

Kapitel 1

Energieeffizienz – Definitionen, Indikatoren, Wirkungen

Martin Pehnt

Hinter den Begriffen „Energieeffizienz“ und „Energieeinsparen“ verbergen sich äußerst verschiedene Maßnahmen und Aktionsfelder. Sie betreffen unterschiedliche Bereiche: den Strom- und Wärmemarkt, den Verkehrssektor, die industrielle Produktion. Sie erfordern die Einbeziehung unterschiedlicher Kompetenzbereiche: physikalisch-technisches Wissen, angepasste Verhaltensweisen und innovative politische Instrumente. Sie verlangen in manchen Bereichen Erweiterungen – den Aufbau einer Infrastruktur beispielsweise –, in anderen Bereichen Einschränkungen, z. B. durch suffiziente Verhaltensweisen und Verzicht auf Bedürfnisse. Kurz: Energieeffizienz ist „heterogen und ubiquitär“ (Seefeldt 2007).

Dieses Kapitel versucht eine Klärung des Begriffs „Energieeffizienz“ und anderer, für das Verständnis der Energieeffizienz entscheidender Begriffe. Es ordnet Energieeffizienz in die Nachhaltigkeitsdebatte ein und beschreibt, wie sie sich messen lässt.

1.1 Energieeffizienz: eine Begriffsbestimmung

1.1.1 Effizienz und Effektivität

„Efficere“ bedeutet zu Stande kommen, bewirken, durchsetzen, eine Tat ausführen, fertig bringen oder hervor bringen. Die Übersetzung des lateinischen Verbs macht deutlich: Bei „Effizienz“ geht es zum einen um den Prozess des „Zustandekommens“ an sich, um eine erzielte Wirkung. Doch Effizienz erfordert neben der Wirkung auch ein angemessenes Verhältnis zwischen eingesetzten Mitteln und Wirkung.

In der Wirtschaftslehre wird davon ausgegangen, dass zur Erreichung eines bestimmten Nutzens – beispielsweise erwünschte Eigenschaften, Dienstleistungen oder Produkte – der Einsatz von unnützen Mitteln minimiert wird. Dies ist im

M. Pehnt (✉)

Institut für Energie- und Umweltforschung, 69120 Heidelberg, Deutschland
e-mail: martin.pehnt@ifeu.de

sogenannten „ökonomischen Prinzip“ zu Grunde gelegt. Das ökonomische Prinzip geht von der Annahme aus, dass, so die gängige Definition, Wirtschaftssubjekte aufgrund der Knappheit der Güter eingesetzte Mittel und Ergebnis in Verhältnis setzen und entsprechend ihren persönlichen Präferenzen (Nutzenmaximierung, Gewinnmaximierung oder Umsatzsteigerung) vernünftig handeln. Wenn der Mitteleinsatz (Input) vorgegeben ist, wird man nach dem ökonomischen Prinzip einen maximalen Output anstreben (das sogenannte „Maximumprinzip“). Falls das Ergebnis (Output) festgelegt ist, wird der Mitteleinsatz minimiert („Minimumprinzip“).

Effizienz ist von *Effektivität* abzugrenzen: Während Effektivität allgemein das Verhältnis von erreichtem zu definiertem Ziel unter Einsatz aller Mittel bezeichnet, ist für die Effizienz ein möglichst geringer Mitteleinsatz relevant. Effektivität beschreibt die Wirksamkeit, Effizienz die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit. Im Alltagssprachgebrauch wird dies häufig auch so formuliert: „Effektiv ist es, die richtigen Dinge zu tun; effizient ist es, die richtigen Dinge richtig zu tun.“

Effizienz als Maß für einen optimalen Mitteleinsatz setzt somit Effektivität als Maß für die Zielerreichung voraus und geht über diese hinaus. Effizienz beschreibt damit in der Regel das Verhältnis zwischen einem wie auch immer definierten Input und einer Outputgröße.

Dieses allgemeine Verständnis lässt sich auf das energiewirtschaftliche Verständnis von Effizienz übertragen. Wir setzen heute Energieträger ein, um bestimmte *Dienstleistungen* zu erfüllen. Beispiele für Dienstleistungen sind eine Lagerung von Speisen bei kalten Temperaturen, die Bereitstellung eines behaglichen Wohnraums, Lichtverhältnisse, in denen wir komfortabel arbeiten können, oder die Übertragung von Nachrichten (Tabelle 1.1).

Diese Dienstleistungen sind oftmals deshalb notwendig, weil wir einen Nicht-Gleichgewichtszustand aufrecht erhalten wollen, beispielsweise eine warme Wohnung mit erhöhter Innentemperatur gegenüber einer kalten Umgebung, eine kühlere und entfeuchtete Luft in einer klimatisierten Wohnung gegenüber einer heißen, schwülen Umgebung oder den Transport mit einer nicht-reibungsfreien Bewegung (Feist 2002).

Anstatt nun ein dynamisches Fließgleichgewicht zu schaffen, also unter Aufwand von Energie *aktiv* einem Gleichgewichtsbestreben entgegenzuwirken, beispielsweise durch Verbrennung von Heizöl, kann die Dienstleistung – der warme Raum – aufrecht erhalten werden, indem Barrieren errichtet werden, die das Erreichen des Gleichgewichtszustands *passiv* erschweren; beispielsweise durch konsequente Wärmedämmung.

Energieeffizienz bedeutet also, den Energieeinsatz in ein System zur Erbringung der Dienstleistung zu reduzieren. Dieses System kann ein Energiewandler sein, beispielsweise ein Fahrzeug oder ein Heizkessel, aber auch ein Gebäude, eine Firma oder eine gesamte Ökonomie.

Dieses Verständnis von Energieeffizienz entspricht auch der Auffassung der Europäischen Union in der sogenannten Energiedienstleistungsrichtlinie:

Energieeffizienz ist das Verhältnis von Ertrag an Leistung, Dienstleistungen, Waren oder Energie zu Energieeinsatz. (EU 2006)

Tabelle 1.1 Energiedienstleistungen (Beispiele) und ihre Quantifizierung (Feist 2002)

Energiedienstleistungen (Beispiele)	Beschreibung	Quantifizierung
Heizen	Bereitstellung thermisch komfortabler Wohnräume in den kälteren Jahreszeiten	Wohnfläche * Zeitintegral der Temperaturdifferenz
Kühlen	Bereitstellung thermisch komfortabler Wohnräume in den wärmeren Jahreszeiten	Wohnfläche * Zeitintegral der Temperaturdifferenz
warmes Trinkwasser	warmes Wasser zum Duschen, Baden, Waschen, ...	Wassermenge * Temperaturdifferenz
Wäschewaschen	saubere, hygienisch einwandfreie Wäsche	Masse der Wäsche, evtl. mit Verschmutzungsgrad
Wäschetrocknen	schrantrockene Wäsche	Masse der Wäsche, evtl. mit Restfeuchte
Geschirrspülen	Reinigung des Ess- und Kochgeschirrs mit wenig manuellem Aufwand; hygienisch einwandfreies Geschirr	Zahl der Maßgedecke, evtl. mit Verschmutzungsgrad
Beleuchtung	Komfortable Lichtverhältnisse	Wohnfläche * Zeitintegral der Beleuchtungsstärke
Kommunikation	Übertragung von Nachrichten	Byte/s

1.1.2 Ebenen der Energieeffizienz

In der Diskussion um Energieeffizienz können drei Ebenen unterschieden werden:

- Auf der *gesamtwirtschaftlichen Ebene* wird Energieeffizienz entweder mit der *Energieintensität* oder mit dem Kehrwert, der *Energieproduktivität*, gemessen. Die Energieintensität kann z. B. in Primärenergieverbrauch je Einheit Bruttoinlandsprodukt oder Primärenergieverbrauch je Einwohner/-in angegeben werden, auf der sektoralen Ebene auch in Primärenergieverbrauch je Einheit wirtschaftlicher Produktion (siehe Abschn. 1.5.3). Sie gibt an, wie viel Energie eingesetzt werden muss, um ein gewisses Ergebnis (z. B. die Bereitstellung einer gewissen Wirtschaftleistung) zu produzieren.
- In der *Energieumwandlung* wird unter Energie- bzw. Umwandlungseffizienz in der Regel der *Wirkungs-* bzw. *Nutzungsgrad* der Umwandlung verstanden, also z. B. das Verhältnis von erzeugter Endenergie oder Nutzenergie zu eingesetzten Energierohstoffen (z. B. Wirkungsgrad eines Kraftwerks, eines Heizungssystems oder einer Raffinerie; siehe Abschn. 1.4.5).
- Auf der *Energienachfrageseite* wird unter Energie- bzw. Endenergieeffizienz das Verhältnis interpretiert, wie viel Energie für die Befriedigung energierelevanter Bedürfnisse, d. h. letztlich für ein bestimmtes Maß an Energie- oder Mobilitätsdienstleistungen benötigt wird (Irrek und Thomas 2005). Eine Steigerung der Endenergieeffizienz bedeutet demnach, *weniger* Energie für dasselbe Maß an Dienstleistung einzusetzen. Die Steigerung kann durch technische,

organisatorisch-institutionelle bzw. Struktur verändernde oder auch verhaltensbezogene Maßnahmen erreicht werden.

Die Steigerung der Energieeffizienz beruht in der Regel auf einem *Substitutionsprozess* (Erdmann und Zweifel 2007). Im Fall verbesserter Kraftwerkstechnik oder Gebäudedämmung wird Energie durch den Produktionsfaktor Kapital ersetzt: es wird investiert, um weniger Energie einsetzen zu müssen. Bei besserem Energiemanagement findet eine Substitution von Energie durch Humankapital statt: es wird geplant, kontrolliert und koordiniert, um den Energieeinsatz zu reduzieren.

Vielfach werden die Begriffe *Energieeffizienz* und *Energiesparen* synonym benutzt. Genaugenommen ist die Erhöhung der Energieeffizienz eine Teilmenge des Energiesparens (Abb. 1.1). Energiesparen beinhaltet zusätzlich auch den teilweisen oder vollständigen Verzicht auf die Inanspruchnahme von Energie- oder Mobilitätsdienstleistungen z. B. durch Genügsamkeit bzw. eine Substitution der Befriedigung von energierelevanten Bedürfnissen durch andere, weniger energieintensive Bedürfnisse (Irrek und Thomas 2007). Beispiele sind die Reduktion der Innentemperatur unter einen üblicherweise als angenehm empfundenen Wert oder der Ersatz einer sonst täglichen Ausflugsfahrt mit dem Auto durch einen Spaziergang in der näheren Umgebung.

1.1.3 Einflussgrößen des Energieverbrauchs

Die Energienachfrage wird auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette beeinflusst. Analysiert man den Energiebereitstellungspfad rückwärts, so ist als erstes die Nachfrage nach Endenergie unter die Lupe zu nehmen. Diese ist geprägt von

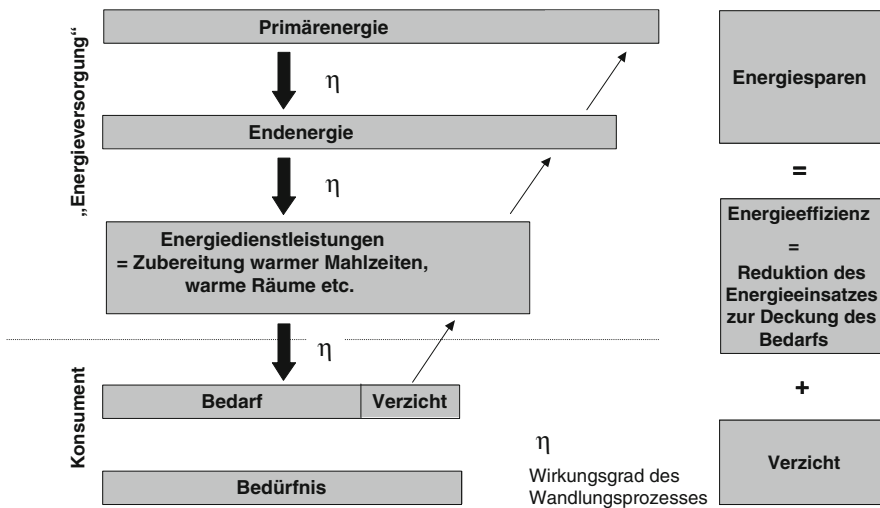


Abb. 1.1 Energiesparen und Energieeffizienz

verschiedenen Einflussgrößen (siehe auch Erdmann und Zweifel 2007; Prognos 2007):

- *Wirtschaftliche und gesellschaftliche Rahmengrößen.* Entscheidend für den Energiebedarf einer Gesellschaft sind zunächst deren strukturelle Rahmengrößen, insbesondere die Bevölkerung und die Wirtschaftsentwicklung.
- *Aktivitäten und Bedürfnisse.* Daraus abgeleitet werden können die Aktivitäten, die sich in der Gesellschaft ausprägen, und die oft in Form von Kennwerten angegeben werden: Wie viel Wohnfläche wird in Anspruch genommen, wie viel Fahrleistung erbracht oder wie viel Fernsehen geschaut?
- *Qualitäten.* Die nächste Frage ist, welche Qualitäten an Produkten oder Dienstleistungen angefordert werden: Wird das Haus auf 22 oder 20°C geheizt, ist der Fernseher groß oder klein, wird Pkw oder Bahn gefahren?
- *Technologien.* Welchen technologischen Standard haben die Produkte oder Prozesse, die diese Aktivitäten oder Bedürfnisse in der gewünschten Qualität abdecken? Ist das Haus auf Passivhausstandard oder nicht, hat der Fernseher einen niedrigen Stand-by-Verbrauch, ist das Fahrzeug sparsam. Letztendlich wird hier also das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen charakterisiert.
- *Umwandlung.* Schließlich ist die Frage entscheidend, mit wie vielen Verlusten der Prozess der Bereitstellung des Endenergieträgers (siehe Abschn.1.4.2) behaftet ist. Dies ist eine Frage der Effizienz des „Umwandlungssektors“.

