

## 2

# Naturwissenschaftlich-technische Grundlagen

Energiemärkte lassen sich nicht ohne Bezug auf ihre naturwissenschaftlichen Grundlagen analysieren. Energie selbst ist ein physikalischer Begriff. Jede Energiewandlung beruht auf physikalischen, chemischen oder biologischen Vorgängen. Qualifizierte energiewirtschaftliche Aussagen setzen voraus, dass die einschlägigen thermodynamischen Grundlagen und die teilweise komplexen Begrifflichkeiten richtig interpretiert und sachgerecht angewendet werden.

Über die Vermittlung dieser Qualifikation hinaus werden verschiedene Rechenverfahren zur Erstellung von Energiebilanzen vorgestellt. Außerdem werden Modelle zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands und der „grauen Energie“ – der in Importen enthaltenen Energiemengen – behandelt. Eines dieser Modelle greift auf die im Rahmen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung entwickelte energetische Input/Output-Tabelle zurück. Damit erweist sich die Energieökonomik nicht nur als „Kunde“ ingenieurwissenschaftlicher Konzepte, sondern kann auch in umgekehrter Richtung befruchtend wirken.

Die in diesem Kapitel verwendeten Variablen und Symbole lauten:

|             |   |
|-------------|---|
| $E$         | Energie (in Energieeinheiten)                                 |
| $F_j$       | Endnachfrage nach Gütern und Dienstleistungen des Sektors $j$ |
| $\eta$      | Wirkungsgrad, bei Brennstoffen Brennstoffnutzungsgrad         |
| $KEA$       | Kumulierter Energieaufwand                                    |
| $P$         | Druck ( <i>Pressure</i> )                                     |
| $\vartheta$ | Temperatur (in ° Kelvin)                                      |
| $V$         | Volumen   |
| $X_i$       | Bruttoproduktion von Sektor $i$                               |
| $X_{ij}$    | Lieferungen von Sektor $i$ nach Sektor $j$ .                  |

### 2.1

## Energie aus naturwissenschaftlicher Sicht

Der nachfolgende kursorische Überblick zu den Begrifflichkeiten und der Rolle von Energie in den verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen verdeutlicht die Breite der verschiedenen disziplinären Ansätze.

### 2.1.1

#### Physik

Physikalisch betrachtet ist Energie definiert als die Fähigkeit, Arbeit zu leisten (mechanische Energie). Maßeinheit für die Energie ist ein Joule ( $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ ). Diese Einheit entspricht der Arbeit, die benötigt wird, um einen Körper von 102 g Masse einen Meter zu heben. Hierbei muss die Erdanziehung (Gravitationskraft  $g = 9,807 \text{ m/s}^2$  am Normort Paris) überwunden werden. Die Kraft ist physikalisch gleich Masse (kg) mal Beschleunigung ( $\text{m/s}^2$ ) und wird in Newton (N) gemessen:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2. \quad (2.1)$$

Die mechanische Energie kann in potentieller Form (z.B. Wasser in einem Stausee) oder als kinetische Energie vorliegen (z.B. Rotation einer Turbine). Die pro Zeiteinheit verrichtete Arbeit wird als Leistung bezeichnet und in Watt (W) oder Kilowatt (kW) gemessen:

$$1 \text{ W} = 1000 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1000 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}. \quad (2.2)$$

Eine Kilowattstunde (kWh) ist die Energiemenge, die ein Gerät mit einer Leistung von einem kW während einer Stunde abgibt. Diese Energiemenge ist wie folgt in Joule (J) bzw. Megajoule (MJ) umzurechnen:

$$1 \text{ kWh} = 3'600 \text{ kWs} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}. \quad (2.3)$$

Ein Kilowattjahr (kWa) ist gleich  $365 \cdot 24 \text{ kWh} = 8760 \text{ kWh} = 31,54 \cdot 10^9 \text{ J}$ .

Für die thermische Energie gibt es eine eigene Maßeinheit – die Kalorie (cal). Eine Kalorie entspricht der Energie, die erforderlich ist, um 1 g Wasser von 14,5 auf 15,5 °C zu erwärmen. Zum Vergleich betragen die Schmelzwärme von (gefrorenem) Wasser 80 cal/g und die Siedewärme 539 cal/g.

Die Beziehung zwischen der mechanischen Energie und der thermischen Energie wurde durch den schottischen Physiker JAMES JOULE entdeckt. Sein Resultat war ein erstes Gesetz der Energieerhaltung: Mechanische Energie kann vollständig in Wärme umgewandelt werden (aber nicht umgekehrt). Der Umwandlungsfaktor, das mechanische Wärmeäquivalent, beträgt:

$$1 \text{ cal} = 4,187 \text{ kJ} \quad \text{bzw.} \quad 1 \text{ kJ} = 0,2366 \text{ cal}. \quad (2.4)$$

Im 20. Jahrhundert wurden weitere Energieerhaltungssätze entdeckt – das Gesetz zur Äquivalenz zwischen Energie und Masse durch ALBERT EINSTEIN ( $E = m \cdot c^2$ ) sowie die Quantisierung der Energie der Strahlung durch MAX PLANCK (Strahlungsgesetz  $E = h \cdot \nu$  mit dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$  und der Strahlungsfrequenz  $\nu$ ).

Die physikalischen Kenntnisse zur Energie sind in den beiden Hauptsätzen der Thermodynamik zusammengefasst. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik trifft die Aussage, dass die gesamte Energie in geschlossenen Systemen konstant ist, das heißt weder erzeugt noch verbraucht, sondern nur umgewandelt werden kann. Dabei können verschiedene Energieformen unterschieden werden:

- mechanische Energie: arbeitsfähige Energie, auch Exergie genannt; dazu gehört unter anderem die geordnete kinetische Energie
- chemische Energie: Bindungsenergie von Molekülen (Coulomb-Kraft)
- elektrische Energie: Energie des elektromagnetischen Feldes
- thermische Energie: kinetische Energie von Atomen und Molekülen
- Strahlungsenergie: Wenn Strahlungsenergie, z.B. in Form von Photonen, auf Materie auftrifft, kommt es zur einfachen Reflexion, zur Absorption und Reflexion (dabei kann die Wellenlänge der Abstrahlungsenergie verlängert werden), zur Absorption durch Umwandlung in interne Wärme oder zur Absorption durch chemische Prozesse (Photosynthese)
- Kernenergie: Energie der Masse (Massendefekt).

Im Gegensatz zum Sprachgebrauch gibt es demnach keinen Energieverbrauch, sondern nur die Umwandlung von Energie, etwa die Umwandlung der in fossilen Energieträgern chemisch gebundenen Energie in kinetische Energie oder Wärmeenergie. Verbraucht werden kann ein Energieträger bzw. die in ihm gespeicherte arbeitsfähige Energie. Die nach den Gesetzen der Thermodynamik in Arbeit (statt Wärme) umwandelbare Energie wird Exergie genannt, die nicht in arbeitsfähige Energie umwandelbare Menge heißt Anergie.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt (in einer von vielen Versionen), dass arbeitsfähige Energie in einem geschlossenen System tendenziell abnimmt, d.h. in Wärmeenergie umgewandelt wird (Gesetz der Entropiezunahme). Zur Beurteilung dieses zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik sind zwei Punkte wichtig (vgl. dazu auch HAKEN 1988):

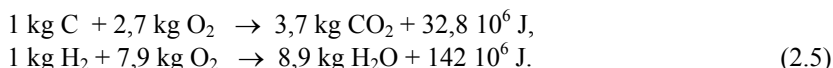
- Aus physikalischer Sicht trifft der zweite Hauptsatz eine Wahrscheinlichkeitsaussage in Bezug auf die Entropiezunahme. Er beruht auf der großen Zahl der Freiheitsgrade, welche die in thermodynamischen Systemen enthaltenen Atome und Moleküle bei ihren Bewegungen aufweisen (statistische Mechanik).
- Der zweite Hauptsatz bezieht sich auf geschlossene, nicht auf offene Systeme. In offenen Systemen tritt an die Stelle des zweiten Hauptsatzes die Theorie offener dynamischer Systeme bzw. die Theorie der Selbstorganisation (vgl. NICOLIS und PRIGOGINE 1977, 1987, HAKEN 1988).

Dank des kontinuierlichen Einfalls des Sonnenlichts ist der Globus aus thermodynamischer Sicht ein offenes System, in dem die Entropie abnehmen kann, etwa durch die Speicherung der Sonnenenergie in fossilen Energieträgern.

