

Thomas Schabbach  
Viktor Wesselak

# Energie

Den Erneuerbaren  
gehört die Zukunft

SACHBUCH



Springer

---

# Technik im Fokus

Die Buchreihe Technik im Fokus bringt kompakte, gut verständliche Einführungen in ein aktuelles Technik-Thema.

Jedes Buch konzentriert sich auf die wesentlichen Grundlagen, die Anwendungen der Technologien anhand ausgewählter Beispiele und die absehbaren Trends.

Es bietet klare Übersichten, Daten und Fakten sowie gezielte Literaturhinweise für die weitergehende Lektüre.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/8887>

---

Thomas Schabbach ·  
Viktor Wesselak

# Energie

Den Erneuerbaren gehört die  
Zukunft

2., vollständig überarbeitete und neu  
strukturierte Auflage

 Springer

Thomas Schabbach  
Institut für Regenerative  
Energietechnik  
Hochschule Nordhausen  
Nordhausen, Deutschland

Viktor Wesselak  
Institut für Regenerative  
Energietechnik  
Hochschule Nordhausen  
Nordhausen, Deutschland

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

ISSN 2194-0770

ISSN 2194-0789 (electronic)

Technik im Fokus

ISBN 978-3-662-58048-6

ISBN 978-3-662-58049-3 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58049-3>

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, 2020

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.

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

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

---

## Vorwort

Der Klimawandel und die Verknappung natürlicher Ressourcen fordern die menschliche Zivilisation in einer nie gekannten Weise heraus. Zunehmende Wetterextreme, abschmelzende Gletscher und ein Anstieg des Meeresspiegels sind die Vorboten kommenden Wandels. Dass diese mit der Freisetzung von Treibhausgasen – insbesondere durch die Verbrennung fossiler Energieträger – zusammenhängen, wird wissenschaftlich schon lange nicht mehr in Zweifel gezogen. Die internationale Politik hat darauf reagiert und mit dem 2016 in Kraft getretenen Pariser Weltklimaabkommen klare Leitlinien für unsere zukünftige Entwicklung vorgegeben: um die Erderwärmung bis zum Jahr 2050 auf unter zwei Grad zu begrenzen, sollen die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2050 auf null zurückgefahren werden.

Denkt man die vor uns liegende Entwicklung von diesem Ende her, so sind die uns zur Verfügung stehenden Zeiträume für den Technologiewandel überschaubar: wenn 2050 keine Kohlekraftwerke mehr am Netz sein sollen, dürfen heute keine mehr errichtet werden; wenn 2050 keine fossil befeuerten Heizungskessel mehr im Einsatz sein sollen, dürfen nach 2030 keine mehr eingebaut werden; wenn 2050 keine fossil angetriebenen Kraftfahrzeuge mehr im Verkehr sein sollen, dürfen nach 2035 keine mehr neu zugelassen werden.

Wie kann ein solches, treibhausgasneutrales Energiesystem im Jahr 2050 für ein Industrieland wie Deutschland aussehen? Welche Technologien stehen uns zur Verfügung, um unseren Energiebedarf an Strom, Wärme und Mobilität zu decken?

Welche Speicher werden dafür benötigt? Und schließlich: welche Schritte müssen Politik und Gesellschaft dafür gehen?

Auf diese Fragen werden wir im Rahmen dieses Buches Antworten geben. Dabei ist uns bewusst, dass wir nur einen ersten Einblick in das komplexe und faszinierende Thema Energie geben können. Wir haben uns bemüht, weitestgehend auf eine 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 für die Gelegenheit, uns mit diesem Sachbuch in einer aktualisierten und vollständig überarbeiteten Auflage erneut an eine breitere Öffentlichkeit wenden zu dürfen. Nach unserer Ansicht kann die anstehende grundlegende Umgestaltung unseres Energiesystems nur dann erreicht werden, wenn die Betroffenen – wir alle – über die nötigen ideologiefreien Informationen und Sachkenntnisse zum Thema Energie verfügen.

im Mai 2019

Thomas Schabbach  
Viktor Wesselak  
Professoren am Institut für  
Regenerative Energietechnik (in.RET)  
der Hochschule Nordhausen, Nordhausen

