



TECHNIK IM FOKUS

GRÜNE FAKTEN HINTERGRÜNDE

Thomas Schabbach
Viktor Wesselak

Energie

Die Zukunft wird erneuerbar

 Springer Vieweg

Technik im Fokus

Technik im Fokus

Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird

Wesselak, Viktor; Voswinckel, Sebastian, ISBN 978-3-642-24296-0

Komplexität – Warum die Bahn nie pünktlich ist

Dittes, Frank-Michael, ISBN 978-3-642-23976-2

Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?

Neles, Julia Mareike; Pistner, Christoph (Hrsg.), ISBN 978-3-642-24328-8

Energie – Die Zukunft wird erneuerbar

Schabbach, Thomas; Wesselak, Viktor, ISBN 978-3-642-24346-2

Weitere Bände zur Reihe finden Sie unter

<http://www.springer.com/series/8887>

Thomas Schabbach · Viktor Wesselak

Energie

Die Zukunft wird erneuerbar

 Springer Vieweg

Thomas Schabbach
Nordhausen, Deutschland

Viktor Wesselak
Nordhausen, Deutschland

Konzeption der Energie-Bände in der Reihe Technik im Fokus: Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak, Institut für Regenerative Energiesysteme, Fachhochschule Nordhausen

Extra Programme unter <http://extras.springer.com/2012/978-3-642-23976-2>

ISSN 2194-0770

ISBN 978-3-642-24346-2

ISBN 978-3-642-24347-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-24347-9

Springer Berlin Heidelberg Dordrecht London New York

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-Verlag Berlin Heidelberg 2012

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.

Lektorat: Eva Hestermann-Beyerle

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.

Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

www.springer.com

Vorwort

Zunehmende Wetterextreme als spürbare Folgen des Klimawandels, Preisrekorde bei Benzin, Diesel und anderen Energieträgern und schließlich die Reaktorkatastrophe von Fukushima haben die Energieversorgung zu einem zentralen Diskussionsthema unserer Zeit werden lassen. Mit dem Bekenntnis zu mehr Klimaschutz und dem Ausstieg aus der Atomenergie ist ein Prozess eingeleitet worden, der unsere Energieversorgung und voraussichtlich auch unseren Umgang mit Energie nachhaltig verändern wird.

Kapitel 1: Was ist Energie? Energie ist die Voraussetzung aller natürlichen Prozesse und damit auch Grundbedingung für die menschliche Existenz. Die Nutzung unterschiedlicher Energieträger hat die Menschheitsgeschichte entscheidend beeinflusst. So war die technische Grundlage der industriellen Revolution die Erschließung der fossilen Energieressourcen Kohle und Rohöl sowie die Entwicklung der Wärmekraftmaschinen.

Kapitel 2: Woraus entsteht Energie? Ein Leben ohne den Einsatz elektrischer Energie und fossiler Treibstoffe wäre in heutiger Zeit undenkbar. Fossile, nukleare und regenerative Energieträger bilden die Basis unserer Energieversorgung; durch ihre Umwandlung entsteht die Nutzenergie. Die Physik mit den Hauptsätzen der Thermodynamik gibt die Grenzen vor, innerhalb derer diese Umwandlung erfolgen kann. Ihnen unterliegen nicht nur die Wärmekraftmaschinen, sondern auch alle anderen Energiewandler wie Solarzellen, geothermische Kraftwerke oder Verbrennungsmotoren.

Kapitel 3: Wofür wird Energie benötigt? Energie wird zur Stromerzeugung, Wärmebereitstellung und für Mobilität benötigt. Dabei gibt es weltweit große Unterschiede: So verbraucht beispielsweise ein Einwohner Deutschlands mehr als das Zehnfache der Energie, die einem Einwohner Indiens zur Verfügung steht. Dabei werden nur 40 Prozent des deutschen Primärenergiebedarfs aus dem eigenen Land gedeckt und nur 10 Prozent basieren auf regenerativen Energien.

Kapitel 4: Warum muss sich die Energieerzeugung ändern? Die Endlichkeit der fossilen und nuklearen Energieträger, die Emission von Treibhausgasen mit der Folge des Klimawandels und nicht zuletzt die Konflikte um die globalen Energieressourcen sind der Grund, warum die Umstellung unseres Energiesystems auf erneuerbare Energien unvermeidbar ist.

Kapitel 5: Was macht die Energiepolitik? Auf dem Weg zu einer nachhaltigen, auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung müssen zuerst die Potenziale der Energievermeidung und Energieeffizienz ausgeschöpft werden. Die aktuelle Energiepolitik Deutschlands liefert zahlreiche Ansätze, wie die erklärten Ziele über Gesetze und Verordnungen erreicht werden sollen.