## 2.1.2 Chemie

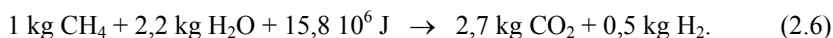
Die chemische Sicht der Energie knüpft an die physikalischen Gesetze der Energieumwandlung an, stellt dabei aber die Wirkungen spezieller Prozesse der Ener-

gieumwandlung in den Vordergrund. Ein besonders wichtiger chemischer Umwandlungsprozess ist die Verbrennung (Oxidation). Bei diesem Vorgang entstehen Moleküle, deren Bindungsenergie geringer ist als die Summe der Bindungsenergien der ursprünglichen Moleküle (exothermer Prozess). Beispiele solcher Umwandlungsprozesse sind die Verbrennung von Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H):

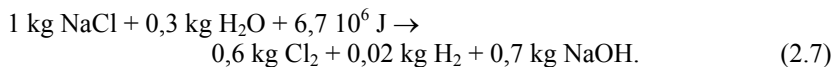


Während Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasserdampf verbrennt, führt die Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen mit Sauerstoff zur Bildung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), und zwar im (stöchiometrischen) Verhältnis von 3,7 kg CO<sub>2</sub> je kg Kohlenstoff. Dabei wird Energie (gemessen in Joule J) frei.

Umgekehrt können viele chemische Prozesse nur unter Zufuhr von Energie ablaufen (endothermer Prozess). Dazu gehören die Umkehr-Reaktionen der Verbrennungsvorgänge, etwa die Wasserstofferzeugung. Bei der Wasserstoff-Elektrolyse wird die benötigte Energie in Form von Elektrizität bereitgestellt. Bei der Reformierung von Erdgas (Methan CH<sub>4</sub>) zu Wasserstoff läuft die folgende Reaktion ab:



Eine für die chemische Industrie wichtige Reaktion ist die Chlor-Alkali-Elektrolyse, bei der aus Kochsalz (Natriumchlorid bzw. NaCl) und Wasser (H<sub>2</sub>O) unter Zufuhr von Energie (Joule J) die Produkte Chlor (Cl<sub>2</sub>), Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Natronlauge (NaOH) hergestellt werden:



Chlor ist ein Rückgrat der chemischen Industrie. Die Reaktionsfreudigkeit und Selektivität von Chlor haben den Vorteil, dass chemische Reaktionen mit hohen Ausbeuten und geringen Neben- oder Abfallstoffen ablaufen. Da bei der Umsetzung von Chlor in der Regel Wärme freigesetzt wird, können die Prozesse der Chlorchemie meist ohne zusätzlichen Energieaufwand und bei niedrigem Druck kostengünstig durchgeführt werden. Die Produkte sind dabei meist chlorfrei, denn Chlor dient als Katalysator und wird nach Ablauf der chemischen Reaktionen abgespalten. Manche Produkte wie PVC, FCKW's und DDT enthalten allerdings Chlor. Wegen des Umweltschädigungspotentials von Chlor – Kehrseite seiner hohen Reaktionsfähigkeit – ist die Entsorgung von Chlorprodukten problematisch.

### 2.1.3 Biologie

Aus biologischer Sicht ist die Energieumwandlung eng verknüpft mit der Photosynthese und der Zellatmung. Durch die Photosynthese wird die Solarstrahlung (Energie der Photonen) genutzt, um die Kohlendioxid- und Wassermoleküle (CO<sub>2</sub>

und  $\text{H}_2\text{O}$ ) aufzubrechen und zu Kohlenwasserstoff-Verbindungen (z.B. Kohlehydrate) mit einer höheren Bindungsenergie unter Freisetzung von Sauerstoff umzuwandeln. Dabei wirkt das Chlorophyll als Katalysator.

Bei der Zellatmung wird die chemische Energie von organischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen unter Einsatz von Sauerstoff erzeugt. Als ein quantitatives Beispiel sollen die Energieflüsse des lebenden menschlichen Körpers dienen. Die für die Ruhelage eines Menschen erforderliche metabolische Leistung beträgt ca. 85 Watt (W), davon 20 W für die Gehirntätigkeit. Zusammen mit der normalen körperlichen Tätigkeit beträgt die durchschnittliche Leistung eines Menschen etwa 110–120 W. Da diese Leistung während 24 Stunden zur Verfügung stehen muss, ist eine tägliche Energieaufnahme von 2,6–2,9 kWh (oder 2300–2500 kcal) erforderlich. Für einige Stunden kann der Mensch eine mechanische Dauerleistung von 100 W abgeben (z.B. Dauerlauf). Die dafür erforderliche Leistungsaufnahme steigt von 120 W auf 600 W oder mehr.

Nach Tabelle 2.1 können Maulesel, Ochsen und Pferde höhere mechanische Dauerleistungen erbringen, weshalb sie für viele Jahrtausende eine wertvolle Hilfe für den Menschen waren. Schätzungen zufolge wurde in Mitteleuropa vor der industriellen Revolution etwa 30 Prozent der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche für die Energieversorgung dieser Last- und Zugtiere benötigt. Eine immer noch verwendete Leistungseinheit ist die Pferdestärke (PS). 1 PS = 0,7355 kW.

**Tabelle 2.1.** Energetische Nutzleistungen

| –                           | mechanische Leistung (W) |
|-----------------------------|--------------------------|
| Mensch in Ruhelage          | 0                        |
| Dauerleistung des Menschen  | ca. 100                  |
| Dauerleistung des Maulesels | ca. 250                  |
| Dauerleistung des Ochsen    | ca. 400                  |
| Dauerleistung des Pferdes   | ca. 600                  |

Rechnet man den biologischen Energiebedarf des Menschen auf die etwa 7 Milliarden Menschen umfassende Weltbevölkerung hoch, so resultiert eine jährliche Energiemenge von  $0,7 \cdot 10^{12}$  kWh pro Jahr oder 860 Millionen Tonnen Erdöl-einheiten (Mio. t.o.e; vgl. Tabelle 2.2). Die Energie wird durch die Nahrung in Form hochwertiger Biomasse zur Verfügung gestellt, wozu die Landwirtschaft und die Fischerei weltweit rund 5 Mrd. t.o.e. Biomasse pro Jahr ernten müssen.

## 2.2

### Energie aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht

Energie liegt in vielfältigen Erscheinungsformen vor und kann in verschiedenen Einheiten gemessen werden. Die Ingenieurwissenschaften befassen sich mit der Entwicklung, der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen und Geräten zur Ener-

giegewinnung und haben ein energiestatistisches Instrumentarium entwickelt, welches auch für die Energieökonomik unverzichtbar ist.

## 2.2.1 Energieeinheiten

Was aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht ein Energieträger ist, hängt ab vom technischen Wissen zur Nutzbarmachung der darin gespeicherten Energie und der (wirtschaftlichen oder gesellschaftlichen) Bereitschaft, dieses Wissen anwenden zu wollen. Zum Beispiel wurde Uranoxid ( $U_3O_8$ ) erst in dem Moment Gegenstand der Energietechnik, als die kontrollierte Spaltung des Uran-Isotops  $^{235}U$  technisch beherrschbar wurde.

Entsprechend dieser Sicht gibt es eine ganze Reihe verschiedenartiger Energieträger, und es stellt sich die Aufgabe, deren spezifischen Energiegehalt in eine gemeinsame Energieeinheit umzurechnen. Während die Einheiten Joule (J), Megajoule (1 MJ =  $10^6$  J) und Gigajoule (1 GJ =  $10^9$  J) die dafür geeigneten physikalischen Größen sind, werden je nach Energiebranche branchenspezifische Energieeinheiten verwendet. Einige der gebräuchlichsten sind die

- Tonne Steinkohleeinheit (SKE) = 29,3 GJ (*tons of coal equivalent t.c.e.*)
- Tonne Erdöl-Äquivalent t.o.e. = 41,87 GJ (*tons of oil equivalent*)
- Barrel (bbl) Erdöl = 159 l Erdöl, entspricht einer Energiemenge von 5,7 GJ; Faustregel: 1 bbl = 50/365 t.o.e.
- Normkubikmeter Erdgas bei 0° C und einem Druck von 1,013 bar oder 1013 Hectopascal (hPa), abhängig von der chemischen Gaszusammensetzung
- *British Thermal Unit* BTU = 1055 J, entspricht der Erwärmung von einem britischen Pfund Wasser (453 Gramm) um 1° Fahrenheit. Gebräuchlich sind auch die Einheiten THERM =  $10^5$  BTU und QUAD =  $10^{15}$  BTU.

Anstelle der Zehnerpotenzen werden auch die folgenden Symbole verwendet:

|          |           |                 |            |
|----------|-----------|-----------------|------------|
| peta (P) | $10^{15}$ | femo (f)        | $10^{-15}$ |
| tera (T) | $10^{12}$ | pico (p)        | $10^{-12}$ |
| giga (G) | $10^9$    | nano (n)        | $10^{-9}$  |
| mega (M) | $10^6$    | micro ( $\mu$ ) | $10^{-6}$  |
| kilo (k) | $10^3$    | milli (m)       | $10^{-3}$  |

Hilfreich sind die in Tabelle 2.2 aufgeführten Umrechnungsfaktoren. Die ersten drei Zeilen bzw. Spalten bezeichnen Energieeinheiten, die auf physikalischen Definitionen beruhen. Die Werte der letzten drei Zeilen bzw. Spalten sind von den in der Natur vorkommenden fossilen Energieträgern abgeleitet. Angesichts der unterschiedlichen Eigenschaften geologischer Lagerstätten spricht man nicht von Tonnen Öl, sondern Tonnen Erdöleinheiten (t.o.e.) bzw. Tonnen Steinkohleeinheiten (SKE bzw. englisch t.c.e.).

