

Lars Jaeger

Wege aus der Klimakatastrophe



Wie eine
nachhaltige
Energie- und
Klimapolitik gelingt

SACHBUCH

 Springer

Wege aus der Klimakatastrophe

Lars Jaeger

Wege aus der Klimakatastrophe

Wie eine nachhaltige Energie- und
Klimapolitik gelingt



Springer

Lars Jaeger
Baar, Schweiz

ISBN 978-3-662-63549-0 ISBN 978-3-662-63550-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63550-6>

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

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

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung der Verlage. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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.

Text und Konzeptberatung: Dr. Bettina Burchardt
Covermotiv: © stock.adobe.com/Jenny Sturm/ID 285073574
Covergestaltung: deblik, Berlin

Planung: Lisa Edelhäuser
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

An Yuka Nakamura

Vorwort

Jeder Mensch hat sein ganz persönliches Aha-Erlebnis, wenn es um den Klimawandel geht. Der eine hat mit Bewässerungsschlauch und Gießkanne vergeblich versucht, seinen Garten unbeschadet durch mehrere Dürresommer zu bringen. Der andere wundert sich, dass er daheim von einer Tigermücke gestochen wird, die ursprünglich nur in den Tropen und Subtropen zu finden war. Und ein Dritter musste mit ansehen, wie sein Haus überschwemmt wurde, weil zum ersten Mal seit Menschengedenken ein Bächlein nach einem Starkregenereignis zum reißenden Strom geworden war.

Für mich wurde der Klimawandel schmerzhaft konkret, als ich im Sommer 2020 zum Morteratsch-Gletscher im Oberengadin wanderte, dem größten Gletscher der Schweizer Ostalpen. Inmitten der beeindruckenden Szenerie der Berge wird dort dem Wanderer ein dramatisches Geschehen erfahrbar: Wo der Wanderweg auf die einst kilometerlange und viele Hundert Meter breite Gletscherzunge führt, informieren Schilder darüber, bis zu welcher Stelle das Eis sich in den vergangenen Jahrzehnten ausgedehnt hatte. Seit 1870 hat er sich jedes Jahr um durchschnittlich 18 m zurückgezogen, 2015 waren es sogar 164 m! Über zweieinhalb Kilometer geht man auf einem Untergrund entlang, der noch vor einem erdgeschichtlichen Wimperschlag von Dutzenden Metern Eis bedeckt war.

Fakt ist: Der Klimawandel ist keine am Horizont drohende Gefahr mehr. Er ist in unserem Alltag angekommen und bedroht unsere Lebensgrundlagen. Die wesentlichen konkreten Zusammenhänge sind seit den 1980er-Jahren bekannt: Von Menschen produzierte Treibhausgase – allen

voran das Kohlendioxid CO_2 – bewirken eine stetige Erwärmung unserer Welt. Damals lagen bereits konkrete Handlungspläne auf dem Tisch, doch eine starke industrielle Lobby verhinderte deren Umsetzung und hintertrieb gezielt die Reputation der Wissenschaftler. In weniger konkreter Form existierte sogar bereits 1895 die konkrete Vermutung eines Zusammenhangs zwischen CO_2 -Anteil in der Atmosphäre und der globalen Durchschnittstemperatur. Erste direkte Belege für eine steigende CO_2 -Konzentration und eine dadurch verursachte globale Erwärmung konnte dann ab den späten 1950er-Jahren der US-amerikanische Forscher Charles David Keeling vorlegen.

Heute sieht das Bild ganz anders aus. Wer gegen den Klimawandel aktiv wird, wird nicht mehr ausgegrenzt. Die nach anfänglicher Kritik fast durchweg positive Resonanz auf die Fridays-for-Future-Bewegung zeigt das. Mehr noch: Politik und Wirtschaft überbieten sich in dem Bestreben, die Klimakatastrophe zu verhindern. Im Herbst 2020 kündigten sowohl die EU als auch China einen Fahrplan zu einer CO_2 -neutralen Wirtschaft bis 2050 bzw. 2060 an. Kurz darauf bekannte sich auch die deutsche Automobilindustrie zu diesem Ziel. Nach der Abwahl Donald Trumps folgten auch die USA dieser Linie.

Nach dreieinhalb Jahrzehnten, in denen sich Stillstand, Rückschritte und einige wenige mühsam erkämpfte Fortschritte in der Bekämpfung des Klimawandels einander ablösten, geht es nun zu wie beim Domino: Die Widerstände gegen die globale Energiewende, die unser Klima retten soll, fallen – einer nach dem anderen. Jahr für Jahr werden sogar die optimistischsten Prognosen zu den Möglichkeiten neuer Technologien von den aktuellen Entwicklungen eingeholt und übertroffen. An Ideen, technologischen Möglichkeiten und konkreten Initiativen mangelt es nicht. Fast alle drehen sich um den zentralen Faktor des Klimawandels: Energie. Denn mit Ausnahme einiger Teile der Landwirtschaft lassen sich alle Einflüsse, die der Mensch auf das Klima nimmt, auf Energieerzeugung und -verbrauch zurückführen. Angetrieben durch die erstaunlichen technologischen Fortschritte auf den Gebieten Fotovoltaik, Windkraft und Batterie-Energiespeicherung sowie Nanotechnologie und künstliche Intelligenz stehen wir an der Schwelle zur schnellsten und tiefgreifendsten Umwälzung auf dem Energiesektor der letzten 150 Jahre.

Dieses Buch führt Sie durch die Welt der Energie und des Klimas auf unserem Planeten und liefert Fakten:

- Was ist überhaupt Energie?
- Wie erzeugen, transportieren und speichern wir Energie?

- Warum beeinflusst unsere Art des Energieverbrauchs das Klima?
- Wie funktionieren die Klimamodelle der Wissenschaftler und kann man ihnen wirklich trauen?
- Was dürfen wir vom technologischen Fortschritt erwarten?
- Welche Möglichkeiten haben wir, Energie ohne negative Klimaeffekte zu erzeugen?
- Können wir uns das leisten?

Die Antworten, die dieses Buch gibt, widerlegen die Meinungen der wenigen Klimaskeptiker und -leugner, die immer noch für große Verwirrung sorgen. Die Tatsachen zeigen: *Yes, we can!* Die Lage ist sehr ernst, aber wir sind auf dem Weg, den verheerenden Klimatrend umzukehren – und das ohne signifikante Wohlstandsbeschränkung. Nach drei Jahrzehnten Tief-schlaf und sträflich verpasster Gelegenheiten hat sich endlich eine erfolg-versprechende Dynamik eingestellt. Viel haben wir auf unserem Weg in die Klimaneutralität schon erreicht – zum Beispiel wurde 2020 in Deutschland erstmals mehr regenerativer als fossiler Strom verwendet. Nun kommt es darauf an, dass uns mitten in der Energiewende nicht die Luft ausgeht und wir weiterhin die ökonomischen und politischen Herausforderungen, die mit ihr kommen, meistern. Denn unsere Reise in eine treibhausgasfreie Zukunft hat längst begonnen.

