

1 Physikalische Grundlagen

Die Physik gehört ebenso wie die Chemie zu den klassischen Naturwissenschaften in der unbelebten Natur (etwa im Gegensatz zur Biologie). In beiden Bereichen werden auf Grund von Beobachtungen der Natur, meist in der Form von gezielten Experimenten, Gesetz-

mäßigkeiten gesucht, welche den Vorgängen in der Natur zu Grunde liegen. Dabei ist die Physik für diejenigen Naturgesetze der unbelebten Natur zuständig, die keine Stoffumwandlungen beinhalten. Diese so entdeckten **Naturgesetze** werden dann in der Technik angewandt.

1.1 Größen und Einheiten

Zur Beschreibung der Naturgesetze müssen geeignete Begriffe gebildet werden. Die „Kraft“ und auch die „Masse“ sind Beispiele für physikalischen Begriffe, ohne deren Einführung sich die Naturvorgänge kaum eindeutig erfassen lassen würden. In den so genannten exakten Naturwissenschaften, wie beispielsweise der Physik, geht man aber noch weiter: Man beschreibt Naturvorgänge nicht nur mit qualitativen Begriffen (z. B. hier wirkt eine *Kraft*), sondern erfasst die untersuchten Sachverhalte quantitativ (z. B. diese Kraft ist so und so stark). Diese quantitativen Begriffe nennt man **Größen**. Sie benötigen eine **Einheit**, in der sie zahlenmäßig angegeben werden können. Die physikalische Größe „Masse“ hat die Einheit kg (Kilogramm). Da physikalische Größen auch häufig in mathematischen Formeln verwendet werden, kürzt man sie mit einem **Formelzeichen**, in der Regel in Form eines Buchstabens, ab. Für die Masse lautet das Formelzeichen einfach *m*. Der Buchstabe *m* wird aber auch für die Einheit der physikalischen Größe „Länge“ verwendet und steht dort für die Längeneinheit Meter. Man muss sich ggf. klar machen, welche Bedeutung ein bestimmter Buchstabe im gerade vorliegenden Zusammenhang hat.

Es gibt insgesamt sieben **Grundgrößen**, nämlich: *Länge*, *Zeit*, *Masse*; *Stromstärke*, *Temperatur*, *Stoffmenge* und *Lichtstärke*. Aus ihnen lassen sich alle anderen Größen ableiten, wohingegen sich die sieben Grundgrößen nicht auf noch einfachere Größen zurückführen lassen.

Von den genannten sieben Grundgrößen sind im physikalischen Teilgebiet der Mechanik nur drei relevant, die als bekannt vorausgesetzt werden:

Tabelle 1: Die drei Grundgrößen der Mechanik

Grundgröße	Formelzeichen	Einheit	abgekürzt mit
Masse	<i>m</i>	Kilogramm	kg
Länge	<i>l</i> oder <i>s</i>	Meter	m
Zeit	<i>t</i>	Sekunde	s

Die Angabe einer physikalischen Größe besteht üblicherweise aus dem Formelzeichen, dem Zahlenwert (auch Maßzahl genannt) und der Einheit, wie folgende Beispiele zeigen:

$$m = 75 \text{ kg}; l = 2,7 \text{ m}; t = 12,1 \text{ s}$$

Mit den physikalischen Größen wird gerechnet. Dabei werden die Zahlenwerte miteinander verrechnet und auch die Einheiten.

Beispiele:

1. Von A nach B sind es 260 Meter; diese Strecke gibt man dann folgendermaßen an: $s = 260 \text{ m}$. Hin und zurück sind es dann 520 m oder ausführlicher aufgeschrieben: $2 \cdot s = 2 \cdot 260 \text{ m} = 520 \text{ m}$.