**Tabelle 2.2.** Konversionstabelle (basierend auf IEA-Umrechnungsfaktoren)

|          | MJ     | kcal                  | kWh     | t.o.e.                 | Barrel                | t.c.e.                 |
|----------|--------|-----------------------|---------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 MJ     | 1      | 238,8                 | 0,2778  | 23,88 E <sup>-06</sup> | 175 E <sup>-06</sup>  | 34,14 E <sup>-06</sup> |
| 1 kcal   | 0,0042 | 1                     | 0,00116 | 0,1 E <sup>-06</sup>   | 0,73 E <sup>-06</sup> | 0,143 E <sup>-06</sup> |
| 1 kWh    | 3,6    | 860                   | 1       | 86 E <sup>-06</sup>    | 630 E <sup>-06</sup>  | 123 E <sup>-06</sup>   |
| 1 t.o.e. | 41'880 | 10 E <sup>+06</sup>   | 11'630  | 1                      | 7,33                  | 1,430                  |
| 1 Barrel | 5'713  | 1,36 E <sup>+6</sup>  | 1'587   | 0,1364                 | 1                     | 0,195                  |
| 1 t.c.e. | 29'290 | 6,995 E <sup>+6</sup> | 8'136   | 0,6995                 | 5,127                 | 1                      |

Die angegebenen Umrechnungsfaktoren beruhen auf (unteren) Heizwerten ( $H_i$ ). Das ist die bei vollständiger Verbrennung frei werdende Energie, wobei eine Abgastemperatur von 25 °C unterstellt und die zum Verdampfen des im Abgas enthaltenen Wassers benötigte Energie (Kondensations-Enthalpie) abgezogen wird. Beim oberen Heizwert bzw. Brennwert ( $H_s$ ) wird die Kondensations-Enthalpie hinzugerechnet. Der Unterschied hängt vom Wasserdampfgehalt des Abgases ab und beträgt je nach Energieträger 5 bis 30 Prozent. Die meisten gängigen Energiestatistiken verwenden den unteren Heizwert als Bezugsgröße (Ausnahme Erdgas); US-amerikanische Energiestatistiken sowie die Gaswirtschaft verwenden jedoch traditionell den Brennwert als Rechnungseinheit.

## 2.2.2

### Technische Energiewandlung

Es gibt viele technische Verfahren zur Energiewandlung, von denen einige in Tabelle 2.3 aufgeführt sind. Um Arbeit verrichten zu können, muss Energie in transientser Form vorliegen. Beispielsweise muss eine Temperaturdifferenz gegeben sein, um thermische Energie in mechanische Energie umzuwandeln.

**Tabelle 2.3.** Technische Verfahren der Energiewandlung (Beispiele)

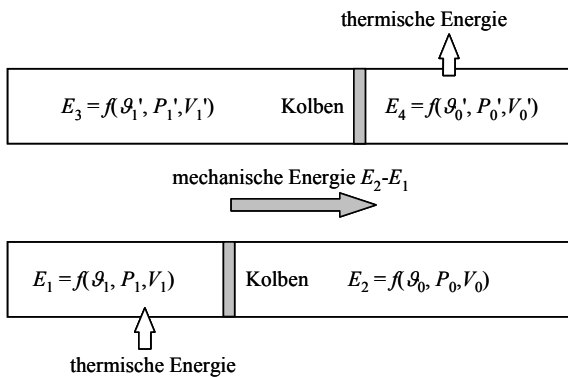
| Output<br>Input        | mechanische<br>Energie | thermische<br>Energie  | chemische<br>Energie | elektrische<br>Energie    | Strahlungs-<br>energie |
|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------|
| mechanische<br>Energie | -                      | Reibungs-<br>wärme     | -                    | Wasser-<br>turbine        | -                      |
| thermische<br>Energie  | Wärme-<br>maschine     | -                      | Thermo-<br>chemie    | elektrischer<br>Generator | -                      |
| chemische<br>Energie   | Verbren-<br>nungsmotor | Heizkessel             | -                    | Brennstoff-<br>zelle      | Gaslampe               |
| elektrische<br>Energie | Elektromotor           | Induktions-<br>heizung | Elektrolyse          | -                         | Glühlampe              |
| Strahlungs-<br>energie | Laser                  | Mikrowel-<br>lenofen   | Solarchemie          | Photovoltaik              | -                      |
| Kernenergie            | -                      | Kernreaktor            | -                    | -                         | Radio-<br>aktivität    |

In der Natur gibt es etliche Energiepotentiale in transienter Form, etwa Flüsse, Windenergie und Geothermie. Fossile Energieträger sowie Kernbrennstoffe sind jedoch erst nach einem oder mehreren Umwandlungsschritten in der Lage, Arbeit zu leisten. In der Regel wird bei solchen Umwandlungsschritten ein Teil der Energie in Wärme umgewandelt, die nicht zur Verrichtung von Arbeit eingesetzt werden kann.

Die thermodynamischen Begrenzungen der Energiewandlung lassen sich am Beispiel der Dampfmaschine erläutern (vgl. Abb. 2.1). Durch Wärmezufuhr, z.B. über die Verbrennung eines fossilen Energieträgers, wird Wasser im linken Zylinder zu Dampf gewandelt und noch überhitzt (Abb. 2.1 unten). Wegen der Zustandsgleichung (ideales Gas)

$$\frac{P V}{\varrho} = \text{konstant} \tag{2.8}$$

mit dem Druck  $P$ , dem Volumen  $V$  und der Temperatur  $\varrho$  (gemessen in Grad Kelvin  $K = -273$  Grad Celsius) kommt es bei konstantem Volumen zu einem Druckanstieg im linken Zylinder, der durch die Verschiebung des Kolbens nach rechts entspannt wird (Abb. 2.1 oben). Bei modernen Wärmemaschinen erfolgt die Druckentspannung über eine Turbine.



**Abb. 2.1.** Prinzip einer Dampfmaschine

Sobald durch die Kolbenverschiebung Druck und Gegendruck ausgeglichen sind – oder, gleichbedeutend, die Temperatur im erhitzten Zylinder sich der Temperatur jenseits des Kolbens angepasst hat –, sind die Möglichkeiten erschöpft, um die Energie des linken Zylinders in mechanische Energie umzuwandeln. Mit der Druckentspannung wird jenseits des Kolbens bzw. der Turbine ein Energieüberschuss  $E_4 > E_2$  erzeugt, der bei fortgesetztem Betrieb der Wärmemaschine abgeführt werden muss. Bei großen thermischen Kraftwerken werden als Wärmesenke in der Regel Kühltürme eingesetzt.

Die bei einer solchen Wärmemaschine nutzbare mechanische Energie ist demnach wesentlich geringer als diejenige des eingesetzten Brennstoffs. Ein Maß für

die technischen Umwandlungsverluste ist der mechanische Wirkungsgrad (Carnot-Effizienz)

$$\eta = \frac{\text{nutzbarer Energieoutput}}{\text{Energieinput}} \quad (2.9)$$

Eine ideale Dampfmaschine, die mit einer Dampf-Eintrittstemperatur von  $\vartheta_1$  sowie einer Dampf-Austrittstemperatur von  $\vartheta_0$  (gemessen in Grad Kelvin) betrieben wird, hat einen maximal möglichen mechanischen Wirkungsgrad von

$$\eta_{\max} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_0}{\vartheta_1} = 1 - \frac{\vartheta_0}{\vartheta_1} \quad (2.10)$$

Bedingt durch Reibung, Wärmeübergang, plastische Verformung und andere thermodynamische Irreversibilitäten liegen die Wirkungsgrade in der Praxis unterhalb der theoretischen Maximalwerte. Beispielsweise ergibt sich bei einem GuD-Kraftwerk (Kombianlage mit einer Gas- und einer Dampfturbine) bei einer Eintrittstemperatur  $\vartheta_1 = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Austrittstemperatur  $\vartheta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  als theoretischer Brennstoffnutzungsgrad  $\eta = 80$  Prozent, realisiert werden jedoch Werte von maximal knapp 60 Prozent.

Klassisches Ziel der Ingenieurskunst besteht darin, nutzbare Energie mit möglichst hohen Wirkungsgraden bereitzustellen, wobei natürlich die naturgesetzlichen Grenzen der Thermodynamik nicht überschritten werden können.

