

1 Einführung

$$E = m \cdot c^2$$

ALBERT EINSTEIN

Mit dem Begriff **Energie** (griech. Wirksamkeit) kann intuitiv jeder etwas anfangen. Schließlich ist Energie untrennbar mit Leben im weitesten Sinne verbunden, da ohne Energie kein Leben möglich ist. Im Alltag verbindet man mit diesem Wort: Tatkraft, Wirkungen erzeugen, Durchhaltevermögen, Schwung usw. Aber auch im naturwissenschaftlich-technischen Zusammenhang hat jeder eine Vorstellung von dem, was mit Energie gemeint ist: Zum Heizen braucht man Energie, zum Autofahren, zum Herstellen von Gütern, zum Hochheben von Lasten usw.

Trotz dieses anschaulichen Zugangs handelt es sich bei Energie um einen außerordentlich vielschichtigen Begriff. Das Thema Energie lässt sich unter den verschiedensten Aspekten betrachten, die aber letztlich alle zusammenhängen:



Abb. 1.1 ► Ein Blitz symbolisiert eine große Menge Energie, die zerstörerisch sein kann. Trotzdem benötigen wir Energie zum (Über-) Leben.

Zunächst sind da die **physikalischen Grundlagen** des Energiebegriffs zu nennen. Es gibt Naturgesetze, die das Umwandeln von Energie bestimmen. Energie ist sogar zu einem zentralen Begriff der Physik geworden. Man denke nur an die fundamentale Bedeutung des bekannten **Energieerhaltungssatzes**.

Energie spielt auch in der **Technik** eine herausragende Rolle. Viele Ingenieure beschäftigen sich mit der Nutzbarmachung von Energie in den unterschiedlichsten Bereichen und versuchen, die Effizienz der Energienutzung mit technischen Mitteln zu verbessern sowie neue Energietechniken zu entwickeln und marktreif zu machen.

Natürlich hat die Energie darüber hinaus eine sehr große **ökonomische Bedeutung**. Die Energiewirtschaft verzeichnet Umsätze und tätigt Investitionen, die über denen vieler anderer Industriezweige liegen. Sie stellt national und international einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor dar. Denn ohne ausreichende Energieversorgung wäre der hohe materielle Lebensstandard in den Industrieländern nicht möglich.



Abb. 1.2 ► Das „Raumschiff Erde“ hat nur endliche Energievorräte wie Kohle und Öl an Bord, erhält jedoch eine kontinuierliche Energiezufuhr von der Sonne, ohne die es kein (Über-) Leben gäbe.

Neben diesen technisch-wirtschaftlichen Betrachtungen sind die **politischen und gesellschaftlichen Bedeutungen** der Energie unübersehbar. Ein hochindustrialisiertes und zivilisiertes Land wie

als die Hälfte der im Dampf steckenden Wärmeenergie ungenutzt an die Umgebung geht. Da ein Wärmekraftwerk aus einer Kette von Energiewandlern besteht, ist der Gesamtwirkungsgrad eines Wärmekraftwerkes noch geringer: Er liegt in der Regel unter 40 %, meist zwischen 35 % und 38 %. Diese naturgesetzliche Beschränkung könne auch neue Techniken nicht entscheidend verbessern, solange Wärmeenergie als Zwischenstufe benutzt wird. Mit modernen Gasturbinen-/Kombikraftwerken, bei denen Gas- und Dampfturbinen (GuD) kombiniert sind, kommt man dem Carnot'schen Wirkungsgrad näher und erreicht inzwischen über 50 %.

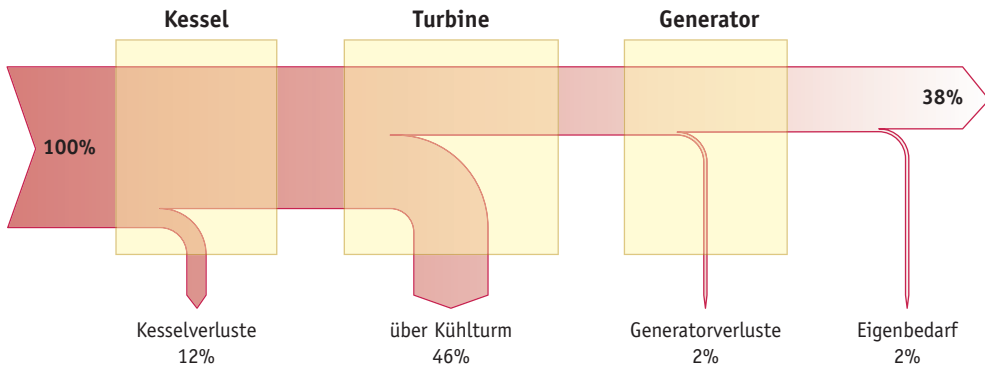


Abb. 4.25 ► Energieflussdiagramm eines Wärmekraftwerkes

Rechnet man noch Leitungsverluste ($< 10\%$) beim Stromtransport sowie Umwandlungsverluste beim Endverbraucher hinzu, so zeigt sich, dass in der Regel weniger als 30 % der eingesetzten Primärenergie (chemische Energie der Kohle oder Kernenergie der Kernbrennstoffe) als Nutzenergie bei dem Verbraucher ankommen.

Die EVU betreiben Kohlekraftwerke unterschiedlicher Leistung – von etwa 200 MW bis 800 MW –, wobei sich diese Leistungsangaben auf die abgegebene elektrische Leistung beziehen. Betrachtet man ein 500-MW-Kohlekraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 38 %, so muss diesem Kraftwerk eine Leistung in Form von chemischer Energie der Kohle von 1300 MW zugeführt werden, während etwa 800 MW als Abwärme an die Umgebung abgegeben werden. Abbildung 4.26 zeigt den schematischen Aufbau eines Kohlekraftwerkes.

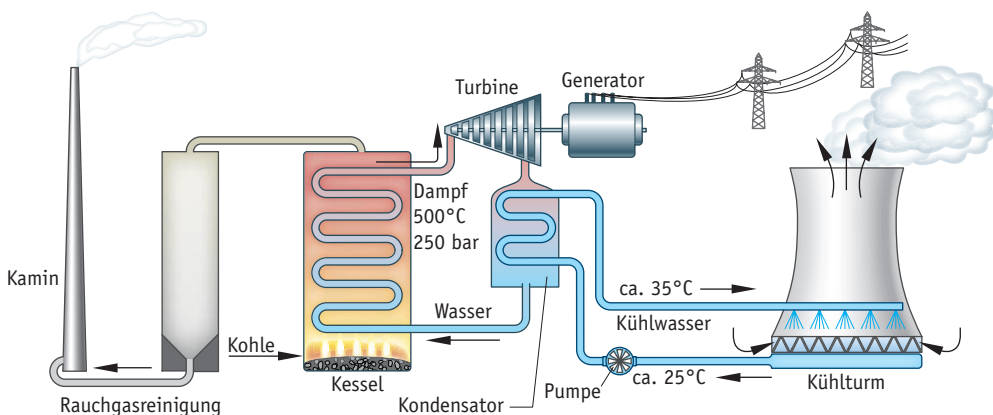


Abb. 4.26 ► Schematische Darstellung eines Kohlekraftwerkes

5 Energie und Umwelt

Jede großtechnische Energiewandlungskette, ob fossil oder nuklear, entnimmt der Erdkruste **erschöpfliche Energierohstoffe** (Kohlen, Erdöl, Erdgas, Natururan) und wandelt sie in mehreren Stufen bei relativ großen Verlusten in **Nutzenergie** um. Während die Energie die Kette durchläuft, nimmt ihr Exergieanteil ständig ab, der Anergieanteil zu. Da die oben genannten Energieträger stoffgebunden sind, fallen bei den Umwandlungen zudem beträchtliche Mengen an Rest- und Schadstoffen an. Das Freisetzen dieser Stoffe an die Umwelt (**Emission**) führt zu beträchtlichen Umweltbelastungen durch die gegenwärtigen Energieversorgungssysteme.