2. Aus den Grundgrößen werden weitere, **abgeleitete Größen** gebildet. Die **Geschwindigkeit** *v* ist eine solche abgeleitete Größe. Sie ist (im einfachsten Fall) definiert durch die Vor-

gabe „Geschwindigkeit ist Weg durch Zeit“, was man als Formel angibt:

$$v = \frac{s}{t}$$

Benötigt ein batteriegetriebenes Spielzeugauto für die oben angegebene Strecke $s = 260 \text{ m}$ eine Zeit von $t = 40 \text{ s}$, so hatte es die (Durchschnitts-)Geschwindigkeit:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{260 \text{ m}}{40 \text{ s}} = 6,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Abb. 1-1: Ein etwas größeres Spielzeugauto

Die Einheit der Geschwindigkeit ergibt sich also unmittelbar aus der Formel und lautet „Meter durch Sekunden“ oder auch „Meter pro Sekunde“. Manchmal wird im Einklang mit den Potenzgesetzen der Mathematik dafür auch $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ geschrieben.

3. Nun gibt etwa die Anzeige in einem Auto die Geschwindigkeit nicht in „Meter pro Sekunde“ sondern in „Kilometer pro Stunde“ (in Kurzzeichen: $\frac{\text{km}}{\text{h}}$) an. Wie hängen die unterschiedlichen Einheiten für die Geschwindigkeit zusammen?



Abb. 1-2: Geschwindigkeitsanzeige in km/h

Die Umrechnung lautet:

$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = \frac{1}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

oder umgekehrt ausgedrückt:

$$1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Demnach fährt das Spielzeugauto mit:

$$v = 6,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,6 \cdot 6,5 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 23 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

4. Wenn besagtes Spielzeugauto aus dem Stand heraus losfährt, so nimmt seine Geschwindigkeit zu, d. h., das Fahrzeug beschleunigt. Die entsprechende physikalische Größe nennt man auch tatsächlich die **Beschleunigung** a . Sie gibt die Änderung der Geschwindigkeit pro Zeit an und ist im einfachsten Fall definiert als:

$$a = \frac{v}{t}$$

Die Einheit der Beschleunigung ergibt sich direkt aus der Definitionsformel, indem man die Einheiten der darin vorkommenden Größen einsetzt.

$$\text{Einheit von } a = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{s}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Wenn das Fahrzeug während der Beschleunigungsphase in jeder Sekunde um $1,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ schneller wird, so hat es die Beschleunigung: $a = 1,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Auch das Abbremsen ist physikalisch betrachtet eine (negative) Beschleunigung. Ist $a = -1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, so wird das Fahrzeug in jeder Sekunde um $1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ langsamer.

Natürlich hat man nicht nur bei der physikalischen Größe der Geschwindigkeit unterschiedliche Einheiten, sondern auch bei allen anderen Größen. Man hat sich international gewissermaßen auf ein Grundeinheitensystem, die so genannten **SI-Einheiten**, verständigt. Für die mechanischen Grundgrößen sind die SI-Einheiten in Tabelle 1 angegeben.

Daneben hat man vor allem im Alltag auch andere Einheiten, wie etwa bei der Zeit die Angabe in Minuten oder Stunden, bei der Länge in Millimeter (wenn es kleine Strecken sind) oder Kilometer. Die verschiedenen Einheiten einer Größe sind stets ineinander umrechenbar. Werden physikalische Größen in Formeln miteinander verknüpft, so müssen ihre Einheiten kom-

patibel gemacht werden. Man drückt dann am besten alle Größen in SI-Einheiten aus. Dabei wird auch häufig von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, Zahlenwerte mit Hilfe von Zehnerpotenzen auszudrücken, wobei gilt:

$$10 = 10^1; 100 = 10^2; 1\ 000 = 10^3 \text{ usw.}$$

$$0,1 = 10^{-1}; 0,01 = 10^{-2}; 0,001 = 10^{-3} \text{ usw.}$$

Außerdem benutzt man so genannte Einheiten-vorsätze, um besonders große oder kleine Größen auszudrücken.