## 2.3 Energiebilanz

Um sich ein quantitatives Bild zu energiewirtschaftlichen Zusammenhängen eines Landes zu verschaffen, muss auf statistische Quellen zurückgegriffen werden, wie sie von den statistischen Ämtern, Verbänden, Energieunternehmen und Forschungseinrichtungen veröffentlicht werden. Eine besonders wichtige Datenquelle sind Energiebilanzen, die eine zusammenfassende und vollständige Darstellung der Energieflüsse des technischen Energiesystems eines Landes bieten.<sup>2</sup> In diesen Bilanzen werden das Aufkommen und die Verwendung der verschiedenen Energieträger innerhalb eines Betrachtungszeitraums in seiner Gesamtheit dokumentiert.

Eine graphische Darstellung von Energiebilanzen erfolgt üblicherweise in Form von Energieflussbildern. Ein stark vereinfachtes Beispiel ist in Abb. 2.2 gezeigt. Die Dicke der Pfeile gibt einen approximativen Überblick zur Struktur des

<sup>2</sup> Im Rahmen der Betriebswirtschaftslehre spricht man von Bilanzen, wenn Bestandsgrößen betrachtet werden. Bei Energiebilanzen werden demgegenüber die aggregierten Energieflüsse eines Jahres erfasst. Die betriebswirtschaftliche Analogie derartiger Stromgrößen ist die Gewinn- und Verlustrechnung.

technischen Energiesystems in einem typischen Energieimportland. Die hier verwendeten Begriffe und deren Interpretation werden nachfolgend näher erläutert.

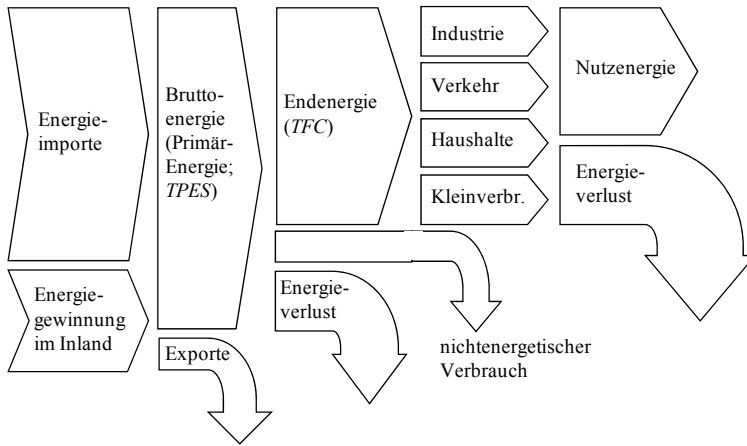


Abb. 2.2. Schematisches Energieflussbild

### 2.3.1 Bruttoenergie (Primärenergie)

Das gesamte Energieaufkommen aus inländischen Quellen und Importen abzüglich der Energieexporte bestimmt die zur Verfügung stehende Bruttoenergie. Nicht ganz korrekt spricht man auch von Primärenergie (*Total Primary Energy Supply TPES*). Das sind Energieträger, die noch keinen Umwandlungsprozess durchlaufen haben. Energieträger, die einen Umwandlungsprozess durchlaufen haben, werden als Sekundärenergieträger bezeichnet. Die sprachliche Ungenauigkeit des Begriffs Primärenergie wird mit dem zunehmenden Anteil an Sekundärenergieträgern (z.B. Benzin und Diesel anstelle von Rohöl) problematisch.

Zieht man von der Bruttoenergie die im Energiesektor anfallenden Umwandlungs- und Leitungsverluste sowie den nicht-energetischen Energieverbrauch ab, so ergibt sich die Endenergie (*Total Final Consumption TFC*), die an die Endnutzer für energetische Zwecke gelieferte Energie. Im Regelfall handelt es sich um Energieverkäufe von Energieunternehmen – also kommerzielle Energie. Daneben steht den Endnutzern in mehr oder weniger großem Umfang auch nichtkommerzielle Energie zur Verfügung, etwa in Form von selbst gesammeltem Brennholz, von getrocknetem Dung oder über die Wärmeerzeugung einer eigenen Solaranlage. Wegen der meist fehlenden statistischen Erfassung gibt es nur Schätzungen zur energetischen Nutzung nichtkommerzieller Energieträger.

Tabelle 2.4 zeigt am Beispiel Deutschlands den Aufbau einer Energiebilanz. Diese besteht aus einer dreiteiligen Matrix. Im oberen Teil ist das Bruttoenergieaufkommen im Inland nach Herkunft und Art des Energieträgers dargestellt. Ent-

sprechend der internationalen Konvention werden Kernbrennstoffe als heimische Energieträger klassifiziert, obwohl diese importiert sind. Der Grund liegt darin, dass Kernbrennstoffe zumeist über mehrere Jahre im Inland gelagert werden, so dass man diesen Energieträger aus versorgungspolitischer Sicht analog zu einem einheimischen Energieträger betrachten kann.

**Tabelle 2.4.** Energiebilanz für Deutschland 2004 im IEA-Format

| [Mio. t.o.e.] | Coal | Oil  | Petr-<br>prod. | Gas  | Nu-<br>clear | Hy-<br>dro | Wind,<br>PV | Bio-<br>mass | Electr | Heat | Total |
|---------------|------|------|----------------|------|--------------|------------|-------------|--------------|--------|------|-------|
| Production    | 58,3 | 4,4  | -              | 14,7 | 43,5         | 1,8        | 2,6         | 10,6         | -      | -    | 136   |
| Imports       | 28,3 | 113  | 35,3           | 72,8 | -            | -          | -           | -            | 4,1    | -    | 253   |
| Exports       | -0,6 | -1,1 | -24,2          | -7,0 | -            | -          | -           | -            | -4,4   | -    | -37,3 |
| Stock Changes | -0,2 | -0,6 | -1,0           | -1,9 | -            | -          | -           | -            | -      | -    | -3,7  |
| TPES          | 85,8 | 115  | 10,1           | 78,7 | 43,5         | 1,8        | 2,6         | 10,6         | -0,2   | -    | 348   |

| [Mio. t.o.e.]      | Coal | Oil  | Petr-<br>prod. | Gas  | Nuc-<br>lear | Hy-<br>dro | Wind,<br>PV | Biom<br>ass | Electr | Heat | Total |
|--------------------|------|------|----------------|------|--------------|------------|-------------|-------------|--------|------|-------|
| TPES               | 85,8 | 115  | 10,1           | 78,7 | 43,5         | 1,8        | 2,6         | 10,6        | -0,2   | -    | 348   |
| Transfers          | -    | 3,2  | -2,6           | -    | -            | -          | -           | -           | -      | -    | 0,6   |
| Statist. Differen. | 1,8  | -    | 0,4            | 1,4  | -            | -          | -           | -           | -      | -    | 3,7   |
| Electr. Plants     | -62  | -    | -1,0           | -3,9 | -43,5        | -1,8       | -2,2        | -1,2        | 45,2   | -    | -70,4 |
| CHP Plants         | -9,9 | -    | -1,2           | -12  | -            | -          | -           | -3,6        | 7,2    | 13,9 | -6,1  |
| Heat Plants        | -0,6 | -    | -0,2           | -0,4 | -            | -          | -           | -0,1        | -      | 1,0  | -0,3  |
| Refineries         | -    | -124 | 124            | -    | -            | -          | -           | -           | -      | -    | 0,1   |
| Coal Transform.    | -4,9 | -    | -1,2           | -    | -            | -          | -           | -           | -      | -    | -6,0  |
| Other Transform    | -    | 5,9  | -6,1           | -    | -            | -          | -           | -           | -      | -    | -0,3  |
| Own Use            | -1,0 | -    | -6,9           | -0,7 | -            | -          | -           | -0,1        | -5,1   | -0,3 | -14,2 |
| Distrib. Losses    | -0,3 | -    | -              | -0,2 | -            | -          | -           | -           | -2,9   | -    | -3,5  |
| TFC                | 9,0  | -    | 116            | 62,4 | -            | -          | 0,3         | 5,6         | 44,1   | 14,6 | 252   |

| [Mio. t.o.e.]  | Coal | Oil | Petr-<br>prod. | Gas  | Nuc-<br>lear | Hy-<br>dro | Wind,<br>PV | Biom<br>ass | Electr | Heat | Total |
|----------------|------|-----|----------------|------|--------------|------------|-------------|-------------|--------|------|-------|
| TFC            | 9,0  | -   | 116            | 62,4 | -            | -          | 0,3         | 5,6         | 44,1   | 14,6 | 252   |
| Industry       | 7,9  | -   | 4,0            | 19,0 | -            | -          | -           | -           | 20,1   | 1,9  | 52,9  |
| Transport      | -    | -   | 62,1           | -    | -            | -          | -           | 1,0         | 1,4    | -    | 64,5  |
| Residential    | 0,6  | -   | 17,7           | 28,4 | -            | -          | 0,3         | 4,6         | 12,1   | 12,7 | 76,3  |
| Commercial     | 0,3  | -   | 6,6            | 7,5  | -            | -          | -           | -           | 9,9    | -    | 24,3  |
| Agriculture    | -    | -   | 1,7            | 0,3  | -            | -          | -           | -           | 0,7    | -    | 2,7   |
| Non-specific   | -    | -   | 0,1            | 5,2  | -            | -          | -           | -           | -      | -    | 5,3   |
| Non-energy Use | 0,3  | -   | 23,4           | 2,1  | -            | -          | -           | -           | -      | -    | 25,8  |