Abb. 5.1 ► Rauchgas-Emissionen eines fossilen Kraftwerks

5.1 Überblick

Einen Überblick über die wichtigsten Emissionen der Energiewandlungssysteme gibt die nachfolgende Abbildung 5.2:

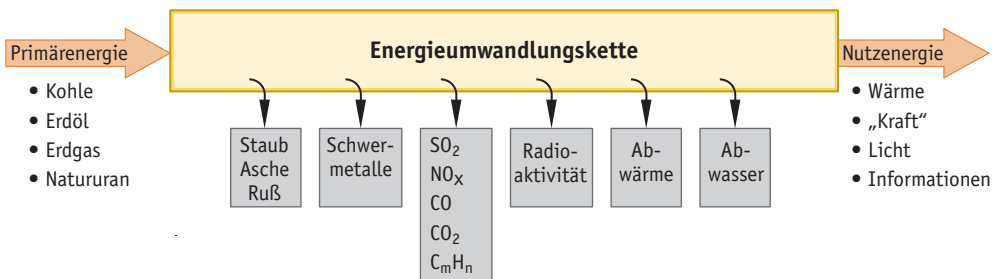


Abb. 5.2 ► Wichtige Emissionen von Energiewandlungssystemen

Die emittierten Stoffe reagieren zum Teil mit Stoffen aus der Umwelt, z. B. mit dem Luftsauerstoff, und werden dadurch umgewandelt. Es entstehen komplexe, teilweise noch wenig erforschte Umwandlungsketten. Diese Schadstoffe wirken schädlich auf:

- Menschen → Atemwegserkrankungen, Krebs
- Tiere und Pflanzen → Fischsterben in verschmutzten oder sauren Gewässern, Waldsterben
- Sachgüter → Schäden an (historischen) Bauwerken

CO₂. Lange Zeit wurde dieses Gas für unbedenklich gehalten, da es nicht toxisch⁶ und für das Wachstum der Pflanzen sogar nötig ist. Inzwischen weiß man aber, dass es – bei entsprechender Konzentration in der Atmosphäre – entscheidend zur Veränderung des Weltklimas beiträgt.

5.3.1 Der natürliche Treibhauseffekt

Die auf die Erde einfallenden Sonnenstrahlen bestehen aus elektromagnetischen Wellen. Die kurzwelligen Sonnenstrahlen - ihre größte Strahlungsintensität liegt im Bereich des sichtbaren Lichtes - werden von der Atmosphäre weitgehend durchgelassen und erwärmen die Erdoberfläche. Daraufhin werden von der Erde längerwellige Wärmestrahlen – ihre Wellenlänge liegt im unsichtbaren **Infrarotbereich** – abgegeben. Die elektromagnetischen Wellen des Infrarotbereiches können aber die Atmosphäre nicht wieder ungehindert verlassen; vielmehr werden sie von **Spurengasen**, zu denen auch das CO₂ gehört, absorbiert⁷. Zwar strahlen die Spurengase die absorbierte Energie wieder ab, jedoch erfolgt das ungerichtet und somit teilweise wieder zur Erde zurück.

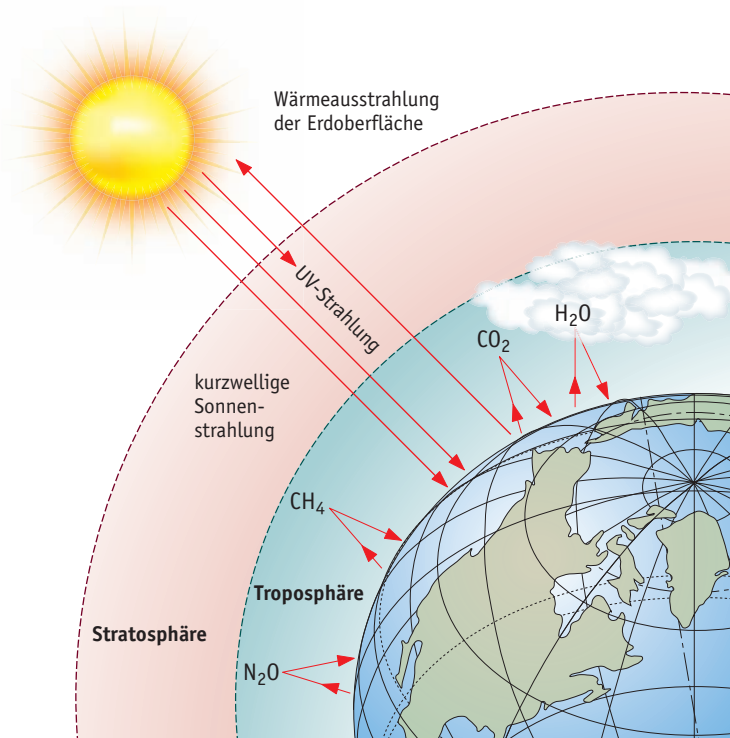


Abb. 5.9 ► Schematische Darstellung des Treibhauseffektes

Die Spurengase haben also die gleiche Wirkung wie die Glasscheiben eines Treibhauses: Einerseits lassen sie das von außen einfallende kurzwellige Sonnenlicht durch, andererseits unterbinden sie das Abstrahlen der langwelligen Wärmestrahlung aus dem Inneren des Treibhauses.

6 toxisch = giftig

7 Aus der Physik oder Chemie weiß man, dass Gas-Atome oder -Moleküle elektromagnetische Wellen bestimmter Wellenlängen absorbieren. CO₂ hat die Eigenschaft, im Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums liegende Wellen zu absorbieren. Der Physiker spricht in diesem Zusammenhang davon, dass die Spurengase, so auch CO₂, *Absorptionsbanden* im Infrarotbereich des Spektrums haben.

6 Erneuerbare Energien

Dass die Menschheit ihr Energieversorgungssystem einseitig auf die fossilen Energieträger ausgerichtet hat, wurde bereits mehrfach betont. Deutschland hat zwar einen **Energiemix**¹, allerdings nach wie hauptsächlich bestehend aus den drei fossilen Energiequellen Kohle, Öl und Erdgas. Andere Energieträger haben bislang nur untergeordnete Bedeutung. Daraus ergeben sich zwei zentrale Probleme im Hinblick auf eine zukunftssträchtige, umweltgerechte Energieversorgung: Die fossilen Energieträger sind in absehbarer Zeit erschöpft, und was derzeit noch drängender ist, sie schädigen die Umwelt dermaßen, dass die natürlichen Lebensgrundlagen der Menschheit in Gefahr sind (vgl. Kapitel 5). Wenn die Erde ein bewohnbarer Ort für Menschen bleiben soll, *muss* also eine **Energiewende** her.

Die aber ist nur durch drastisch verstärkte Nutzung **erneuerbarer Energien** herbeizuführen.

Als erneuerbare oder regenerative Energiequellen bezeichnet man Energiequellen, die sich auf natürliche Weise selbständig und unabhängig von ihrer Nutzung erneuern.²



Abb. 6.1 ► Montage einer Windkraftanlage im Windpark Alpha Ventus

- 1 Unter *Energiemix* versteht man die Verteilung der Energieversorgung auf verschiedene Energiequellen.
- 2 Die erneuerbaren Energien (EE) werden zunehmend als „grüne Energien“ oder – noch poetischer – als „Energien des Himmels“ bezeichnet. Entsprechend sind die fossilen Energien die „Energien der Hölle“.