Lars Jaeger

Danksagung

Zahlreiche Personen haben diesen Text gelesen und dabei wertvolle Verbesserungsvorschläge gemacht. Zuallererst möchte ich Bettina Burchardt danken, ohne die das Buch in dieser Form nicht möglich geworden wäre. In vielen Stunden hat sie sich dem Text und seinen Inhalten gewidmet und dieses Buch in die Form gebracht, die es nun hat. Dann möchte ich meiner Partnerin Yuka Nakamura danken, für die emotionale und inhaltliche Unterstützung über die vielen Wochen des Schreibens. Herzlich danken möchte auch dem Springer-Verlag mit seiner hervorragenden Lektorats-Arbeit, sowie Frau Lisa Edelhäuser für ihr ausgezeichnetes Projektmanagement und die Begleitung während der Entstehung dieses Buches. Danken möchte ich auch meiner Agentin, Frau Beate Riess sowie ihrer Kollegin Frau Anne-Katrin Weise, für all ihre Unterstützungen und Ermutigungen nicht nur für dieses Buch.

Trotz all dieser Hilfe haben sich sicher der ein oder andere Fehler und zahlreiche Auslassungen nicht vermeiden lassen. Die Materie, um die es hier geht, ist derart umfangreich und komplex, dass bei weitem nicht jeder Aspekt und oder auch jedes Thema in dem ihm und ihr gebührenden Umfang behandelt werden kann. Aber dafür gibt es ja auch zahlreiche Fachbücher. Ich bitte den Leser um Entschuldigung und übernehme selbstverständlich die volle Verantwortung dafür.

Inhaltsverzeichnis

Teil I Energie

1	Von Aristoteles zur Kernfusion	3
2	Das Fundament der Zivilisation	17
3	Das Comeback der nachhaltigen Energie	31
4	Stromkrieg und Smart Grids	47

Teil II Klima

5	Eine kurze Geschichte des Klimas	65
6	Der Flügelschlag des Schmetterlings	81
7	Risikoethik und Redlichkeit	95
8	Klimaleugner, Klimahysteriker und Nimbys	113

Teil III Strom

9	Der Weg des regenerativen Stroms	129
10	Die Joker im Spiel	145
11	Yes, we can!	161
12	Umparken im Kopf	177

Teil IV Gesellschaft

13	Die Wirtschaft der Zukunft	197
14	Das Primat der Ökonomie	215
15	Im Interesse der gesamten Menschheit	231
16	Eine Baustelle für alle	249
	Was es konkret braucht	267
	Epilog	269
	Literatur	273
	Stichwortverzeichnis	277

Teil I

Energie



1

Von Aristoteles zur Kernfusion Der lange Weg zur Erkenntnis, was Energie überhaupt ist

Was ist eigentlich Energie? Die Antwort auf diese Frage ist heute Schulstoff für die Unterstufe – und doch tun sich die meisten Menschen schwer damit, das Phänomen Energie physikalisch richtig zu beschreiben. Erfahrungsgemäß geraten dabei die Begriffe „Kraft“, „Leistung“, „Impuls“ und „Energie“ ziemlich durcheinander. Auch den Gelehrten der letzten 2500 Jahre wollte es lange Zeit nicht gelingen, ihre Beobachtungen mit sauber getrennten Begriffen zu beschreiben und so Ordnung in das Energiechaos zu bringen. Deshalb gleich zu Anfang des Buches eine Übersicht: Was genau ist was?

Am Anfang war die Kraft

„Warum fliegt ein geworfener Stein durch die Luft und fällt nicht sofort senkrecht auf den Boden?“ Diese Frage löste den wohl längsten Streit in der Geschichte der Naturwissenschaften aus. Der Ürvater der Physik, der antike Philosoph Aristoteles, war überzeugt: Kräfte wirken nur im direkten Kontakt von Körper zu Körper – so, wie sich zum Beispiel Billardkugeln gegenseitig anstoßen und in neue Bahnen lenken. Weil als Träger für eine auf den Stein einwirkende Kraft nur die Luft infrage kam, reimte sich Aristoteles die Sache wie folgt zusammen: Der Stein verdrängt die Luft, diese schließt sich hinter ihm wieder zusammen und schiebt den Stein voran, sodass er weiter geradeaus fliegt.

So wie alle Erklärungen des Aristoteles wurde auch seine Theorie der Bewegung 2000 Jahre lang kaum hinterfragt. Erst im späten Mittelalter begannen die europäischen Gelehrten, sich von den Vorstellungen der antiken Denker zu lösen. Jetzt kam die Impetustheorie auf. Der Gelehrte Johannes Philoponos hatte deren Grundzüge zwar schon im 6. Jahrhundert n. u. Z. entwickelt, doch gegen das Dogma des Aristoteles hatte sie keine Chance gehabt. Die Impetustheorie besagt, dass eine immaterielle Kraft, die sich *im bewegten Körper* befindet, dessen Flugbahn bestimmt. Beim Wurf geht der Impetus als innerer Antrieb von der Hand des Werfers auf den Stein über und pflanzt diesem seine Bewegung ein. Für manche Gelehrte hatte die Impetustheorie gar eine theologische Dimension: So wie eine bewegende Kraft vom Werfer ins Wurfgeschoss übertragen wird, sollte auch die Hostie eine Kraft enthalten, die ihr von Gott mitgeteilt wurde.

Die Impetustheorie brach völlig mit der aristotelischen Tradition. Aber auch sie war weit von der Wahrheit entfernt. Wo im bewegten Körper hätte sich der Impetus befinden sollen? Und wie sollte man sich ihn überhaupt vorstellen? Dazu kam, dass sich die beobachtete Bewegung von Wurfgeschossen durch den Impetus auch nicht ansatzweise erklären ließ.

Erst Galileo Galilei und Isaac Newton kamen der Sache auf die Spur. Ihr Trägheitssatz besagt, dass jeder Körper im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung bleibt, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern. Mit anderen Worten: Es braucht keinen Kraftaufwand, um eine gegebene Bewegung zu *erhalten*. Kräfte *verändern* die Bewegungen.