Alle diese Faktoren werden wiederum durch äußere Rahmenbedingungen bestimmt: der Klimawandel beispielsweise senkt den Energiebedarf für die Heizung, und Energiepreisssteigerungen wirken sich auf das Aktivitätsprofil aus und können einen längerfristigen Wertewandel induzieren.

1.1.4 Der Rebound-Effekt

Werden Maßnahmen zur Senkung des Energieeinsatzes ergriffen, so kommt es dennoch zu Effekten, die dieser Senkung entgegenwirken. Diese Effekte nennt man „Rebound-Effekte“. Erstmalig wurde der Rebound-Effekt 1865 von William Stanley Jevons formuliert. Er stellte fest, dass durch die Einführung der Wattschen Dampfmaschine, die dreimal effizienter als die Vorgängermaschine war, der britische Kohleverbrauch deutlich anstieg. Die kohlebefeuerte Dampfmaschine war durch die Effizienzsteigerung wettbewerbsfähiger zu betreiben, weshalb insgesamt mehr als dreimal so viele neue Maschinen eingesetzt wurden (Jevons 1866).

Verschiedene Wirkungsmechanismen sind für einen Rebound-Effekt verantwortlich.

- *Direkter Rebound:* Unmittelbar ist der Rebound-Effekt wirksam dadurch, dass eine effizienter angebotene Dienstleistung stärker nachgefragt wird; beispielsweise, weil sie billiger wird. Das heißt, dass die Effizienzgewinne eines Produktes durch dessen vermehrte Nutzung geschmälert werden.

- *Indirekt* wirkt ein Rebound, weil eine Energiekosteneinsparung, die sich auf Grund von Effizienzmaßnahmen ergibt, eine erhöhte Nachfrage nach Gütern in anderen Bereichen bewirken kann. Wer beispielsweise Heizkosten einspart, hat mehr Geld für zusätzliche Autofahrten oder Konsumgüter (*Budget-Effekt*).
- *Energiepreiseffekt*: Außerdem steigt das Angebot an Energieträgern durch Effizienz. Das steigende Angebot senkt den Preis des Energieträgers, die Nachfrage steigt.¹
- *Ansprüche*: Vielfach ergibt sich auch eine Erhöhung der Komfortansprüche und sozialen Normen. Während in einem schlecht gedämmten Haus niedrige Innentemperaturen im Winter hingenommen werden müssen, steigt in einem sanierten Gebäude der Anspruch an eine als angemessen empfundene Temperatur.
- *Struktureffekt*: Technische Effizienzsteigerungen können auch dazu führen, dass Strukturen geschaffen werden, die wiederum den Energieverbrauch antreiben. Effiziente Fahrzeuge haben beispielsweise erst eine Raumplanung ermöglicht, die auf Schlafstädte, ein „Leben auf dem Land“, Einkaufscenter auf der grünen Wiese etc. setzt. Bei höheren Kraftstoffkosten würden sich funktionsdurchmischte, kleinräumig strukturierte Räumuster durchsetzen.
- *Ökobilanzieller Rebound* (sog. „graue Energie“): Die Herstellung von Geräten und Maßnahmen der Energieeffizienz (beispielsweise wärmedämmende Materialien) verursacht seinerseits einen Energieverbrauch. Dieser liegt zwar in der Regel eine Größenordnung unterhalb des im Lebenszyklus eingesparten Brennstoffbedarfs, kann aber nicht ganz vernachlässigt werden.
- Im extremen Fall eines durch Effizienz erhöhten Energiebedarfs spricht man von *Backfire*.

Rebound-Effekte gibt es nicht nur in der Energiewirtschaft. Beispielsweise wurde in der Verkehrswissenschaft ein vergleichsweise konstantes persönliches Zeitbudget für Mobilität festgestellt. Erhöhte Geschwindigkeiten führen daher lediglich zu größeren Reisedistanzen, nicht zu eingesparter Zeit (Zeit-Rebound). Auch in anderen Bereichen treten ähnliche Rebounds auf, z. B. in der Computertechnik (Speicher-Rebound; Taktfrequenz-Rebound) und in der Verkehrs- und Arbeitssicherheit (riskanteres Verhalten bei größeren Sicherheitsstandards; Risiko-Rebound).

Die Höhe des Rebound-Effektes lässt sich experimentell schwer bestimmen. Verschiedene Studien kommen zu dem Schluss, dass die Energieeinsparung durch Effizienzmaßnahmen zwischen 0 und 30% durch den Rebound-Effekt gemildert wird (Madlener und Alcott 2007). In vielen Fällen werden Rebound-Effekte in einer Größenordnung von 10% ermittelt (UKERC 2008). In der Regel sind Rebound-Effekte dann höher, wenn der Ausgangszustand vor Durchführung der Effizienzmaßnahme

¹Bei mangelhafter Ausgestaltung des Emissionshandels tritt der gleiche Effekt auf (durch die Effizienzmaßnahmen steigt das Angebot an Emissionshandelszertifikaten, dadurch sinken deren Kosten). Daher müssen Effizienzmaßnahmen bei der Bestimmung der zugeteilten Obergrenzen für CO₂-Mengen berücksichtigt werden.

besonders schlecht ist, wenn das Dienstleistungsniveau weiter vom Sättigungszustand entfernt ist und wenn die eingesparten Energiekosten einen spürbaren Anteil an den Gesamtkosten haben (Schriebl 2008).

1.2 Energieeffizienz als gesellschaftliche Notwendigkeit

Unabhängig von der Debatte über mögliche Rebound-Effekte ist die Steigerung der Energieeffizienz eine volkswirtschaftliche und gesellschaftliche Notwendigkeit. Energieeffizienz bedeutet vielfach einen Wettbewerbsvorteil, da Kosten reduziert werden können. Doch über diese unmittelbare Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen hinaus kann Energieeffizienz zu zahlreichen weiteren gesellschaftlichen Vorteilen führen, die Gegenstand dieses Kapitels sind.

1.2.1 Energieeffizienz, Versorgungssicherheit und Energiekosten

Versorgungssicherheit umfasst sowohl eine physische (Verfügbarkeit von Ressourcen) als auch eine ökonomische Versorgungssicherheit (Schutz vor Preisschwankungen) (SRU 2008). Zu beiden Dimensionen der Versorgungssicherheit leistet Energieeffizienz durch die Senkung des Energierohstoffbedarfs einen Beitrag. Hierzu gehört zunächst der Bereich der *Importabhängigkeit*: In Deutschland liegt der Anteil importierter Energieträger insgesamt bei über siebenzig Prozent (Abb. 1.2). Während die Importabhängigkeit bei Uranerz bei 100% liegt, werden Naturgase zu über 80%, Mineralöl zu 96% und Steinkohle zu über 60% aus dem Ausland eingeführt (BMWi 2008). Dieser Trend wird sich fortsetzen. Durch sinkende in-neuropäische Vorräte und einen steigenden Bedarf wird in der europäischen Union die Importabhängigkeit im Trend von 41% auf knapp 70% im Jahr 2030 steigen (Adelphi 2007). Energieeffizienz kann diese Importabhängigkeit verringern.

Insbesondere der wachsende Energiebedarf der asiatischen Länder wie Indien und China verschärft die Verknappung der fossilen Energieträger erheblich. Einer größer werdenden Gruppe an Gas- und Ölkonsumenten steht eine schrumpfende

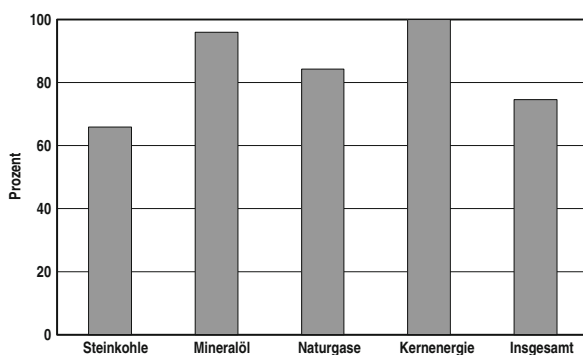


Abb. 1.2 Heutige Importabhängigkeit bei verschiedenen Energieträgern (BMWi 2008)

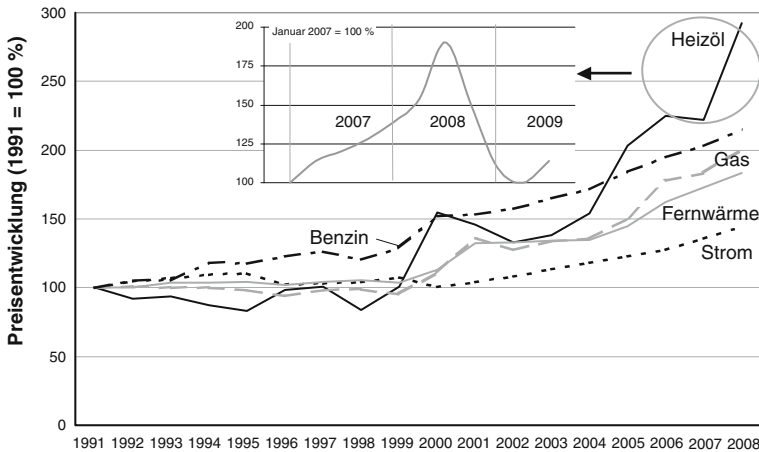


Abb. 1.3 Energiepreisentwicklung für Endkunden (BMWi 2009)

Zahl bedeutsamer Lieferanten gegenüber, was das Problem der Importabhängigkeit verstärkt.

Zugleich bedeutet Energieeffizienz eine Absicherung vor volatilen Energiepreisen. Die Energiepreise schwankten in den letzten Jahren stark. Verantwortlich hierfür waren kurzfristige Nachfrageschwankungen und ein durch die Wirtschaftskrise dauerhaft rückgängiger Energiebedarf, aber auch Spekulationen, Angebotsengpässen und andere Gründe. Zugleich zeigt der langfristige Trend für fossile Rohstoffe deutlich nach oben (Abb. 1.3). Durch Effizienzmaßnahmen können nicht nur hohe Energiepreise, sondern auch ein hohes Kostenrisiko gedämpft werden.

1.2.2 Energieeffizienz, Klima- und Umweltschutz

Es ist nicht nur die Begrenztheit der fossilen Ressourcen, die ein Umdenken bezüglich des Umgangs mit Energie erzwingt. Auch die vielfach erschöpfte Aufnahmefähigkeit unserer Umwelt für die Abfallprodukte der Energienutzung macht ein Umlenken notwendig. Dies gilt insbesondere für jene Abfälle, die in die Atmosphäre entlassen werden. Bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entstehen Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid und Stickoxide, die zur Bildung des sauren Regens beitragen. Findet die Verbrennung nicht vollständig statt, werden Kohlenmonoxide, unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Rußpartikel emittiert; bei festen Brennstoffen können darüber hinaus erhebliche Mengen an Staub auftreten. Diese Emissionen und noch eine Vielzahl anderer schädigen nicht nur die Umwelt, sondern sind für den Menschen auch direkt gesundheitsschädigend.

Neben diesen klassischen Luftschadstoffen wird bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern immer auch Kohlendioxid freigesetzt. Dieses Gas

ist zwar für Organismen nicht giftig, es verstärkt aber den Treibhauseffekt und führt damit zu einer Erhöhung der globalen Temperaturen. Seit Beginn der Industrialisierung ist die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre um ein Viertel angestiegen und hat eine Erhöhung der mittleren bodennahen Lufttemperatur von $0,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$ bewirkt. Werden keine deutlichen Gegenmaßnahmen zur Reduktion dieser und anderer klimarelevanter Emissionen ergriffen, so wird nach Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mit einem weiteren Anstieg der mittleren globalen bodennahen Lufttemperatur zwischen $1,1$ und $6,4^\circ\text{C}$ bis zum Jahr 2100 gerechnet, wobei regional die Änderungen durchaus unterschiedlich stark ausfallen können. Neben der Temperaturerhöhung sind in deutlich stärkerem Maße als bisher Änderungen der Niederschlagsverteilung, ein Anstieg extremer Wettersituationen wie Stürme und Starkregen, eine Verschiebung von Klima- und Vegetationszonen und die Verschlechterung der Böden mit fatalen Folgen für die ohnehin angespannte Welternährungssituation zu erwarten. Klimaänderungen haben in der Erdgeschichte häufig stattgefunden; bedrohlich an den heute zu beobachtenden Veränderungen ist, dass die Änderungen mit hoher Geschwindigkeit auftreten und weder den menschlichen Zivilisationen noch der Umwelt einen ausreichenden Zeitraum zur Anpassung lassen.