Tabelle 2: Einheitenvorsätze und ihre Bedeutung

Vor-satz	Kurz-zeichen	Faktor	Vor-satz	Kurz-zeichen	Faktor
Kilo	k	10^3	Milli	m	10^{-3}
Mega	M	10^6	Mikro	μ	10^{-6}
Giga	G	10^9	Nano	n	10^{-9}
Tera	T	10^{12}	Pico	p	10^{-12}
Peta	P	10^{15}	Femto	f	10^{-15}
Exa	E	10^{18}	Atto	a	10^{-18}

1.2 Kraft und Masse

Die Masse ist, wie bereits gesagt, eine physikalische Grundgröße, die sich nicht auf noch fundamentalere Größen zurückführen lässt. Jedem Körper wird eine bestimmte Masse zugeschrieben, die durch Messung (= Vergleich mit einer genormten Masse) bestimmt werden kann. Die Masse ist eines Körpers ist orts-unabhängig, also beispielsweise auch in der Schwerelosigkeit oder auf dem Mond immer gleich groß.



Abb. 1-3: Isaac Newton (1642–1727)

Die **Kraft**, sie wird mit dem Formelbuchstaben F bezeichnet, ist eine abgeleitete Größe. Sie wird an ihren Wirkungen erkannt.

Den Zusammenhang zwischen Kraft und Masse hat der berühmte englischen Physiker Isaac Newton (1642–1727), nach dem die Einheit der Kraft benannt ist, herausgefunden.

1. Kraftwirkung: Ein Kraft kann einen Körper verformen.	2. Kraftwirkung: Eine Kraft kann den Bewegungszustand eines Körpers ändern.
	

Abb. 1-4: Wirkungen der Kraft

2 Chemische Grundlagen

Die Chemie ist neben der Physik eine weitere Grundlagenwissenschaft in der Technologie. Alle technischen Verfahren zur Stoffumwandlung, wie die Herstellung von Kunststoffen, die Stahlerzeugung oder die Petrochemie, setzen die Erkenntnisse aus der Chemie ein. Von besonderer Bedeutung sind in der Chemie Modellvorstellungen über den Aufbau der Materie, da

diese Struktur der Stoffe nur indirekt erschlossen werden kann. Bis zu den heute verwendeten Modellvorstellungen war es ein langer Weg. Die ersten bekannten Versuche den Aufbau der Materie zu ergründen, gehen auf griechische Philosophen zurück und wurden bereits vor zweieinhalb Jahrtausenden angestellt.

2.1 Modellvorstellungen

Alle Materie ist aus den im **Periodensystem der Elemente** (PSE; siehe Anhang) zusammengefassten Atomen aufgebaut. Ein Atom (griechisch: das Unteilbare) ist in der Chemie die kleinste Einheit der uns umgebenden Materie. Jeder Stoff besteht aus einer sehr großen Anzahl von Atomen. Diese der direkten Beobachtung nicht zugänglichen Bausteine der Materie stellt man sich zunächst als kleine Kugeln vor. Wie halten nun die einzelnen Atome in einem Festkörper zusammen?

Die Bindungskräfte zwischen den Atomen setzen sich aus zwei Anteilen zusammen: Zum einen wirken Abstoßungskräfte zwischen den Atomen, da sich ein Festkörper nicht beliebig zusammendrücken lässt. Zum andern müssen

Anziehungskräfte vorhanden sein, da sonst der Festkörper nicht zusammenhalten würde.

Die Überlagerung dieser beiden Kräfte ergibt für einen bestimmten Atomabstand r_0 Kräftegleichgewicht. Er legt den Gleichgewichtsabstand zweier benachbarter Atome fest. Durch äußere Kräfte können die Atome aus ihren Gleichgewichtslagen entfernt werden. Wegen **actio = reactio** ergeben sich dabei gleichgroße innere Rückstellkräfte. Nimmt man die äußere Kraft wieder weg, so „federn“ die Atome in die Gleichgewichtslage zurück. Es liegt also elastische Verformung vor. Erst wenn durch eine äußere Zugkraft F_{max} überschritten wird, kann das Atom nicht mehr auf seinen Platz zurückkehren. Nun ist der Festkörper plastisch verformt oder zu Bruch gegangen.