Konzentrierende Kollektoranlagen

Während mit den oben beschriebenen Sonnenkollektoren in Deutschland Temperaturen bis knapp 100 °C erreicht werden können, sind mit Systemen, die das Sonnenlicht fokussieren, noch höhere Temperaturen zu erzielen. Da für solche Anlagen direkt eingestrahktes Sonnenlicht erforderlich ist, sind sie nur in Gegenden mit hoher Direkteinstrahlung sinnvoll. Zur Fokussierung sind verschiedene Vorrichtungen denkbar und in Pilotanlagen teilweise auch schon realisiert worden. Allen gemeinsam ist, dass die einfallende Direktstrahlung über große Reflektorflächen auf eine kleine Absorberfläche konzentriert wird. Von den verschiedenen Varianten wird hier nur die Parabolrinnenanlage näher betrachtet.

Parabolrinnenanlagen bestehen, wie Abbildung 6.10 zeigt, aus langgestreckten Spiegelrinnen mit parabolischem Querschnitt. Damit wird die einfallende Direktstrahlung auf die Brennnlinie fokussiert, wo sich ein Absorberrohr befindet, durch das ein Wärmeträger strömt. Auf diese Weise kann entweder direkt oder über einen Wärmetauscher eine Turbine angetrieben werden, so dass während der Sonnenstunden auf konventionelle Art Strom erzeugt wird. Das ist besonders zweckmäßig, wenn während der heißen Tageszeit ein hoher Strombedarf abzudecken ist, etwa für den Betrieb von Klimaanlage. Die Parabolspiegel müssen dem Sonnenstand nachgeführt werden, damit möglichst hohe Einstrahlwerte erzielt werden. Eine solche *Solarfarm* wird unter anderem in Almeria (Spanien) als Demonstrationsanlage betrieben.

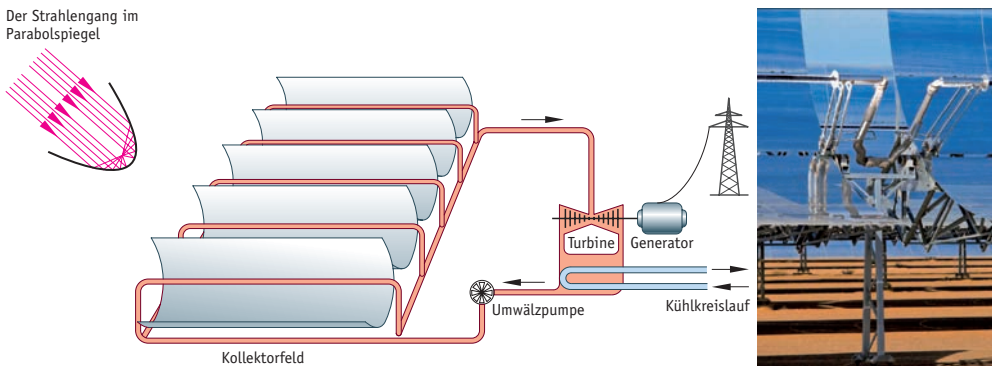


Abb. 6.10 ► Solarkraftwerk mit Parabolrinnenanlage

6.2.2 Photovoltaische Nutzung der Sonnenenergie

Die technisch anspruchsvollste Nutzung der Sonnenenergie besteht darin, die einfallende Lichtenergie direkt – also ohne Wärme als Zwischenstufe – in elektrische Energie umzuwandeln. Diese Umwandlungstechnik bezeichnet man als **Photovoltaik**. Realisiert wird die Umwandlung mit Hilfe von **Solarzellen**. Das sind in der Regel aus Silicium bestehende Halbleiterbauelemente.

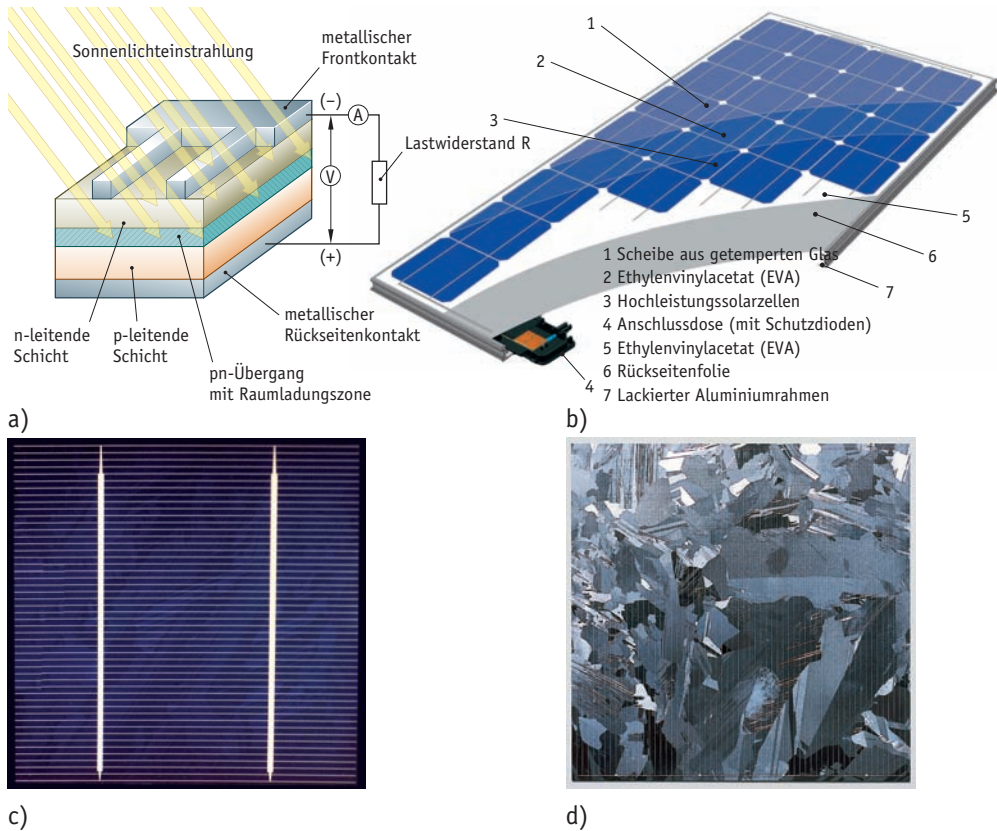


Abb. 6.11 ▶ Schematischer Aufbau einer Solarzelle (a) und eines Photovoltaik-Moduls (b) sowie mono-kristalline (c) und polykristalline (d) Solarzelle

Um Aufbau und Funktionsweise von Solarzellen beschreiben zu können, sind einige Grundbegriffe aus der **Halbleitertechnik** erforderlich: Eine Solarzelle besteht, wie Abbildung 6.11a zeigt, im Wesentlichen aus zwei unterschiedlich dotierten⁷, dünnen Halbleiterschichten (p- und n-dotierte Schicht⁸). Die Grenze zwischen beiden Schichten, der **pn-Übergang**, spielt die entscheidende Rolle bei dem **photovoltaischen Effekt**. Denn dort ist ein inneres elektrisches Feld ausgebildet, das ein Spannungsgefälle bewirkt, und zwar so, dass auf der n-Seite der Pluspol und auf der p-Seite der Minuspol dieser inneren Spannung liegt. Im Bereich des pn-Überganges bildet sich eine an freien Ladungsträgern verarmte **Sperrschicht** aus. Trifft nun ein Lichtstrahl mit ausreichender Energie auf ein Bindungselektron in der Sperrschicht, so wird das Elektron aus der Bindung herausgelöst; es entsteht ein **Elektron-/Loch-Paar**, also ein freier negativer und ein freier positiver Ladungsträger. Aufgrund des Spannungsgefälles wird das Elektron zur positiven Seite der Spannung, in das n-Gebiet, und das Loch in das p-Gebiet gezogen. Somit findet eine **Ladungstrennung** statt – das Kennzeichen einer **Spannungsquelle**. Wird die Solarzelle

⁷ In das Kristallgitter dotierter Halbleiter sind Fremdatome eingebaut.