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Eine kurze Geschichte der Energienutzung</b> . . . . .	1
1.1	Produktivität und Effizienz . . . . .	2
1.2	Der Mensch als Energiewandler . . . . .	3
1.3	Von der Steinzeit zur neolithischen Revolution . . . . .	5
1.4	Bewässerungskulturen . . . . .	7
1.5	Die merkantil-sklavistischen Reiche . . . . .	11
1.6	Exkurs: Das normannische Grönland . . . . .	15
1.7	Die Holzkrise des Mittelalters und die industrielle Revolution . . . . .	17
1.8	Energiegeschichte als Geschichte der Energiekrisen . . . . .	22
1.9	Die solare Revolution? . . . . .	24
	Literatur . . . . .	26
<b>2</b>	<b>Energieformen und Energiebedarf</b> . . . . .	27
2.1	Der Energiebegriff . . . . .	27
2.2	Energieformen . . . . .	28
2.3	Energiewandlungen . . . . .	35
2.4	Der globale Energiebedarf und seine Deckung . . . . .	41
2.5	Der deutsche Energiebedarf und seine Deckung . . . . .	44
2.6	Energiebereitstellung im Wandel – am Beispiel von Sachsen und Thüringen . . . . .	47
	Literatur . . . . .	50

<b>3</b>	<b>Stromerzeugung und -speicherung</b> . . . . .	53
3.1	Kohlekraftwerke. . . . .	55
3.1.1	Der Kraftwerksprozess . . . . .	55
3.1.2	Heizkraftwerke. . . . .	60
3.1.3	Rauchgasreinigung . . . . .	60
3.1.4	CO <sub>2</sub> -Abtrennung . . . . .	62
3.2	Gas-Kraftwerke . . . . .	65
3.2.1	Gasturbinen-Kraftwerke . . . . .	65
3.2.2	GuD-Kraftwerke . . . . .	66
3.3	Nuklearkraftwerke . . . . .	67
3.3.1	Radioaktivität – Strahlung – Wirkung . . . . .	69
3.3.2	Kernspaltung . . . . .	71
3.3.3	Kraftwerkstechnik . . . . .	75
3.3.4	Sicherheit und Risiken. . . . .	77
3.3.5	Radioaktive Abfälle . . . . .	81
3.3.6	Fusionsreaktoren . . . . .	82
3.4	Photovoltaik . . . . .	83
3.5	Solarthermische Stromerzeugung . . . . .	90
3.6	Geothermische Stromerzeugung . . . . .	93
3.7	Windenergieanlagen. . . . .	95
3.8	Wasserkraftwerke. . . . .	99
3.9	Biomasse-Kraftwerke . . . . .	102
3.9.1	Biomasseproduktion . . . . .	103
3.9.2	Biomasse als Brennstoff . . . . .	103
3.10	Biogas-Anlagen . . . . .	107
3.11	Brennstoffzellen. . . . .	110
3.12	Elektrische Energiespeicher. . . . .	112
3.12.1	Speicherwasserkraftwerke . . . . .	113
3.12.2	Druckluftspeicherkraftwerk. . . . .	114
3.12.3	Power-to-Gas . . . . .	117
3.12.4	Schwungmassenspeicher . . . . .	121
3.12.5	Elektrochemische Energiespeicher . . . . .	122
	Literatur. . . . .	124

---

<b>4</b>	<b>Wärmebereitstellung</b> .....	127
4.1	Wärme und Energiequalität .....	128
4.2	Öl- und Gasheizkessel .....	130
4.3	Biomasse-Heizungen .....	132
4.4	Wärmepumpen .....	135
	4.4.1 Erdgekoppelte Wärmepumpen .....	138
	4.4.2 Außenluft-Wärmepumpen .....	141
4.5	Solarthermieranlagen .....	143
	4.5.1 Kollektortechnik .....	143
	4.5.2 Solaranlagen .....	149
4.6	Wärmenetze .....	153
	4.6.1 Fernwärmenetze .....	154
	4.6.2 Nahwärmenetze .....	154
	4.6.3 Niedertemperatur-Wärmenetze .....	155
	4.6.4 Solare Wärmenetze .....	157
	Literatur .....	159
<b>5</b>	<b>Mobilität</b> .....	161
5.1	Biokraftstoffe .....	163
5.2	Synthetische Kraftstoffe .....	165
5.3	Elektromobilität .....	167
5.4	Mobilität in der Zukunft .....	168
	Literatur .....	171
<b>6</b>	<b>Grundprobleme der Energieversorgung</b> .....	173
6.1	Endlichkeit der Ressourcen .....	173
6.2	Klimawandel .....	178
6.3	Gerechtigkeit der Verteilung .....	183
6.4	Bausteine für eine nachhaltige Energieversorgung .....	185
	Literatur .....	192
<b>7</b>	<b>Energiepolitik in Deutschland</b> .....	195
7.1	Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) .....	199
7.2	Energie-Einsparverordnung (EnEV) .....	202
7.3	Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG) .....	207

7.4	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG) .....	209
7.5	Klimaschutzgesetz .....	211
7.6	Atomausstieg .....	212
	Literatur. ....	214
<b>8</b>	<b>Die Zukunft der Energieversorgung</b> .....	<b>217</b>
8.1	Energiepotenziale .....	217
8.2	Energieszenarien .....	220
8.3	Sektorkopplung .....	224
8.4	Leitstudie 2050. ....	226
8.5	World Energy Outlook 2018 .....	231
	Literatur. ....	233
<b>9</b>	<b>Forderungen an die künftige Energiepolitik</b> .....	<b>235</b>
9.1	Bestandsaufnahme .....	235
9.2	Welche Zielsetzungen hat die deutsche Klimapolitik? .....	237
9.3	Welche Möglichkeiten stehen der Politik zur Verfügung? .....	238
9.4	Gebäude und Verkehr als blinde Flecken der Energiepolitik .....	242
9.5	Fazit .....	243
	Literatur. ....	244
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>245</b>



# Eine kurze Geschichte der Energienutzung

# 1

## Zusammenfassung

Energie ist die 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 Lauf 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.