Dies widerspricht zwar der Alltagserfahrung, in der ein geworfener Stein nach einer Weile wie von allein in den Zustand der Ruhe kommt. Doch Galilei hatte erkannt, dass durch die Luft fliegende oder auf dem Boden rollende Körper bremsenden Reibungskräften ausgesetzt sind. Ohne sie würde der Stein bis in alle Ewigkeit weiterfliegen.

Dank Galilei und Newton ist der Begriff „Kraft“ heute klar definiert. Mithilfe der von ihnen formulierten Gesetze der mechanischen Bewegung können wir die parabelförmige Flugbahn des Steines mit einfachen Formeln berechnen: Sie ist das Ergebnis von verschiedenen Kräften, die auf ihn einwirken. Die Vorstellungen eines Impetus und die von Luft, die den Stein während seines Fluges voranschleibt, verloren ihre Gültigkeit.

Die Erkenntnis, dass die parabelförmige Flugbahn durch das Zusammenspiel verschiedener Kräfte zustande kommt, ist das Ergebnis eines fast 2000 Jahre währenden intellektuellen Kraftakts.

Der Impuls und die *vis viva*

Heute heißt der Trägheitssatz in der Physik auch das Gesetz von der Impulserhaltung. Was ist nun wieder ein Impuls? Er ist das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit: $m \cdot v$. Bei allen physikalischen Prozessen bleibt der Gesamtimpuls eines Systems erhalten. Im Fall einer Billardkugel, die eine andere zentral anstößt, ist das gut zu beobachten: Die Massen der Kugeln bleiben natürlich gleich, die Summe der Geschwindigkeiten auch, es ist nach dem Stoß allerdings die andere Kugel, die sich bewegt. Auch diese Entdeckung stammt von Galilei und Newton.

Allerdings beschreibt der Impuls eines Körpers nicht das gesamte Maß seiner Wirkung. Zwei Körper können denselben Impuls haben und doch einen dritten Körper ganz unterschiedlich beeinflussen.

Ein 1 Kilo schwerer Körper, der aus 50 Zentimeter Höhe fallen gelassen wird, hat beim Aufprall auf den Boden exakt den gleichen Impuls wie ein zweiter Körper von 100 Gramm, der aus 5 Metern fallen gelassen wird. Dennoch hat der zweite Körper eine deutlich größere Wirkung beim Aufprall. Er hinterlässt beispielsweise in einem weichen Boden ein entsprechend tieferes Loch.

Die Wirkung eines Körpers beim Aufprall ist vom *Quadrat* seiner Geschwindigkeit abhängig. Etwa 50 Jahre nach Galilei bezeichnete Gottfried Wilhelm Leibniz daher nicht den Impuls $m \cdot v$, sondern die Größe $m \cdot v^2$ als das „wahre Maß“ für eine Bewegung. Für heutige Physiker ist $m \cdot v^2$ eine Formel für Energie. Doch Leibniz bezeichnete $m \cdot v^2$ noch als *vis viva*, also als „lebendige *Kraft*“. So genial Leibniz' Entdeckung des Terms $m \cdot v^2$ auch war, ihm war der Unterschied zwischen Kraft und Energie noch völlig unklar. Auch ließ er mit seiner *vis viva* die eigentlich schon abgeschriebene Impetustheorie zur Hintertür wieder herein.

Es dauerte sehr lange, bis die Physiker die grundlegenden Begriffe „Kraft“, „Impuls“ und „Energie“ geklärt hatten.

Die große Energiekonfusion

Die Vorstellung, dass *Kraft* ein charakteristisches Merkmal alles Lebendigen ist, hat eine lange philosophische Tradition. Bereits die antiken Naturphilosophen sprachen davon, dass Kräfte den Dingen Leben einverleiben. Aristoteles dachte sich hierfür das Wort *energeia* aus. Er leitete

es vom griechischen Wort *ergon* ab, das Arbeit, Tat oder Werk bedeutet. *Energieia* verleiht also einem Gegenstand die Eigenschaft, in Bewegung zu sein oder eine solche zu verursachen.

Aristoteles sagte also „Energie“ und meinte „Kraft“. Leibniz sagte „Kraft“ und meinte „Energie“. Was für ein Durcheinander! Die moderne Wissenschaft braucht aber eindeutige Begriffe, um zu funktionieren. Bis endlich Klarheit geschaffen wurde, dauerte es nach Leibniz noch ein weiteres Jahrhundert.

Noch fiel die Verwirrung nicht auf, denn die Zeitgenossen Leibniz' und des späteren 18. Jahrhunderts interessierten sich kaum für die *vis viva*. Sie war für sie eher eine philosophische Spekulation als eine Sache für Naturwissenschaftler. Erst im frühen 19. Jahrhundert wagten sich die Physiker Thomas Young und Gaspard Gustave de Coriolis an eine erste klare Formulierung des Energiebegriffs:

„Energie ist die Fähigkeit des Körpers, gegen eine widerstehende Kraft eine gewisse Strecke zurückzulegen.“

Die vereinfachte Formel lautet: **Energie gleich Kraft mal Weg**. Mathematisch exakt muss man allerdings ein Integral bilden: $E = \int F \cdot ds$. In der Mechanik hat die Energie noch einen weiteren Namen: Arbeit. Arbeit ist also die mechanische Energie, die man aufwenden muss, um zum Beispiel Steine auf einen Berg zu tragen.

Doch bis der Begriff der Energie in den Wissenschaften Fuß fasste und von den Physikern wirklich verstanden wurde, vergingen weitere Jahrzehnte. Einen großen Schub bekam dieser Prozess durch den Siegeszug der Dampfmaschinen ab dem 19. Jahrhundert. Um immer bessere Maschinen bauen zu können, wollte man genau verstehen, wie sie funktionieren.

Kräfte bewegen Dinge und bringen konkrete Veränderungen hervor. Energie bezeichnet die *Fähigkeit*, eine Kraft auszuüben.

Dampfmaschinen als Antrieb für die Grundlagenforschung

In einer Dampfmaschine ist der Antreiber für mechanische Arbeit Wärme. Wasser wird durch Erhitzen in den gasförmigen Zustand überführt. Der Wasserdampf treibt mit einem Teil seiner Energie einen Kolben an, kühlt

dabei wieder ab und kondensiert wieder zu Wasser. Bei der nächsten Erhitzungsphase geht das Ganze von vorn los.