⁸ Grob gesagt: In der n-Schicht sind frei bewegliche negative Ladungsträger (*Elektronen*) vorhanden, in der p-Schicht frei bewegliche positive Ladungsträger (*Löcher*). Löcher verhalten sich wie frei bewegliche positive Ladungsträger, tatsächlich aber sind es fehlende Elektronen in einer ursprünglich neutralen Bindung im Kristallgitter.

6.2.3 Wüstenstrom aus der Sahara für Europa

Neben unzähligen kleinen Einzelprojekten ist nun auch ein echtes Großprojekt namens „**Desertec**“ in Planung. Ein Betreiberkonsortium namhafter Konzerne will erneuerbare Energien für Europa und darüber hinaus nutzbar machen. In diesem gigantischen Projekt, das sich über ganz Europa, Nordafrika (Sahararegion) und den Nahen Osten erstreckt, sollen die regenerativen Energien dort angezapft werden, wo das entsprechende Angebot herrscht. So werden Solarkraftwerke im Sonnengürtel der Sahara und des Nahen Ostens errichtet, Windkraftparks an und vor den Küsten usw. Die so gewonnene Energie wird dann in einem riesigen Netz dorthin transportiert, wo die entsprechende Nachfrage besteht, aber vor allem nach Europa.

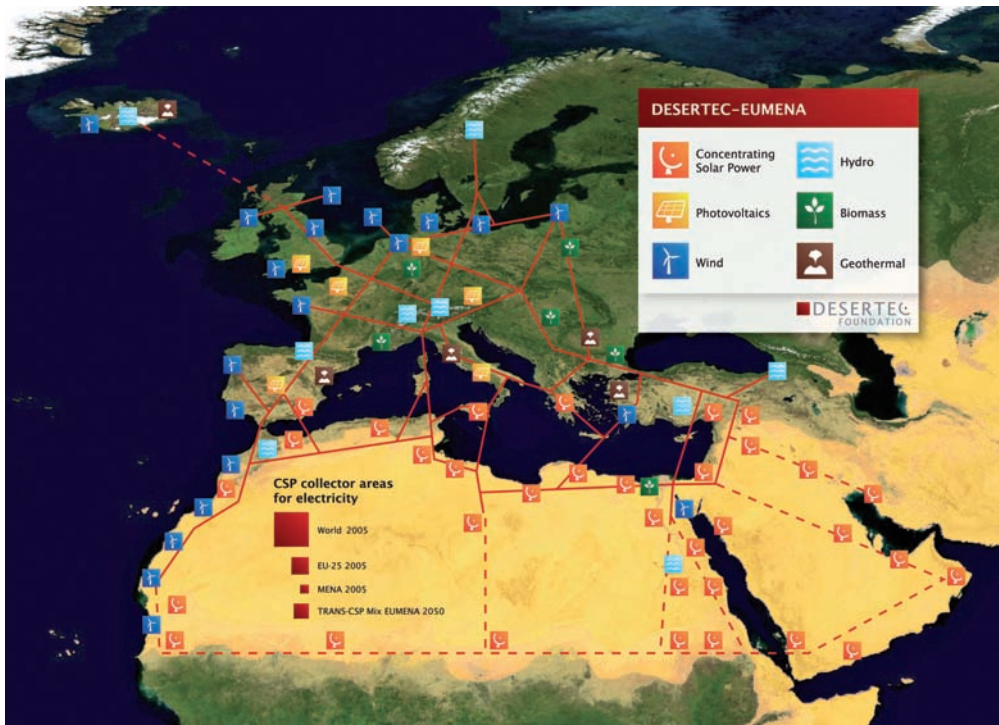


Abb. 6.16 ► Das Kontinente umfassende Desertec-Konzept

Ziel ist eine langfristige CO₂-freie Energieerzeugung im großtechnischen Maßstab mit einer Vielzahl von hauptsächlich solaren Kraftwerken und einem Stromnetz mit extremen Ausmaßen. Nicht nur die technischen Herausforderungen sind hoch, sondern auch die politischen und finanziellen Dimensionen.

6.2.4 Solar-Wasserstoff-Technik

Die regenerativen Energiequellen bieten ein zeitlich stark schwankendes (= **intermittierendes**) Energieangebot, das in der Regel nicht zeitgleich mit der Energienachfrage auftritt. Bei der Nutzung regenerativer Energie besteht also das Problem der **Energiespeicherung**. Bei den herkömmlichen Energiequellen spielt dieser Aspekt keine so zentrale Rolle. Kohle beispielsweise wird einfach auf Halde geschüttet. Zudem liegen die Angebots- und Nachfragestandorte regenerativer Energien oft weit auseinander (Sonnenenergieangebot in der Sahara – Nachfrage nach Solarstrom in Deutschland), weshalb sich auch die Frage nach dem Energietransport stellt.



Abb. 7.11 ► Fliegen ist die schnellste, aber auch energieintensivste Art des Reisens



Abb. 7.12 ► LKW sind die Lastesel des immer weiter anwachsenden Güterverkehrs



Abb. 7.13 ► Die energieeffizienteste Art des modernen Reisens: der ICE



Abb. 7.14 ► Mobilität mit Sonnenenergie: der SolarRacer

Wie im Verkehrsbereich Energie eingespart und somit auch Schadstoffe vermieden werden können, wird ersichtlich, wenn man die **Energieintensität** der verschiedenen Transportmittel miteinander vergleicht: Bei dem Personentransport im Inland ist per Flugzeug eine Energie von 3000 kJ pro Person und Kilometer (= Personenkilometer, Pkm) erforderlich.

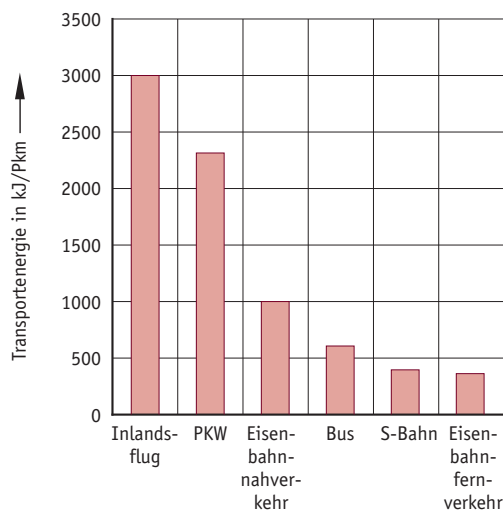


Abb. 7.15 ► Die Energieintensität der verschiedenen Personentransportmittel pro Personenkilometer (Pkm)

Technik als **Verluste**. Als Gütemaß für eine Energiewandlung definiert man den **Wirkungsgrad** η (Eta)⁸, sprich den Quotienten von **abgegebener Energie** E_{ab} und **zugeführter Energie** E_{zu} :

$$\eta = \frac{E_{ab}}{E_{zu}}$$

Da stets $E_{ab} < E_{zu}$, ist η eine dimensionslose Zahl kleiner als 1; $\eta = 1$ ist der theoretische Grenzfall, dem manche reale Energiewandler recht nahekommen (vgl. Abbildung 1.5). Häufig gibt man den Wirkungsgrad in Prozent an, dann ist der mit obiger Formel berechnete Zahlenwert mit 100 % zu multiplizieren. Ein Wirkungsgrad von 0,8 bzw. 80 % bedeutet, dass die dem Energiewandler zugeführte Energie zu 80 % in die gewünschte Energieform umgewandelt wird und 20 % Verluste auftreten. In der Abbildung sind typische Werte für die Wirkungsgrade einiger wichtiger Energiewandler angegeben. Es zeigt sich: Bei Energiewandlern mit Wärme als zugeführter Energie sind die Wirkungsgrade vergleichsweise niedrig. Der Grund dafür wird in Kapitel 3 erläutert.