Die im Festkörper wirkenden Kräfte sind letztlich elektrostatische Kräfte zwischen den elektrisch geladenen Protonen (positive Elementarladung) und Elektronen (negative Elementarladung). Ungleich geladene Teilchen ziehen sich an, gleich geladene Teilchen stoßen sich ab.

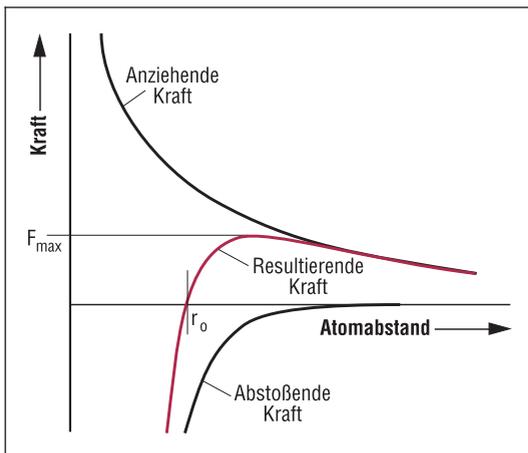


Abb. 2-1: Kräfte im Festkörper

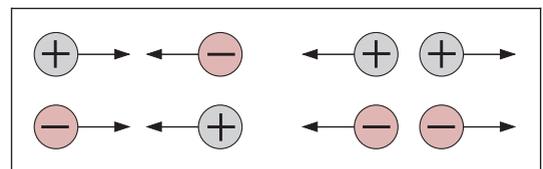


Abb. 2-2: Die Kraftwirkung zwischen elektrisch geladenen Teilchen

Die Stärke der Kraftwirkung nimmt mit zunehmendem Abstand der Teilchen ab.

Atommodelle

Zum Verständnis der chemischen Bindung sind einige Grundkenntnisse über den Aufbau von Atomen erforderlich. Dabei geht es in der Chemie nicht um den Atomkern (vgl. dazu den Abschnitt „Physikalische Grundlagen der Kernenergie“), sondern um den Aufbau der Atomhülle oder **Elektronenhülle** der Atome. Dafür gibt es – historisch gewachsen – unterschiedlich stark ausdifferenzierte Modelle. Für unsere Zwecke genügt das Schalenmodell des dänischen Physikers Niels Bohr (1885–1962), das so genannte **Bohrsche Atommodell**. Demnach befinden sich die Elektronen auf bestimmten Schalen um den Atomkern. Diesen Schalen sind bestimmte, diskrete Energieniveaus der Elektronen zugeordnet. Die Elektronen können demnach nicht beliebige Energiewerte haben, sondern nur ganz bestimmte, den Schalen entsprechende Energieniveaus. Elektronen auf kernnahen Schalen sind energiearm, solche auf kernfernen Schalen energiereich. Elektronen können durch Energieaufnahme von kernnahen auf kernferne Schalen angehoben werden. Umgekehrt geben sie beim Zurückspringen in einen energieärmeren Zustand die zuvor aufgenommene Energie wieder in Form elektromagnetischer Strahlung ab.

