von Bildungs- und Gesundheitssektor mit der direkten Umlage der hohen Kosten der entsprechenden Angebote auf die Nachfragenden unmittelbar zu sozioökonomischen Diskriminierungen führen. Die Kosten könnten von einigen getragen werden, von anderen nicht. Eine Finanzierung durch die Gemeinschaft verhindert den Ausschluss von Teilen der Gesellschaft von Bildungsangeboten und Gesundheitsdienstleistungen, schützt die Durchlässigkeit der Gesellschaft und verteilt zumindest die finanzielle Komponente von Gesundheitsrisiken auf viele Schultern. In der Energie- und Wasserversorgung hingegen liegt die Notwendigkeit der Vergemeinschaftung der Kosten weniger nahe; und zumindest in Ländern, in denen keine Versorgungsknappheit bezüglich Energie und Wasser vorliegt, besteht weniger die Gefahr der Unterversorgung.

⁴ Es gibt neben den allgemein gesellschaftspolitischen Motiven aber auch technische Gründe dafür, dass die Energieversorgung stärker öffentlich kontrolliert ist als andere Wirtschaftszweige. Dazu gehört vor allem die Tatsache, dass einige Energieversorgungsstrukturen quasinatürliche Monopole darstellen. Es wird nicht mehrere im gleichen geographischen Raum parallel betriebene und somit konkurrierende Strom- und Gasnetze geben können.

Marktwirtschaftliche Strukturen können daher leichter implementiert werden. In der Tat wurden gerade in Europa in den letzten Jahrzehnten Energie- und Wasserversorgungsaufgaben aus dem öffentlichen Aufgabenbereich herausgelöst und in private – allerdings stark öffentlich kontrollierte – Hände geben. Ziel war dabei die Nutzung wirtschaftlicher Effizienzpotenziale, die regelmäßig bei der Privatisierung von Versorgungsstrukturen gehoben werden können. Den öffentlichen Regelungsmechanismen kommt aber weiterhin die Aufgabe zu, Versorgungssicherheit zu wahren und Missbrauch von Monopolstrukturen vorzubeugen. In Deutschland gibt es inzwischen vereinzelt auch Beispiele der Rekommunalisierung der Energieversorgung.

Da Energie ebenso wie Wasser, Nahrungsmittel und Rohstoffe ein grundlegendes Betriebsmittel nicht nur für die Wirtschaft, sondern für Gesellschaften überhaupt ist, bestimmt die Sicherung des Zugangs zu Energiequellen immer auch politische Beziehungen auch auf höchster Ebene mit. Man denke etwa an die militärisch-politische Präsenz der USA im arabischen Raum, die auf offizieller politischer Ebene in freundschaftlichen Bahnen verlaufende Beziehung zu Saudi-Arabien, die Motive für den Irakkrieg etc. In diesen Fällen ist es der internationale Erdölhandel, der die geopolitischen Beziehungen prägt. Die USA ist bislang der größte Erdölimporteur⁵ und gestaltet seine Außenpolitik auch nach Maßgabe der Sicherung des Zugangs zu den entsprechenden Handelsquellen. Rohstoffe, Wasser, Nahrungsmittel und Energie sind derart wichtige Lebensgrundlagen von Gesellschaften, dass es notwendigerweise eine politische Grundaufgabe einer jeden Regierung ist, Bezugsquellen verfügbar zu halten.

⁵ Es ist abzusehen, dass die USA diesen Titel bald abgeben werden, da sie ihre Energieimportabhängigkeit durch die zunehmende Nutzung von Schieferöl und -gas allmählich abbauen.

Die Energiepolitik arbeitet sich seit einiger Zeit am Begriff der Energiewende ab. Der Terminus *Wende* deutet darauf hin, dass eine generelle Neuorientierung der Energieversorgung ansteht oder dass eine solche zumindest angestrebt wird. Warum bedarf es einer solchen Neuorientierung?

2.1 Energieverbrauch

Wir haben auf die Bedeutsamkeit der Energieversorgung für moderne Gesellschaften und die Menschen in ihnen hingewiesen. In der Tat ist unser gegenwärtiger Lebensstil abhängig wie noch nie zuvor von der Verfügbarkeit großer Mengen nutzbarer Energie. Die Geschichte der Menschheit über die letzten Jahrhunderte hinweg lässt sich gut beschreiben als die Geschichte einer enormen Zunahme des Energiekonsums.