Kapitel 6: Wie sieht die Energieversorgung der Zukunft aus? Das Potenzial der regenerativen Energien ist mehr als ausreichend, um weltweit ein nachhaltiges und gerechtes Energiesystem aufzubauen. Die dazu notwendigen Änderungen werden an einer für Deutschland entwickelten Modellrechnung aufgezeigt.

Als Autoren ist uns bewusst, dass wir mit diesem Buch nur einen sehr begrenzten Einblick in das komplexe und faszinierende Thema Energie geben können. Wir haben uns bemüht, weitestgehend auf eine naturwissenschaftliche und ingenieurtechnische Fachsprache zu verzichten. Sollte dennoch an der einen oder anderen Stelle der Ingenieur durchscheinen, bitten wir dies zu entschuldigen – ebenso wie Fehler, die trotz sorgfältigen Bemühens unerkannt blieben.

Wir danken dem Springer-Verlag und besonders Frau Hestermann-Beyerle für die Gelegenheit, nach unserem Lehrbuch zur Regenerativen Energietechnik für Ingenieurstudierende, uns nun auch mit einem Sachbuch an eine breitere Öffentlichkeit wenden zu dürfen. Nach unserer Ansicht kann die anstehende grundlegende Umgestaltung unseres Energiesystems nur dann erreicht werden, wenn die Betroffene-

nen – wir alle – über die nötigen ideologiefreien Informationen und Sachkenntnisse zum Thema Energie verfügen.

Nordhausen, im März 2012

Viktor Wesselak
Thomas Schabbach
Professoren für Regenerative bzw.
Thermische Energiesysteme am Institut für
Regenerative Energietechnik (in.RET)
der Fachhochschule Nordhausen

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1 Was ist Energie? | 1 |
| 1.1 Kurze Geschichte der Energienutzung | 1 |
| 1.1.1 Produktivität und Effizienz | 2 |
| 1.1.2 Der Mensch als Energiewandler | 3 |
| 1.1.3 Von der Steinzeit zur neolithischen Revolution | 5 |
| 1.1.4 Bewässerungskulturen | 7 |
| 1.1.5 Die merkantil-sklavistischen Reiche | 11 |
| 1.1.6 Exkurs: Das normannische Grönland | 14 |
| 1.1.7 Die Holzkrise des Mittelalters und die industrielle Revolution | 16 |
| 1.1.8 Energiegeschichte als Geschichte der Energiekrisen | 21 |
| 1.1.9 Die solare Revolution? | 23 |
| 1.2 Energiebegriff | 25 |
| 1.2.1 Energieformen | 26 |
| 1.2.2 Energiewandlungen | 31 |
| 2 Energiegewinnung | 37 |
| 2.1 Fossile Energieträger | 38 |
| 2.1.1 Der Kraftwerksprozess | 39 |
| 2.1.2 Heizkraftwerke | 43 |
| 2.1.3 Rauchgasreinigung | 44 |
| 2.1.4 CO ₂ -Abtrennung | 45 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.1.5 | Gasturbinen-Kraftwerke | 47 |
| 2.1.6 | GuD-Kraftwerke | 48 |
| 2.1.7 | Wärmebereitstellung | 49 |
| 2.1.8 | Transport und Verkehr | 53 |
| 2.2 | Nukleare Energieträger | 54 |
| 2.2.1 | Kernspaltung | 55 |
| 2.2.2 | Kraftwerkstechnik | 61 |
| 2.2.3 | Sicherheit und Risiken | 64 |
| 2.2.4 | Fusionsreaktoren | 67 |
| 2.3 | Regenerative Energieträger | 68 |
| 2.3.1 | Photovoltaik | 69 |
| 2.3.2 | Solarthermie | 75 |
| 2.3.3 | Solarthermische Stromerzeugung | 83 |
| 2.3.4 | Geothermie | 85 |
| 2.3.5 | Geothermische Stromerzeugung | 91 |
| 2.3.6 | Windenergie | 94 |
| 2.3.7 | Wasserkraft | 97 |
| 2.3.8 | Biomasse | 100 |
| 2.3.9 | Biogas | 103 |
| 2.3.10 | Energiespeicher | 106 |
| 3 | Energieverbrauch | 113 |
| 3.1 | Globaler Energieverbrauch | 113 |
| 3.2 | Energieverbrauch und -bereitstellung in Deutschland | 116 |
| 3.3 | Energiebereitstellung im Wandel – am Beispiel von Sachsen und Thüringen | 120 |
| 4 | Grundprobleme der Energieversorgung | 125 |
| 4.1 | Endlichkeit der Ressourcen | 125 |
| 4.2 | Gerechtigkeit der Verteilung | 128 |
| 4.3 | Klimawandel | 130 |
| 4.4 | Bausteine für eine nachhaltige Energieversorgung | 134 |
| 5 | Energiepolitik in Deutschland | 141 |
| 5.1 | Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) | 143 |
| 5.2 | Energie-Einsparverordnung (EnEV) | 145 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.3 | Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG) | 149 |
| 5.4 | Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG) | 150 |
| 5.5 | Atomausstieg | 151 |
| 6 | Die Zukunft der Energieversorgung | 155 |
| 6.1 | Energiepotenziale | 156 |
| 6.2 | Szenarien und Prognosen | 159 |
| 6.3 | Leitszenario 2009 | 161 |
| | Nachwort | 167 |
| | Literaturauswahl | 169 |
| | Quellenverzeichnis | 171 |
| | Index | 175 |