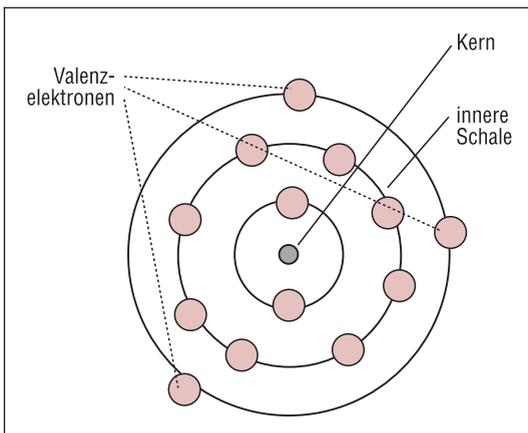


Abb. 2-3: Das Bohrsche Atommodell

Für die Besetzung der Schalen mit Elektronen gibt es bestimmte Regeln.

Maßgebend für die chemische Bindung sind alleine die Elektronen in der äußeren Schale, die so genannten **Valenzelektronen** oder Außen-elektronen.

Die äußere Schale im Bohrschen Atommodell heißt Valenzschale, ihre Elektronen nennt man Valenzelektronen.

Das Bohrsche Atommodell ist zwischenzeitlich weiter verfeinert worden. So enthalten Schalen wiederum mehrere Unterschalen. Diese werden auch als Orbitale bezeichnet. Das zugehörige Atommodell, das so genannte **Orbitalmodell**, differenziert das hier verwendete Bohrsche Atommodell weiter aus.

Periodensystem der Elemente (PSE)

Zunächst steht man einer unüberschaubaren Fülle unterschiedlicher Stoffe gegenüber. Man könnte vermuten, dass jeder Stoff auch seine eigene Atomart, seine eigene Grundsubstanz besitzt. Dass dem nicht so ist, haben die Chemiker im 18. Jahrhundert herausgefunden.

Es gehört zu den wichtigsten Entdeckungen der Chemie, dass sämtliche uns umgebenden Stoffe nur aus einer überschaubaren Menge verschiedener Elemente aufgebaut sind. Diese Elemente sind im **Periodensystem der Elemente** systematisch angeordnet (vgl. auch Anhang).

Jedes Element erhält ein Elementsymbol, z. B. H für Wasserstoff, Na für Natrium, S für Schwefel usw. Die Elemente des Periodensystems sind nach der Protonenzahl (positiv geladene Kernbausteine), die zugleich der Elektronenzahl in der Atomhülle entspricht, angeordnet, die deshalb auch **Ordnungszahl** genannt wird.

Da sich die Elemente mit gleicher Zahl von Valenzelektronen chemisch ähnlich verhalten, sind sie so im Periodensystem der Elemente angeordnet, dass sie in den so genannten Hauptgruppen untereinander stehen.

Dadurch erhält das PSE 8 Hauptgruppen (senkrechte Spalten). Die Hauptgruppennummer ei-