Der gemittelte energetische Grundumsatz eines Menschen beträgt etwa 80 W. Diese Leistung bringt er auf, um seine Lebensfunktionen aufrechtzuerhalten. Bei ansteigender körperlicher Arbeit nimmt der Energieumsatz entsprechend zu. Über einen Zeitraum von einigen Stunden kann ein Mensch eine Leistung von etwa 250 W erbringen. Viel mehr ist über einen längeren Zeitraum nicht möglich. Spitzensportler können für kurze bis sehr kurze Zeiträume (wenige Sekunden) Leistungen abrufen, die eine knappe Größenordnung darüber liegen. Die für die Körperfunktionen benötigte Energie nimmt der Mensch in chemisch gebundener Form über die Nahrung auf. Die biologisch definierten Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit bestimmen dabei die Grenzen des körpergebundenen Energieumsatzes. Doch der Mensch als geschickter Werkzeugbauer ist nicht auf die Grenzen seiner körperlichen Leistungsfähigkeit angewiesen. Er kann seine Wirkungsmöglichkeiten ausdehnen, indem er Technik nutzt – und dabei zur Erreichung seiner Ziele Energie einsetzt, die nicht durch Nahrungsaufnahme und Muskelkraft limitiert ist. Durch Technikeinsatz kann der Energieumsatz in große Höhen gehoben werden. Den verlängerten Technikarm eingerechnet setzt ein Deutscher heute Energie mit einer durchschnittlichen

Leistung von 5400 W um. Dieser Wert ergibt sich, legt man den Primärenergieverbrauch Deutschlands auf die Bevölkerung um. Der Primärenergieverbrauch ist das beste verfügbare Maß für den Energieumsatz einer Gesellschaft. Das uns heute zur Verfügung stehende Energiesystem stellt uns also das knapp Siebzifache der Energie zur Verfügung, die wir zum unmittelbaren Überleben bräuchten und etwa das Vierzigfache dessen, was wir durch körperlich schwere Arbeit dauerhaft leisten könnten. Das ist viel im Vergleich zu vielen anderen Ländern, bei weitem aber noch kein Spitzenwert: Ein Einwohner von Katar benötigt noch dreimal mehr.

Die Kulturgeschichte des Menschen ist von einem ganz enormen Anstieg des Energiebedarfs (absolut, aber auch pro Kopf) gekennzeichnet. Der Mensch hat zunehmend seinen Aktionsradius und seine Wirkmöglichkeiten ausgeweitet. Die dazu benötigte Energie überstieg in immer deutlicherer Weise die Leistung, die er durch eigene Muskelkraft aufzubringen vermag. Als Energiegrundlage dienten dann nicht mehr die von ihm aufgenommenen Nahrungsmengen, sondern andere Quellen. Eine schon frühzeitig genutzte Möglichkeit war der Einsatz von Arbeitstieren wie Pferden und Ochsen. Später kamen technische Hilfsmittel dazu. Eisenbahnen, Autos und schließlich Flugzeuge machten den Menschen zunehmend räumlich flexibel und Maschinen halfen ihm, Arbeitsprozesse schneller und bequemer auszuführen. Mit der Entwicklung eines energieintensiven Lebensstils mussten zunehmend neue und ergiebige Energiequellen angezapft werden. In einer gering technisierten Welt nahm der Mensch noch mit den ihm unmittelbar zugänglichen Energiequellen vorlieb. Er nutzte etwa vorhandenes Holz als Brennstoff, veredelte es möglicherweise noch in einer Köhlerei zu Holzkohle. Doch schon bald begann er, sich auch nach entfernteren und weniger leicht zugänglichen Energiequellen umzusehen. Im Mittelalter wurden auf dem Gebiet des heutigen Deutschland nahezu alle Wälder genutzt. Ungenutzt blieben nur Wälder an steileren Hängen oder in den Jagdrevieren des Adels. Irgendwann musste man bemerken, dass die Holzvorräte nur begrenzt zur Verfügung standen und man mit ihnen haushalten musste. Forstwirte betonen heute noch gern, dass der Begriff der Nachhaltigkeit daher in ihren Reihen zuerst in Verwendung kam.¹