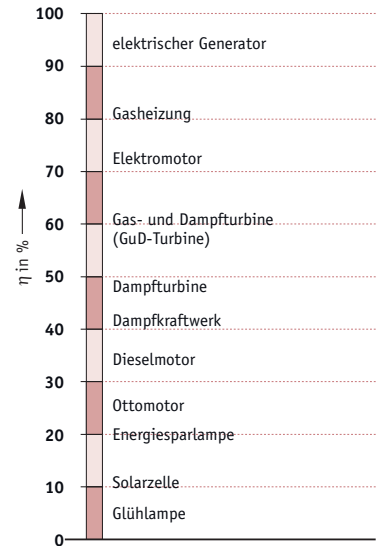


Abb. 1.5 ► Typische Wirkungsgrade einiger Energiewandler

1.1.4 Energiewandlungskette

Bei der technischen Energieversorgung sind in der Regel mehrere Energieumwandlungen hintereinander erforderlich. Auf diese Weise entsteht eine **Energiewandlungskette**. Abbildung 1.6 zeigt die wichtigsten Wandlungen bei der Stromerzeugung in einem Kohlekraftwerk.

Bei der in der Abbildung dargestellten Energiewandlungskette wird zunächst die chemische Energie der Kohle mit Hilfe des Energiewandlers ‚Kessel und Feuerung‘ in Wärmeenergie des Wasserdampfes umgewandelt. Der nächste Energiewandler, die Dampfturbine, wandelt wiederum diese thermische Energie in kinetische Energie der rotierenden Turbinenwelle der Turbine um. An die Turbinenwelle ist der Generator gekoppelt, der schließlich die kinetische Energie der sich drehenden Welle in elektrische Energie umwandelt.

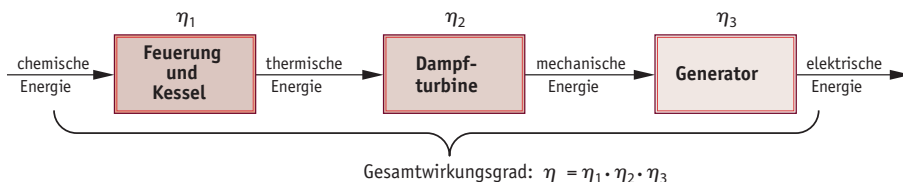


Abb. 1.6 ► Energiewandlungskette Kohlekraftwerk

Um herzuleiten, wie sich der **Gesamtwirkungsgrad** einer Energiewandlungskette aus den Einzelwirkungsgraden zusammensetzt, wird noch einmal auf Abbildung 1.6 und die dortigen Bezeichnungen Bezug genommen: Die Einzelwirkungsgrade der Teilsysteme werden der Reihe nach mit η_1 , η_2 und η_3 bezeichnet, so dass gilt: $\eta_1 = E_{\text{therm}}/E_{\text{chem}}$, $\eta_2 = E_{\text{kin}}/E_{\text{therm}}$ und $\eta_3 = E_{\text{elektr}}/E_{\text{kin}}$. Für den Gesamtwirkungsgrad gilt laut Definition: $\eta = E_{\text{elektr}}/E_{\text{chem}}$. Und eben diesen Quotienten

⁸ Eselsbrücke: „Eta brauch’ ich ab und zu.“

erhält man, wenn man die drei Einzelwirkungsgrade miteinander multipliziert, da sich dann sämtliche „Zwischenenergien“ herauskürzen. Deshalb berechnet sich der Gesamtwirkungsgrad einer Kette als das Produkt aus den Einzelwirkungsgraden. Als Formel:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots$$

Da jeder Einzelwirkungsgrad < 1 , bedeutet das: Der Gesamtwirkungsgrad ist kleiner als der kleinste Einzelwirkungsgrad.

Beispiel

Für die in Abbildung 1.6 dargestellte Energiewandlungskette Kohlekraftwerk ergibt sich mit den Einzelwirkungsgraden $\eta_1 = 0,85$ (Kessel und Feuerung), $\eta_2 = 0,45$ (Dampfturbine) und $\eta_3 = 0,98$ (Generator) ein Gesamtwirkungsgrad von $\eta = 0,37$. Das heißt aber, dass bei 100 Tonnen verfeuerter Kohle nur 37 Tonnen in Form von elektrischem Strom das Kraftwerk verlassen. Somit geht der Energieinhalt von 73 Tonnen Kohle bei der Umwandlung „verloren“!

1.1.5 Energieversorgungssysteme

Um für den Endverbraucher Energiedienstleistungen wie geheizte Räume, Licht, Transport von Menschen und Gütern und Kommunikation anbieten zu können, stehen hoch entwickelte Energieversorgungssysteme zur Verfügung. Sie bereiten die in der Natur vorkommenden Energieträger so auf bzw. wandeln sie so um, dass die Energie gespeichert, transportiert und von dem Endverbraucher sinnvoll genutzt werden kann. Als Beispiel sei das flächendeckende elektrische Energieversorgungssystem genannt, das vom Kohle- oder Uranabbau über Kraftwerke und Hochspannungsleitungen bis zur Steckdose in der Wohnung dafür sorgt, dass bei dem Endverbraucher rund um die Uhr elektrische Energie zur Verfügung steht.

Fachbegriffe für die in Versorgungssystemen auftretenden Energien:

Primärenergie

Darunter versteht man die Energie, die von der Natur unmittelbar zur Verfügung gestellt wird. Da die in der Natur vorkommenden Energien häufig an einen Stoff gebunden sind, spricht man auch von *Energieträgern*, in diesem Zusammenhang also von *Primärenergieträgern*.

- **fossile Energieträger:** Kohle, Erdöl und Erdgas,
- **regenerative/erneuerbare Energien** wie Sonne, Wind und Wasser, aber auch Biomasse
- **Kernbrennstoffe**, z. B. Uran

In Deutschland wie auch weltweit wird der Primärenergiebedarf nach wie vor zu fast 90 % mit fossilen Energieträgern gedeckt.

Sekundärenergie

Einige Primärenergieträger sind weniger geeignet für Transport, Speicherung und/oder Umwandlung. Deshalb werden sie erst einmal zu sogenannten **Sekundärenergieträgern** veredelt, die Primärenergieträger Kohle und Erdöl beispielsweise zu Briketts, Benzin bzw. Heizöl. Ein besonders weit verbreiteter Sekundärenergieträger, der durch Veredlung aus verschiedenen Pri-

- 5.3 Wie viel TWh (Terrawattstunden) elektrische Energie produziert das Kohlekraftwerk im Dauerbetrieb pro Jahr?
- 6 Ein Wasserspeicherkraftwerk besitzt ein ca. 80 Meter über den Turbinen liegendes Hochbecken mit einem Fassungsvermögen von 3,8 Millionen m³ Wasser. Die Anlage weist folgende Einzelwirkungsgrade auf:

Rohrleitung: $\eta_1 = 0,90$; Turbine: $\eta_2 = 0,93$; Generator: $\eta_3 = 0,87$