Energiebedingte CO_2 -Emissionen tragen wesentlich zum menschlich verursachten Treibhauseffekt bei. Im Jahr 2007 lagen sie bei rund 30 Milliarden Tonnen. Der Anstieg dieser energiebedingten globalen Kohlendioxidemissionen in Folge des wachsenden Weltenergieverbrauchs hat dazu geführt, dass seit Beginn der Industrialisierung insgesamt zusätzliche 1 000 Milliarden Tonnen CO_2 in die Atmosphäre emittiert wurden, davon allein 80% in den letzten 50 Jahren.

Da das Wachstum vornehmlich in den Industrieländern stattfand, sind diese für rund 90% der bis heute durch den Energieeinsatz entstandenen CO_2 -Emissionen verantwortlich (Abb. 1.4). Deutschland hat 2008 839 Millionen Tonnen

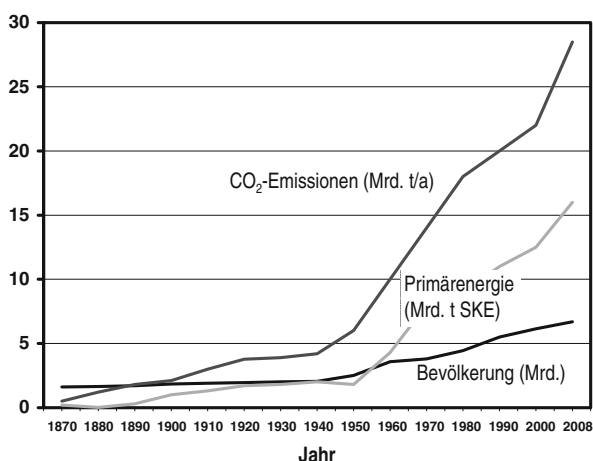


Abb. 1.4 Entwicklung der Bevölkerung, des Energiebedarfs und der CO_2 -Emissionen (IEA 2008)

Kohlendioxid emittiert, das sind rund 3% der weltweiten Emissionen. Jeder Bewohner Deutschlands ist damit für den Ausstoß von über 10 Tonnen Kohlendioxid pro Jahr verantwortlich. Ein US-Amerikaner verursacht pro Jahr 20 Tonnen, ein Chinese 4,6 Tonnen und ein Inder eine Tonne. Die große Verantwortung der Industrieländer für den Treibhauseffekt wird hierdurch besonders deutlich. Allerdings steigen gerade in den Schwellenländern Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen rasant.

Um eine Erwärmung von mehr als 2 Grad zu vermeiden, sollte die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre von derzeit 360 tausendstel Prozent (auch „parts per million“, ppm) bis zum Ende dieses Jahrhunderts höchstens auf 450 ppm steigen. Will man dies erreichen, so ist eine weltweite Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen um mehr als die Hälfte bis zum Jahr 2100 unerlässlich.

Berücksichtigt man die weiter wachsende Bevölkerung, so darf jeder der dann voraussichtlich zehn Milliarden Erdenbürger durchschnittlich nur noch wenig mehr als eine Tonne CO₂ emittieren – etwa so viel wie ein Inder heute. Daraus abgeleitet ergibt sich für Deutschland das längerfristige Ziel, eine Senkung der nationalen CO₂-Emissionen auf höchstens ein Fünftel der Emissionen des Jahres 1990 zu erreichen.

Dieses Ziel ist ohne Energieeffizienz keinesfalls zu erreichen. Das zeigen verschiedene Szenarien sowohl für Deutschland als auch weltweit. Beispielsweise geht die Internationale Energieagentur in ihrem World Energy Outlook davon aus, dass die Steigerung der Endenergieeffizienz einen ähnlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten wird wie erneuerbare Energien und andere Klimaschutzmaßnahmen zusammengenommen (Abb. 1.5).

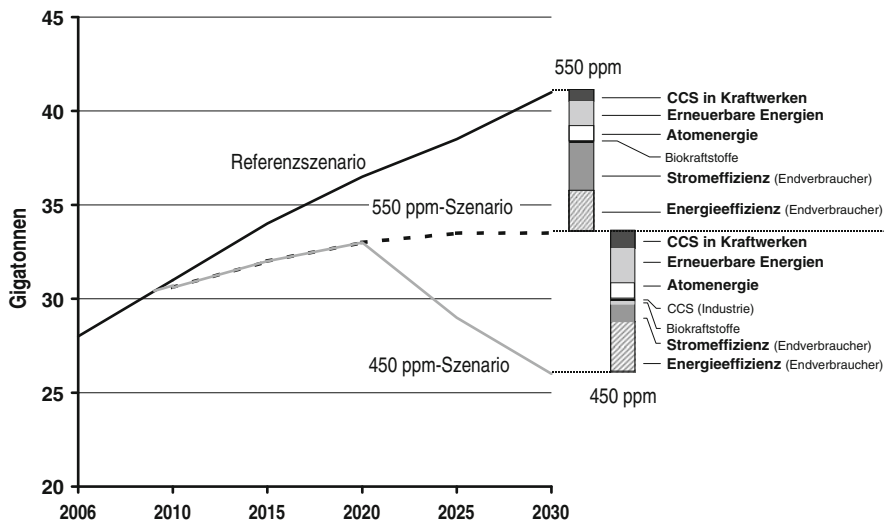


Abb. 1.5 CO₂-Emissionen in den Klimaschutzenszenarien der IEA (IFEU nach IEA 2008)

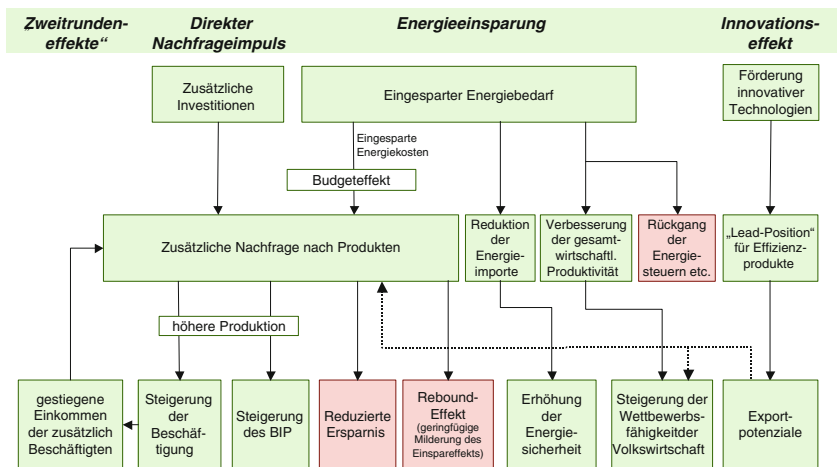


Abb. 1.6 Volkswirtschaftliche Effekte der Energieeffizienz (eigene Darstellung)

1.2.3 Weitere volkswirtschaftliche Vorteile der Energieeffizienz

Neben diesen Effekten gibt es weitere volkswirtschaftliche Folgen der Energieeffizienz, die mit den direkten Nachfrageimpulsen, dem eingesparten Energiebedarf, aber auch der frühzeitigen Entwicklung von Effizienztechnologien und dem dadurch bedingten Wettbewerbsvorsprung bei der Vermarktung der Technologien zu tun haben (Abb. 1.6).

1.2.3.1 Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen

Energieeffizienz ist in zweifacher Hinsicht von unternehmerischer Bedeutung: Sie kann dazu beitragen, dass durch die Senkung der unternehmerischen Energiekosten die Wettbewerbsfähigkeit der Produkte gesteigert werden kann. Zugleich stellt Energieeffizienz aber auch ein bedeutendes Absatzsegment für innovative Produkte dar.

Diese Märkte sind von besonderer Bedeutung auch und gerade, weil es sich bei Energieeffizienzprodukten – ähnlich wie bei Erneuerbare-Energie-Anlagen – um einen Wachstumsmarkt handelt. An diesem wachsenden Markt hat Deutschland einen entscheidenden Anteil. Der Welthandelsanteil Deutschlands an Effizienzprodukten betrug im Jahr 2004 17 Prozent (BMU und UBA 2009) – damit lag Deutschland noch vor den USA, Japan und Italien.

Gerade das Marktvolumen von Produkten der Energieeffizienz wird sich nach einer Studie der Unternehmensberatung Roland Berger stark erhöhen. Die Analyse geht von einer Verdopplung des gegenwärtigen globalen Marktvolumens (450 Mrd. Euro im Jahr 2005) bis 2020 aus (Berger 2007). Die aussichtsreichen zukünftigen Märkte spiegeln sich auch in den Entwicklungsaktivitäten wider: mit 20%

hat Deutschland den zweitgrößten Anteil an Patenten im Bereich Energieeffizienz weltweit (USA: 24%) (BMU und UBA 2009).

Insbesondere der Mittelstand profitiert von der steigenden Nachfrage nach Produkten der effizienten Energiewandlung und -anwendung. Rund 60 Prozent des Umsatzes von Umweltschutzgütern, zu denen auch Produkte der Energieeffizienz zählen, werden in Unternehmen erwirtschaftet, die weniger als 250 Beschäftigte haben (BMU und UBA 2009). Gerade diese Bereiche sind es auch, die besonders forschungsintensiv sind.

1.2.3.2 Arbeitsplatzeffekte und heimische Wertschöpfung

Energieeffizienz leistet auch deshalb einen positiven volkswirtschaftlichen Beitrag, weil Energieträger durch heimische Wertschöpfung substituiert werden. Vereinfacht gesprochen fließen die Euros nicht mehr in den Rohölimport, sondern in verbesserte Antriebs-, Mess- und Regel- oder Beleuchtungstechnologien.

Dadurch verbleibt die Wertschöpfung im Land. Die Bauwirtschaft, die beispielsweise durch vermehrte Investitionen in Gebäudesanierungen angeregt werden kann, hat einen sehr niedrigen Importanteil (Abb. 1.7 oben), ist aber arbeitsintensiv (Abb. 1.7 unten). In einer Studie wurden die zusätzlichen Arbeitsplatzeffekte

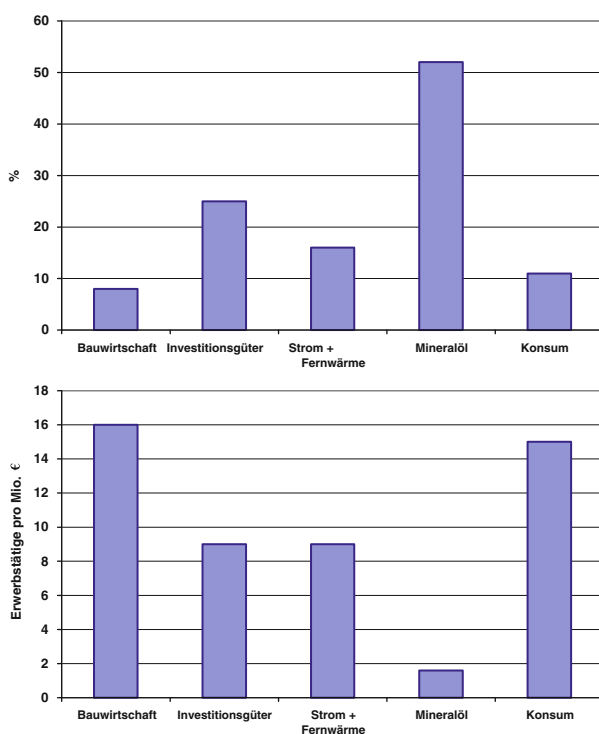


Abb. 1.7 Importanteile (oben) und Arbeitsintensitäten (unten) von unterschiedlichen Wertschöpfungsketten (kumulierte direkte und indirekte Effekte) (FhG-ISI et al. 2008)

von 33 Effizienzmaßnahmen gegenüber einer Referenzentwicklung beziffert. Das Ergebnis der Studie: rund 260 Tausend weitere Arbeitsplätze könnten netto durch diese Maßnahmen bis zum Jahr 2020 in Deutschland entstehen (Pehnt et al. 2009a).

1.2.3.3 Energieeffizienz und soziale Gerechtigkeit²

Energieeffizienz trägt nicht nur dazu bei, die heimische Wertschöpfung zu fördern, sondern reduziert Energiearmut und fördert soziale Gerechtigkeit. Vor dem Hintergrund stetig steigender Energiepreise gewinnt das Problem der „Energiearmut“ immer mehr an Bedeutung. Der Energiepreisanstieg kann einerseits umweltpolitisch erwünschte Investitionsanreize bewirken. Andererseits belastet er aber besonders einkommensschwache Haushalte, die sich die Investition in Energieeffizienzmaßnahmen – wie eine energetische Gebäudesanierung, effiziente Haushaltsgeräte oder sparsame Fahrzeuge – oft nicht leisten können. Im Gegenteil mehren sich die Fälle, in denen Haushalten Strom oder Gas von Energieversorgungsunternehmen abgestellt wird, da Rechnungen nicht beglichen werden können. Von Energiearmut betroffene Haushalte können somit weder angemessen auf den Anstieg der Energiekosten reagieren noch wirksame Beiträge zum Klimaschutz leisten.

In Großbritannien wird Energiearmut wie folgt definiert: „Energiearmut (*fuel poverty*) herrscht in einem Haushalt, der für das angemessene Heizen der Wohnstätte mehr als 10 Prozent seines Einkommens für den gesamten Brennstoffverbrauch des Haushalts aufbringen müsste“. Der Begriff schließt die Ausgaben für den gesamten Haushaltsenergieverbrauch inklusive Warmwasser und Elektrizität ein (Defra/BERR 2008).