*TPES Total Primary Energy Supply; TFC: Total Final Consumption; PV Photovoltaic; CHP: Combined Heat and Power; Quelle: IEA 2005*

Aus dem mittleren Teil der Energiebilanz geht hervor, wie das verfügbare Bruttoenergieaufkommen im Inland in Sekundärenergie umgewandelt wird. In den Spalten stehen weiterhin die Primärenergieträger, während die Zeilen durch die Wandlungstechnologien gebildet werden. Dabei werden die von einer Technologie eingesetzten Energieträger (Energie-Inputs) mit negativem Vorzeichen eingetragen, während die Abgabe der umgewandelten Energie mit positivem Vorzeichen notiert wird. Der Saldo jeder Zeile stellt den Energieverlust der jeweiligen

Technologie dar (letzte Spalte der Energiebilanz). Zwei Zeilen beschreiben den Eigenverbrauch der Energiesektoren sowie die energetischen Verluste beim Transport der Energieträger. Auch werden explizit statistische Differenzen ausgewiesen, die auf Inkonsistenzen in den Datenquellen beruhen.

Die Summe aus den beiden oberen Teilen der Energiebilanz ergibt die in der Zeile *Total Final Consumption* aufgeführten Endenergiemengen. Aus dem Vergleich mit dem Primärenergieaufkommen lässt sich die zur Energiewandlung und -verteilung erforderliche Energiemenge ablesen. Im Beispiel von Tabelle 2.4 können nur rund 70 Prozent der Primärenergie an die Endnutzer geliefert werden.

Derartige Aussagen sind jedoch mit Vorsicht zu interpretieren. Ein besonderes statistisches Problem stellt die Behandlung der Stromerzeugung aus Wasserkraft und anderen erneuerbaren Energien dar. Zwar lässt sich vergleichsweise leicht angeben, wie viel Endenergie mit diesen Kraftwerkstypen bereitgestellt wurde. Der damit verbundene Primärenergieaufwand ist eine daraus abgeleitete Größe, wobei in der Literatur drei Ansätze existieren:

- Beim Substitutionsprinzip wird der Primärenergieaufwand durch diejenige Energiemenge bestimmt, die bei der Stromerzeugung in konventionellen Wärmekraftwerken erforderlich wäre. Als Approximation wird dabei häufig der durchschnittliche Brennstoff-Nutzungsgrad der thermischen Kraftwerke (35 bis 40 Prozent) herangezogen.
- Beim Wirkungsgradprinzip erfolgt die Umrechnung von den Endenergiemengen auf die Primärenergie unter Zugrundelegung von tatsächlichen Brennstoffnutzungsgraden der jeweiligen Kraftwerkstechnik (beispielsweise bei der Kernenergie bis 36 Prozent, bei Pumpspeicherwerken etwa 80 Prozent, bei Photovoltaik nur 10 bis 25 Prozent).
- Das Prinzip des fiktiven Wirkungsgrads weist die regenerative Stromerzeugung sowie den Stromimport mit einem Wirkungsgrad von 100 Prozent aus. Dies hat zur Folge, dass bei der Betrachtung der Primärenergie der Einsatz von regenerativen Energien tendenziell unterschätzt wird.

Da die drei Methoden zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen führen, ist vor einer Auswertung von Energiebilanzen die ihnen jeweils zugrunde liegende Methode zu prüfen. Zudem sind die Energiebilanzen zwischen verschiedenen Ländern und Zeiträumen nicht ohne weiteres vergleichbar, weil sie eventuell mit unterschiedlichen methodischen Verfahren erstellt wurden.

### 2.3.2 Endenergie

Im unteren Teil der Energiebilanz wird die Endenergienachfrage (*TFC Total Final Consumption*) der Industrie, des Verkehrs, der privaten Haushalte und der Kleinverbraucher (*Commercial*; Landwirtschaft, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) getrennt nach den Endenergieträgern aufgeführt. Außerdem wird der nichtenergie-

tische Verbrauch dokumentiert. Würde man – der Systematik der beiden oberen Teilbilanzen folgend – den Endenergieverbrauch mit negativem Vorzeichen in die Energiebilanz eintragen, müsste die Summe aller Zeilen und Spalten jeweils Null sein, womit der Verbleib des Energieaufkommens vollständig dokumentiert ist.

Die Abgrenzung zwischen den einzelnen Verbrauchergruppen weist gegenüber der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung und anderen gesamtwirtschaftlichen Statistiken einige Besonderheiten auf. Ein Beispiel ist der Treibstoffverbrauch des Straßenverkehrs. Hier müsste zwischen dem Verkehr der Unternehmen (Personen- und Güterverkehr) und dem Verkehr der privaten Haushalte unterschieden werden. Da die Mineralölwirtschaft die entsprechende Aufteilung nur grob schätzen kann, unterbleibt eine entsprechende Aufteilung in den Energiebilanzen. Ähnliche Diskrepanzen tauchen auch bei der Zuordnung des Handwerks auf (Kleinverbraucher anstelle des jeweiligen Wirtschaftssektors).

### 2.3.3 Statistische Datenquellen

Es gibt eine Fülle von energiestatistischen Veröffentlichungen (auch im Internet). Eine anerkannte statistische Datenquelle für das Primärenergieaufkommen einzelner Länder und Weltregionen ist der jährlich vom Unternehmen *BP* herausgegebene *BP Statistical Review of World Energy*. Daneben veröffentlichen die *International Energy Agency (IEA)* sowie die *Energy Information Administration (EIA)* des amerikanischen *Department of Energy (DOE)* statistische Materialien zur internationalen Energiewirtschaft, darunter auch Angaben zur Energiepreisentwicklung. Angaben über den nicht-kommerziellen Energieverbrauch sind im Anhang des jährlichen Weltentwicklungsberichts der Weltbank zu finden.

Für Deutschland veröffentlicht die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen die offiziellen Energiestatistiken. Die schweizerische Gesamtenergiestatistik wird jährlich durch das Bundesamt für Energiewirtschaft veröffentlicht.

**Tabelle 2.5.** Weltweite Nutzung der kommerziellen Primärenergieträger

|               | 1925    |     | 1950    |     | 1975    |     | 2000    |     |
|---------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
|               | [M toe] | [%] | [M toe] | [%] | [M toe] | [%] | [M toe] | [%] |
| Mineralöl     | 140     | 13  | 500     | 27  | 2'290   | 44  | 3'519   | 39  |
| Erdgas        | 30      | 3   | 180     | 10  | 930     | 18  | 2'157   | 24  |
| Kohle         | 860     | 83  | 1'120   | 61  | 1'640   | 32  | 2'217   | 25  |
| Wasserkraft   | 10      | 1   | 30      | 2   | 300     | 6   | 617     | 7   |
| Kernenergie   | –       | –   | –       | –   | 20      | 0   | 585     | 6   |
| Primärenergie | 1'040   | 100 | 1'830   | 100 | 5'180   | 100 | 9'015   | 100 |

Quellen: DARMSTADTER *et al.* (1971:10) und BP 2005; Zusätzlich zur kommerziellen Energienutzung werden weltweit schätzungsweise 1'700 Mio. t.o.e. nichtkommerzielle Energie, insbesondere Biomasse, energetisch genutzt.

Sinn von Energiebilanzen ist es, Informationen über die Struktur und die Entwicklung des technischen Energiesystems zu gewinnen. Tabelle 2.5 enthält bei-

spielhaft einige Zahlenangaben zum weltweiten Primärenergieaufkommen, die nach dem Substitutionsprinzip berechnet sind. Während noch bis in die 50er Jahre des 20. Jahrhunderts Kohle der wichtigste Energieträger war, ist es inzwischen das Erdöl mit einem Anteil von nahezu 40 Prozent. Erdgas und Kohle haben einen Primärenergieanteil von je 25 Prozent. Nicht aufgeführt ist das nicht-kommerzielle Energieaufkommen.

### 2.3.4 Nutzenergie

Vom technischen wie vom ökonomischen Standpunkt aus gesehen ist Endenergie ein intermediäres Gut. Sie wird von Energie nutzenden Geräten, Maschinen und Anlagen verwendet, um nützliche Dinge zu erreichen. Es geht also um den Nutzen, der sich mit dem Einsatz von Endenergieträgern erreichen lässt:

- Wärme (Raumwärme, Warmwasser, Hoch- und Niedertemperatur-Prozesswärme)
- Arbeit (Kühlung, Bewegung, Antrieb, Information und Kommunikation)
- Licht (Beleuchtung, Lasertechnik)
- Chemisch gebundene Energie (Elektrolyse, Reduktionsprozesse etc.).