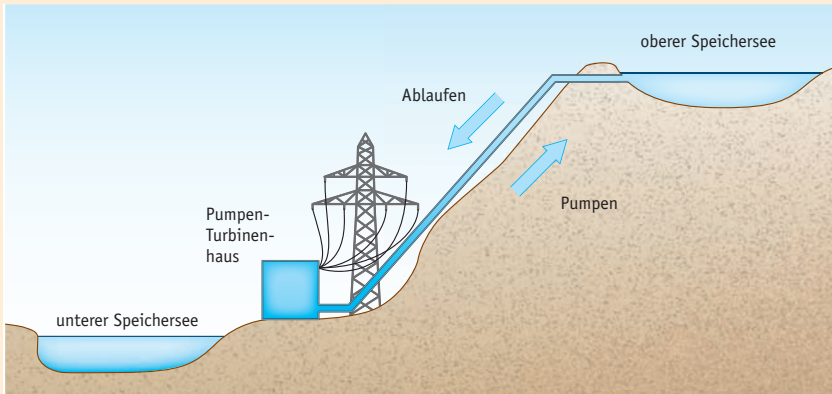


Abb. 1.14

- 6.1 Wie viel potentielle Energie besitzt das Wasser im Hochbecken?
- 6.2 Wie viel elektrische Energie wird daraus gewonnen? Wie viel kostet diese Energie, wenn man für 1 kWh 15 Cents bezahlen müsste?
- 6.3 Wie viele Tonnen Steinkohle lassen sich damit einsparen, wenn ansonsten ein Kohlekraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 38 % diese elektrische Energie liefern müsste?
- 6.4 Um welche Temperatur würde sich das gespeicherte Wasser mit der zur Verfügung stehenden potentiellen Energie erwärmen lassen?
- 6.5 Welche elektrische Leistung gibt das Speicherkraftwerk ab, wenn das Hochbecken innerhalb von 6 Stunden leerläuft.
- 7 Wie viel Energie ist 1 kWh und wie viel kostet sie?
Für verschiedene Anwendungen sollen die Werte zunächst geschätzt und anschließend berechnet werden. Sind die Angaben unvollständig – was in der Praxis die Regel ist –, sollen sinnvolle Annahmen gemacht werden.
- 7.1 Was kann man mit 1 kWh erreichen?
- 7.1.1 Wie lange kann eine 15-W-Energiesparlampe und 100-W-Glühlampe damit betrieben werden?
- 7.1.2 Wie lange kann man damit (elektrisch) die Zähne putzen, mobil telefonieren, Fernsehen schauen, Kuchen backen?
- 7.1.3 Wie hoch lässt sich damit 1 t (Tonne) heben?
- 7.1.4 Wie viele Höhenmeter kann damit ein Bergsteiger erklimmen? Wenn er später diesen „Energieverlust“ mit Bier wieder ausgleichen will: Wie viel muss/darf er trinken?

2 Entwicklung des Energieverbrauchs

Die **Energieversorgungssysteme**, die wir heute zur Verfügung haben, sind historisch gewachsen. Immer, wenn die Menschen neue Energieträger nutzbar machen konnten, waren damit große Umwälzungen verbunden. Die zunehmende Beherrschung und Ausbeutung der in der Natur vorkommenden Energieträger erleichterten den Menschen das Leben ganz erheblich. Freilich darf nicht übersehen werden, dass von dem übermäßigen Energieverbrauch der Menschheit heute Gefahren für eben diese Menschheit ausgehen, weshalb mit Energie in Zukunft viel sparsamer und sorgsamer umgegangen werden muss. Die Umstellung der Energieversorgungssysteme auf umweltfreundliche, ressourcenschonende Technologien wird eine der Schlüsselfragen des 21. Jahrhunderts sein.

2.1 Von der Muskelkraft zum Kernkraftwerk

Am Anfang der Menschheitsgeschichte war der Mensch allein auf seine Körperkräfte angewiesen. Alle Tätigkeiten wurden mit eigener **Muskelkraft** vollzogen. Die Lebenserwartung war entsprechend kurz. Für einen Teil der schweren körperlichen Arbeit konnte später die überlegene Muskelkraft von Tieren genutzt werden – und die wird bis heute eingesetzt.



Der Gebrauch des **Feuers**, das Wärme und Licht spendet, war für die menschliche Entwicklung ein Meilenstein: Die Menschen wurden unabhängiger von Klima und Witterung, konnten aufgrund der Speisenzubereitung auf ein breiteres Nahrungsangebot zurückgreifen und schließlich Gebrauchsgegenstände aus Metall und Keramik herstellen. Die Lebens- und Überlebensbedingungen hatten sich damit wesentlich gebessert, so dass die Bevölkerungszahl anstieg. Das Feuer ist nach wie vor der weit- aus bedeutendste „Energiespender“ der Menschheit. War vor der Industrialisierung Holz der wichtigste Brennstoff, sind es seitdem die **fossilen Energieträger** Kohle, Öl und Gas geworden. Da bei der Verbrennung jedoch **Schadstoffe** freigesetzt werden, hat diese Art der Energienutzung große Umweltprobleme zur Folge.



Mit der Beherrschung des Feuers war man allerdings noch lange nicht in der Lage, die Wärmeenergie aus der Verbrennung in mechanische Antriebsenergie umzuwandeln. Als mechanische Energielieferanten nutzte man mittels entsprechender technischer Vorrichtungen die **Wind-** und **Wasserkraft** aus. Mit ihrer Hilfe wurden Mühlen und Bewässerungsanlagen betrieben. Später wurden Wind- und vor allem Wasserkraft zum Antrieb von Maschinen eingesetzt und Mensch wie Tier damit teilweise von körperlicher Arbeit entlastet. Die emissionsfreien¹



Abb. 2.1 ► Traditionelle Energiewandler

1 *Emission* = das Aussenden oder Abgeben von umweltbelastenden Stoffen an die Umgebung, insbesondere das Abgeben von Luftschadstoffen.

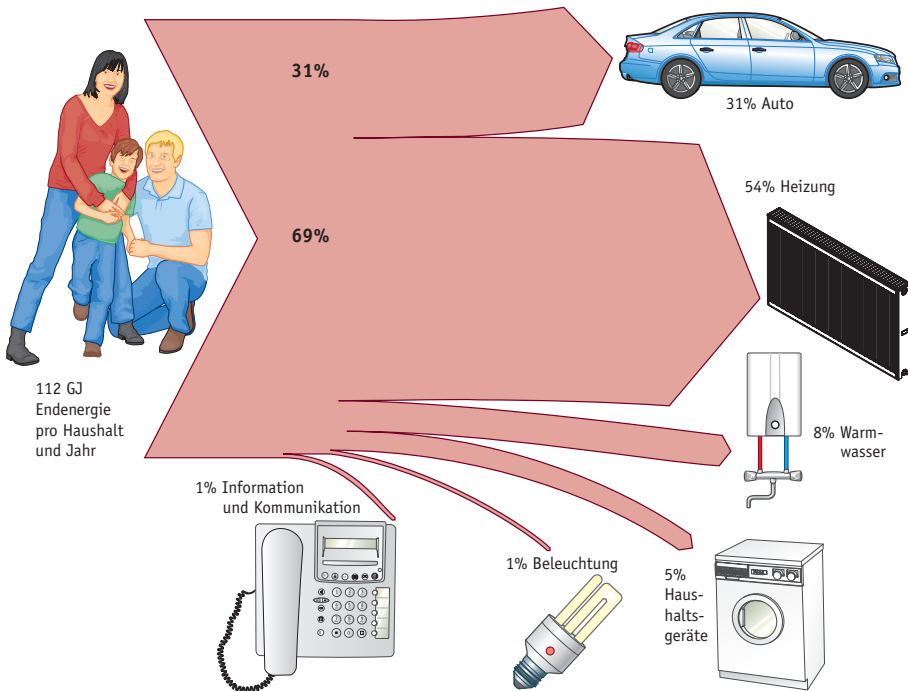


Abb. 2.10 ► Anteile des Energieverbrauchs eines deutschen Haushalts

Raumheizung und Auto haben demnach die bei weitem größten Anteile am Energieverbrauch eines Haushalts. Bei diesen lassen sich folglich auch am ehesten nennenswerte Einsparungen erzielen: Einsparungen bei der Raumheizung sind mittels einer guten Isolierung der Außenwände, moderner gesteuerter Heiztechnik und moderater Raumtemperaturen ohne großen Aufwand zu erzielen; Einsparungen beim Auto lassen sich in erster Linie durch den Verzicht auf unnötige Fahrten realisieren.