Die Physiker begannen zu begreifen, dass die Wärmemenge, die der Wasserdampf an den Kolben verliert, in einem Zusammenhang mit der mechanischen Energie steht, die den Kolben antreibt. Der englische Physiker James Prescott Joule zeigte schließlich mit einem cleveren Experiment, dass Wärme und Energie in einem *direkten* Verhältnis zueinander stehen. Er ließ ein Schaufelrad in einem Behälter mit Wasser rotieren und maß dabei dessen Temperatur. Mit der Zeit stieg diese langsam an. Joule fand, dass eine bestimmte Menge mechanischer Arbeit einer bestimmten Temperaturänderung entsprach. Joule untersuchte auch andere Energieformen wie elektrische oder magnetische Energie und bestimmte, wie viel Wärme sich jeweils aus ihnen gewinnen lässt. Auch hier standen die erzeugten Mengen an Wärme in einem bestimmten Zusammenhang mit den eingebrachten Energiemengen.

Nun war es kein großer Schritt mehr zu der Erkenntnis, dass sich alle Energieformen ineinander verwandeln lassen (eine Liste aller sieben unterschiedlichen Energieformen ist am Ende dieses Kapitels aufgeführt). Wärmeenergie kann – zum Beispiel in einer Dampfmaschine – in mechanische Energie umgewandelt werden. Die Sache funktioniert auch andersherum: Wer sich im kalten Winter die Hände reibt, erzeugt Wärme durch mechanische Energie.

Im Jahr 1842 veröffentlichte der Heidelberger Arzt Julius Robert Mayer einen der wichtigsten Sätze der Physik:

„Meine Behauptung ist: Fallkraft, Bewegung, Wärme, Licht, Elektrizität und chemische Differenz der Ponderabilien sind ein und dasselbe Objekt in verschiedenen Erscheinungsformen.“¹

Diese Feststellung öffnete die Tür zum Satz von der Erhaltung der Energie: Die Gesamtenergie eines Systems bleibt immer gleich. Heute heißt dieser Satz der **Erste Hauptsatz der Thermodynamik**.

Energie kann niemals verschwinden oder aus dem Nichts entstehen. Sie wird immer nur von einer Form in die andere umgewandelt.

¹ J.R. Mayer, *Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur*. Annalen der Chemie und Pharmacie. 42 (2): 233–240 (1842).

Die Grenzen der Energieumwandlung

Jahrhundertlang hatten Forscher und Erfinder versucht, eine Maschine zu bauen, die ohne Energiezufuhr stetig Arbeit verrichten kann. Mit dem Satz von der Energieerhaltung wurde klar, dass die Suche nach so einem *Perpetuum mobile* niemals erfolgreich sein könnte. Denn wenn eine Maschine durch Arbeitsleistung Energie verbraucht, muss ihr neue Energie zugeführt werden, damit sie weiterläuft. Hermann von Helmholtz formulierte 1847: „Ein Perpetuum mobile ist unmöglich.“ Den Grund dafür nannte er das „Prinzip über die Erhaltung der Kraft“. Oje! Immer noch wurden Energie und Kraft durcheinandergeworfen.

Mitte des 19. Jahrhunderts kamen die Physiker einer weiteren Besonderheit der Energie auf die Spur: Energieumwandlungen sind nur unter bestimmten Bedingungen möglich. Damit die Wärme eines Körpers in mechanische Energie überführt werden kann, muss seine Temperatur über der seiner Umgebung liegen. Doch warum ist das so? Der Energieerhaltungssatz verbietet ja nicht, dass ein kalter Körper noch kälter wird, um Energie auf einen wärmeren Körper zu übertragen. Aber so etwas wurde nie beobachtet. Es musste also noch ein zweites fundamentales Gesetz der Wärme geben, das den Wirkungsbereich des ersten entsprechend einschränkt.

Den ersten wichtigen Schritt hierzu hatte der Franzose Nicolas Léonard Sadi Carnot bereits 1824 gemacht. Carnot war kein Physiker, sondern ein Ingenieur, der möglichst effiziente Dampfmaschinen bauen wollte. Er dachte zunächst, dass die gesamte bei der Verbrennung erzeugte Wärmeenergie in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Dann stellte er jedoch fest, dass die maximale Ausbeute an mechanischer Energie von der Differenz der Temperatur des Gases in der Verbrennungskammer abhängt, wo das Wasser erhitzt wird, und der Temperatur im Kondensator, wo es sich wieder abkühlt.

Leider konnte Carnot seine Beobachtungen nicht abschließend deuten; er starb mit 36 Jahren während einer Choleraepidemie. Sein Werk wurde durch den deutschen Physiker Rudolf Clausius und den irischen Physiker William Thomson (den späteren Lord Kelvin), vollendet. Wie Carnot vermuteten Clausius und Thomson, dass hinter der Einseitigkeit des Wärmetransfers ein Gesetz stecken musste. Dieser **Zweite Hauptsatz der Thermodynamik** wurde von Clausius 1850 zum ersten Mal formuliert:

„Es gibt keine Zustandsänderung, deren einziges Ergebnis die Übertragung von Wärme von einem Körper niederer auf einen Körper höherer Temperatur ist.“

Als Clausius diese Gesetzmäßigkeit 1865 in einer mathematischen Formel ausdrückte, führte er eine neue Größe in die Physik ein: die Entropie. Dieses Kunstwort bedeutet „Wandlungspotenzial“. Die Energieumwandlung funktioniert nur so lange, bis der wärmeübertragende Körper sich auf seine Umgebungstemperatur abgekühlt hat. Sobald die beiden Systeme dieselbe Temperatur haben, ist der Wärmetransfer abgeschlossen. Es lässt sich also keine Lokomotive bauen, die sich in Bewegung setzt, indem sie einer gleich warmen oder kälteren Umgebung weitere Wärmeenergie entzieht.

Mit dem Begriff der Entropie hatten die Physiker eine sehr nützliche Beschreibung der Wärmephänomene gefunden. Sie konnten nun endlich die theoretischen Grundlagen von Dampfmaschinen und Verbrennungsmotoren beschreiben und berechnen. Es wurde klar, dass jede Wärmemaschine nur einen bestimmten Energieanteil von einer Form in die andere umwandeln kann, der Rest geht aufgrund des Entropiegesetzes in Form von Abwärme an die Umgebung verloren. Auch die Umwandlung aller anderen Energieformen gehorcht dem Entropiegesetz, und ein Wirkungsgrad von 100 % wird ebenfalls nie erreicht. Wirkungsgrade von Energieumwandlungsprozessen werden uns in den folgenden Kapiteln dieses Buches noch beschäftigen.

Als den Physikern im späten 19. Jahrhundert ein Blick in die atomare Ebene gelang, wurde ihnen klar, dass sich die Entropie auch als ein Maß für die Ordnung eines Systems ansehen lässt. Bewegen sich bei Hitze die Teilchen schnell und wild durcheinander (in festen Körpern schwingen die einzelnen Teilchen in ihrer festen Struktur stark hin und her), sind Unordnung und Entropie hoch. Ist Temperatur dagegen niedrig, bewegen sich die Teilchen eines Gases oder einer Flüssigkeit nur langsam, in einem festen Körper schwingen sie kaum. Aus ihrer geringen Bewegung lässt sich kaum Energie abziehen – die Entropie des Systems ist niedrig.

Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik (Entropiesatz) begrenzt den Wirkungsgrad von Wärmemaschinen und auch aller anderen Energieumwandlungen.

Maximale Energie auf kleinstem Raum

Einen überraschenden weiteren Aspekt der Energie brachte Albert Einsteins Relativitätstheorie hervor. Seine berühmte Formel $E=mc^2$ stellt Energie in einen unmittelbaren Bezug zu Materie. Masse ist also nur eine andere Form von Energie, und zwar Energie sehr hoher Dichte. Der Umrechnungsfaktor, das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit, besitzt den sehr hohen Wert von 300.000.000 m/s zum Quadrat. In einem einzigen, 1 mg schweren Sandkorn steckt rechnerisch die ungeheure Menge Energie von ca. 100 Mrd. Joule, also ca. 28 MWh oder 25 t TNT ($1\text{kt TNT} = 4,184 \cdot 10^{12} \text{ J} = 1,162 \text{ GWh}$).

Als Einstein 1905 seine Formel aufstellte, wusste er noch nicht, wie sich seine Theorie in der Praxis manifestiert. Wo genau waren die gewaltigen Energiemengen, die seine Formel vorhersagte? Erst 1938 erkannte man, dass sie in den Atomkernen schlummern. Die deutschen Physiker Otto Hahn und Lise Meitner spalteten Urankerne durch einen Beschuss mit Neutronen. Die Spaltprodukte besaßen in ihrer Summe geringfügig weniger Masse als das Ausgangsmaterial. Die fehlende Masse wurde direkt in kinetische Energie der Spaltprodukte umgewandelt. Die Energiemenge war millionenfach größer als die, die bei konventionellen chemischen Reaktionen frei wird. Die Physiker nannten diese Energieform „Kernenergie“.

Hahn und Meitner zeigten auch, dass sich die Kernspaltungsenergie besonders einfach aus Uran- und Plutoniumkernen gewinnen lässt. Der Dschinn war nun aus der Flasche. Weniger als sieben Jahre nach der ersten experimentellen Kernspaltung durch Otto Hahn und Lise Meitner in Berlin warf das amerikanische Kampfflugzeug *Enola Gay* die erste Uran-Atom-bombe der Geschichte auf die japanische Stadt Hiroshima. Drei Tage später folgte eine Plutonium-Atombombe auf Nagasaki.

Der neue Zweig der Physik, die Kernphysik, konnte schon bald auch eine Frage beantworten, über die sich die Astronomen bereits sehr lange Zeit Gedanken gemacht hatten: Woher stammt eigentlich die enorme Leuchtkraft der Sonne? Der Ursprung der Sonnenenergie musste die neu entdeckte Kernenergie sein. Doch den Physikern war bereits bekannt, dass die Hauptbestandteile der Sonne nicht schwere Atome wie Uran oder Plutonium sind, sondern leichte wie Wasserstoff und Helium. Der russisch-amerikanische Physiker George Gamow vermutete, dass die Energiequelle der Sonne die *Verschmelzung* von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen sei. Physiker nennen diesen Prozess „Kernfusion“. Die Berechnungen zeigten, dass der Verschmelzungsprozess von Atomen sogar eine noch größere Energiemenge freisetzen müsse als die Spaltung.

Am 31. Oktober 1952 wurde die erste Wasserstoffbombe durch die USA gezündet. Sie hatte die 800-fache Sprengkraft der Hiroshimabombe. Am 12. August 1953 zog die Sowjetunion nach. Acht Jahre später zündeten sie die mit 57 Megatonnen TNT-Äquivalent stärkste jemals explodierte Kernwaffe – sie hatte also die Sprengkraft von 57 Mio. tonnen TNT. Die Kernenergie hatte die Menschen in die Lage versetzt, ihre eigene Spezies zu vernichten.

Die Formel $E=mc^2$ beschreibt, dass Materie nichts anderes ist als „kondensierte Energie“. Ihre erste technologische Anwendung war die Atombombe.

Energie und Leben

Julius Robert Mayer, der 1842 als Erster das Gesetz von der Erhaltung der Energie erkannt hatte, war auf diese entscheidende Idee auf einer Ostasienreise gekommen. Als Schiffsarzt hatte er Matrosen zur Ader gelassen und beobachtet, dass deren Venenblut in den Tropen heller und damit sauerstoffreicher erscheint als in kühleren Gegenden. Den Grund dafür sah er darin, dass der menschliche Körper in diesen Gegenden weniger Wärme benötigt, er daher weniger verbrennen muss und dem Blut entsprechend weniger Sauerstoff entzogen wird. Mayer war also auch der erste Mensch, der den chemischen Prozess, der heute als Atmung oder auch Oxidation bezeichnet wird, als die primäre Energiequelle für Lebewesen identifizierte.

Sein Artikel über die Umwandlung und Erhaltung von Energie und deren Bedeutung für jedes Lebewesen wurde jedoch von den physikalischen Fachjournalen abgelehnt. Schließlich veröffentlichte er seine Energietheorie in den *Annalen der Chemie und Pharmazie*. Deren Herausgeber Justus Liebig hatte mehr Verständnis für Mayers Ideen, hatte er doch kurz zuvor in einem eigenen Artikel publiziert, dass Lebewesen Nahrung zur Deckung ihres Energiebedarfs benötigen. So kam es, dass eine der wichtigsten Erkenntnisse in der Geschichte der Physik erstmals in einer Zeitschrift für Pharmazeuten erschien.

Drei Jahre später veröffentlichte Mayer den Aufsatz „Die organische Bewegung im Zusammenhang mit dem Stoffwechsel“. In ihm präsentierte er unter anderem den Umrechnungsfaktor zwischen der mechanischen Energie und der Wärmeenergie. Dieses sogenannte Wärmeäquivalent beträgt ca. 4,18. Das bedeutet: Eine Kalorie Wärmeenergie (die Energie, die man braucht, um 1 g Wasser um 1 °C zu erwärmen) entspricht 4,18 Nm (Joule) mechanischer Energie. In der modernen Physik hat das Wärmeäquivalent

seine Bedeutung verloren, weil Kalorien nicht mehr als Energieeinheit gelten. Seit der Einführung des SI-Einheitensystems werden alle Energieformen in Joule gemessen.