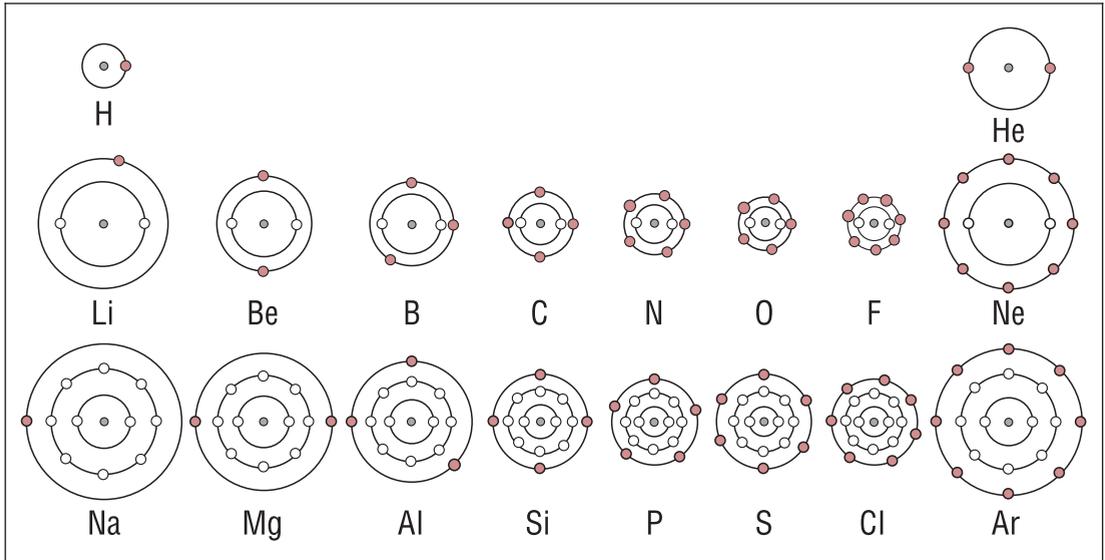


Abb. 2-4: Die Anordnung der ersten 18 Elemente im PSE, gruppiert nach ihrer Valenzelektronenzahl

nes Elements entspricht der Anzahl seiner Valenzelektronen.

Die Zeilen im PSE werden Perioden genannt. Die Periodennummer gibt die Anzahl der Elektronenschalen des Elements wieder. Beispielsweise hat Cl (Chlor) die Ordnungszahl 17 und besitzt daher 17 Protonen im Kern sowie 17 Elektronen in der Hülle. Da es in der 7. Hauptgruppe besteht hat es 7 Valenzelektronen. Außerdem ist es in der 3. Periode (Zeile), sodass es 3 Elektronenschalen besitzt.

Auf die ebenfalls im Anhang mit dargestellten Nebengruppen wird hier nicht eingegangen.

Edelgaskonfiguration

In der 8. Gruppe des PSE befinden sich die so genannten Edelgase. Als „edel“ bezeichnet man in der Chemie Stoffe, die kaum chemische Verbindungen eingehen. Dementsprechend sind die Edelgase chemisch sehr stabil. Ihre Valenzschale ist mit Elektronen gesättigt, sie haben keine Tendenz Elektronen aufzunehmen oder abzugeben. Diese chemisch stabile Besetzung der Valenzschale mit Elektronen bezeichnet man als **Edelgaskonfiguration**. Die Edelgaskonfiguration weist im Falle des Heli-

ums 2 und bei den sonstigen Edelgasen 8 Valenzelektronen auf.

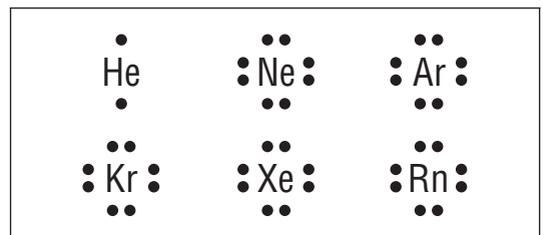


Abb. 2-5: Symbolische Darstellung der Edelgase einschließlich ihrer Valenzelektronen

Die Edelgaskonfiguration ist für die Atome energetisch besonders günstig. Nachdem mit diesen Atomen keine exothermen Reaktionen ablaufen, ist die Edelgaskonfiguration bereits ein energieärmer Zustand. Diesen stabilen und energiearmen Zustand streben auch andere Atome an, indem sie sich mit anderen Atomen verbinden. Die so entstehenden **Moleküle** sind dann energieärmer und stabiler als die ungebundenen Atome. Die bei der Bildungsreaktion frei werdende Energie entspricht der **Bindungsenergie** der Moleküle, also der Energie, mit der die Atome im Molekül zusammengehalten werden. Damit ist das Verständnis der chemischen Bindungen gelegt.

3 Energietechnik

3.1 Grundbegriffe

Zur angemessenen Auseinandersetzung mit dem Thema Energie ist – wie in anderen Wissensbereichen auch – eine gewisse Fachsprache erforderlich. Die präzise Kenntnis der verwendeten Begriffe ermöglicht erst die Kommunikation über die zugrunde liegenden Sachverhalte.