Auch für Deutschland gilt, dass Menschen mit niedrigerem Einkommen proportional gesehen einen größeren Anteil ihres Einkommens für Energie ausgeben als einkommensstärkere (Tabelle 1.2). Hierzulande sind durchschnittlich etwa 14 Prozent der Gesamtbevölkerung arm oder von Armut gefährdet (Destatis 2009).

Energiearmut ist auf eine komplexe Kombination von Faktoren zurückzuführen. Die drei bedeutendsten sind ein geringes Haushaltseinkommen, hohe Energiekosten sowie ein hoher Haushaltsenergieverbrauch aufgrund mangelnder Energieeffizienz des Gebäudes. Letzteres wird beispielsweise durch keine oder ungenügende Wärmedämmung, veraltete Heizsysteme oder hohe Leerstandsraten im Gebäude verursacht. Zudem sind in diesen Haushalten ältere oder gebrauchte Haushalts-Großgeräte mit hohem Verbrauch überrepräsentiert. Darüber hinaus verbringen Menschen mit niedrigem Einkommen häufig mehr Zeit zuhause, beispielsweise bedingt durch Arbeitslosigkeit, die Betreuung anderer Haushaltsmitglieder, Alter oder Krankheit. Die Folgen der Energiearmut bestehen immer häufiger darin, dass sich ohnehin schon arme Haushalte zusätzlich verschulden oder die Strom- oder Heiz-

²Dieses Kapitel basiert auf Dünnhoff und Gigli (2008) und Dünnhoff et al. (2009).

Tabelle 1.2 Ausgabenanteile für Haushaltsenergie am Nettoeinkommen bzw. den Konsumausgaben. Auf Basis 9 300 nordrhein-westfälischer Haushalte der Einkommens- und Verbraucherstichprobe 2003, aktualisiert anhand des Statistischen Jahrbuchs NRW 2006 (FiFo 2007)

Einkommens-Dezile ^a	Anteil der Energieausgaben am Nettoeinkommen (%)	Anteil der Energieausgaben an den Konsumausgaben (%)
1	9,4	9,7
2	8,7	8,8
3	7,6	8,3
4	6,4	7,5
5	6,2	7,3
6	5,7	7,1
7	5,2	6,7
8	4,9	6,6
9	4,5	6,5
10	3,4	5,9
Durchschnitt	6,2	7,4

^aDezile: Verteilung der Einkommen in zehn gleich große Teile (nach Einkommen aufsteigend sortiert).

energieversorgung gekappt wird. Einige sehen sich gezwungen, die Heiztemperatur auf ein sehr niedriges Niveau zu reduzieren oder die Heizung gänzlich auszuschalten, wodurch sich wiederum die Wahrscheinlichkeit gesundheitlicher Probleme erhöht. In Großbritannien wird in diesem Zusammenhang immer häufiger von sogenannten „Winter-Todesfällen“ berichtet. Die Lebensqualität der von Energiearmut betroffenen Menschen wird also generell stark eingeschränkt.

Trotz der eher schleppend voranschreitenden EU-weiten Einigung über die Indikatoren von Energiearmut (Einkommen und Besteuerung, Bau- und anlagentechnische Situation der Wohnung, etc.), mittels derer die betroffenen Haushalte identifiziert und die Entwicklung und Auswirkungen des Phänomens bewertet werden können, werden in einigen Ländern Europas bereits verschiedene Maßnahmen gegen Energiearmut durchgeführt; diese reichen von Subventionen und Energiegutscheinen bis hin zu staatlichen Sozialtarifen (Frankreich, Belgien) und garantierter Mindestversorgung (Italien) für diese Gruppe der einkommensschwachen Verbraucher. In Deutschland ist die Einführung von Sozialtarifen aufgrund des damit verbundenen gesetzgeberischen Eingreifens des Staates in die Preisgestaltung der Energieversorgungsunternehmen sehr unwahrscheinlich. Zudem garantieren in einigen deutschen Regionen bereits vorhandene, von Energieversorgungsunternehmen deklarierte Sozialtarife nicht, dass dem Haushalt wirklich der günstigste Tarif zu Gute kommt. Die meisten Kunden würden statt dessen durch einen Anbieterwechsel noch günstigere Konditionen erhalten (Dünhoff und Gigli 2008). Wenn die Einführung von Sozialtarifen nicht zu Lasten der Unternehmensgewinne der Energieversorger gehen soll, so müsste es Umlagen auf die übrigen Strompreise und Preiserhöhungen im Rahmen

der Grundversorgungstarife geben. Dies würde zu Mehrkosten an anderer Stelle führen.

Der effektivste Weg zur Bekämpfung der Energiearmut besteht darin, Energieeffizienzmaßnahmen flächendeckend umzusetzen. Dazu gehört, Wohnungen von einkommensschwachen Haushalten umfassenden Modernisierungsmaßnahmen zu unterziehen. Ein energetisch saniertes Gebäude erfordert zum Erreichen einer angemessenen Raumtemperatur einen deutlich geringeren Einsatz an thermischer Energie, was wiederum die Budgets armer Haushalte entlastet. Da in Deutschland der Anteil an Mietern unter den Haushalten des untersten Einkommensquartils sehr hoch ist und von Armut betroffenen Haushalten staatliche Sozialwohnungen zur Verfügung gestellt werden, sind vornehmlich Handlungen der privaten Wohnungsunternehmen oder der Kommunen bzw. des Staates gefragt.

Infobox 1.1 Energieeffizienzmaßnahmen in einkommensschwachen Haushalten in Europa

Die EU plant zukünftige Programme für energetische Sanierungen in einkommensschwachen Haushalten mitzufinanzieren, auf nationaler Ebene, aber auch auf Ebene der Länder und Kommunen (Europäische Kommission 2008). In Großbritannien existieren bereits zwei Energieeffizienz-Programme zur Bekämpfung von Energiearmut: Im *WarmFront* Programm werden in Wohnungen von Verbrauchern mit niedrigen Haushaltseinkommen staatlich finanzierte Modernisierungsmaßnahmen umgesetzt (z. B. verschiedenste Wärmedämm-Maßnahmen bis zu einem Wert 3 500 £, zur Installation von Zentralheizungen sogar bis zu 6 000 £).

Das Programm *Carbon Emissions Reduction Target (CERT)* verpflichtet Energieversorger zur Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, deren Einspareffekte einer festgelegten Menge an Tonnen Kohlendioxid entsprechen muss. So müssen etwa in der Phase von 2008–2011 CO₂-Äquivalente des jährlichen Energieverbrauchs von 700 000 Gebäuden eingespart werden. Die Energieversorger verpflichten sich, 40 Prozent dieser Effizienzmaßnahmen in Haushalten von Sozialleistungsempfängern und Menschen über 70 Jahren durchzuführen.

Für Abhilfe innerhalb sehr kurzer Zeiträume sind höchstwahrscheinlich integrative Strategien notwendig. In diesem Zusammenhang wird über die Aufstockung zu geringer Haushaltseinkommen oder die Regulierung von Energiepreisen für die ärmsten Haushalte (z. B. Sozialtarife, garantierte Mindestversorgung) verbunden mit der gleichzeitigen Förderung von Energieeffizienz diskutiert. Andere Möglichkeiten sind etwa zielgruppenspezifische Energieberatungen („Stromspar-Check“, siehe Infobox 1.2) oder das Vorantreiben von Contracting-Modellen durch Energieversorger. Als Voraussetzung kann eine zukünftig zu entwickelnde EU-weite Definition der Energiearmut dienen, welche die Indikatoren zum Feststellen der von Energiearmut betroffenen Haushalte festlegt.

Infobox 1.2 Der Stromsparcheck

Im Projekt „Stromspar-Check“, das Ende 2008 an den Start ging und bundesweit in etwa 60 Kommunen umgesetzt wird, werden Langzeitarbeitslose zu „Stromsparhelfern“ geschult. Sie geben ihre Kenntnisse über Einsparmöglichkeiten im Bezug auf Strom-, aber auch Heizenergie- und Wasserverbrauch an Personen weiter, die ebenfalls sogenannte „Hartz-IV“-Empfänger sind. Zusätzlich werden in den Haushalten kostenlose Strom- und Wassersparartikel (Energiesparlampen, schaltbare Steckerleisten, Spar-Duschköpfe etc.) installiert.

Durch diese energieeffizienten Geräte und die Umsetzung der Verhaltenstipps können sowohl die Haushalte als auch die Kommunen, die Heiz- und Wasserkosten der Empfänger übernehmen, Kosten reduzieren. Ausführende Kooperationspartner sind u. a. der Deutsche Caritasverband, ein vor allem in einkommensschwachen Haushalten akzeptierter Akteur, und die regionalen Energieagenturen, die ihre Experten für die Schulungen der Stromsparhelfer zur Verfügung stellen. www.stromspar-check.de

1.3 Energieeffizienz im Kontext der Nachhaltigkeitsdebatte

Der Begriff „Nachhaltige Entwicklung“ prägt seit etwas mehr als zwei Jahrzehnten die Diskussionen, wenn es um einen schonenden Umgang mit unserer natürlichen Umwelt, um eine gerechtere Verteilung des Wohlstands in der Welt und um eine humane Gestaltung der Lebensgrundlagen für alle Menschen geht. Nachhaltigkeit umfasst somit sowohl ökologische als auch ökonomische und soziale Aspekte, die in ihrer Wechselwirkung betrachtet werden müssen. Eine umfassende Definition von Nachhaltigkeit wurde erstmals von der Brundtland-Kommission erarbeitet und von der Rio-Konferenz 1992 aufgegriffen:

Nachhaltige Entwicklung befriedigt die Bedürfnisse der heutigen Generationen, ohne die Fähigkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihre eigenen Lebensstile zu wählen.

Auf der politischen Agenda hatte jahrzehntelang die Bereitstellung ökonomisch und ökologisch verträglicher Erzeugungsanlagen Priorität. Wurden anfangs zusätzliche Verbraucher für vorhandene Erzeugungsanlagen gesucht – besonders offenbar wird dies am Beispiel der Nachtspeicherheizungen, die die nächtliche Auslastung von Atomkraftwerken verbessern sollten –, wurde erstmals im Rahmen des „Least Cost Planning“ Effizienz als Aspekt energiepolitischer Entscheidungsprozesse berücksichtigt. Dahinter stand die Überlegung, dass in bestimmten Entscheidungssituationen Effizienzmaßnahmen auch aus Sicht eines Energieversorgers betriebswirtschaftliche Vorteile bieten können – etwa, weil Neubauten von Leitungen oder Kraftwerken vermieden werden.

Eine Präferenz für Maßnahmen, die auf der Versorgungsseite ansetzen, zeigt sich auch heute. Viele Klimaschutzprojekte wie beispielsweise Bioenergiedörfer, die sich zum Ziel gesetzt haben, die CO₂-Emissionen drastisch zu senken, erfüllen

Infobox 1.3 Konsistenz und Suffizienz

Als konstituierende Elemente einer Strategie der Nachhaltigkeit werden vielfach neben der Effizienz Suffizienz und Konsistenz genannt.

Suffizienz bedeutet eigenverantwortliches Handeln in Bezug auf Lebensstile und Konsumgewohnheiten; Suffizienz ist „Maßhalten, von nichts zuviel wollen, damit für anderes, das man ebenfalls braucht, noch Platz bleibt. Die Logik der Suffizienz liegt deshalb in der Regel, von mehreren Zielen, die allesamt wichtig sind, keines zu maximieren, sondern für jedes das rechte Maß zu suchen, um sie in Balance zu bringen“ (Scherhorn 2002). Ein individueller Energieverbrauch kann somit entweder durch einen umsichtigen Umgang mit den „richtigen“ Konsumgütern, Nahrungs- oder Verkehrsmitteln oder aber durch einen Verzicht auf energieintensive Produkte oder übertriebene Mobilität erreicht werden.

In einer Strategie der *Konsistenz* geht es nicht darum, die Mengen an Energie- oder Stoffeinsatz zu verändern. Vielmehr wird die Frage nach der Qualität der eingesetzten Güter gestellt. Das Ziel sind Stoffströme, die „den biogeochemischen Kreisläufen und der Verarbeitungskapazität der Ökosysteme angepasst sind“ (Behrendt et al. 1998). Beispiele hierfür sind Kreislaufsysteme, in denen durch Wiederverwertung oder nachwachsende Rohstoffe möglichst keine neuen Ressourcen benötigt werden. Während Effizienz also eine Strategie des „besser“ umschreibt, könnte man Suffizienz und Konsistenz auch mit den Adjektiven „weniger“ und „anders“ belegen (Winterfeld 2007).

diese Zielsetzung durch Installation von Anlagen mit biogenen Brennstoffen. Ob die Haushalte, die mit Wärme und Strom versorgt werden, sparsam damit umgehen, ist in diesen Konzepten oft zweitrangig. Bioeffizienzdörfer, oder „Energiebalance“-Kommunen (dieses Wort spielt auf die richtige Balance zwischen erneuerbaren Energien und Effizienz an, siehe Pehnt et al. 2009b), sind eigentlich gefordert. Denn auch erneuerbare Energien sollten nicht verschwenderisch genutzt werden, da auch ihre Nutzung begrenzt ist; sei es durch limitiert vorhandene Brennstoffe wie Biomasse; limitiert vorhandene Flächen, wie Windvorranggebiete oder Dachflächen für Sonnenkollektoren; oder limitiert vorhandene Finanzmittel, die möglichst nutzbringend eingesetzt werden sollten.