Zusammenfassung

Energie ist eine Voraussetzung aller natürlichen Prozesse. Keine Bewegung, keine Umwandlung eines Stoffes, keine chemische Reaktion und schließlich kein Leben ist ohne die Beteiligung von Energie denkbar. Genauer gesagt: jeder dieser Prozesse basiert auf der Umwandlung von Energie. Energie ist auch die Grundbedingung für die Existenz des Menschen und seiner Gesellschaften. Im Laufe der Geschichte hat der Mensch gelernt, sich unterschiedliche Energieträger anzueignen und durch geeignete Energietechniken nutzbar zu machen. Diese Entwicklung lässt sich jedoch nicht nur auf technische Fragestellungen reduzieren, sondern ist immer eng mit gesellschaftlichen Prozessen verknüpft. Daher soll in diesem Kapitel zunächst ein kurzer Überblick über die historische Entwicklung der Energienutzung gegeben werden, bevor die unterschiedlichen Energieformen sowie mögliche natürliche und technische Umwandlungspfade und deren Grenzen vorgestellt werden.

1.1 Kurze Geschichte der Energienutzung

Der Nutzen, den der Mensch aus Energie zieht, lässt sich grob in die vier Bereiche Nahrung, Wärme, Arbeit und Verkehr einteilen. *Nahrung* stellt die unmittelbare Energienutzung dar: Dem menschlichen Stoff-

wechsel wird chemische Energie in Form von organischen Verbindungen zugeführt. Der Aufbau dieser Energie erfolgt durch die Umwandlung von Sonnenenergie mittels der Photosynthese der Pflanzen bzw. durch den Stoffwechsel der Tiere. *Wärme* dient der Nahrungszubereitung und sorgt damit für einen verbesserten energetischen Aufschluss. Sie dient der Erwärmung von Wohnstätten und ermöglicht so die Besiedlung eines Großteils der Landfläche. Und schließlich ist sie als Prozesswärme die Grundlage vieler industrieller Produktionsprozesse. Unter *Arbeit* wird die vielfältige Nutzung mechanischer Energien durch die Muskelkraft von Menschen und Tieren sowie durch Maschinen zusammengefasst. *Verkehr* schließlich ermöglicht einen regionalen und überregionalen Austausch von Waren, Dienstleistungen sowie Informationen und gleicht damit beispielsweise gegebene oder entstandene Ungleichgewichte der ersten drei Bereiche aus.

1.1.1 Produktivität und Effizienz

Die Geschichte der Energietechnik ist sowohl von Entwicklungen auf dem Gebiet der Energiebereitstellung als auch der Energienutzung geprägt. In ihrem Zusammenspiel entscheiden sie über den Erfolg eines Energiesystems, d. h. über sein Vermögen, eine Gesellschaft zu erhalten und zu entwickeln.

Die Qualität von Energiebereitstellung und Energienutzung lässt sich durch die Produktivität und die Effizienz beschreiben. Die Produktivität der Energiebereitstellung wird durch den Erntefaktor ausgedrückt: eine bestimmte Energiemenge wird in die Nutzung einer Energiequelle investiert und dafür wird eine die investierte Energie möglichst übersteigende Energiemenge geerntet. Der *Erntefaktor* e wird durch das Verhältnis

$$e = \frac{\text{geerntete Energie}}{\text{investierte Energie}}$$

beschrieben. So ist die Produktivität einer Ackerbaugesellschaft beispielsweise gegeben durch das Verhältnis von geernteten Nahrungsmitteln

teln zu dem eingesetzten Saatgut sowie der investierten Arbeit. Die Produktivität des elektrischen Energiesystems einer Industriegesellschaft bestimmt sich aus dem Verhältnis der gewonnenen elektrischen Energie zu der eingesetzten Arbeit zur Gewinnung der Energieträger sowie zum Bau und Betrieb der Kraftwerke.