Mayers Ergebnisse entsprachen denen von James Joule. Zwischen beiden entbrannte ein Streit um die Urheberschaft des Energieerhaltungssatzes, an dem Mayer psychisch zerbrach. Julius Robert Mayer ist heute nahezu vergessen. Dabei hatte er den Begriff der Energie gleich mehrfach auch in der Biologie verankert, denn er sprach auch als Erster die Möglichkeit aus, dass Pflanzen Licht in chemische Energie umwandeln.

Ab der Mitte des 19. Jahrhunderts erzielten Biologen und Mediziner weitere bedeutende Fortschritte darin, das Leben zu verstehen. Sie erkannten, dass Leibniz mit seiner *vis viva*-Vorstellung gar nicht so falsch gelegen hatte. Denn Energie steht in einem direkten Bezug zum Leben. Ganz gleich, ob wir laufen, sitzen, liegen oder denken, unser Körper braucht ständig Energie. Selbst wenn wir schlafen, arbeiten unsere Körperzellen ohne Pause weiter. Die dafür notwendige Energie kommt von außen, durch Nahrungsaufnahme, in Form von Kohlenhydraten, Proteinen und anderen notwendigen Energieträgern. Unser Körper lässt sich also auch als eine überaus komplizierte Energieumwandlungsmaschine betrachten.

Energie und Energieumwandlung sind Grundvoraussetzungen für alles Leben auf der Erde. Dank Julius Robert Mayer fanden die Klärung des Energiebegriffs in der Physik und die Erkenntnis seiner Bedeutung für die Biologie nahezu gleichzeitig statt.

Wie wir Energie messen

Die lange und etwas verworrene Geschichte der Entdeckung der Energie spiegelt sich in den vielen unterschiedlichen Einheiten wider, mit denen sie gemessen wird. Die physikalische Normeinheit der Energie ist heute das Joule (oder auch Wattsekunde, Ws).

1 Joule ist die Arbeit, die einen Körper gegen eine Kraft von 1 Newton 1 Meter weit bewegt. Dies entspricht der Energie, die wir brauchen, um ca. eine Tafel Schokolade einen Meter hochzuheben.

1 Ws beziehungsweise 1 J ist im Verhältnis zu typischen Energieangaben ein recht kleines Energiehäppchen – schon ein einziges Stückchen Schokolade

versorgt unseren Körper mit fast 100.000 J chemischer Energie. Deshalb wird in der Praxis meist mit Kilojoule (kJ) beziehungsweise Kilowattstunden (kWh) gerechnet. 1 kWh sind 3.600.000 Ws (oder Joule).

In der älteren Literatur ist eine Vielzahl weiterer Einheiten zu finden, die teilweise auch heute noch zur Beschreibung von Energiemengen angewendet werden:

- **cal – Kalorie:** Nach einer Definition von 1850 ist 1 Kalorie die Energie, die 1 g Wasser um 1 °C erwärmt. Dies entspricht einer Wärmeenergie von 4,18 J. 1 Kilokalorie (kcal, 1000 cal) entspricht 1,162 kWh.
- **SKE – Steinkohleeinheiten:** 1 SKE ist die Energiemenge, die beim Verbrennen von 1 kg Steinkohle frei wird. Sie entspricht 8,141 kWh oder 7,000 kcal. Meist wird in Millionen Tonnen SKE gerechnet.
- **BTU – British Thermal Unit:** Ein BTU ist die Wärmeenergie, die benötigt wird, um 1 britisches Pfund Wasser um 1 °F zu erwärmen. 1000 BTU entspricht 0,293 kWh. Wenn BTU verwendet werden, dann meist als „Milliarden BTU“.
- **OE – Öläquivalent (*oil equivalent*):** Ein OE ist die Energiemenge, die beim Verbrennen von einem Kilogramm Erdöl freigesetzt wird. 1 OE entspricht 11,63 kWh. In Statistiken begegnen uns Werte in Millionen Tonnen OE, also Megatonnen OE (Mtoe).

Nun noch ein Wort zur **Leistung**. Gemessen wird diese in Watt. Lässt man eine alte Glühbirne mit der Leistung von 60 W 1 h lang brennen, hat sie eine Energie von 60 Wh, also 0,06 kWh verbraucht.

Leistung ist die aufgewendete Energie dividiert durch Zeit. Wird 1 Joule Arbeit in 1 Sekunde verrichtet – so lange brauchen wir ungefähr, um eine Tafel Schokolade aufzuheben –, entspricht dies einer Leistung von 1 Watt.

Eine ältere Einheit zur Beschreibung von Leistung ist die Pferdestärke. Diese von James Watt selbst stammende Bezeichnung sollte die durchschnittliche Arbeitsleistung eines Pferdes darstellen. Doch als Einheit für Leistung hat sich schließlich nicht die Pferdestärke, sondern der Name des Ingenieurs und Erfinders durchgesetzt. James Watt hatte die Leistung des Pferdes übrigens erstaunlich hoch angesetzt: 1 PS entspricht 746 W. Normal trainierte Menschen schaffen auf einem Ergometer eine gewisse Zeit lang 200 bis 250 W. 1 PS erreichen Pferde nur im Sprint, selbst die Ackergäule des 18. Jahrhunderts hätten diese Leistung kaum mehr als eine Ackerfurche lang aufrechterhalten können.

Das offizielle Maß für alle Energiearten ist das Joule (J), aber teilweise wird auch noch die Kilowattstunde (kWh) verwendet.

Energie auf globaler Ebene

Wie jedes Lebewesen ist auch unser Planet mit seinen Seen, Ozeanen, Wüsten, Wäldern, Wolken, Städten, Tieren, Menschen und Pflanzen ein System, das ständig verschiedene Energieformen ineinander umwandelt. Quelle fast aller Energien ist die Sonneneinstrahlung, die mit einer durchschnittlichen Leistung von 1367 W/m^2 auf die Erde trifft. Dieser auch als „Solarkonstante“ bezeichnete Wert ist ein Mittelwert, denn der Abstand der Erde zur Sonne schwankt im Jahresverlauf zwischen 147 und 152 Mio. km. Entsprechend liegt die Bestrahlungsstärke zwischen 1325 und 1420 W/m^2 .

Insgesamt versorgt die Sonne die Erdoberfläche im Jahr mit der Energie von $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh. Sie erwärmt Erdoberfläche und Atmosphäre, lässt Wasser verdunsten und treibt Wolken, Wind und Ozeanströmungen an. Nicht zuletzt ist diese Energiemenge die Grundlage für alles Leben auf der Erde: Pflanzen wandeln das Sonnenlicht durch Fotosynthese zu chemisch hochenergetischen Kohlenhydraten um. Diese befeuern den gesamten Nahrungskreislauf, in den auch der Mensch eingebunden ist.