1.3.1 Effizienz als „Tonnenideologie“?

Gegen eine Strategie der Effizienz wird eingewendet, dass sie mit fortschreiten der Realisierung schnell an ihre Grenzen stoße, weil der „Grenznutzen“ abnehme: mit zunehmenden Verbesserungen nehme der Fortschritt der Effizienzverbesserungen ab. Effizienzsteigerung habe die Struktur einer S-Kurve, d. h. sie laufe in einer Etablierungsphase eines Produktes in eine Sättigung. Die Systeme seien dann ausgereizt. Effizienz folge zudem einem „vereinseitigten und unkonkreten ökonomischen Mengendenken“ (Huber 2000). Auch der Rebound-Effekt (siehe Abschn. 1.1.3) vereitele alle Erfolge der Effizienz.

Eine Effizienz- oder Suffizienz-Strategie, die diese Sachlage [einer qualitativen Veränderung] nicht zu ihrem Ausgangspunkt nimmt, gerät zur Tonnenideologie; dieser erscheint „alles irgendwie viel zu viel“. (...) Das Grundproblem liegt aber nicht darin, exemplarisch gesprochen, den Gebrauch von Kohle und Öl zu rationieren (Suffizienz) oder zu rationalisieren (Effizienz), sondern ihren Gebrauch zu erübrigen durch Übergang zu einer anderen Energiebasis, die auch in großen Volumina umweltverträglich genutzt werden kann.

Zum Beispiel kann man beim Heizen mit einer Variation von 1°C ... 3–6 Prozent Energieverbrauch beeinflussen.... Weitergehende Reduktionen beinhalten bereits Nutzenverzicht. Aber selbst radikalere Verzichtsformen, ohnedies eine Tugendübung für wenige, können kaum zu mehr führen als 20–40 Prozent Verbrauchsreduktion. Wollte man mehr erreichen, müsste man die Leute bei Minimumdiät im Nullenergiebunker immobilisieren. (Huber 2000)

Huber führt eine andere Strategie ins Feld, die der „Konsistenz“ oder der „industriellen Ökologie“. Es werde ein grundlegend neuer Ansatz benötigt, der die ökologische Qualität der Stoffströme so verändert, „dass sie sich in den Naturstoffwechsel besser einfügen“. Nach konkreten Beispielen befragt, werden biotechnische Produktionsverfahren mit gentechnisch veränderten Organismen genannt, Solar-Wasserstoff oder naturverträgliche Anbaumethoden, die nachwachsende Rohstoffe produzieren.

Eine solche eindeutige Prioritätensetzung von Huber zugunsten einer Konsistenzstrategie scheint jedoch verschiedene Aspekte zu verkennen:

- Die Beispiele verdeutlichen: Konsistente Produkte sind bei weitem nicht zwangsläufig „nachhaltige“ Produkte. Die Debatte um die Naturverträglichkeit gentechnisch veränderter Organismen oder sozialer und ökologischer Verwerfungen im Zusammenhang mit der Nutzung von Bioenergieträgern offenbaren die Nebenwirkungen einer Konsistenzstrategie.
- Effizienz sollte Leitgedanke auch und gerade für die Nutzung „konsistenter Stoffströme“ sein. Die Vorstellung, dass beispielsweise biogene Rohstoffe unbegrenzt verfügbar sind, ist spätestens durch die Diskussion um Flächenkonkurrenzen bei der Biomasse („Food or Fuel“) in Frage gestellt worden. Gleiches gilt auch für solare Ressourcen, die auf Flächen und kapitalintensive Umwandlungsanlagen zurückgreifen. Den Beweis, dass bei heutigem Konsumniveau und steigender Weltbevölkerung naturverträgliche Stoffströme machbar sind, bleiben die Konsistenz-Befürworter schuldig.
- Hinzu kommt: „viele Wichtige in der Entwicklung dieser [Konsistenz-] Strategien ist Zukunftsmusik“ (Linz 2006).
- Effizienzsteigerung verläuft nicht zwangsläufig entlang einer S-Kurve. Technologische Sprünge zwischen Produkten desselben Nutzens erlauben Effizienzsteigerungen um Größenordnungen: Auf die Effizienzsteigerung der Glühbirne folgt die Energiesparlampe, gefolgt von Leuchtdioden, organischen Leuchtdioden usw. Die Warnung vor der Inkompatibilität von Effizienz und Genuss („Nullenergiebunker“) wird durch modernste Baukonzepte widerlegt, die zeigen, dass effizientes Wohnen gerade ein behagliches Wohnen ist (siehe Kap. 8); analoges gilt in anderen Handlungsfeldern.

- Effizienz umfasst nicht nur den Wirkungsgrad einer Anlage, sondern gleichermaßen den Umwandlungsprozess von einem Rohstoff in eine Dienstleistung. Damit gerät übrigens auch die Grenze zur Suffizienz fließend. Eine Verlagerung einer Mobilitätsdienstleistung auf den öffentlichen, gut ausgelasteten Verkehr ist zugleich eine Verhaltensänderung wie auch eine Effizienzerhöhung des Quotienten Energieeinsatz zu Mobilitätsbereitstellung.

1.3.2 Effizienz als „Strategie der Anschmiegsamkeit“?

Verschiedene Kritiker der gegenwärtigen Nachhaltigkeitsdebatte übertragen die Kritik, die Effizienzprotagonisten gegenüber versorgungs-fokussierten „end-of-the-pipe“-Strategien artikulieren, auch auf die Effizienz. Sie sehen in der Effizienz einen Bestandteil eines „technischen Weges“, der „das vorherrschende Wachstumsparadigma nicht Frage [stellt], sondern dessen Negativeffekte über technische, prozessuale oder systemische Vorkehrungen [abmildert]“ (Paech 2006). In der Effizienzstrategie gehe es um eine Optimierung der Bedarfsbefriedigung, nicht um das Ausmaß der Bedürfnisse. Dieses Ausmaß in Frage zu stellen sei aber Aufgabe einer austarierten Nachhaltigkeitsdiskussion. „Das Problem ist, dass der Verzicht nicht von den Menschen, sondern den Dingen erwartet wird“ (Gronemeyer 1998).

Eine Suffizienzstrategie hingegen stellt heutige Konsummuster und damit auch die Wachstumsursachen in Frage. In einer „Postwachstumsökonomie“ wird verstärkt auf Eigenarbeit und Genügsamkeit gesetzt, es wird „entrümpelt“ und „entschleunigt“ (Paech 2006).

Das Hauptproblem einer Suffizienzstrategie ist nicht deren technische Machbarkeit, sondern Schwierigkeiten, dieses Modell jenseits einer Verzichtsrhetorik gesellschaftlich zu vermitteln. Gerade das macht sie in der politischen Arena unbeliebt.

1.3.3 Effizienz, Suffizienz und Konsistenz als komplementäre Strategiesäulen

Aller kritischer Äußerungen zu einer Effizienzstrategie ist gemein: Sie wenden sich nicht gegen Effizienz als solche, sondern thematisieren kritisch, welchen Beitrag Effizienz leisten kann und ob gesellschaftliche Aufmerksamkeit und Ressourcen richtig gewichtet sind.

Während reine Strategien der Konsistenz, der Suffizienz und der Effizienz scheitern, liegt es nahe, diese Säulen als komplementäre Säulen einer Nachhaltigkeitsstrategie zu begreifen. Vereinfacht gesprochen: Effizienz und Suffizienz verschaffen Konsistenz zeitliche und räumliche Spielräume durch vorherige Senkung des noch zu deckenden Bedarfs. Suffizienz kann auftretende Rebound-Effekte einer Effizienzstrategie mildern und durch die Infragestellung einer einseitigen Wachstumsorientierung qualitative Veränderungsprozesse anstoßen. Und Konsistenz verspricht

eine naturverträgliche Lösung des verbleibenden Bedürfnisresiduums und auch – wie die äußerst dynamische Entwicklung erneuerbarer Energien zeigt – zeitlichen Spielraum für die unter Beharrungskräften und Hemmnissen leidende Effizienzstrategie. Die kontroverse Debatte um die Rolle einzelner Strategieelemente, um einen „technischen“ und einen „kulturellen“ Weg, mündet nicht in ein Entweder-Oder, sondern in eine Frage der Akzente.

Die begründete Skepsis gegenüber der Wachstums- und Innovationsorientierung des technischen Weges unterminiert nicht die Bedeutung seiner vier Prinzipien – Effizienz, Konsistenz, Vermeidung und Risikominimierung –, wohl aber dessen Alleinvertretungsanspruch. Vieles spricht deshalb für eine Akzentverlagerung zugunsten des kulturellen Weges (Paech 2006).

Dabei verlangt die Suffizienz vermutlich die größte Abkehr von gegebenen Strukturen. Sie tut dies auf einer individuellen Ebene; mit ihrer Infragestellung der Wachstumsdynamik wirkt sie aber auch gesellschaftlich.

Die Effizienzstrategie steht dieser Entwicklung nicht im Weg, sie befördert sie allerdings auch nicht: sie ist komplementär zu Suffizienz und Konsistenz.

1.4 Begriffsdefinitionen

Nach diesem Exkurs in die Nachhaltigkeitsdebatte und der Rolle der Effizienz in dieser Diskussion soll der folgende Abschnitt, pragmatischer an den energie-wirtschaftlichen und -technischen Bedingungen der Energieeffizienz orientiert, die Voraussetzungen für ein begriffliches Verständnis der weiteren Kapitel dieses Buches schaffen. Er ersetzt jedoch nicht das detaillierte Studium von Standardwerken der Thermodynamik, der Energietechnik oder Verfahrenstechnik.

1.4.1 Energie und Leistung

Zentral für ein Verständnis von Energieeffizienz ist die Unterscheidung zwischen Energie und Leistung. Ein häufiger Fehler ist deren Verwechslung gerade in der Presse, wo man häufig die Einheit kW anstelle von kWh, gelegentlich sogar – in Anlehnung an km/h – auch kW/h findet.

Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu leisten. Die Maßeinheit der Energie ist ein Joule ($1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$). Eine ältere Energieeinheit ist die Kalorie. Sie entspricht der Wärmemenge, die man aufwenden muss, um 1 g Wasser bei Normaldruck (101,325 kPa) von 14,5 auf 15,5°C zu erwärmen. 1 Kalorie (cal) entspricht 4,1868 J. Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene Energieeinheiten eingebürgert, die mittels Tabelle 1.3 ineinander umgerechnet werden können.

Dass mechanische und thermische Energie ineinander umgewandelt werden können, ist erst seit Entdeckung des Energieerhaltungssatzes bekannt. Die Forscher Robert Mayer, James Prescott Joule und Hermann Helmholtz erarbeiteten unabhängig voneinander verschiedene Aspekte des Energieerhaltungssatzes (Pehnt und Nast

Tabelle 1.3 Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten. Um von der Ausgangseinheit (z.B. TWh) in die Zieleinheit (z.B. Mio. t SKE) umzurechnen, muss der Ausgangswert mit dem Tabellenwert (im Beispiel: 0,123) multipliziert werden (BMWi 2009)

Ausgangseinheit \ Zieleinheit PJ		Mio. t SKE	Mio. t RÖE	Mrd. kcal	TWh
1 Petajoule (PJ)	–	0,034	0,024	238,8	
1 Mio. t Steinkohleeinheit (SKE)	29,308	–	0,7	7 000	8,14
1 Mio. t Rohöleeinheit (RÖE)	41,869	1,429	–	10 000	11,63
1 Mrd. Kilokalorien (kcal)	0,004187	0,000143	0,0001	–	0,001163
1 Terawattstunde (TWh)	3,6	0,123	0,0861	859,2	–

2001). Dieser heute als erster Hauptsatz der Thermodynamik formulierte Erfahrungssatz besagt, dass die Energie in einem geschlossenen System konstant bleibt. Es kann keine Energie erzeugt oder verbraucht werden – auch wenn der alltägliche Sprachgebrauch dies nahe legt.

Mayer führte diese Erkenntnisse zusammen und folgerte, dass es „eine unveränderliche Größenbeziehung zwischen Wärme und Arbeit“ geben müsse. Mayer erkannte auch die praktische Konsequenz aus dem Energiesatz und wird damit zum Vater des Effizienzgedankens: man müsse nun daran gehen, bei kohlebetriebenen Dampfmaschinen den ungewünschten Effekt der Verbrennung, nämlich die „Wärmeentbindung nach außen“, möglichst klein zu machen.

Energie tritt in verschiedenen Erscheinungsformen auf:

- als Wärme, also ungeordnete Bewegung der Atome,
- als mechanische Bewegungsenergie, also geordnete Bewegung von Körpern,
- als potenzielle (Lage-) Energie (gespeicherte Energie, z. B. durch Anheben eines Gegenstandes gegen die Schwerkraft),
- als elektromagnetische Energie,
- als elektromagnetische Strahlungsenergie,
- als chemische Energie (Bindungsenergie von Atomen zu Molekülen) und
- als Kernenergie, also Bindungsenergie von Kernbausteinen, Protonen und Neutronen zu Atomkernen.

Arbeit ist die Energiedifferenz, die bei Übergang zwischen zwei Energiezuständen aufgewandt werden muss, zum Beispiel um einen Körper zu beschleunigen oder einen Körper anzuheben. Die mechanische Arbeit ergibt sich aus dem Produkt aus der Kraft, die auf einen Körper längs der Wegstrecke ausgeübt wird, und der Wegstrecke.