Die *Effizienz* beschreibt den Wirkungsgrad der Energienutzung und wird häufig mit dem griechischen Buchstaben η (eta) bezeichnet. Sie gibt das Verhältnis von Nutzenergie zur eingesetzten, konsumierten Energie an:

$$\eta = \frac{\text{Nutzenergie}}{\text{konsumierte Energie}}$$

In einer Ackerbaugesellschaft steht beispielsweise die menschliche Arbeitskraft im Vordergrund. Die in Form von Nahrung konsumierte Energie kann zu einem bestimmten Teil wieder in Arbeit umgesetzt werden. Diese stellt dann die Nutzenergie dar, die wieder in den Nahrungsanbau investiert werden kann. In einer Industriegesellschaft werden unterschiedlichste Kraft- und Arbeitsmaschinen eingesetzt, um mechanische Arbeit zum Zweck des Antriebs, der Förderung oder der Verformung zu verrichten. Diese Maschinen konsumieren Energie in Form von Brennstoffen, sofern sie von einer Dampfmaschine oder einem Verbrennungsmotor angetrieben werden, oder Elektrizität, wenn sie von einem Elektromotor angetrieben werden.

Produktivität und Effizienz sind also die beiden Stellschrauben jedes Energiesystems: Je höher der Erntefaktor, desto mehr Energie steht bei gleichem Einsatz zur Verfügung; je höher die Wirkungsgrad, desto weniger Energie muss bei gleichem Nutzen aufgewendet werden.

1.1.2 Der Mensch als Energiewandler

Bis weit in das 19. Jahrhundert hinein war die menschliche Muskelkraft die Hauptquelle für mechanische Arbeit. Neue Erfindungen, wie die 1712 von Thomas Newcomen konstruierte und ab 1769 von James Watt verbesserte Dampfmaschine, die 1804 von Richard Trevithick vorgestellte Lokomotive oder die 1834 von Cyrus McCormick patentierte

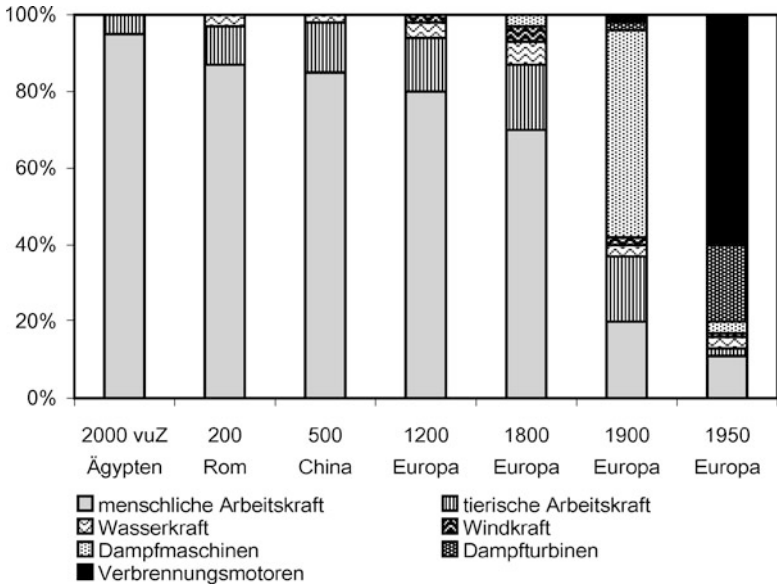


Abb. 1.1 Anteil unterschiedlicher Energiewandler an der in einer Gesellschaft verrichteten Nutzarbeit, nach [6]

Mähmaschine setzten sich nur langsam durch. Abbildung 1.1 zeigt den Anteil der menschlichen Muskelkraft an der in einer Gesellschaft verrichteten Nutzarbeit. Bemerkenswert ist u. a. der vergleichsweise geringe Anteil der Arbeitskraft von Tieren.

Ein erwachsener Mensch benötigt je nach körperlicher Belastung eine Energiezufuhr zwischen 2000 und 4000 Kilokalorien pro Tag. Das entspricht etwa 2,3 bis 4,6 kWh. (Die Umrechnung von Energieeinheiten kann mit Hilfe von Tab. 1.2 erfolgen.) Diese Energie nimmt der Mensch durch Nahrungsmittel pflanzlicher und tierischer Herkunft auf und ist damit in der Lage, über einen längeren Zeitraum eine Leistung zwischen 75 und 100 Watt zu erbringen. Kurzzeitig – beispielsweise bei einem Kurzstreckenlauf – sind Spitzenleistungen bis zu 1000 Watt möglich. Setzt man die über einen Arbeitstag erbrachte Dauerleistung ins Verhältnis zu der konsumierten Energie, so ergibt sich für den Menschen ein Wirkungsgrad von etwa 20 Prozent. Demgegenüber liegt die