Die Endnutzer betreiben dazu (meist in eigener Verantwortung) Heizkessel, Motoren, Beleuchtungssysteme, Klimageräte, Schmelzöfen. Wie bei jedem Umwandlungsvorgang treten erneut Verluste auf, vor allem in Form von Abwärme. Eine statistische Erfassung der entsprechenden Umwandlungsverluste ist schon deshalb schwierig, weil es keine stringente Definition von Nutzenergie (*Net Energy*) gibt. Wo beispielsweise soll die von einer Zentralheizung gelieferte Wärmemenge gemessen werden: am Ausgang des Brenners oder an den Heizkörpern? Es gibt daher nur Modellrechnungen über die durchschnittlichen Energieverluste bei der Umwandlung von End- in Nutzenergie.

Noch einen Schritt weiter geht der Begriff der Energiedienstleistung. Dahinter steht die Vorstellung, dass es letztlich nicht auf den warmen Heizkörper oder das heiße Wasser, sondern den wohltemperierten Raum oder ein gut geformtes Stahlblech ankommt. Wie viel Nutzenergie dafür erforderlich ist, ist nicht mehr nur eine Frage der Technik (Wärmedämmstandard, optimale Auslegung von Motorleistungen, ...), sondern hängt wesentlich vom Verbraucherverhalten ab. Man kann beispielsweise durch mehr oder weniger intelligentes Lüften einen erheblichen Einfluss auf die zum Wohnbehagen erforderliche Energie zur Raumwärmegewinnung nehmen.

Weil Nutzenergie und Energiedienstleistungen am Markt nicht beobachtet werden können, tauchen sie in den traditionellen Energiebilanzen nicht auf. Schätzungen zufolge treten bei den entsprechenden Umwandlungsschritten weitere erhebliche Umwandlungsverluste auf. Gesamtwirtschaftlich betrachtet liegt der Anteil der Primärenergie, der schlussendlich als Nutzenergie und Energiedienstleistungen

bereit steht, schätzungsweise zwischen 10 bis 20 Prozent. Wenn künftig eine weitere Verringerung der Umwandlungsverluste entlang der Kette zwischen der Primärenergiequelle bis zur Energiedienstleistung erreicht werden könnte, würde der Gesamtenergiebedarf bei gleich bleibender Energiedienstleistung weiter deutlich sinken, womit sich auch die energiebedingten Umweltschäden und Treibhausgas-Emissionen vermindern würden.

## 2.4 Kumulierter Energieaufwand

Der kumulierte Energieaufwand  $KEA$  von Produkten oder Dienstleistungen ist definiert als die Summe aller Primärenergienmengen, die bei der Herstellung  $KEA_H$ , der Nutzung  $KEA_N$  und der Entsorgung  $KEA_E$  anfallen:

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E. \quad (2.11)$$

Der Indikator „kumulierter Energieaufwand“ wird unter anderem für die sachgerechte Beurteilung von Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs von Gebäuden, Fahrzeugen etc. verwendet. Der Vorteil der Energieverbrauchs-minderung könnte aufgehoben werden durch einen vermehrten Energieverbrauch bei der Herstellung, und dies gilt es bei der energetischen Beurteilung von Einsparmaßnahmen zu beachten.

Auch zur Beurteilung von Solar- und Windkraftanlagen wird der kumulierte Energieaufwand herangezogen. Während bei der Nutzung solcher Anlagen praktisch keine Energie benötigt wird, spielt die bei der Herstellung benötigte Primärenergie eine Rolle. Mit der energetischen Amortisationsdauer (*Pay-back Time*) wird der Zeitraum angegeben, bis die bei der Herstellung und der Entsorgung benötigte Energie durch die Anlage zurück gewonnen wird. Der Erntefaktor gibt an, wie oft eine regenerative Anlage in ihrer Lebenszeit den kumulierten Energieaufwand wieder abgibt, beziehungsweise an anderer Stelle wieder einspart.

Das Konzept des kumulierten Energieverbrauchs wird auch zur genaueren Beurteilung der Energiebilanz eines Landes benötigt. Diese betrachtet nämlich nur die im Land verwendete Energie, nicht aber den Energieaufwand, der im Ausland zur Herstellung der Importe erforderlich ist (graue Energie; SPRENG 1988). Die Volkswirtschaft von Ländern mit hohen Energiepreisen tendiert dazu, die Herstellung energieintensiver Produkte ins Ausland zu verlagern. Damit wird zwar das Primärenergieaufkommen des Importlandes reduziert, doch global gesehen ist der Effekt neutral. Die Berechnung des kumulierten Energieaufwands  $KEA$  macht dies transparent.

Zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands stehen zwei prinzipiell unterschiedliche Berechnungsmethoden zur Verfügung – die Prozesskettenanalyse und die energetische Input/Output-Tabelle. Bei der Prozesskettenanalyse werden alle Prozessglieder zur Herstellung eines ökonomischen Gutes bis zu dessen Entsorgung detailliert aufgeschlüsselt und die einfließenden Energieströme aufsummiert (vgl. FRISCHKNECHT *et al.* 1994). Die Methode ist relativ einfach anzuwen-

den, wenn die notwendigen Daten zur Verfügung stehen. Tabelle 2.6 zeigt Ergebnisse, die mit dem vom Institut für Wohnen und Umwelt Darmstadt entwickelten GEMIS-Modell (FRITSCHÉ *et al.* 1999) berechnet wurden. Danach ist für die Bereitstellung von 1 kWh Heizöl insgesamt 1,13 kWh Primärenergie erforderlich. Für die Bereitstellung von 1 kWh Elektrizität aus deutschen Kraftwerken müssen sogar rund 3 kWh Primärenergie eingesetzt werden. Spalte 3 von Tabelle 2.6 zeigt zusätzlich den damit jeweils verbundenen Ausstoß an Treibhausgasen (in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten).

**Tabelle 2.6.** Kumulierter Energieaufwand verschiedener Energieträger

|                           | KEA<br>[kWh Prim/ kWh End] | CO <sub>2</sub> -Äquivalent<br>[g/kWh] |
|---------------------------|----------------------------|--|
| Heizöl extraleicht        | 1,13                       | 311                                    |
| Erdgas H (hochkalorisch)  | 1,14                       | 247                                    |
| Flüssiggas (Ethan, Butan) | 1,13                       | 272                                    |
| Steinkohle                | 1,08                       | 439                                    |
| Braunkohle                | 1,21                       | 452                                    |

Bei der Prozesskettenanalyse müssen die Berechnungen irgendwann abgebrochen werden. Es ist nicht möglich, die gesamten wirtschaftlichen Interdependenzen bei der Herstellung von Gütern komplett zu erfassen und dadurch entstehen methodisch bedingte Fehler. Diese lassen sich mit der Methode der energetischen Input/Output-Analyse vermeiden.

## 2.5 Energetische Input/Output-Tabelle

Die Methode basiert auf der Unterteilung der Volkswirtschaft in Wirtschaftssektoren. Die zwischen diesen Sektoren ausgetauschten Waren und Dienstleistungen werden in einer Input/Output-Tabelle erfasst (vgl. LEONTIEF 1970). Die Sektoren sind durch homogene Gütergruppen definiert, also funktionell abgegrenzt, im Unterschied zu den Wirtschaftszweigen in den volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen, die institutionell gebildet werden.<sup>3</sup>

Tabelle 2.7 zeigt ein stark vereinfachtes Beispiel einer Input/Output-Tabelle mit fünf Sektoren, darunter zwei Energiesektoren. Die Transaktionen sind zu Herstellungspreisen ohne Mehrwertsteuer und ohne Verbrauchssteuern wie Mineralöl- oder Tabaksteuer bewertet, die Einfuhren zu *cif*-Preisen und die Ausfuhren zu *FOB*-Preisen. Handelsspannen werden als Output des Handels (Teil des Dienstleistungssektors) verbucht.

<sup>3</sup> Bei der institutionellen Sektorzuordnung werden Unternehmen gemäß dem Schwerpunkt ihrer wirtschaftlichen Tätigkeit zu Sektoren zusammengefasst.