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 Stoffwechsel 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. 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 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 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 lassen 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 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, zum Bau und Betrieb der Kraftwerke sowie ggf. dem Energieinhalt der eingesetzten Brennstoffe.

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

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

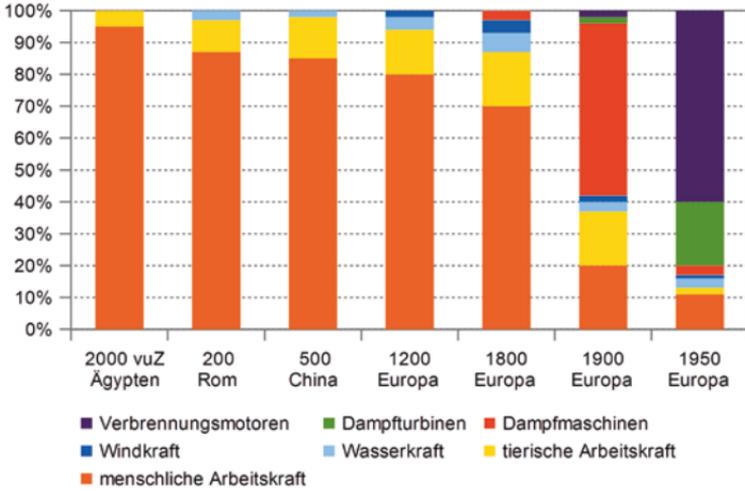
In einer Ackerbaugesellschaft steht beispielsweise die menschliche Arbeitskraft im Vordergrund. Die in Form von Nahrung konsumierte Energie kann zu einem bestimmten Teil wieder in Arbeit umgesetzt werden. Diese stellt dann die Nutzenergie dar, die wieder in den Nahrungsanbau investiert werden kann. In 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, beziehungsweise Elektrizität, wenn sie von einem Elektromotor angetrieben werden.

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

---

## 1.2 Der Mensch als Energiewandler

Bis weit in das 19. Jahrhundert 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 Mähmaschine setzten sich nur langsam durch. Abb. 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.



**Abb. 1.1** Anteil unterschiedlicher Energiewandler an der in einer Gesellschaft verrichteten Nutzarbeit. (Nach Smil [6])

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. 2.1 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 W zu erbringen. Kurzzeitig – beispielsweise bei einem Kurzstreckenlauf – sind Spitzenleistungen bis zu 1000 W 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 %. Demgegenüber liegt die Effizienz der Hauptarbeitstiere Pferd und Rind mit maximal 10 % deutlich darunter. Das macht den Einsatz von Arbeitstieren teuer und erklärt die jahrtausendlange intensive Nutzung der menschlichen Muskelkraft in unterschiedlichen Systemen der gesellschaftlichen Arbeitsorganisation.

## 1.3 Von der Steinzeit zur neolithischen Revolution

Die Nutzung von Feuer ist die erste „Energietechnik“ des Menschen und lässt sich über 500.000 Jahre zurückverfolgen. Der Einsatz des Brennstoffs Holz zur Wärmegegewinnung, Beleuchtung und Nahrungszubereitung schaffte eine zentrale Voraussetzung für die Entwicklung der Menschheit und veränderte fundamental das Alltagsleben. Das Feuer hatte nicht nur den beschriebenen Nutzwert, sondern wirkte auch gemeinschaftsbildend: das Feuer schaffte einen beleuchteten Raum um die Feuerstelle herum, der sich dadurch von der Umwelt abgrenzte. Es diente als Versammlungspunkt der Gemeinschaft und führte mit der Notwendigkeit, Feuer zu machen, es zu unterhalten und Brennholz zu beschaffen, zu neuen Aufgaben.