2.2.4 Ausblick

Die Energieversorgung der Menschheit befindet sich in der Krise. Da sie ihren Energiebedarf zu fast 90 % mit den fossilen Energieträgern Kohle, Öl und Gas deckt, ergeben sich für die Zukunft zwei schwerwiegende Probleme im Hinblick auf eine langfristig gesicherte und umweltgerechte Energieversorgung:

- Die Ressourcen⁵ an fossilen Brennstoffen sind begrenzt. Auch wenn definitive *Reichweiten*⁶ der einzelnen nichterneuerbaren Energieträger kaum zuverlässig angegeben werden können, so ist dennoch klar, dass die fossilen Energieträger in absehbarer Zeit aufgebraucht sein werden. Verschärfend kommt hinzu, dass die sicheren Vorräte an fossilen Energieträgern zu etwa 65 % Kohle, aber nur zu 19 % Öl und zu 16 % Gas enthalten. Trotzdem hat Öl derzeit mit fast 40 % den größten Anteil an der Bedarfsdeckung.

5 Der Begriff **Ressource** (franz.) bezeichnet die größtmögliche Menge, die (noch) vorhanden ist. Die davon sicher gewinnbare Menge nennt man **Reserve**.

6 Darunter versteht man die Anzahl der Jahre, die der Energieträger noch genutzt werden kann. Dabei darf man sich das Ende – beispielsweise des Öls – nicht abrupt vorstellen; es wird vielmehr allmählich knapper und damit immer teurer werden. Somit sind Verteilungskämpfe bis hin zu Kriegen um das knappe Gut nicht ausgeschlossen.

- 11.6 In Finanzratgebern findet man folgende Regel (Faustformel) zur Zinseszinsrechnung: Um herauszufinden, in welchem Zeitraum sich ein Startkapital bei gegebenem Zinssatz verdoppelt, muss man 72 durch diesen Zinssatz dividieren. Demnach betrüge die Verdopplungszeit bei $p = 7\%$ also $72/7 = 10,3$, sprich, es dauert 10,3 Jahre, bis sich das Startkapital bei einem Zinssatz von 7 % verdoppelt.
Diese Formel ist mathematisch nicht ganz einfach aus der Zinseszinsformel herzuleiten (möglich ist es aber mit Hilfe einiger Näherungen).
Überprüfen Sie diese Regel nun mit der Zinseszinsformel für $p = 3\%$; 5% ; 10% .
- 12 Für die folgenden Aufgaben können die Zahlenwerte aus Tabelle 6 entnommen oder eigene recherchierte Werte herangezogen werden.
- 12.1 Was versteht man unter Reichweite eines Energieträgers?
- 12.2 Welche Reichweiten ergeben sich, wenn man zu den sicheren Vorräten noch die geschätzten Ressourcen hinzunimmt (Tabelle 6) und konstanten Verbrauch unterstellt?
- 12.3 Zu welchen Reichweiten kommt man, wenn man eine jährliche Verbrauchssteigerung von 5 % annimmt?
- 12.4 Von einem Energieträger werden derzeit 3,0 Gt SKE pro Jahr verbraucht. Der Verbrauch wächst um 5 % pro Jahr.
Wie hoch ist der jährliche Verbrauch in zehn bzw. in zwanzig Jahren? Wie viel Prozent Zuwachs sind das gegenüber dem Ausgangsjahr?
- 13 Erzeugen Sie mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms eine Tabelle, welche die der Abbildung 2.10 zugrundeliegenden Zahlen berechnet. Die Tabelle sollte folgendermaßen aufgebaut sein:

	A	B	C	D	E
1	Jahre	konstanter jährlicher Verbrauch	3 % jährliche Verbrauchszunahme	2 % jährliche Verbrauchsabnahme	
2	0	232,0	232,0	232,0	
3	1	226,5	226,5	226,5	
4	2	221,0	220,8	221,1	
5	3	215,5	215,0	215,8	
6	4	210,0	209,0	210,7	
7	5	204,5	202,8	205,6	
8	6	199,0	196,4	200,6	
9	7	193,5	189,9	195,7	
10	8	188,0	183,1	191,0	
11	9	182,5	176,1	186,3	
12	10	177,0	168,9	181,7	

Abb. 2.12

Verbleibende Vorräte an Erdöl bei unterschiedlichen Verbrauchsentwicklungen (Zahlen aus Tabelle 2.2)

Rechnen Sie die Tabelle mit anderen Annahmen zur jährlichen Verbrauchsänderung durch.

- 14 Um wie viel Prozent steigt der Stromverbrauch bis zum Jahr 2030, wenn mit jährlichen Steigerungsraten von a) 1 %, b) 2 %, c) 5 % gerechnet wird?

3 Thermodynamik

Die **Umwandlung von Wärme in Arbeit** ist in unserer energieintensiven Zivilisation der wichtigste energietechnische Prozess überhaupt. Fast die gesamte großtechnische Stromerzeugung beruht darauf. Auch alle Verbrennungsmotoren sowie Flugzeug- und Raketentriebwerke wandeln Wärme in Arbeit um.

Bereits mit der Entwicklung und Nutzung der Dampfmaschine als Energiewandler entstand das Bedürfnis, die damit zusammenhängenden energetischen Vorgänge und Umwandlungen genauer zu verstehen und nach Möglichkeit zu verbessern. Das theoretische Rüstzeug dafür stellt das als **Thermodynamik**¹ bezeichnete Wissensgebiet bereit. Ingenieure und Physiker haben darin die in Zusammenhang mit der Energie stehenden Beobachtungen als zentrale Erfahrungssätze formuliert. Ein solches empirisch gefundenes Naturgesetz ist der **Energieerhaltungssatz**, der zudem als **1. Hauptsatz der Thermodynamik** (s. Abschnitt 3.4.1) bezeichnet wird.

Die Thermodynamik hat sich seit ihren Anfängen als Wärmelehre inzwischen zu einer **allgemeinen Energielehre** entwickelt, da die Wärmeenergie bei allen Energiewandlungen eine wichtige Rolle spielt. Bei den meisten technischen Energiewandlungsverfahren tritt Wärmeenergie als Zwischenstufe auf, was naturgesetzliche Einschränkungen der Umwandelbarkeit bedeutet. Da die Kenntnis dieser Naturgesetze zur technischen Allgemeinbildung gehört, ist die Thermodynamik ein ingenieurwissenschaftliches Grundlagenfach. Sie benutzt bestimmte Fachbegriffe, die im nächsten Abschnitt eingeführt werden.



Abb. 3.1 ► Die Thermodynamik befasst sich mit den Naturgesetzen bei der Umwandlung von Wärme (= thermo) in Arbeit (= dynamik)

3.1 Thermodynamische Grundbegriffe

3.1.1 Thermodynamische Systeme

Die Thermodynamik untersucht **thermodynamische Systeme**: Als **technisches System** bezeichnet man dabei jenen Bereich einer technischen Anlage, der genauer untersucht wird. Dieser Bereich bzw. dieses System wird definiert durch genau festgelegte **Systemgrenzen**, die es von der **Umgebung** abgrenzen, wobei die Systemgrenzen real oder nur gedacht sein können.