Nur wenige Energien lassen sich nicht auf die Sonneneinstrahlung zurückführen. Dies sind die Ausnahmen:

- Geothermische Energie, die aus dem sehr heißen Erdkern stammt
- Gezeitenenergie, die das Ergebnis der Wechselwirkung von Wasser mit der Schwerkraft von Erde, Mond und Sonne ist
- Kernenergie, die entweder durch die Fusion oder die Spaltung von Atomkernen entsteht

Sonnenenergie ist die energetische Basis für unsere Biosphäre. Fast die gesamte auf der Erde verfügbare Energie war ursprünglich einmal Strahlungsenergie der Sonne.

Lange haben Gelehrte und Physiker mit dem Wesen der Energie gerungen. Heute kennen wir ihre verschiedenen Erscheinungsformen gut und sind deshalb in der Lage, sie ganz nach unseren Bedürfnissen von einer Form in die andere zu überführen. Haben wir also alle Fragen geklärt und sind am Ende des Weges angekommen, der von Aristoteles bis zur Kernfusion führte?

Nein, denn mit der Frage, was Energie in letzter Hinsicht ist, tut sich die heutige Physik immer noch schwer. Was ist ihre Essenz? Wir können Energien berechnen und ihre Umwandlungen beschreiben, doch begriffen haben wir sie in ihrem tiefsten Fundament noch nicht. So schrieb der wohl bedeutendste Physiker der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, Richard Feynman, in seinen berühmten *Feynman Lectures*:

„Es ist wichtig, sich bewusst zu machen, dass wir in der heutigen Physik keine Kenntnisse darüber haben, was Energie ist.“²

Anhang – Energie in verschiedenen Gewändern

1. Kinetische Energie

Diese Energieform ist verbunden mit Bewegung. Seit Jahrtausenden wird durch Wind- und Wassermühlen die kinetische Energie von strömender Luft (Wind) beziehungsweise Wasser genutzt. Häufig ist es unser Ziel, andere Energieformen in kinetische Energie umzuwandeln. Bei Benzin- und Dieselaautos wird die chemische Energie des Treibstoffs durch Verbrennung zunächst in Wärme- und dann in Bewegungsenergie des Fahrzeugs umgewandelt. Bei Elektroautos ist es die elektrische Energie, die deren Fortbewegung ermöglicht.

2. Potenzielle Energie (Lageenergie)

Ein ruhender Gegenstand, der im Vergleich zu einem anderen Ortsniveau höher liegt, hat eine entsprechende Lageenergie. Lässt man den Gegenstand fallen, kann diese in Bewegungsenergie umgewandelt werden. In Speicherstauseen wird Energie in Form von Lageenergie gespeichert. Bei Bedarf wird das Wasser auf ein tieferes Niveau abgelassen und die Lageenergie in mechanische Bewegungsenergie und schließlich in elektrische Energie umgewandelt.

3. Wärmeenergie

Wärme entsteht bei Verbrennungen, aber auch bei der Reibung von Körpern. In Verbrennungsmotoren (Dampfmaschinen, Automotoren) wird sie in mechanische Energie umgewandelt.

4. Chemische Energie

Alle chemischen Verbindungen enthalten chemische Energie. Physikalisch gesehen handelt es sich um die Energie der Elektronen in der Atomhülle.

² R. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I, Chapter 4, Reading, Mass., Addison-Wesley Pub. Co. (1961).

Brennstoffe wie Kohle, Holz, Öl und Erdgas eignen sich besonders gut zur Nutzung der chemischen Energie. Bei ihrer Verbrennung wird Wärme freigesetzt, die wiederum in mechanische (Automotor) oder elektrische Energie (Kohlekraftwerk) umgewandelt werden kann. Auch in Nahrungsmitteln wird die chemische Energie genutzt. Durch die Verbrennung – das Fachwort dafür ist Oxidation – zum Beispiel von Kohlenhydraten in Lebewesen wird die chemisch gebundene Energie für Lebensprozesse aller Art verwendet.

5. **Elektrische Energie**

Elektrische Energie entspricht der Bewegungsenergie geladener Teilchen, zum Beispiel von Elektronen. Als Strom ist sie die für uns wohl praktischste Energieform, da sie sich leicht in kleinen Geräten in nahezu fast alle anderen Energieformen umwandeln lässt. Im Elektromotor wird Strom zu Bewegungsenergie, im Heizgerät zu Wärmeenergie, in einer Leuchte zu Strahlungsenergie, in diesem Fall: zu Licht. Über Kabel lässt sich elektrische Energie auch sehr einfach über große Entfernungen transportieren. Zwei Nachteile hat die elektrische Energie allerdings. Erstens: Sie lässt sich nur schwer in größeren Mengen speichern. Zweitens: Bei der Umwandlung in andere Energieformen treten oft signifikante Umwandlungsverluste auf.

6. **Strahlungsenergie**

Auch (Sonnen-)Licht und andere elektromagnetische Strahlung besitzt Energie. Pflanzen nutzen diese Energie für ihren Stoffwechsel (Fotosynthese). Die Lichtenergie der Sonne strömt in großen Mengen auf die Erde ein und ist die Grundlage für alles Leben auf der Erde, denn zuletzt findet jegliche chemische Energie, die Lebewesen für ihren Stoffwechsel brauchen, ihren Ursprung in der Sonne. Kohle, Holz, Öl und Erdgas sind die Überreste pflanzlicher Kohlenhydrate, die vor vielen Millionen Jahren mittels Fotosynthese erzeugt wurden. Mithilfe von Fotozellen lässt sich Lichtenergie direkt in elektrische Energie umwandeln.

7. **Kernenergie**

Während die chemische Energie ihren Ursprung in der Elektronenhülle der Atome hat, stammt die Kernenergie aus Reaktionen der Atomkerne. Sie ist die mächtigste aller Energien: Im Vergleich zur chemischen Energie der Elektronenhülle werden vielfach größere Energiemengen frei. Es gibt zwei Formen der Kernenergie. Erstens: Kernenergie, die bei der Spaltung großer Atomkerne frei wird – dies ist das Prinzip, nach dem heutige Kernkraftwerke funktionieren. Zweitens: Kernenergie, die bei der Verschmelzung leichter Atomkerne freigesetzt wird – sie ist unter anderem die Quelle der Strahlungsenergie der Sonne.