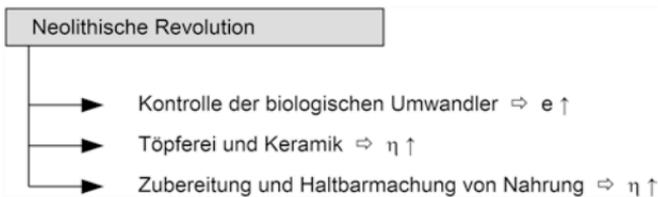
Die Menschen der Steinzeit lebten als Jäger und Sammler. Diese Form der Nahrungsgewinnung beschränkte die Bevölkerungsdichte rigoros. Je nach Ökosystem ist auf diese Weise eine Bevölkerungsdichte von einem Bewohner auf ein bis zehn Quadratkilometer möglich, woraus sich Gruppengrößen von einigen Dutzend Menschen ableiten lassen. Die Entnahme von Nahrungsmitteln – eine Erneuerung der Ressourcen vorausgesetzt – wird durch die Produktivität des Ökosystems begrenzt. Dabei ist der Wirkungsgrad vorgegeben: Pflanzen wandeln ein bis zwei Prozent der Strahlungsenergie der Sonne in Biomasse, d. h. in chemische Energie um; Tiere wandeln pflanzliche Biomasse mit einem Wirkungsgrad von maximal 20 % in tierische Biomasse um. Der Tagesenergiebedarf eines Menschen ist aufgrund der Lebensumstände in der Steinzeit mit etwa 4500 Kilokalorien etwas über dem heutiger Menschen anzusetzen. Arbeit wurde durch menschliche Muskelkraft verrichtet, wobei einfache Steinwerkzeuge wie Faustkeile oder zusammengesetzte Werkzeuge wie Speere für die Jagd am Ende der Eiszeit benutzt wurden.

Vor etwa 10.000 Jahren vollzog sich ein Übergang von den Jäger- und Sammlerkulturen hin zu Ackerbau und Viehzucht betreibenden Gesellschaften. Der britische Archäologe Gordon

Childe hat dafür den Begriff der „Neolithischen Revolution“ geprägt. Wenngleich sich dieser Übergang über viele Tausend Jahre erstreckte, so kam er doch in seinen Auswirkungen einer Revolution gleich: Einerseits erhöhte der Mensch durch die Kontrolle der biologischen Umwandler die Produktivität der Nahrungserzeugung. Dies setzte eine Domestizierung von Wildpflanzen und -tieren voraus, sowie geeignete Anbau- und Lagerungstechniken. Andererseits entstand eine zeitliche Entkopplung der durch menschliche Arbeit investierten Energie und der geernteten pflanzlichen oder tierischen Nutzenergie.

Durch diese Neuerungen erreichte das von den Menschen genutzte Energiesystem eine bisher nicht gekannte Stabilität. Die aktive Produktion von Nahrungsmitteln ermöglichte die Erzielung von Überschüssen an speicherbarer Energie. Damit wurde es nicht nur möglich, Krisen besser zu bewältigen, die Überschüsse ermöglichten der neolithischen Gesellschaft auch ein quantitatives und qualitatives Wachstum. Steigende Bevölkerungszahlen und neue Bedürfnisse schafften die Voraussetzungen für technische Entwicklungen, die sich vor allem im Keramik-, Töpfer- und metallverarbeitenden Handwerk niederschlugen. Diese ersten Ansätze einer Arbeitsteilung, die investierte Arbeit beim Anlegen von Feldern und Weiden sowie die gemeinschaftliche Arbeit in der Landwirtschaft beförderten die dauerhafte Niederlassung menschlicher Gruppen im Umfeld der Nahrungsmittelreserven.

Abb. 1.2 fasst die wesentlichen Merkmale der neolithischen Revolution noch einmal zusammen: Ackerbau und Viehzucht bedeuten durch die Kontrolle der biologischen Umwandler eine



**Abb. 1.2** Energetische Stellschrauben der neolithischen Gesellschaft

deutliche Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität, der Erntefaktor steigt. Die Zubereitung von Nahrung verbessert den energetischen Aufschluss durch den Körper, Lagerhaltung und Konservierung vermindern die Verluste. Beide Maßnahmen tragen zu einem effizienteren Umgang mit Nahrungsmitteln bei.

Aus den jungsteinzeitlichen Konzentrationspunkten entwickelten sich vor etwa 6000 Jahren die ersten geschichtlichen Kulturen. In Vorder- und Südostasien entstanden ausdifferenzierte Gesellschaften in den großen Schwemmlandgebieten der Flüsse Indus, Nil, Euphrat und Tigris sowie des Gelben Flusses. All diesen Gesellschaften gemeinsam ist ein Energiesystem, das auf mit aufwendigen Bewässerungstechniken betriebenen Getreideanbau beruht.