3.1.1 Erscheinungsformen der Energie

Genau zu definieren, was Energie eigentlich ist, fällt schwer. Es soll deshalb zunächst angegeben werden, in welchen Formen Energie auftreten kann. Diese aus der Physik bekannten Erscheinungsformen der Energie sind im Wesentlichen:

mechanische Energie



Hier ist die in der Physik übliche Unterscheidung von **potentieller** und **kinetischer** Energie wichtig. Potentielle Energie oder Lageenergie hat beispielsweise eine Wassermenge, die sich im Hochbecken eines Speicherstausees befindet. Kinetische oder Bewegungsenergie besitzt das Wasser, wenn es vom Hochbecken zum Talbecken fließt.

chemische Energie



Das ist die in den chemischen Bindungen zwischen den Atomen steckende Energie, die bei chemischen Reaktionen zugeführt (endotherm) oder abgegeben (exotherm) wird. Ein Beispiel für eine exotherme Reaktion, bei der chemische Bindungsenergie frei wird, ist die Verbrennung, beispielsweise von Kohle.

elektrische Energie



Das ist die Energie, die durch elektrische Ladungen hervorgerufen wird. Sie kann in statischer Form zwischen den Platten eines Kondensators gespeichert sein oder in dynamischer Form durch die Bewegung elektrischer Ladungen zum Ausdruck kommen. Die elektrische Energie ist naturgesetzlich sehr eng mit der magnetischen Energie verknüpft. Man spricht deshalb in der Physik auch von elektromagnetischer Energie. Weil das in der Technik nicht üblich ist, wurde hier nur der Oberbegriff elektrische Energie gewählt. Die elektrische Energie spielt in der Energietechnik eine wichtige Rolle.

elektromagnetische Strahlungsenergie



Dies meint die Energie der elektromagnetischen Wellen oder Strahlen, also z. B. die Strahlungsenergie des Sonnenlichts. Die elektromagnetischen Strahlen sind aber keinesfalls auf die sichtbaren Strahlen, das Licht, zu beschränken. Hierzu gehören auch die Wärmestrahlung, die Radiowellen, Röntgenstrahlung usw.

Kernenergie



Im Gegensatz zur chemischen Energie, welche die Bindungsenergien in den Atomhüllen beschreibt, ist bei der Kernenergie die Bindungsenergie in den Atomkernen gemeint, also die Bindungsenergie zwischen den Protonen und Neutronen eines Atomkerns. Diese Energie kann mit geeigneten Kernreaktionen z. T. freigesetzt werden.

Wärmeenergie



Was Wärmeenergie oder thermische Energie bedeutet, ist jedem zugänglich, da der Mensch diese Energieform unmittelbar spürt. Heute weiß man, dass Wärmeenergie letztlich die ungeordnete Bewegungsenergie der Atome oder Moleküle des erwärmten Stoffes ist. Diese Modellvorstellung der modernen Physik ist für energietechnische Betrachtungen allerdings weniger wichtig. Die Wärmeenergie nimmt unter den Energieformen eine Sonderrolle ein, da sich die anderen Energieformen zwar vollständig in Wärmeenergie umwandeln lassen, umgekehrt sich Wärmeenergie aber nur eingeschränkt in andere Energieformen umwandeln lässt.

3.1.2 Energieerhaltung

Im Prinzip können die verschiedenen Erscheinungsformen der Energie ineinander umgewandelt werden. Diese **Energieumwandlungen** unterliegen gewissen naturgesetzlichen Einschränkungen. Einer der zentralen Sätze der Physik ist der so genannte **Energieerhaltungssatz**. Diese aus der Erfahrung gewonnene (= empirische) Aussage besagt, dass die Menge der Energie, über alle Energieformen hinweg, immer gleich groß ist.

Energieerhaltungssatz:

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, sie kann lediglich von einer Form in eine andere umgewandelt werden.