Von Energie und Arbeit abzugrenzen ist die *Leistung P*. Leistung ist die pro Zeiteinheit t verrichtete Arbeit, also die zeitliche Ableitung der Arbeit:

$$P = \frac{dE}{dt}$$

(1.1)

Sie wird in Watt gemessen, wobei

$$1\text{ W} = 1\text{ J/s} = 1\text{ kg m}^2/\text{s}^3.$$

Mit dieser Festlegung des Watt ergibt sich die übliche Energieeinheit kWh aus dem Joule:

$$1\text{ kWh} = 3600\text{ kWs} = 3,6\text{ Millionen J} = 3,6\text{ MJ}.$$

1.4.2 Energieformen

Am Anfang des Energiegewinnungsprozesses steht die in der Natur vorkommende Primärenergie, die entweder in freier oder in gebundener Form vorliegt, z. B. fossile Energie (wie Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Erdöl), erneuerbare Energie (wie Biomasse, Wasserkraft, Sonnenenergie, Erdwärme, Windenergie) und Kernenergie (hauptsächlich Uran).

Primärenergie ist also der rechnerische Energiegehalt eines natürlich vorkommenden Energieträgers, bevor er – zum Beispiel durch Verbrennung – umgewandelt wird (Abb. 1.8). Zu den Primärenergieträgern zählen fossile Energieträger wie Stein- und Braunkohle, Erdöl und Erdgas sowie erneuerbare Energien (Sonnenenergie, Windkraft, Wasserkraft, Erdwärme und Gezeitenenergie). In Deutschland war 2008 Mineralöl mit 34,8% der wichtigste Primärenergieträger, gefolgt von Erdgas (22,1%), Steinkohle (13,1%), Braunkohle (11,1%) und Kernenergie (11,6%) (BMWi 2009).

Die Primärenergie wird durch verlustbehaftete Prozesse wie Verbrennung, Kernspaltung oder Raffinieren in sogenannte *Sekundärenergieträger* (engl. secondary energy) umgewandelt. Sekundärenergie ist daher die Energie, die als Ergebnis eines Umwandlungsprozesses aus Primärenergie gewonnen wird. Dabei vermindert sich

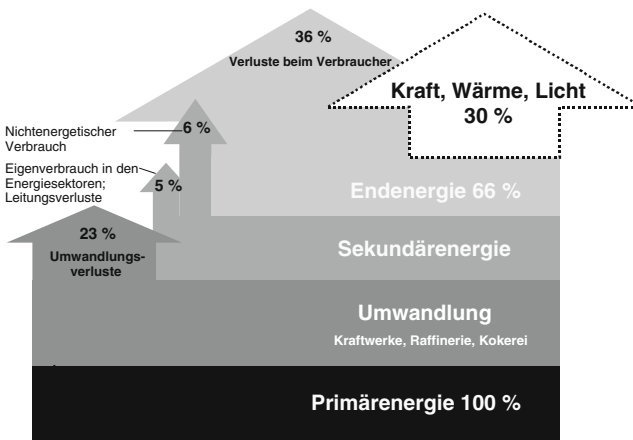


Abb. 1.8 Primärenergie, Sekundärenergie, Endenergie, Nutzenergie: die Energiebilanz in Deutschland stark vereinfacht (eigene Darstellung nach FfE München)

die nutzbare Energiemenge durch Umwandlungs- und Transportverluste. Sekundärenergieträger sind entweder leitungsgebunden wie Strom, Fernwärme und Stadtgas oder die veredelten Produkte Benzin, Heizöl, Koks, Briketts etc.

Bevor der Energieträger in der letzten Umwandlungsstufe beim Kunden in Nutzenergie umgewandelt wird, bezeichnet man ihn als *Endenergieträger* (engl. final energy). Beispiele hierfür sind beim Verbraucher angeliefertes Heizöl, Benzin oder Strom. Die *Nutzenergie* umfasst hingegen gemäß der Definition der VDI 4608 die technischen Formen der Energie, die der Verbraucher benötigt – beispielsweise Wärme, Licht oder mechanische Energie.

1.4.3 Brennwert und Heizwert

Der Energiegehalt eines Brennstoffes wird durch den *Brennwert* H_s (s: superior), früher oberer Heizwert H_o , genannt, bzw. den *Heizwert* H_i (früher: unterer Heizwert H_u) beschrieben. Der Brennwert (engl. Higher Heating Value oder Gross Calorific Value) gibt die bei vollständiger Verbrennung einer Brennstoffmenge freigesetzte Reaktionswärme an, wenn das bei der Verbrennung gebildete Wasser in flüssigem Zustand anfällt. Definitionsgemäß beträgt die Temperatur des Brennstoffes und der Verbrennungsprodukte 25°C . Werden der Brenn- oder Heizwert auf eine Massen- oder Volumeneinheit bezogen, so schreibt man diese spezifischen Größen klein (h_i und h_s).

Zur Nutzung des gesamten Brennwertes, insbesondere der Kondensationswärme des Wasserdampfes, muss das Abgas abgekühlt werden. Dies ist oftmals nicht möglich. Der Heizwert (engl. Lower Heating Value oder Net Calorific Value) gibt die Reaktionswärme an, die genutzt werden kann, wenn das Wasser in gasförmigem Zustand anfällt. Die Differenz aus Brennwert und Heizwert entspricht der Verdampfungsenthalpie des Wasserdampfes.

Das Verhältnis H_i/H_s beträgt bei typischem Erdgas 0,903, bei Heizöl 0,94, bei Steinkohle 0,958 und bei Braunkohle 0,93. Bei gasförmigen Brennstoffen bezieht man den spezifischen Heiz- und Brennwert auf das Volumen des vollständig verbrannten Gases im Normzustand bei Umgebungsdruck und 0°C .

Die Höhe der Brenn- und Heizwerte wird von der Zusammensetzung des Brennstoffes bestimmt. Wenn ein Brenngas beispielsweise hohe Mengen inerter – also nicht mehr mit anderen Reaktionspartnern reagierender – Substanzen wie beispielsweise Stickstoff oder Kohlendioxid besteht, ist sein Brennwert geringer. Dies ist beispielsweise bei Biogas der Fall, das neben Methan größere Mengen Kohlendioxid enthält (Tabelle 1.4, vgl. Biogas mit Erdgas). Auch ein hoher Wassergehalt senkt den Brennwert (Tabelle 1.4, vgl. feuchte Rohbraunkohle mit Steinkohle).

Der Heizwert eines Brennstoffes war in früheren Zeiten deshalb wichtig, da es zwingend notwendig war, den Wasserdampf im Abgas durch hohe Abgastemperaturen gasförmig zu belassen, um eine mögliche Korrosion des Heizkessels oder ein Versotten des Schornsteines zu verhindern.

Tabelle 1.4 Stoffzusammensetzung, Heiz- und Brennwerte verschiedener fester und gasförmiger Brennstoffe. waf: wasser- und aschefrei

Brennstoff	Elementaranalyse (waf) in [Massen-%]					Wasser [Massen-%]	Brennwert Δh_s [MJ/kg]	Heizwert Δh_i [MJ/kg]
<i>Feste Brennstoffe</i>	C	H	S	O	N			
Steinkohle	88	5	1	4,5	1,5	0–10	29,3–35,2	27,3–34,1
Rohbraunkohle	68	5,5	2,5	23	1	50–60	10,5–13,0	6,4–11,3
Holz	50	6	0	44	0	10–20	15,9–18,0	14,7–16,8
<i>Flüssige Brenn- und Treibstoffe</i>	Zusammensetzung in [Massen-%]						Brennwert	Heizwert
	C	H	S	O+N			Δh_s [MJ/kg]	Δh_i [MJ/kg]
Methanol	37,5	12,5	–	50			22,3	19,6
Benzin	85,0	15,0	–	–			46,7	42,5
Diesel	86,3	13,4	0,3	–			45,9	43,0
Heizöl EL	86,3	13,0	0,3	0,4			45,5	42,7
<i>Brenngase</i>	Zusammensetzung in [Volumen-%]						Brennwert	Heizwert
	CH ₄	C _x H _y	CO ₂	N ₂			Δh_s [MJ/Nm ³]	Δh_i [MJ/Nm ³]
Erdgas (Russland)	82,1	8,8	0,5	7,3			42,0	38,0
Erdgas (Norwegen)	85,8	12,3	1,5	0,5			44,5	40,2
Biogas	60–80	–	20–40	ca 2,0			24–32	21–28
Wasserstoff	–	–	–	–			12,8	10,8

Infobox 1.4 Verdampfungsenthalpie

Die Verdampfungsenthalpie kennt man vom umgekehrten Prozess: Wird ein Topf mit heißem Wasser auf einer Herdplatte erwärmt, steigt zunächst die Temperatur auf 100°C. Wird dann weitere Wärme zugeführt, steigt die Temperatur nicht mehr weiter. Stattdessen wird die zugeführte Energie genutzt, um die Wassermoleküle aus ihren Bindungen zu befreien und das flüssige Wasser in Wasserdampf zu verwandeln.

Wenn umgekehrt der Wasserdampf wieder kondensiert, wird die Verdampfungsenthalpie freigesetzt. Darauf beruht der Brennwerteffekt.
Um den gesamten Brennwert zu nutzen, müssen Abgase im Heizsystem unter die Taupunkttemperatur (ca. 58°C bei Erdgas und ca. 48°C bei Heizöl) abgekühlt werden.

1.4.4 Exergie und Anergie

Während Energie nach dem Energieerhaltungssatz nicht verbraucht oder eingespart werden kann – auch wenn landläufig, wie auch in diesem Buch, von „Energieverbrauch“ und „Energieeinsparung“ gesprochen wird –, kann die Erscheinungsform der Energie verändert werden. Beispielsweise kann chemische oder Lageenergie in

Bewegungsenergie oder elektrische Energie umgewandelt werden. Dabei wandelt sich auch die „Arbeitsfähigkeit“ der Energie. Ein Maß hierfür ist die Exergie.

Exergie ist der Teil der Energie, der sich in einer vorgegebenen Umgebung in jede andere Energieform umwandeln lässt. *Anergie* ist der Teil der Energie, der sich nicht in Exergie umwandeln lässt.

Der exergetische Anteil der Wärme Q entspricht dem optimalen Wirkungsgrad, der mit einer sogenannten „Carnot-Maschine“ erzielt werden kann (siehe hierzu [Abschn. 3.3.1](#) sowie Lehrbücher der Thermodynamik).

Dieser Carnotfaktor hängt ab von der Temperatur des Arbeitsmediums T_A und der Temperatur der Umgebung T_u , auf die das Arbeitsmedium abgekühlt werden könnte:

$$\text{Exergie der Wärme} = Q \cdot \eta_{\text{Carnot}} = Q \cdot \left(1 - \frac{T_u}{T_A}\right) \quad (1.2)$$

Je höher also die Temperatur des Mediums, desto höher dessen Exergie. Hieraus kann man einen „Energiequalitätsgrad“ bestimmen. Er bewertet den Exergieanteil eines Energieträgers:

$$\zeta = \frac{\text{Exergie}}{\text{Energie}} = \begin{cases} \eta_{\text{Carnot}} \text{ (Wärme)} \\ \text{ca.1 (Brennstoffe)} \\ 1 \text{ (Strom)} \end{cases} \quad (1.3)$$

Elektrische Energie beispielsweise kann zu 100% in andere Energieformen überführt werden. 1 kWh elektrische Energie entspricht daher 1 kWh Exergie. Wärme bei Umgebungstemperatur hingegen lässt sich in keine andere Energieform umwandeln. Sie ist reine Anergie.

Exergie und Anergie können thermodynamisch fundiert abgeleitet werden. Dies ist z. B. in Baehr (2009) nachzulesen.

1.4.5 Wirkungsgrad und Nutzungsgrad

Als *Wirkungsgrad* η wird der Quotient aus einer nutzbaren abgegebenen Leistung und einer zugeführten Leistung verstanden. Der Wirkungsgrad ist damit eine „Blitzlicht-Aufnahme“ eines Umwandlungsprozesses zu einem gegebenen Zeitpunkt. Typische Wirkungsgrade verschiedener Prozesse fasst Tabelle [1.5](#) zusammen.

Anders der *Nutzungsgrad*: dieser ist ein mittlerer Wirkungsgrad über längere Zeiträume, in der Regel ein Jahr. Ein elektrischer Nutzungsgrad ist beispielsweise der Quotient aus der innerhalb eines Jahres erzeugten Strommenge eines Kraftwerks und der über ein Jahr zugeführten Brennstoffmenge.