2

Das Fundament der Zivilisation

„Was ist der Mensch?“, lautet eine der grundlegenden philosophischen Fragen. Für Aristoteles ist der Mensch das einzige Lebewesen mit Vernunft und Sprache. Nach Kant wird der Mensch durch drei Eigenschaften bestimmt: Er kann hoffen und glauben, strebt nach Wissen und kann sich moralisch verhalten, weil er Gut von Böse zu unterscheiden vermag. Dies sind nur zwei der vielen Versuche von Philosophen, den Menschen zu definieren.

Merkwürdigerweise wurde bisher eine außerordentliche Fähigkeit des Menschen kaum berücksichtigt: Der Mensch ist das einzige Wesen, das Energie jenseits des eigenen Umsatzes von Nahrungsenergie in Metabolismus und Muskelkraft zu nutzen vermag. Und nur weil wir auch noch andere Energie als die chemische Energie in unserer Nahrung aus unserer Umwelt abgreifen und zu unserem Nutzen umwandeln, können wir in komplexen sozialen Strukturen ein erstaunlich leichtes und sicheres Leben führen.

Energiekreislauf in eigener Sache

Ohne Energie kein Leben. Selbst im Schlaf braucht unser Körper Energie: Unser Herz schlägt, unsere Neuronen senden Signale aus, in unseren Zellen finden Umwandlungsprozesse statt. Der metabolische Grundumsatz des Menschen, der im Zustand körperlicher Ruhe die grundlegenden Lebensfunktionen wie Atmung, Blutkreislauf, Wärmeregulation und Verdauung

aufrechterhält, entspricht einer Leistung von ca. 60 bis 90 W – die Faustregel lautet: 1 W/K Körpergewicht. Auf 24 h hochgerechnet verbrauchen Frauen in diesem Zeitraum etwa 1,68 kWh, also 1445 kcal; bei Männern liegt der Wert mit 1,92 kWh ein wenig höher, das sind 1651 kcal. Dies sind statistische Mittelwerte, für den einzelnen Menschen nimmt der metabolische Grundumsatz natürlich individuelle Werte an. Doch eines haben wir alle gemeinsam: Kompensieren wir diesen Ruheenergiebedarf nicht in Form von mit der Nahrung aufgenommenener chemischer Energie, haben wir auf Dauer keine Überlebenschance.

Sobald wir leichte Arbeiten verrichten und etwas Sport ausüben, steigt unsere Leistung und damit unser Energiebedarf noch einmal um 30 bis 40 W auf ca. 100 bis 120 W. Die Leistung eines normalen Menschen mit Schreibtischtätigkeit liegt also etwas über der einer konventionellen 100-W-Glühbirne. Pro Tag entspricht das einem Energieverbrauch von 2,4 kWh beziehungsweise 2000 kcal. Um mehr Leistung zu bringen, muss ein Mensch entsprechend mehr Nahrung zu sich nehmen. Bei schwerer körperlicher Arbeit und im Hochleistungssport kann sich der Energieverbrauch kurzzeitig bis auf das 20-Fache des Grundumsatzes erhöhen.

Während des größten Teils der Menschheitsgeschichte war dies unser Energiekreislauf: Menschen nehmen Nahrung zu sich und können deshalb jagen und sammeln gehen; die in dem Erjagten und Gesammelten steckende chemische Energie diente als Antrieb des menschlichen Stoffwechsels. Durch ihre anstrengende Tätigkeit als Jäger und Sammler entsprach der Energieumsatz der frühen Menschen etwa dem Doppelten ihres metabolischen Grundumsatzes. Auch wenn sie schon früh durch den Gebrauch von Werkzeugen zusätzliche Leistung aus ihrer Muskelkraft herausholten, war dieses Mehr an Leistung immer noch allein aufgrund der Nahrungsaufnahme möglich.

Die für ihren Alltag benötigte Energie entsprach bei den vorgeschichtlichen Jägern und Sammlern der Energie, die sie mit ihrer Nahrung aufnahmen.

Feuer, Wind und Wasser

Vor ungefähr 1,9 Mio. Jahren erschloss der Mensch neben seiner Nahrung erstmals eine weitere Energiequelle: Er nutzte die bei der Verbrennung von Holz und anderen pflanzlichen Materialien frei werdende Energie. Bis er lernte, selbst Feuer zu machen, und nicht mehr auf natürliche Savannenbrände angewiesen war, vergingen allerdings noch einmal eine Million Jahre.

Ob durch Blitz entzündete Gräser oder selbst entfachtetes Feuer – die bei der Verbrennung frei werdende Energie machte sich der frühe Mensch auf vielfältige Weise zunutze:

- Dank der Wärme des Feuers konnte er in Gebiete vordringen, die er zuvor wegen des kalten Klimas nicht hatte besiedeln können.
- Das Kochen und Braten der Nahrung machten diese verdaulicher und erschlossen so einen größeren Anteil der in ihr enthaltenen chemischen Energie.
- Ohne Feuer stände energiereiches Fleisch nur selten auf unserem Speisezettel, denn der menschliche Körper kann rohes Fleisch nur sehr eingeschränkt verdauen. Auch einige pflanzliche Nahrungsquellen, wie zum Beispiel im rohen Zustand ungenießbare Hülsenfrüchte, können im gegarten Zustand durchaus gegessen werden.
- Das Feuer tötete die Keime in der Nahrung ab und machte sie haltbarer, sodass sie für eine bestimmte Zeit gelagert werden konnte.
- Das Feuer bot Licht und Schutz vor Raubtieren und Insekten.
- Vermutlich wurde es schon früh bei der Jagd eingesetzt.

Mit der Beherrschung des Feuers sicherte sich der Mensch nicht nur seine Vorherrschaft über die Natur. Ihm standen auch deutlich reichhaltigere Nahrungsquellen zur Verfügung. Davon profitierte vor allem ein Organ: das Gehirn. Die Beherrschung des Feuers wurde zu einem bedeutenden Treiber der körperlichen und geistigen Evolution des Menschen.

Mit der Nutzung des Feuers stieg der Pro-Kopf-Energieumsatz des Menschen auf das ungefähr Drei- bis Fünffache seines metabolischen Grundumsatzes.

Als der Mensch lernte, mit Feuer umzugehen, bedeutete Energienutzung nicht mehr nur Überleben durch Nahrungsaufnahme. Energie wurde nun auch dafür verwendet, das Leben angenehmer und sicherer zu gestalten.

Ab der neolithischen Revolution wurde der Mensch sesshaft und begann, Landwirtschaft zu betreiben. Bald machte er sich die Muskelkraft von Haustieren nutzbar. Ein Rind erledigte die Arbeit von drei bis fünf Arbeitern. Durch verbesserte Tierzucht und Ernährung sowie die Entwicklung nützlicher Geschirre konnten große und starke Haustiere zehn Arbeiter ersetzen.