---

## 1.4 Bewässerungskulturen

Zunächst soll das pharaonische Ägypten betrachtet werden. Die Bewässerung der Felder entlang des Nils ermöglichte eine Intensivierung der Landwirtschaft. Zum einen stieg die Produktivität der bewirtschafteten Fläche, zum anderen konnte durch Bewässerung die Anbaufläche ausgeweitet werden. Zugleich ließ sich über die Nutzung der Hochwasserperioden des Nils eine Düngung der Felder durch den mitgeführten Schlamm erreichen. Die dadurch erzielte Steigerung der Nahrungsmittelproduktion ermöglichte ein massives Bevölkerungswachstum und das Entstehen großer Städte. In der Spätzeit des ägyptischen Reiches wird von einer Einwohnerzahl von bis zu 7 Mio. Menschen ausgegangen.

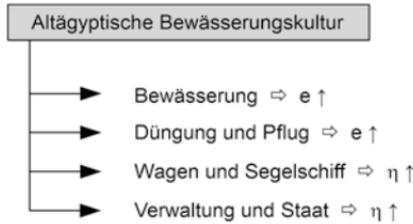
Das Funktionieren dieses Energiesystems erforderte ausgedehnte Deich- und Kanalsysteme sowie tier- oder menschenbetriebene Maschinen zur Be- und Entwässerung. Damit war nicht nur ein gegenüber den neolithischen Gesellschaften größerer zeitlicher Horizont der investierten Arbeit verbunden, sondern die Durchführung und Organisation dieser Arbeiten setzte eine zentrale Planung sowie die Zusammenfassung der Arbeitskraft zehntausender Menschen voraus. Der amerikanische Soziologe Lewis Mumford bezeichnete die pharaonische

Arbeitsorganisation als eine „Megamaschine“, als die erste große Kraftmaschine der Menschheit, die die Arbeitskraft von bis zu 100.000 Menschen zusammenfasste [3]. Geht man von einer Dauerleistung von 75 W aus, die ein Mensch an Arbeit erbringen kann, so mobilisierte diese Megamaschine eine mechanische Leistung von 7,5 MW. Diese Leistung wurde zum Bau und Unterhalt des Bewässerungssystems, zum Getreideanbau und während der landwirtschaftlichen Ruhephasen zur Errichtung großer symbolischer Bauwerke wie der Pyramiden eingesetzt.

Der Landtransport war trotz der Erfindung des Wagens aufgrund des (Nahrungs-)Energiebedarfs der Lasttiere auf das lokale Umfeld beschränkt oder erstreckte sich auf Luxusgüter. Baumaterial, Getreide, handwerkliche Produkte oder Salz wurden mit Schiffen entlang des Nils transportiert. Flussabwärts wurde dabei die Strömung des Wassers, flussaufwärts die Strömung des Windes genutzt. Beide Antriebsarten nutzen nicht-biologische Energieträger und ermöglichen einen zusätzlichen energetischen Nutzen, ohne dass das zur Verfügung stehende Nahrungsangebot dadurch beeinträchtigt wurde.

Die pharaonische Arbeitsorganisation benötigte eine effiziente Verwaltung, die die Arbeiten koordinierte, Nahrungsmittel und Saatgut verwaltete sowie die Versorgung beispielsweise der beim Bau der großen Pyramiden beschäftigten Menschen sicherstellte. Dazu waren Maße, Gewichte, Schrift und ein Zahlensystem notwendig sowie ein Überschuss des Energiesystems, um diese von Priestern und Staatsbeamten gebildete Verwaltung über Steuern und Abgaben zu unterhalten. Darüber hinaus waren für die Arbeitsorganisation zweifelsohne enorme gesellschaftliche Zwangsmaßnahmen erforderlich, wenngleich die alt-ägyptische Gesellschaft keine Sklavenhaltergesellschaft war. Dem dafür notwendigen Staatsapparat stand ein Gottkönig vor, dessen absolute Macht durch eine Staatskirche legitimiert und durch symbolische Prachtbauten verherrlicht wurde (Abb. 1.3).

Als zweites Beispiel einer Bewässerungskultur soll das chinesische Energiesystem herangezogen werden. Vor etwa 5000 Jahren begann sich der Reisanbau in China allgemein auszubreiten und drängte bis ins 8. Jahrhundert unserer Zeitrechnung den



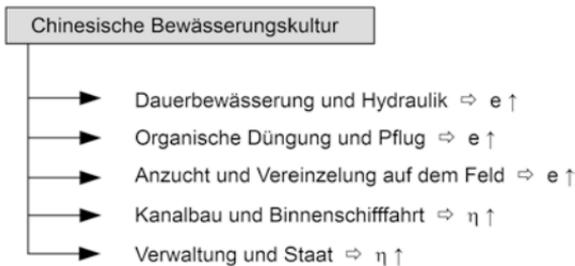
**Abb. 1.3** Energetische Stellschrauben der altägyptischen Bewässerungskultur