**Tabelle 2.7.** Input/Output-Tabelle einer Volkswirtschaft (in Geldeinheiten)

|                   | Öl,<br>Gas,<br>Kohle | Elek-<br>trizität | Land-<br>wirtschaft | Indu-<br>strie | Dienst-<br>leistun-<br>gen | Endnach-<br>frage $F_i$ | Output<br>$X_i$ |
|-------------------|----------------------|-------------------|---------------------|----------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|
| Öl, Gas, Kohle    | <b>0,09</b>          | <b>0,07</b>       | <b>0,18</b>         | <b>2,86</b>    | <b>4,18</b>                | <b>5,72</b>             | <b>13,10</b>    |
| Elektrizität      | <b>0,01</b>          | <b>0,28</b>       | <b>0,09</b>         | <b>1,18</b>    | <b>2,22</b>                | <b>3,67</b>             | <b>7,45</b>     |
| Landwirtschaft    | 0,00                 | 0,00              | 0,90                | 11,54          | 1,33                       | 3,31                    | 17,08           |
| Industrie, Bau    | 0,01                 | 0,61              | 3,82                | 45,08          | 26,02                      | 143,42                  | 218,96          |
| Dienstleistungen  | 0,06                 | 0,82              | 1,98                | 20,01          | 38,48                      | 159,62                  | 220,97          |
| Importe           | <b>8,16</b>          | <b>1,24</b>       | 1,29                | 62,15          | 15,18                      |                         | 88,02           |
| Abschreibungen    | 0,98                 | 1,26              | 2,98                | 11,23          | 17,26                      |                         | 33,71           |
| Zinsen, Gewinne   | 0,26                 | 0,62              | 3,07                | 9,49           | 32,92                      |                         | 46,40           |
| Löhne, Gehälter   | 0,83                 | 1,25              | 3,51                | 44,89          | 72,72                      |                         | 123,20          |
| indirekte Steuern | 2,70                 | 1,30              | -0,74               | 10,53          | 10,66                      |                         | 24,50           |
| ./. Subventionen  |                      |                   |                     |                |                            |                         |                 |
| Input $X_j$       | 13,10                | 7,45              | 17,08               | 218,96         | 220,97                     | 315,74                  | 793,30          |

Zeilenweise gelesen, gibt eine solche Tabelle Auskunft über die Struktur der wertmäßigen Lieferungen eines Sektors an die übrigen Wirtschaftssektoren (erster Quadrant) sowie an die Endnachfrage<sup>4</sup> – kurz, über die Verwendung der Bruttoproduktion. Spaltenweise gelesen, gibt die Input/Output-Tabelle Auskunft über die sektorspezifischen Kosten der Produktionsfaktoren; neben den Bezügen von anderen Sektoren (erster Quadrant) werden dabei die Importe, die Kosten für die Inputfaktoren Kapital (Abschreibungen; Zinsen und Gewinne) und Arbeit (Löhne und Gehälter inkl. Lohnnebenkosten) sowie die indirekten Steuern (abzüglich Subventionen) ausgewiesen. Die Zeilensummen (Einnahmen) und Spaltensummen (Ausgaben) eines jeden Sektors stimmen definitionsgemäß immer überein.

Für Deutschland veröffentlicht das Statistische Bundesamt in unregelmäßigen Abständen eine nach 59 Gütergruppen bzw. Produktionsbereichen gegliederte Input/Output-Tabelle, allerdings jeweils mit mehreren Jahren Verzug (vgl. Statistisches Bundesamt 2004).

**Tabelle 2.8.** Energetische Input/Output-Tabelle einer Volkswirtschaft (in Mt.o.e)

|                | Öl,<br>Gas, .. | Elek-<br>trizität | Land-<br>wirtschaft | Indu-<br>strie | Dienst-<br>leistungen. | Endnach-<br>frage $F_i$ | Output<br>$X_i$ |
|----------------|----------------|-------------------|---------------------|----------------|------------------------|-------------------------|-----------------|
| Öl, Gas, Kohle | 8,2            | 4,7               | 11,6                | 157,3          | 149,6                  | 206,2                   | 537,6           |
| Elektrizität   | 0,6            | 20,6              | 3,1                 | 56,4           | 46,2                   | 130,4                   | 257,3           |
| Import         | 571,1          | 56,1              |                     |                |                        |                         | 627,2           |

Werden die fett gedruckten Felder von Tabelle 2.7 nicht in Geldeinheiten, sondern in Energieeinheiten angegeben, so spricht man von der energetischen Input/Output-Tabelle (BEUTEL und STRAHMER 1982; vgl. das Beispiel in Tabelle 2.8). Es handelt sich um die transponierte und (entsprechend der Gliederung der Volkswirtschaft in Wirtschaftssektoren) neu aufgeteilte Energiebilanz. Dividiert man die Geldflüsse aus der wirtschaftlichen Input/Output-Tabelle durch die jewei-

<sup>4</sup> Das sind der private und der öffentliche Konsum, die Investitionen einschließlich der Lagerbestands-Änderungen sowie der Export.

ligen Energieflüsse der energetischen Input/Output-Tabelle, so enthält man den durchschnittlichen Preis für die Energiebezüge der Sektoren bzw. des Endverbrauchs.

Die Input/Output-Tabelle ist Basis für die Entwicklung eines entsprechenden Input/Output-Modells. Entsprechend der Gliederung der Input/Output-Tabelle in  $N$  Sektoren kann der Output eines jeden Sektors  $X_i$  (entspricht der Bruttoproduktion des Sektors  $i=1, \dots, N$  in Geldeinheiten) durch die folgende Grundgleichung des Input/Output-Modells dargestellt werden:

$$X_i = \sum_{j=1}^N X_{ij} + F_i, \quad (i=1, \dots, N). \quad (2.12)$$

Hierbei steht  $X_{ij}$  für die Lieferungen des Sektors  $i$  an den Sektor  $j$  sowie  $F_i$  für die Endnachfrage nach Gütern bzw. Dienstleistungen des Sektors  $i$ .

Das Input/Output-Modell beruht in seiner linearen Variante auf der Annahme, dass zwischen den sektoralen Inputs  $X_{ij}$  und Outputs  $X_j$  zumindest auf kurze Sicht konstante, durch die verwendete Produktionstechnologie vorgegebene Verhältnisse bestehen, die sich darstellen lassen durch die Input-Koeffizienten

$$a_{i,j} := \frac{X_{ij}}{X_j} = \text{konst.}, \quad (i, j=1, \dots, N). \quad (2.13)$$

Bei der hier angenommenen Konstanz der Input-Koeffizienten spricht man auch von einer limitationalen Produktionsfunktion oder Leontief-Produktionsfunktion; mit diesen Begriffen wird eine Produktionsstruktur bezeichnet, bei der das Verhältnis der Faktoreinsatzmengen zu den Produktionsoutputs technisch vorgegeben ist. Die Produktionskoeffizienten  $a_{ij}$  sind der zahlenmäßige Ausdruck für die zum Erhebungszeitpunkt im Wirtschaftssektor  $j$  durchschnittlich angewendete Produktionstechnik. Substitutionsvorgänge zwischen den sektoralen Inputs, beispielsweise als Folge veränderter Input-Preise oder auf Grund veränderter Technologien, sind im Ansatz (2.13) explizit nicht vorgesehen. Möglichkeiten der Lockerung dieser sehr restriktiven Annahme werden am Ende dieses Unterkapitels angesprochen. Zunächst sei aber an der Annahme (2.13) festgehalten.

Unter Verwendung der Koeffizienten  $a_{ij}$  ist die Bruttoproduktion  $X_i$  des Sektors  $i$  gegeben durch

$$X_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot X_j + F_j, \quad (i=1, \dots, N). \quad (2.14)$$

Diese sektoralen Produktionsbeziehungen stellen ein lineares Gleichungssystem dar, das in Matrix-Schreibweise wie folgt aussieht:

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_N \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Dieses Gleichungssystem lässt sich nach den Bruttonproduktionswerten  $X_i$  auflösen (die entsprechende Matrix ist immer invertierbar) und ergibt als Lösung erneut ein lineares Gleichungssystem. Es lautet in Matrix-Schreibweise

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-a_{11} & -a_{12} & \dots & -a_{1N} \\ -a_{21} & 1-a_{22} & \dots & -a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_{N1} & -a_{N2} & \dots & 1-a_{NN} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_N \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

oder in elementarer Darstellung

$$X_i = \sum_{j=1}^N f_{ij} \cdot F_j, \quad (i=1, \dots, N). \quad (2.17)$$

Die Koeffizienten  $f_{ij}$  heißen Leontief-Multiplikatoren und bringen zum Ausdruck, um wie viele Einheiten die Bruttonproduktion eines Wirtschaftssektors  $i$  zusätzlich ausgeweitet werden muss, wenn eine weitere Einheit der Endnachfrage nach Gütern des Sektors  $j$  befriedigt werden soll.