Der Unterschied zwischen Wirkungsgrad und Nutzungsgrad kann beträchtlich sein. In letzterem sind beispielsweise Verluste durch Stillstand und Leerlauf oder Anfahr- und Abfahrvorgänge enthalten. Auch ungünstige Betriebszustände

Tabelle 1.5 Typische Wirkungsgrade verschiedener Energiewandler

Energiewandler	Energieformen	Wirkungsgrad [%]
Generator	m → e	98–99
Staubfeuerungen für Steinkohle	c → t	98–99,5
Rostfeuerungen für Steinkohle	c → t	95–98
Dampferzeuger	c → t	92–97
Großer Elektromotor	e → m	90–96
Wasserturbinen	m → m	90–95
Heizungskessel	c → t	90–94
Trocken-Batterien	c → e	85–95
Kleiner Elektromotor	e → m	60–75
Brennstoffzellen	c → e	60–70
Windturbinen	m → m	40–50
Kombi-Kraftwerk	c → e	42–57
Dampfturbinen	t → m	45–50
Dampf-Kraftwerk	c → e	36–44
Gasturbinen	t → m	30–35
Diesel-Motor	c → m	30–35
Otto-Motor	c → m	25–30
Photozellen (Pilotausführungen)	s → e	20–25
Ofenheizung	c → t	15–20
Photozellen (Serienprodukt)	s → e	5–10
Elektroleuchten	e → s	2–30
Produktion von Biomasse	s → c	1–2
Globale Bioproduktion (Mittelwert)	s → c	0,4

m: mechanische Energie; e: elektrische Energie; c: chemische Energie; s: Strahlungsenergie; t: thermische Energie.

führen dazu, dass der Nutzungsgrad einer Anlage niedriger ist als der maximale Wirkungsgrad.

Dies ist insbesondere bei dem Vergleich verschiedener Anlagen zu berücksichtigen. Vielfach geben Hersteller nur den Wirkungsgrad in einem bestimmten Betriebspunkt an; dieser muss aber nicht unbedingt repräsentativ für das reale Betriebsverhalten des Gerätes sein.

Berechnung eines Nutzungsgrades. Ein Mehrfamilienhaus mit zehn Wohneinheiten (Stromverbrauch 48 000 kWh/a) wird mit einem kleinen Blockheizkraftwerk (BHKW) mit Strom und Wärme versorgt. Jährlich werden 12 770 Kubikmeter Erdgas (entsprechend norwegischer Qualität) im Blockheizkraftwerk eingesetzt. Das BHKW deckt 56% des Strombedarfs des Wohngebäudes. Außerdem werden 11 500 kWh in das öffentliche Netz eingespeist. Berechnen Sie mit diesen Angaben und Tabelle 1.4 den elektrischen Nutzungsgrad bezogen auf den Heizwert.

Neben dem Strom erzeugt das BHKW rund 87 000 kWh Wärme. Berechnen Sie nun auch den thermischen Nutzungsgrad. Wieviel Prozent der Wärme des Mehrfamilienhauses kann das BHKW bei einem typischen Energiestandard abdecken? Nutzen Sie hierzu Informationen aus Kap. 4 und 6.

Wie könnte man die Effizienz der Energieversorgung des Gebäudes insgesamt steigern? Welche Auswirkungen hätte dies auf die Wirtschaftlichkeit des BHKW? Warum? Welche weiteren Maßnahmen könnten Sie ergreifen, um das Gesamtsystem zu optimieren?

Infobox 1.5 Wirkungsgrad und Nutzungsgrad in der Praxis: Das Beispiel Brennwertkessel

Bei Gas-Brennwertkesseln werden sogenannte Normwirkungsgrade definiert, die bei Standardbedingungen auf einem Prüfstand gemessen werden. Typische Wirkungsgrade liegen bezogen auf den Heizwert des Erdgases bei 109% (warum der Wirkungsgrad über 100% liegen kann, erläutert Abschn. 1.4.3) oder 98% bezogen auf den Brennwert.

Im Jahresmittel – dies zeigen Praxistests – liegt der Nutzungsgrad bei lediglich 96 bzw. 86%. Eine ganze Reihe von Faktoren sind dafür verantwortlich, beispielsweise die hydraulische Einbindung, die Rücklauftemperatur (wenn sie zu hoch ist, kann der Wasserdampf im Abgas nicht kondensieren) und der Aufstellort der Heizung (innerhalb oder außerhalb der beheizten Gebäudehülle). (Siehe hierzu: Jagnow und Wolf 2005)

1.5 Energieeffizienz-Indikatoren

Energieeffizienz zu messen ist schwierig, aber erforderlich für eine Analyse der aktuellen energiepolitischen (Effizienz-) Situation und zur Bewertung der erforderlichen Maßnahmen. Es ist – anders als bei erneuerbaren Energien – nicht möglich, einen „Zähler“ oder ein „Messgerät“ an eine Effizienzeinrichtung anzuschließen. Vielmehr muss immer eine Situation „Vorher“/„Nachher“ bzw. „mit“ und „ohne Effizienz“ verglichen werden. Dafür sind Indikatoren notwendig, die aus den vorhandenen Daten auf verschiedenen Ebenen und in unterschiedlichen Sektoren die Entwicklung der Energieeffizienz angemessen darstellen.

1.5.1 Anforderungen an Energieeffizienzindikatoren

Effizienz ist das Ergebnis vielfältiger Entwicklungen. Viele Faktoren wirken sich gegenseitig verstärkend oder schwächend auf die gleiche zu messende Energiegröße aus. Betrachtet man die Entwicklung einer absoluten Energiegröße, wie beispielsweise den jährlichen deutschen Primärenergieverbrauch, so kann man eine Beschreibung des Verlaufs liefern, ohne weitere Aussagen über die Gründe dieser Dynamik zu treffen. Außerdem ergibt sich die Schwierigkeit, dass verschiedene exogene Entwicklungen, beispielsweise das Klima oder die wirtschaftlichen Aktivitäten, Einfluss auf diesen Verbrauch gehabt haben.

Indikatoren sind Hilfsmittel, die Informationen liefern, Zustände beschreiben und durch die Beschreibung sich verändernder Zustände im Zeitablauf dynamische Entwicklungen wiedergeben sollen. Indikatoren haben unterschiedliche Aufgaben (angelehnt an DIW und ISI 1997), beispielsweise die Information über den Entwicklungsstand, der Vergleich zwischen Ländern, Sektoren oder Maßnahmen (Benchmark), die Prognose oder Strategiebewertung und Evaluation.

Generell müssen Indikatoren unterschiedliche Anforderungen erfüllen (DIW und ISI 1997): Sie müssen eine hohe Erklärungskraft haben und die Komplexität des Energieversorgungssystems differenziert beschreiben. Nur auf diesem Weg ist die

Bewertung von politischen und wirtschaftlichen Zielen und Strategien hinsichtlich der gemessenen Energieeffizienz möglich. Eine energiewirtschaftliche Analyse, die auf die Messung und Prognose von Energieeffizienz ausgerichtet ist, muss somit in der Lage sein, relevante Wechselwirkungen zwischen Ursachen, Entwicklung, Struktur und Folgen des Energieverbrauchs deutlich zu machen.

Dabei sollen Energieeffizienzindikatoren einerseits ausreichend differenzierte Aussagen ermöglichen, aber andererseits eine Zerfaserung ins Detail von gesamtwirtschaftlich ausgerichteten Trends vermeiden. Wichtig ist daher auch die Verfügbarkeit von qualitativ ausreichenden, aktuellen und konsistenten Daten.

1.5.2 Bereinigung der Indikatoren

Damit Indikatoren eine Aussagekraft haben, müssen sie bereinigt werden, um Entwicklungen, die nicht im Zentrum der Analyse stehen, herauszufiltern. Geht es beispielsweise um eine Analyse des Gebäudeenergiebedarfs, so kann ein kalter Winter die Aussage der Analyse verfälschen. Eine „Bereinigung“ von Indikatoren hilft, verschiedene Einflussfaktoren auf Indikatoren voneinander zu trennen.

1.5.2.1 Temperaturbereinigung

Von besonderer Bedeutung ist die Temperaturbereinigung. Eine Temperaturbereinigung erlaubt die Umrechnung und Vergleichbarkeit des Energiebedarfs eines besonders warmen oder kalten Jahres auf das langjährige Mittel. So lag die Erhöhung der Energieproduktivität der deutschen Volkswirtschaft im Jahr 2006 bei 1,4% – temperaturbereinigt jedoch nur bei 0,8%.

Um eine Temperaturbereinigung vorzunehmen, wird in den folgenden Schritten vorgegangen. Zunächst wird der gemessene Energieverbrauch E_{Vg} in einen außen-temperaturabhängigen Anteil E_{VgH} und einen außen-temperatur-unabhängigen (beispielsweise Warmwasser-Bereitstellung) Anteil E_{VP} aufgeteilt. Letzterer kann beispielsweise in den Sommermonaten ermittelt werden.

Zur Temperaturbereinigung von E_{VgH} – oder anderen Indikatoren – werden vielfach die „Gradtage“ herangezogen. Gradtage beschreiben die Summe aller Temperaturdifferenzen zwischen Außentemperatur und Heizgrenztemperatur für alle Tage einer Heizperiode. Die Heizgrenztemperatur ist die Temperatur, unterhalb derer die Heizung angeschaltet werden muss, weil die internen Wärmegewinne des Gebäudes nicht mehr zur Erwärmung ausreichen (typisch für durchschnittliche Bestandsgebäude: 15°C).

Vereinfacht können die Gradtage eines Jahres dargestellt werden als

$$Gt = \sum_{n=1}^{365} (20^{\circ}\text{C} - t_{m,n}) \quad (1.4)$$

wobei $t_{m,n}$ das Tagesmittel der Außentemperatur eines Heiztages in °C darstellt. Für alle Tage mit einer Außentemperatur größer der Heizgrenztemperatur (z. B.

15°C) ist $t_{m,n}$ mit 20°C anzusetzen; das bedeutet, diese Tage liefern keinen Beitrag zu den Gradtagen. Die Einheit von Gradtagen sind sog. Kelvintage (Kd) bzw. °C-Tage (dies ist gleichbedeutend, da eine Temperaturdifferenz von 1 K der von 1°C entspricht).

Beispiel: Liegen an drei Tagen mittlere Außentemperaturen von 5°C, 0°C und –3°C vor, so betragen die Gradtagszahlen für diese drei Tage 58 Kd.

Die Gradtage sind also ein Maß für den erforderlichen Energieaufwand zur Beheizung eines Gebäudes in einem gegebenen Jahr und an einem gegebenen Standort. Im Internet sind diese Werte als Zeitreihen für viele Standorte in Deutschland, Österreich, Schweiz und weltweit erhältlich. Beispielsweise betragen die mittleren Gradtage eines typischen Jahres für Heidelberg 3 300 K*d/a, für Berchtesgaden 4 598 K*d/a, für Berlin 3 784 K*d/a und für Hannover 3 998 K*d/a.

Die Berechnung des bereinigten Verbrauchs E_{VH} erfolgt dann nach der Formel:

$$E_{VH} = E_{VgH, \text{Jahr } x} \cdot \frac{Gt_{\text{mittel}}}{Gt_{\text{Jahr } x}} \quad (1.5)$$

(Index mittel: Mittelwert eines Zeitraums; Jahr x: Wert im Jahr x). Der bereinigte Energieverbrauch ergibt sich dann aus der Summe von E_{VH} und E_{VP} . Nach einem analogen System können andere Indikatoren temperaturbereinigt werden.

1.5.2.2 Inflationsbereinigung

Wichtig bei der Betrachtung einer Bezugsgröße ist auch die Inflationsbereinigung. Wenn beispielsweise der Ölpreis ähnlich wie die Löhne und die Preise anderer Güter gestiegen ist, so ist zwar der Eurobetrag des Ölpreises angestiegen. Real kann aber mit einem typischen Tageslohn die gleiche Menge Öl erworben werden.

Man unterscheidet daher zwischen *nominalen* und *realen* Größen. Während nominale Größen die aktuelle Preisentwicklung beinhalten, bezeichnen reale Größen eine um die Preisentwicklung bereinigte Variable. Reale Größen filtern somit den Effekt der Preisentwicklung (Inflation oder Deflation) heraus. Dazu muss man die nominale Größe durch einen Preisindex dividieren.

Verschiedene Indizes können für die Inflationsbereinigung herangezogen werden. Ein üblicher Indikator ist der Verbraucherpreisindex, der ein Maß für die Preisentwicklung der von einem typischen Konsumenten gekauften Waren und Dienstleistungen („Warenkorb“) ist. Er wird von den jeweiligen statistischen Ämtern (in Deutschland: Destatis) ausgerechnet.

Beispiel: Der Ölpreis lag im Jahr 1980 bei 40 Dollar pro Barrel – fiel danach aber wieder deutlich ab. War das Öl damals teurer als heute? Recherchieren Sie dazu den Verbraucherpreisindex.

1.5.3 Gesamtwirtschaftliche Indikatoren

Makroökonomische Indikatoren nähern sich der Energieeffizienz auf volkswirtschaftlichem Wege. Eine besonders wichtige Gruppe von Energieeffizienzindikatoren sind die *Energieintensitäten*. Diese sind eine Relationsgröße, die den Energieeinsatz in Verhältnis zu einer wirtschaftlichen oder gesellschaftlichen Bezugsgröße setzen. Es wird also ein Quotient aus dem Energieverbrauch (gemessen in Energieeinheiten) und einem wirtschaftlichen Indikator (gemessen in Geldeinheiten) geschaffen. Als *Energieproduktivität* bezeichnet man den Kehrwert der Intensität (Abb. 1.9).

Von besonderer Bedeutung ist eine Bestimmung einer Maßzahl für die Energieintensität auf gesamtwirtschaftlicher Ebene. Hierzu wird der Primärenergiebedarf oft auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP) bezogen. Dieses bezeichnet den Mehrwert aller für den Endverbrauch hergestellten Güter und Dienstleistungen, die in einem Land zu einem bestimmten Zeitabschnitt hergestellt werden. Das BIP berechnet sich als Summe aus dem Konsum der Haushalte, den Investitionen der Firmen, der Staatsausgaben und der Nettoexporte. In Deutschland lag die Primärenergieintensität im Jahr 2008 bei 6,168 Gigajoule (GJ) je Tausend Euro Bruttoinlandsprodukt (in den Preisen von 2000) (BMW 2009).