Trockenanbau von Hirse, Gerste und Weizen auf das Gebiet des trockeneren Nordens zurück. Wesentliche Elemente des chinesischen Energiesystems waren eine intensive Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen mittels Dauerbewässerung, geeignete Fruchtfolgen mit mehreren Ernten im Jahr, organische Düngung anstelle der Brache und der massive Einsatz menschlicher Arbeit. Zwischen dem 8. und 13. Jahrhundert unserer Zeitrechnung kam es zu einer weiteren Steigerung der Produktivität durch die Technik des Pikierens, der getrennten Anzucht des Saatguts und anschließenden Vereinzelung auf dem Feld. Dadurch konnte die Reifeperiode auf den Feldern so verkürzt werden, dass bis zu drei Ernten pro Jahr möglich waren. Dies ermöglichte ein Anwachsen der Bevölkerung von 53 Mio. auf über 100 Mio. Menschen in diesem Zeitraum. Die Verdoppelung der Bevölkerung in einem Zeitraum von etwa 500 Jahren wurde durch den enormen Produktivitätszuwachs des Energiesystems ermöglicht. Gleichzeitig erforderte aber die beschriebene Intensivierung der chinesischen Landwirtschaft auch einen steigenden Arbeitsaufwand, der nur von einer wachsenden Bevölkerung zu leisten war. Eine Steigerung der Nahrungsmittelproduktion ist also direkt an einen Anstieg der investierten Arbeit gekoppelt, z. T. sogar bei sinkender Produktivität. Die konsequente Nutzung der künstlichen Wasserwege des Bewässerungssystems auch zum Transport ermöglichte eine hocheffiziente Verkehrsinfrastruktur.

Die Aufrechterhaltung der Bewässerungssysteme und die Verteilung des in den Monaten des Sommermonsuns anfallenden Wassers auf die gesamte landwirtschaftlich nutzbare Fläche und die gesamte Vegetationsperiode waren nur mittels einer zentralen staatlichen Organisation möglich. Diese musste die Deich- und Kanalbauten planen, errichten und instandhalten. Darüber hinaus musste der Staat für eine „Wassergerechtigkeit“ sorgen und Streitigkeiten um die Wassernutzung schlichten. Die chinesische Arbeitsorganisation beruhte auf einem kollektiven Frondienst, der einen Monat im Jahr umfasste (Abb. 1.4).

Beim Vergleich der chinesischen und altägyptischen Bewässerungskultur fallen eine Reihe von Gemeinsamkeiten auf: Im Zentrum des Energiesystems steht der landwirtschaftliche Arbeitsprozess, in den der Großteil der Menschen unmittelbar eingebunden ist. Die Aneignung der Energie durch die Gesellschaft erfolgt über die Vermittlung des Staates, der über Staatsbeamte, den Klerus oder lokale Lehnsherren Grundbesitz und Produktion organisiert und kontrolliert. Der Staat garantiert die Durchführung der für den Bewässerungsbau notwendigen Arbeiten und schafft die Grundvoraussetzung für eine Gesellschaft dieser Größe und Komplexität. Die politische Stabilität des Staates garantiert somit die Stabilität des Energiesystems.

Zwei Faktoren begünstigten das Scheitern des chinesischen und altägyptischen Energiesystems. Zum einen ist jeweils eine steigende wirtschaftliche Belastung des Energiesystems durch



**Abb. 1.4** Energetische Stellschrauben der chinesischen Bewässerungskultur

„parasitäre“ Klassen wie beispielsweise den Klerus zu verzeichnen. So kontrollierte um 1200 vor unserer Zeitrechnung (v. u. Z.) die ägyptische Priesterschaft ein Siebtel der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche und um das Jahr 800 beanspruchten buddhistische Klöster rund 10 % der chinesischen Getreide- und Gemüseproduktion. Die Effizienzsteigerung einer zentralen Planung und Arbeitsorganisation wurde so zunichtegemacht. Zum anderen führte eine durch das Bevölkerungswachstum getriebene militärische Expansion zu einer Ausweitung des Energiesystems auf Gebiete, die nur bedingt in das Bewässerungssystem eingebracht werden konnten. Die Möglichkeit anstatt drei Ernten nur zwei oder eine Ernte pro Jahr einbringen zu können, hatte einen dramatischen Einbruch der Produktivität zur Folge.

---

## 1.5 Die merkantil-sklavistischen Reiche

Der Begriff der merkantil-sklavistischen Reiche wurde durch den brasilianischen Soziologen Darcy Ribeiro für Gesellschaften eingeführt, die einerseits durch einen intensiven Warenaustausch über ihre Grenzen hinweg und andererseits durch den Verlust der persönlichen Freiheit eines großen Teils ihrer Bevölkerung geprägt sind [4]. Zu den merkantil-sklavistischen Reichen zählen insbesondere Griechenland, Karthago und Rom. Ihr Energiesystem ist gekennzeichnet durch eine immer weiter fortschreitende Verlagerung aus ihrem ursprünglichen Territorium heraus. Ihr Ursprung liegt in den Stadtstaaten, die als Handelszentren fungierten und zunächst nur die umliegenden landwirtschaftlichen Gebiete beherrschten. Eine im Vergleich zu den Bewässerungskulturen extensive Landwirtschaft führte zu einem ständigen Missverhältnis zwischen Produktion und Konsum.