**Tabelle 2.9.** Leontief-Koeffizienten zur Input/Output-Tabelle 2.7

|                | Öl, Gas | Elektrizität | Landwirtschaft | Industrie | Dienstleistungen |
|----------------|---------|--------------|----------------|-----------|------------------|
| Öl, Gas        | 1,007   | 0,015        | 0,019          | 0,021     | 0,026            |
| Elektrizität   | 0,001   | 1,041        | 0,010          | 0,009     | 0,014            |
| Landwirtschaft | 0,000   | 0,008        | 1,075          | 0,074     | 0,018            |
| Industrie, Bau | 0,002   | 0,133        | 0,332          | 1,304     | 0,190            |
| Dienstleistung | 0,006   | 0,155        | 0,189          | 0,156     | 1,236            |
| Summe          | 1,016   | 1,352        | 1,625          | 1,564     | 1,484            |

Die *Leontief*-Multiplikatoren der Input/Output-Tabelle 2.7 sind in Tabelle 2.9 angegeben. Die Spaltensummen dieser Tabelle geben an, wie stark der inländische Bruttonproduktionswert insgesamt (über alle Sektoren addiert) ansteigen muss, wenn die sektorale Endnachfrage um eine Einheit steigt. Steigt beispielsweise die Endnachfrage nach Elektrizität um eine Geldeinheit, so muss die gesamtwirtschaftliche Bruttonproduktion – bei den gegebenen Technologien und Kostenstrukturen – um insgesamt 1,352 Geldeinheiten und die Elektrizitätsproduktion selbst

um 1,041 Geldeinheiten ausgeweitet werden (vgl. die beiden fett gedruckten Felder der mit *Importe* bezeichneten Zeile in Tabelle 2.9).

Damit liegen die Voraussetzungen vor, um mit Hilfe der Input/Output-Tabelle den Energiegehalt von Waren und Dienstleistungen in Energieeinheiten zu berechnen. Zunächst berechnet man aus der energetischen Input/Output-Tabelle die direkten Energiekoeffizienten  $e_{ij}$  für alle  $M$  Energiesektoren:

$$e_{ij} = \frac{\text{Energiefieferungen von } i \text{ nach } j}{\text{Bruttoproduktion von Sektor } j}, \quad (i=1, \dots, M; \quad j=1, \dots, N). \quad (2.18)$$

Die über die  $M$  Energiesektoren summierten Koeffizienten

$$e_i = \sum_{k=1}^M e_{ik}, \quad (i=1, \dots, N) \quad (2.19)$$

geben an, wie viel Energie (in Energieeinheiten) der Sektor  $j$  je Bruttoproduktionswert (in Geldeinheiten) direkt bezogen hat.

Hinzuzurechnen sind die indirekten Energielieferungen, die dem Sektor  $j$  durch die Lieferungen der anderen Wirtschaftssektoren (also über die Vorleistungen) zufließen. Dies geschieht durch Rückgriff auf die *Leontief*-Multiplikatoren. Mit ihrer Hilfe lässt sich der direkte und indirekte Endenergiegehalt  $\hat{e}_{ij}$  der Güter und Dienstleistungen von Sektor  $j$  berechnen:

$$\hat{e}_{ij} = \sum_{k=1}^N e_{ik} \cdot f_{kj}, \quad (i=1, \dots, M; \quad j=1, \dots, N). \quad (2.20)$$

Die Summe über alle  $M$  Energiesektoren

$$\hat{e}_j = \sum_{i=1}^M \hat{e}_{ij}, \quad (j=1, \dots, N) \quad (2.21)$$

liefert einen Wert für die direkten und indirekten Energiebezüge des Sektors  $j$  bezogen auf seinen Bruttoproduktionswert.

Hier fehlen noch die in den Nicht-Energieimporten enthaltene Energie (graue Energie) sowie die durch den Kapitalverzehr indirekt in Anspruch genommene Energie. Beides lässt sich erneut durch Rückgriff auf Zahlenangaben aus der Input/Output-Tabelle ergänzen. Für die graue Energie wird die Zeile *Importe* (in Geldeinheiten) aus Tabelle 2.7 herangezogen. Diese Zeile gibt an, wie viele gleichartige Güter jeder Sektor aus dem Ausland bezogen hat. Um den darin enthaltenen Energieanteil zu quantifizieren, ist der kumulierte Energieinhalt der Importgüter aus den Input/Output-Tabellen der jeweiligen Exportländer zu berechnen. In der Praxis beschränkt man sich dabei auf die wichtigsten Herkunftsländer.

Die im Kapitalverzehr enthaltene Energie kann unter Rückgriff auf die Zeile *Abschreibungen* aus Tabelle 2.7 abgeschätzt werden. Bei diesem Vorgehen wird unterstellt, dass die bei der Herstellung der Investitionsgüter seinerzeit direkt und indirekt benötigten Energiemengen erst mit den Abschreibungen in Anspruch ge-

nommen werden. Methodisch korrekt müsste der in den Investitionsgütern gebundene direkte und indirekte Energieaufwand aus den inländischen Input/Output-Tabellen früherer Jahre berechnet werden.

Bei aller formalen Eleganz des Input/Output-Modells bleibt als wesentlicher Mangel die Annahme limitationaler Produktionsfunktionen entsprechend Gleichung (2.13). Zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands ist dieser Einwand noch belanglos, denn in diesem Fall reicht die statische Betrachtung der gegebenen Produktionsstruktur aus. Doch für andere energiewirtschaftliche Anwendungen der Input/Output-Tabelle müssen die Input-Koeffizienten dynamisiert werden, wobei darauf zu achten ist, dass die sektoralen Konsistenzbedingungen – Summe der sektoralen Inputs gleich Summe der sektoralen Outputs – erhalten bleiben. Dabei werden zwei prinzipiell verschiedene Konzepte verfolgt:

- Die Input-Koeffizienten können gezielt entsprechend der sich im Zeitverlauf veränderten sektoralen Produktionsverfahren angepasst werden. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn die volkswirtschaftlichen Auswirkungen eines Ersatzes von Kernkraftwerken durch Erdgaskraftwerke analysiert werden sollen. Dazu definiert man je eine Kostenstruktur für Kernkraftwerke und Erdgaskraftwerke als Spaltenvektor der Input/Output-Tabelle und simuliert die Kostenstruktur des Elektrizitätssektors entsprechend dem exogen vorgegebenen Stromerzeugungsanteil.
- Die Input-Koeffizienten können durch ökonomische Modellansätze flexibilisiert werden, wobei als mögliche Einflussgrößen insbesondere die Veränderungen der sektoralen Preise in Betracht kommen. Diese hängen insbesondere ab von der sektoralen Lohn- und Produktivitätsentwicklung sowie von Veränderungen bei den indirekten Steuern und den sektoralen Importpreisen. Die erste empirische Studie in diese Richtung war das im Jahr 1974 erstmals publizierte Hudson-Jorgenson-Modell für die USA (HUDSON und JORGENSEN 1974). Spätere Arbeiten sind unter dem Begriff *berechenbares Gleichgewichtsmodell* bekannt geworden (vgl. SHOVEN und WHALLEY 1992, BÖHRINGER 1995).

Unabhängig vom konkreten Vorgehen benötigt die Dynamisierung von Input/Output-Modellen erhebliche Mengen an volkswirtschaftlichen Daten, die in der nötigen zeitlichen und sektoralen Tiefe nicht verfügbar oder von nur geringer Erhebungsqualität sind. Dies beeinträchtigt den praktischen Wert entsprechender Publikationen.

## Literatur

- BEUTEL, J., STRAHMER, C. (1982): Input-Output-Analyse der Energieströme, *Allgemeines Statistisches Archiv* 3, 209–239
- BÖHRINGER, Ch. (1995): *Allgemeine Gleichgewichtsmodelle als Instrument der energie- und umweltpolitischen Analyse*. Stuttgart: Peter Lang

- BP (2005): *BP Statistical Review of World Energy*. London: The British Petroleum Company ([www.bp.com/statisticalreview](http://www.bp.com/statisticalreview))
- DARMSTADTER, J., TEITELBAUM, P., POLACH, J. (1971): *Energy in the World Economy. Resources for the Future*. Baltimore: Johns Hopkins University Press
- FRISCHKNECHT, P., HOFSTETTER, P., KNOEPFEL, I. (1994): *Ökoinventare für Energiesysteme*. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule
- FRITSCHKE, U. *et al.* (1999): *Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme* Version 3.08, Öko-Institut, Darmstadt
- HAKEN, H. (1988): *Information and Self Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- HUDSON, E.A., JORGENSEN, D.W. (1974): U.S. Energy Policy and Economic Growth 1975–2000. *The Bell Journal of Economics* 5, 461–514
- IEA (2006): *Energy Balances of OECD Countries*. Paris: International Energy Agency
- LEONTIEF, W. (1970): Environmental Repercussions and the Economic Structure. An Input/Output-Approach. *The Review of Economics and Statistics* 52, 262–271
- NICOLIS, G., PRIGOGINE, I. (1977): *Self Organization in Non-Equilibrium Systems*. New York: Wiley
- NICOLIS, G., PRIGOGINE, I. (1987): *Die Erforschung des Komplexen*. München: Piper
- SPRENG, D. (1988): *Net Energy Analysis and the Energy Requirements of Energy Systems*. New York: Präger
- Statistisches Bundesamt (2004): *Input-Output-Rechnung 2000*. Fachserie 18, Reihe 2: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Wiesbaden.