Ähnlich wie dem Energie- und Baurohstoff Holz erging es später fossilen Energierohstoffen. Der besonders hochwertige Energieträger Erdöl wurde seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zu einem der wichtigsten und am vielfältigsten einsetzbaren Energieträger. Er wurde in zunehmenden Mengen gefördert; viele ergiebige und leicht zugängliche Lagerstätten wurden entdeckt und sukzessive genutzt. Einige dieser Lagerstätten sind inzwischen erschöpft und der weiter gestiegene Bedarf wird durch Lagerstätten bedient, die schwerer zugänglich sind und bei denen die Förderung aufwändiger oder auch gefährlicher ist. Ereignisse wie die Ölplattform-Havarie 2010 im Golf von Mexiko rücken die Risiken ins öffentliche Bewusstsein, die eingegangen werden, um Energierohstoffe aus allen erdenklichen Winkeln der Erde herbeizuschaffen. Schließlich hat der Energiehunger gar dazu geführt, mit der Kernenergie-Nutzung geradezu unglaubliche Großrisiken

¹ Hans Carl von Carlowitz hat 1713 in der Schrift *Silvicultura oeconomica* darauf hingewiesen, dass der Rohstoff Holz sorgsam eingesetzt werden muss, um eine dauerhafte Nutzung nicht zu gefährden.

menschlicher Grundenergieumsatz	80
leichte Arbeit	100
körperlich schwere Arbeit über einige Stunden hinweg	250
Primärenergieleistung pro Einwohner Bangladesch	272
durchschnittliche Leistung eines Radprofis bei großen Rundfahrten	300
Spitzen-Radprofi an Berganstieg (halbe Stunde)	450
kurzzeitige (wenige Sekunden) Spitzenleistung von Profi-Radsprintern	2000
Endenergieleistung pro Einwohner Deutschland	3100
Primärenergieleistung pro Einwohner Deutschland	5400
Primärenergieleistung pro Einwohner Katar	23100

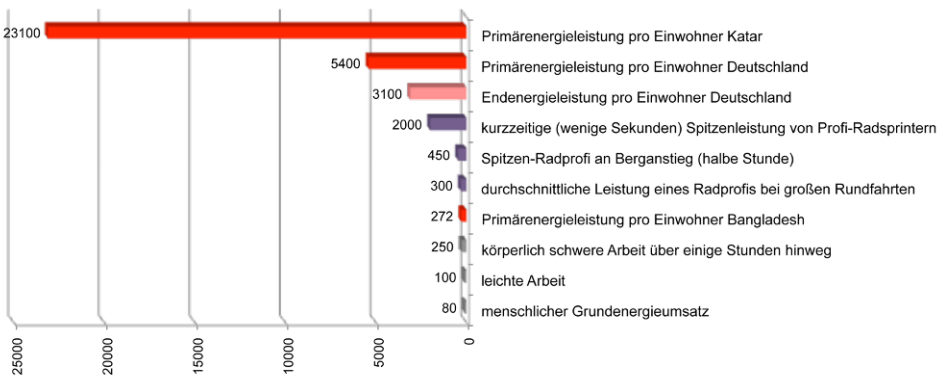


Abb. 1 Primärenergieleistungen pro Kopf in verschiedenen Ländern (rot) im Vergleich zum Energieumsatz eines Menschen (grau) und zu sportlichen Leistungen (violett), in [W] (Grafik: M. Günther)

einzuweisen. Der Wunsch nach größeren Wirkungsmöglichkeiten und größeren Aktionsradien ist offensichtlich so mächtig, dass dafür enorme Risiken eingegangen werden.

Der Energiebedarf ist nicht intrinsisch gedeckelt. Es gibt keine sozusagen natürliche Grenze des Energiebedarfs, ab der sich Energie nicht mehr sinnvoll einsetzen ließe. Der Konsum von Nahrungsmitteln etwa hat eine intrinsische Grenze. Ein Mensch kann nur eine bestimmte Menge Nahrungsmittel sinnvoll verbrauchen; ihr Konsum begrenzt den weiteren unmittelbaren Bedarf. Es gibt das Phänomen der *Sättigung*. Beim Energiekonsum gibt es keine oder zumindest keine klare Sättigungsgrenze. Auch mit sehr großen Energiemengen können immer noch Aktivitäten gestaltet werden, die aus subjektiver Bedürfnissicht sinnvoll sein können. Der Handlungsradius wächst ja immer noch ein Stück an, je mehr Energie zum Verbrauch bereitsteht. Energiekonsum hat einen extensiven Charakter. Der tatsächliche Energiekonsum wird durch *äußere* Faktoren begrenzt, insbesondere durch verfügbare finanzielle Mittel. Es liegt in der Natur des intrinsisch nicht begrenzbaeren Energiekonsums, dass hinreichend leicht zugängliche und ergiebig verfügbare Quellen auch *genutzt* werden. Es gibt keine Bremse, die quasi automatisch angezogen wird,