Die griechischen Stadtstaaten begannen ab dem 6. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung mit einer Spezialisierung ihrer Landwirtschaft auf den Wein- und Olivenanbau sowie auf die Produktion von Handelsgütern. Der Aufbau einer Handels- und Kriegsflotte sicherte einen Welthandel, der auf einem breiten Spektrum von Gütern beruhte und in dem Griechenland insbesondere Energieträger importierte, wie z. B. Holz

aus dem Libanon oder Getreide aus Kleinasien und Nordafrika. Aus Effizienzgründen kam nur der Schiffstransport infrage. Zum einen verhinderte ein schlecht ausgebautes Straßennetz überregionale Transporte. Zum anderen wies der Landtransport mittels Ochsespannen oder Lastträgern selbst auf dem gut ausgebauten römischen Straßennetz immer noch eine geringe Effizienz auf: die benötigten Nahrungsmittel – und damit die benötigte Energie – zum Unterhalt dieses Transportsystems beschränkten das Einzugsgebiet, aus dem sich ein Landtransport von Lebensmitteln lohnte.

Das griechische Energiesystem war abhängig von der Lieferung wichtiger Energieträger, die es militärisch abzusichern galt. Steigende Investitionen in das Militärwesen und die durch die permanente Kriegsführung dem Energiesystem entzogenen Arbeitskräfte wurden nicht durch eine Erhöhung der Produktivität, sondern durch eine Effizienzsteigerung innerhalb des Energiesystems abgedeckt. Neben zahlreichen mechanischen Verfahren zur Erhöhung der Effizienz wie Hebel, Flaschenzüge oder wasserbetriebene Arbeitsmaschinen erreichte man dies vor allem durch den massiven Einsatz von Sklaven, d. h. durch eine Minimierung der Reproduktionskosten der Arbeitskraft. Die Arbeitskraft eines Sklaven musste nur auf dem biologischen Minimum erhalten werden, weder für Kindheit, Erziehung noch Alter musste die nutznießende Gesellschaft aufkommen.

Das griechische Energiesystem wurde von dem römischen Staat weiter forciert. Eine gegen Ende des 3. Jahrhunderts vor unserer Zeitrechnung beginnende militärische Expansion hatte die Aufgabe, Konkurrenten um die Energiequellen (allen voran Karthago) auszuschalten und einen stetigen Zustrom an Nahrungsmitteln und Sklaven zu garantieren. Dieser Prozess führte über eine jahrhundertelange Folge von Kriegen zum Imperium Romanum. Allein Cäsar soll in seinen Kriegen mehr als eine Million Sklaven erbeutet und Rom zugeführt haben.

Gegen Ende des 2. Jahrhunderts unserer Zeitrechnung hatte das römische Reich die Grenzen seiner Expansion erreicht. Alle über die Schifffahrt erreichbaren Gebiete waren Bestandteil der

Ausbeutungsstruktur geworden. Es wird geschätzt, dass zwischen einem Drittel und der Hälfte der Einwohner des römischen Reiches Sklaven gewesen sind. Die Entfernung zu den weiter landeinwärts gelegenen Provinzen war so groß geworden, dass die Transportkosten und der Unterhalt der dort stationierten Legionen den dort produzierten Überschuss völlig aufzeherten. Das auf Expansion angelegte Energiesystem kollabierte schließlich. Dies machte sich zuerst auf dem Sklavenmarkt und damit auf der Grundlage jeder Produktion bemerkbar: der Sklavennachschub kam ins Stocken und die Preise für Sklaven erhöhten sich dramatisch. Dies erfolgte zu einem Zeitpunkt, wo die „freien“ Arbeitskräfte in vielen Berufsgruppen durch einen ruinösen Wettbewerb mit Sklavenarbeit bereits verdrängt oder in der Minderheit waren. Eine Abwärtsspirale setzte sich in Gang, die in den nächsten 200 Jahren den vollständigen Zusammenbruch des römischen Reiches zur Folge hatte.

Merkmal der merkantil-sklavistischen Gesellschaften ist die Konzentration auf Maßnahmen zur Effizienzsteigerung. Dies betrifft insbesondere die Entwicklung der Handelsschifffahrt und die Nutzung von Sklavenarbeit. Letztere hatte insbesondere in der militärischen Expansionsphase negative Rückwirkungen auf den technischen Fortschritt und damit auf die Produktivität (vgl. Kasten). So setzten sich beispielsweise Wassermühlen erst ab dem 3. Jahrhundert unserer Zeitrechnung gegen durch Muskelkraft betriebene Mühlen durch, d. h. erst mit der Verknappung billiger Arbeitskräfte (Abb. 1.5).