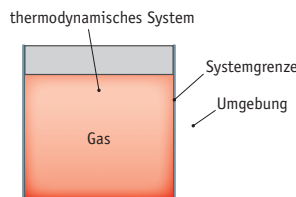


Abb. 3.2 ► Konkretes thermodynamisches System

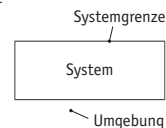


Abb. 3.3 ► Abstraktes thermodynamisches System

Werden bei einem technischen System energetische Betrachtungen angestellt, so bezeichnet man es als **thermodynamisches System**. Der gasgefüllte Arbeitszylinder mit verschiebbarem Kolben (Abbildungen 3.2 und 3.3) ist das Standardmodell für ein konkretes thermodynamisches System.

1 früher auch Wärmelehre genannt

Im $p(V)$ -Diagramm sind die Kurven konstanter Temperatur, die Isothermen, Hyperbeläste, wie das Gesetz von Boyle-Mariotte $p \cdot V = \text{konstant}$ zeigt. Je höher die konstante Temperatur gewählt wird, desto weiter nach oben verschiebt sich die zugehörige Isotherme im Diagramm. In der Abbildung 3.22 sind drei Isothermen dargestellt, wobei für die jeweiligen Temperaturen gilt: $T_1 < T_2 < T_3$. Dass die Reihenfolge bei den Temperaturen so sein

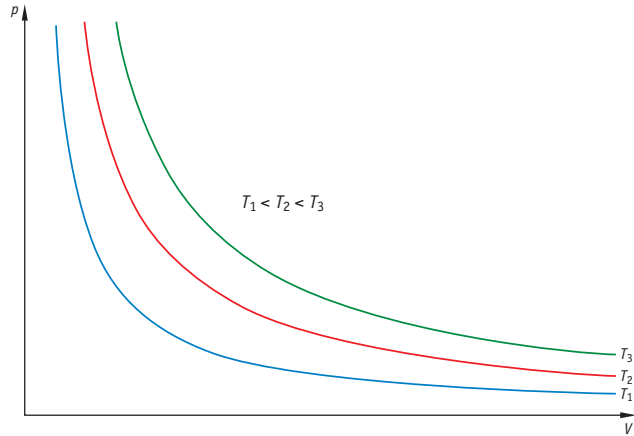


Abb. 3.22 ► Isothermenschar

bestimmen festen Volumen hat das Gas mit höherer Temperatur einen höheren Druck und muss deshalb im Diagramm weiter oben liegen.

Zur Berechnung der bei einem isothermen Prozess umgesetzten Arbeit werden die Erkenntnisse des vorherigen Abschnitts eingesetzt. Letztlich muss der in Abbildung 3.23 schraffiert gezeichnete Flächeninhalt berechnet werden.²¹

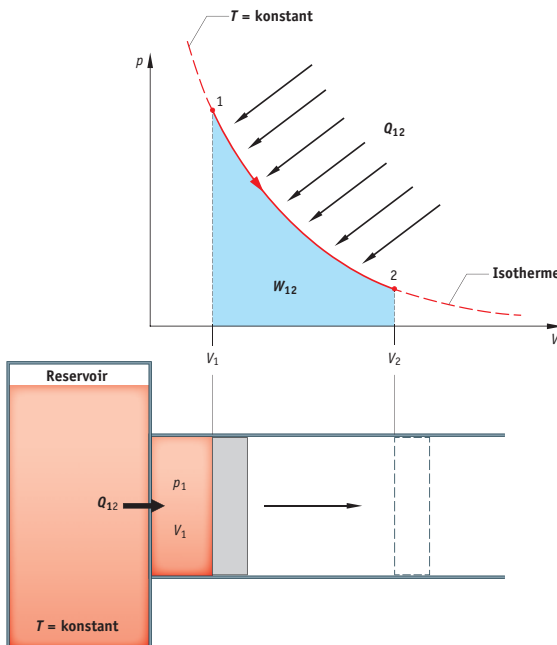


Abb. 3.23 ► Isothermer Prozess

²¹ Wer keine Kenntnisse in Integralrechnung hat, sollte nur auf das Endergebnis achten.

Es gibt keine zwischen den Temperaturen T_o und T_u arbeitende Wärmekraftmaschine, die mehr Arbeit liefert als eine nach dem Carnot'schen Kreisprozess arbeitende Maschine. Aufgrund irreversibler Vorgänge realer Wärmekraftmaschinen haben diese stets einen kleineren Wirkungsgrad als den Carnot'schen Wirkungsgrad. Es gilt also:

$$\eta_{\text{WKM, real}} < \eta_{\text{WKM, ideal}} \leq \eta_{\text{C}}$$

Eine Carnot-Maschine, die den Carnot'schen Kreisprozess durchläuft, ist praktisch nicht zu verwirklichen. Dennoch ist der Carnot'sche Wirkungsgrad das Gütemaß für reale Wärmekraftmaschinen. Die Güte einer Wärmekraftmaschine darf also nicht daran gemessen werden, wie nahe ihr Wirkungsgrad dem Wert 1 kommt, sondern wie nahe ihr Wirkungsgrad dem Carnot'schen Wirkungsgrad kommt – und dieser ist stets kleiner als 1. Wie das Zahlenbeispiel auf Seite 88 zeigt, beträgt der Carnot'sche Wirkungsgrad bei den Temperaturen $\vartheta_o = 500\text{ °C}$ und $\vartheta_u = 50\text{ °C}$ nur 0,58. Keine zwischen diesen Temperaturen arbeitende reale Wärmekraftmaschine kann diesen Wert erreichen. Hat die reale Wärmekraftmaschine beispielsweise einen Wirkungsgrad von 0,45, so erreicht sie den theoretisch möglichen Wert 78 %. Gute Wärmekraftmaschinen erreichen den Carnot'schen Wirkungsgrad bis etwa 95 %.

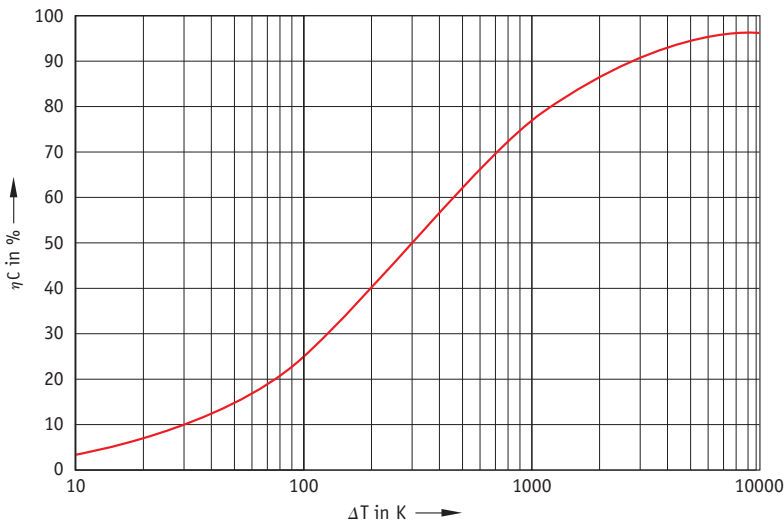


Abb. 3.46 ▶ Der Carnot'sche Wirkungsgrad in Abhängigkeit von $\Delta T = T_o - T_u$, wobei $T_u = 300\text{ K}$

Die Abbildung 3.46 zeigt, wie der Carnot'sche Wirkungsgrad mit zunehmender Temperaturdifferenz steigt. Zu hohe Temperaturen führen jedoch zu Werkstoffproblemen. Diese Kurve ist daher die naturgesetzliche Grenze für den Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen. Sie macht auch verständlich, warum Wärmekraftmaschinen einen im Vergleich zu anderen Energiewandlern geringen Wirkungsgrad besitzen: Bei hochwertigen Energieformen liegt die obere Grenze für den Wirkungsgrad bei 100 %; bei Wärmekraftmaschinen ist die obere Grenze der Carnot'sche Wirkungsgrad, und der ist je nach Temperaturdifferenz erheblich kleiner als 100 %.