Zeitreihen geben darüber hinaus Auskunft über die Entwicklung des Effizienzindikators. Die Steigerungsraten bei der Verbesserung der Energieintensität sind seit Anfang der neunziger Jahre in Deutschland, der EU und der OECD deutlich gesunken. Gerade in Deutschland sind die Raten der Verbesserung der Energieintensität

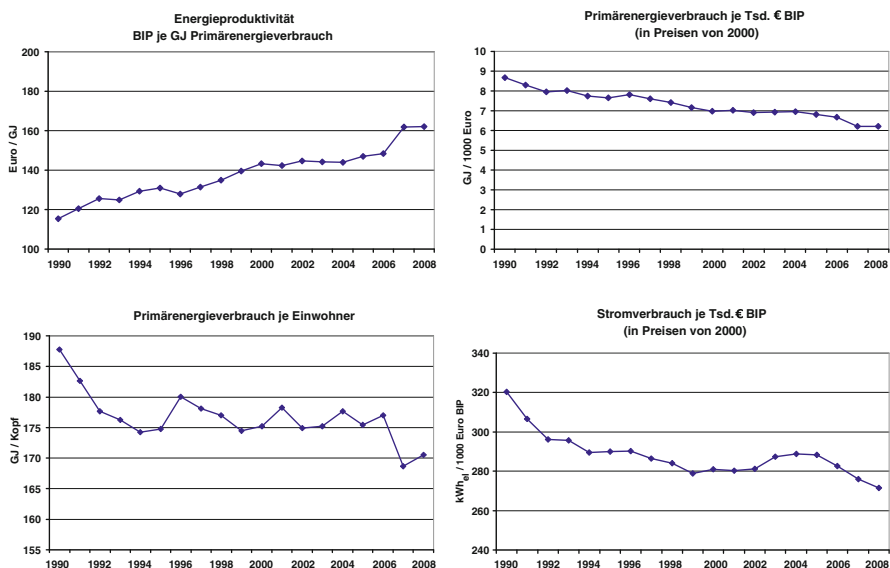


Abb. 1.9 Ausgewählte makroökonomische Indikatoren der Energieeffizienz (basierend auf Daten in BMW 2009)

seit 2000 fast stagniert (nachdem sie schon von 2,1% in der ersten Hälfte auf 0,9% in der zweiten Hälfte der neunziger Jahre gefallen waren). Dennoch liegt Deutschland in der EU auf Platz vier und somit weit unter dem Durchschnitt der EU 15 und der EU 25 (SRU 2008:107).

In den vergangenen Jahren ist die Energieproduktivität in Deutschland angestiegen (siehe Abb. 1.9). Das *Ziel der Bundesregierung*, die Energieproduktivität in Deutschland zu verdoppeln (auf 230 €/GJ in Abb. 1.9), ist allerdings noch lange nicht erreicht. In den letzten Jahren hat sich die Energieproduktivität bis 2009 um rund 41 Prozent gesteigert – gemittelt entspricht dies einer jährlichen Steigerung um 1,8 Prozent. Damit das Ziel der Verdopplung der Energieproduktivität gehalten werden kann, reicht dies nicht aus: knapp 3 Prozent jährlicher Produktivitätssteigerung sind hierfür erforderlich. Die steigende Produktivität geht vor allem darauf zurück, dass das preisbereinigte BIP seit 1990 um 26% gestiegen ist. Der Primärenergiebedarf ist in diesem Zeitraum um 11% zurückgegangen.

Infobox 1.6 Wirtschaftskrise und Energieeffizienz (basierend auf Lehr und Lutz 2009)

Welchen Einfluss hat die Wirtschafts- und Finanzkrise der Jahre 2008/2009 auf die Energieeffizienz? Hierbei sind Struktureffekte, Energiepreiseffekte, Investitionseffekte, Niveaueffekte und Wirkungen staatlicher Konjunkturprogramme zu unterscheiden, die teilweise wechselseitig voneinander abhängen.

Kurzfristig geht die energieintensive Investitionsgüterproduktion deutlich stärker zurück als die weniger energieintensive Konsumgüterherstellung. Zugleich ist der private Konsum von der Wirtschaftskrise bisher kaum betroffen. Entsprechend kommt es zu einem *Struktureffekt* weg von energieintensiver Produktion, der für sich dazu führt, dass die Energienachfrage stärker zurückgeht als das Bruttoinlandsprodukt. Dieser Struktureffekt verbessert kurzfristig die Energieeffizienz. Durch die Unterauslastung der Produktion etwa in der Stahlindustrie verschlechtert sich umgekehrt die Energieeffizienz.

Die Wirtschaftskrise hat zu einem starken Einbruch der *Energiepreise* wie der CO₂-Zertifikatspreise geführt. Bei Erdgas tritt der Effekt aufgrund der Ölpreisbindung um etwa 6 Monate verzögert auf.

Viel wichtiger ist der *langfristige* Wirkungszusammenhang. Die Investitionstätigkeit der Unternehmen wie der Kauf langlebiger Konsumgüter der Haushalte wird durch die Wirtschaftskrise reduziert. Da neue Anlagen und Geräte in der Regel deutlich energieeffizienter sind als Vorgängerprodukte, senkt der *Investitionseffekt* vor allem langfristig die Energieeffizienz. Verstärkt wird diese Wirkung durch die niedrigen Energiepreise, die weniger energieeffiziente Produkte relativ günstiger werden lassen. Als Folge der Finanzkrise sind dauerhaft verschlechterte Investitionsbedingungen zu befürchten. Bestandteile staatlicher *Konjunkturprogramme* wie die Ausweitung des Gebäudesanierungsprogramms in Deutschland („Effizient sanieren“) und die Nationale Klimaschutzinitiative erhöhen dagegen langfristig die Energieeffizienz. Zusammengefasst dürften sich die kurzfristigen Effekte weitgehend ausgleichen. Mit der Wirtschaftsleistung wird in jedem Fall der Energieverbrauch kurzfristig deutlich sinken.

Infobox 1.6 (Fortsetzung)

Der Energieverbrauch liegt dadurch höher. Dieser Energiepreiseffekt reduziert die Energieeffizienz kurzfristig (an der Tankstelle). In der Statistik der Energiebilanzen wird dieser Effekt durch Lagerhaltung (verstärkte Nachfrage nach Heizöl zum Jahresbeginn 2009) allerdings überzeichnet.

Wenn sich der Struktureffekt längerfristig wieder reduziert, wird der negative Investitionseffekt stärker sein als die positive Wirkung der staatlichen Konjunkturmaßnahmen. Die Energieeffizienz wird durch die Wirtschaftskrise dauerhaft niedriger sein. Diese Einschätzung wird z.B. auch von der Internationalen Energieagentur geteilt.

Statistische Artefakte: Bei der Berechnung der Energieproduktivität ist ein statistisches Artefakt zu beachten: In der Energiebilanz wird bei der Erzeugung von Strom aus Energieträgern, denen kein Heizwert zugeordnet werden kann (beispielsweise Wind- und Wasserkraft oder Fotovoltaik), ein Wirkungsgrad von 100% angesetzt. Welche Auswirkungen hat dann eine hohe Durchdringung von erneuerbaren Energien auf die Energieproduktivität?

Sektorale Indikatoren. Zur besseren Analyse der Gründe für die Entwicklungen einer gesamtwirtschaftlichen Effizienzentwicklung ist eine weitere Disaggregation auf einzelne Sektoren oder sogar Subsektoren hilfreich. Man unterscheidet zwischen den Sektoren der Haushalte, GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) und der Industrie, die eine grundsätzlich unterschiedliche Struktur beim Energieverbrauch und somit auch sehr verschiedene Einsparmöglichkeiten haben.

Eine Abgrenzung der einzelnen Sektoren kann sich als schwierig heraus stellen: So ist bei der Berechnung der Endenergie, zum Beispiel dem Treibstoffverbrauch des Straßenverkehrs, schwer fassbar, ob der Verkehr auf unternehmerische Tätigkeiten zurückzuführen ist oder ob er den Haushalten zugerechnet werden sollte. Auf sektoraler Ebene kann zum Beispiel der oben dargestellte Primärenergieverbrauch je Einheit Bruttowertschöpfung differenziert nach Produktionsbereichen betrachtet werden (sektorale Energieintensität). Des weiteren können Energieintensitätsgrößen wie der temperaturbereinigte Energieverbrauch auf disaggregierter Ebene gemessen werden.

Abbildung 1.10 stellt beispielhaft die Entwicklung im industriellen Sektor dar. Die Energieintensität sinkt im allgemeinen, insbesondere in den Sektoren Chemie und Maschinenbau. Einzelne Sektoren, wie beispielsweise die Papier- und Zellstoffindustrie, weisen hingegen steigende Energieintensitäten auf, während die Effizienz im besonders energieverbrauchsintensiven Eisen- und Stahlsektor starken Schwankungen unterliegt.

1.5.4 Technische Indikatoren

Im Gegensatz zu makroökonomischen Indikatoren bewerten technische Indikatoren Energieeffizienz im Sinne der Entwicklung einzelner Technologien. Energieeffizienz wird wie auch bei gesamtwirtschaftlichen Energieintensitäten als Relationsgrös-

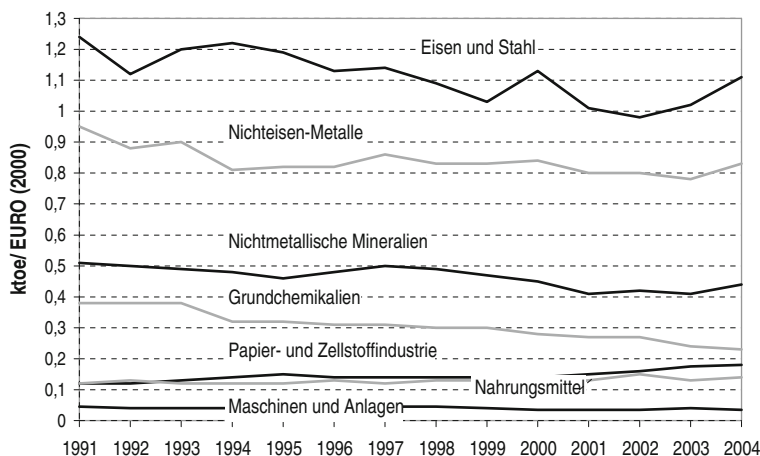


Abb. 1.10 Energieintensität des industriellen Sektors (Eichhammer et al. 2008) (ktoe: Kilotonnen Öläquivalent)

se betrachtet, bei der man versucht, die Inputgröße in Verhältnis zu einem Output zu setzen. Der Unterschied zwischen makroökonomischen und technischen Indikatoren liegt am Bezug des technischen Indikators auf eine Technologie (z. B. Dampfkraftwerke) oder Technologiegruppe (z. B. Leuchtmittel oder Pkw).

Technische Indikatoren beschreiben oftmals größere Kohorten von Systemen. Sie setzen sich dann zusammen aus den Eigenschaften der Einzelanlagen und den Anteilen dieser Anlagen an der Gesamtflotte der Systeme (Abb. 1.11).

Die Eigenschaften des einzelnen Systems wird wiederum bestimmt von den Wirkungsgraden der einzelnen Aggregate. In den Wirkungsgrad einer Druckluftanlage beispielsweise gehen der Wirkungsgrad des Motors, aber auch der Wirkungsgrad der mechanischen Teile und der Druckluftverteilung ein.

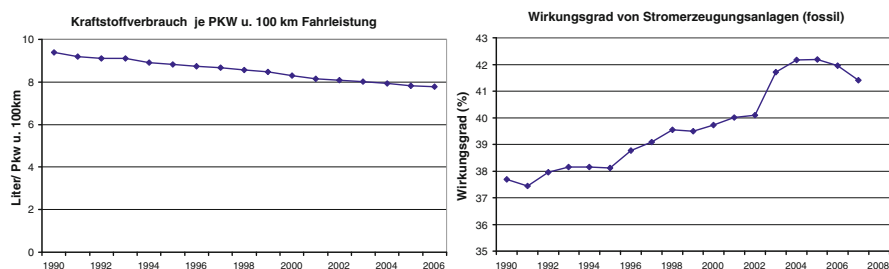


Abb. 1.11 Ausgewählte technische Indikatoren der Energieeffizienz (basierend auf Daten in BMWi 2009)

Effizienz eines Pkw: Beschreiben Sie ausgehend von Abb. 1.11, wie sich die Energieeffizienz der Pkw entwickelt hat. Welche Faktoren gehen in den Wert ein? Welchen Einfluss haben kürzliche Entwicklungen (z. B. Ölpreis, Abwrackprämie, etc.) auf diese Entwicklung? Überprüfen Sie Ihre Vermutung anhand der aktuellsten zur Verfügung stehenden Zahlen. Wie würden Sie diese Kurve bis 2020 extrapolieren?

Im sogenannten „Meseberg-Papier“ wird eine Effizienz-Strategie für Pkw definiert. Versetzen Sie sich in die Lage eines Referenten des Verkehrsministeriums, der diese Strategie erarbeiten soll. Was würden Sie vorschlagen?