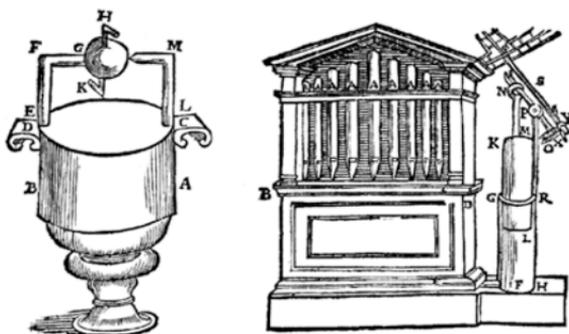


**Abb. 1.5** Energetische Stellschrauben der merkantil-sklavistischen Reiche

### Die Apparate des Heron von Alexandria

Über das Leben des Naturwissenschaftlers Heron ist wenig bekannt. Vermutlich lebte er im 1. Jahrhundert unserer Zeitrechnung im ägyptischen Alexandria und arbeitete dort als Lehrer. Seine Schriften zur Mechanik, Hydraulik und Pneumatik – vermutlich Skripten seiner Vorlesungen – sind jedoch erhalten und erlauben einen Einblick in das technische Verständnis der Antike. Insbesondere beschäftigte sich Heron mit der technischen Nutzung von Wärme, Wind- und Wasserkraft. In seinen Aufzeichnungen findet sich mit der Aeolipile (Abb. 1.6 links) eine Wärmekraftmaschine, bei der durch das Erhitzen eines Wasserbehälters (A, B) aus zwei Düsen (H, K) Dampf ausgestoßen und dadurch eine Kugel (G) in Bewegung gesetzt wird. Eine weitere Konstruktion beschreibt eine Orgel (Abb. 1.6 rechts), die durch ein Windrad mittels eines pneumatischen Zylinders (F, K) angetrieben wird.

Eine technische Nutzung von Wärmekraftmaschinen und Windkraftanlagen fand in Europa erst über tausend Jahre später statt. Die von Heron beschriebenen Apparate haben den Charakter mechanischer Kuriosa. Sie dokumentieren das ingenieurtechnische Grundverständnis



**Abb. 1.6** Aeolipile (links) und windkraftbetriebene Orgel (rechts). (Aus: Heronis Alexandrini: Buch von den Luft- und Wasser-Künsten, Bamberg 1688)

wichtiger Naturzusammenhänge, ohne dass daraus aber technische Konsequenzen für den von billiger Sklavenarbeit geprägten Produktionsprozess resultierten.

---

## 1.6 Exkurs: Das normannische Grönland

In den vorangegangenen Abschnitten wurden weiträumige Energiesysteme beschrieben, die über lange Zeiträume bestanden. Der nachfolgende Exkurs illustriert die Bedeutung des Energiesystems auch für kleinräumige Gesellschaften.

Im 8. Jahrhundert begann eine durch eine zu hohe Bevölkerungsdichte in Norwegen ausgelöste Besiedlung weitgehend menschenleerer Regionen des Nordatlantiks durch die Wikinger. Nach den Orkney- und Shetlandinseln folgten um 800 die Färöerinseln und 870 Island. Von Island aus wurde ab 980 Grönland und im Jahr 1000 Neufundland (Vinland) besiedelt. Die Siedlung in Neufundland musste nach wenigen Jahren wegen des starken Widerstands der indigenen Bevölkerung wieder aufgegeben werden. Die Besiedlung Grönlands dauerte vermutlich bis Mitte des 15. Jahrhunderts. Über ihr Ende gibt es keine Aufzeichnungen, jedoch haben Ausgrabungen eine Reihe von Erkenntnissen über den Niedergang des normannischen Grönlands erbracht.

Die Wikinger siedelten vor allem in zwei Fjorden an der Westküste Grönlands. Insgesamt dürfte die Anzahl der Siedler in der Blütezeit zwischen 3000 und 5000 Menschen gelegen haben. Die Wikinger hatten ihr Energiesystem nach Grönland importiert. Grundlage der landwirtschaftlichen Produktion war die Rinder- und in späteren Jahren vermehrt die Schaf- und Ziegenhaltung. Der gesellschaftliche Status eines Wikingers wurde wesentlich durch die Größe seines Stalls, d. h. die Anzahl seiner Rinder bestimmt. Durch die kurze Vegetationsperiode musste während der Sommerweide ausreichend Heu für den Stallaufenthalt eingebracht werden. Die empfindlichen Böden waren jedoch durch die intensive Beweidung einer starken Erosion ausgesetzt, was die Produktivität weiter verringerte.