Es gibt noch andere Formulierungen des Energieerhaltungssatzes, auf die noch eingegangen wird.

Zunächst allerdings scheint der Energieerhaltungssatz der Alltagserfahrung zu widersprechen: Schließlich müssen wir für Energie bezahlen, obwohl sie nach dem Energieerhaltungssatz nicht vernichtet bzw. verbraucht werden kann! Alle sprechen vom Energieverbrauch, sei es der vom Auto, vom Kühlschrank oder der Deutschlands. Wozu braucht man Kraftwerke, wenn ohnehin keine Energie er-

zeugt werden kann? Wieso kann Energie knapp sein? Wenn sie weder erzeugt noch vernichtet werden kann, muss sie doch in immer gleicher Menge zur Verfügung stehen.

Der Energieerhaltungssatz steht nur scheinbar im Widerspruch zu den oben genannten Fragen. Zwar wird Energie tatsächlich nicht verbraucht, sie wird aber **entwertet**. Hier bietet sich ein Vergleich mit dem in einem Haushalt verbrauchten Wasser an. Obwohl im Prinzip genau die gleiche Wassermenge, die der Wasserleitung entnommen wird, über den Kanal wieder abfließt, spricht man von Wasserverbrauch. Die Anzahl der entnommenen Liter Frischwasser entspricht aber genau der Anzahl der Liter des abgegebenen Schmutzwassers. Eigentlich wurde kein Wasser verbraucht, es wurde nur verschmutzt bzw. entwertet und kann so nicht wieder dem Versorgungsnetz zugeführt werden. Beim so genannten Energieverbrauch ist es genauso: Wird 1 kWh elektrische Energie aus dem Stromversorgungsnetz bezogen und wird diese mit dem Elektroherd in Wärmeenergie umgewandelt, so erhält man genau 1 kWh Wärmeenergie, womit man Speisen zubereiten kann. Diese Wärmeenergie verflüchtigt sich letztlich an die Umgebung und kann nicht mehr ohne Weiteres zurückgeholt werden. Es findet eine **Energieentwertung** statt: Aus 1 kWh hochwertiger elektrischer Energie wurde 1 kWh niederwertige Umgebungsenergie, mit der in Zukunft keine Speisen mehr zubereitet werden können.

Energieverbrauch bedeutet also letztlich die Umwandlung hochwertiger Energieformen in niederwertige. Mit Energieerzeugung ist das Verfügbarmachen hochwertiger Energieformen gemeint. Die niederwertige Energieform ist Wärmeenergie, ihr Wert ist umso geringer, je weniger sich ihre Temperatur von der Umgebungstemperatur unterscheidet.

3.1.3 Energieumwandlung

Nach dem Satz über die Energieerhaltung gibt es (streng genommen, wenn auch umgangssprachlich üblich) keine Energieverbraucher, sondern nur **Energiewandler**. Sie wandeln eine

Energieart in andere Energiearten um. Wie bereits im Kapitel „Physikalische Grundlagen“ ausgeführt, gibt man als Gütemaßstab für Energiewandler ihren **Wirkungsgrad** η (Eta) an, der folgendermaßen definiert ist:

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

Die dimensionslose Zahl η liegt zwischen 0

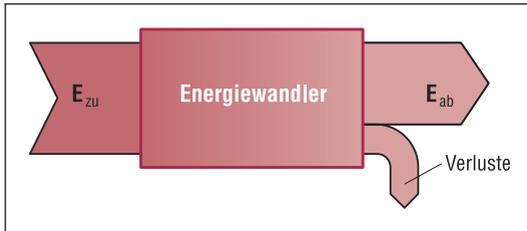


Abb. 3-1: Energieflussbild eines Energiewandlers

und 1 oder, wie sie auch oft angegeben wird, zwischen 0% und 100%. Effiziente Energiewandler haben einen Wert nahe bei 1, viele für unsere Energieversorgung wichtige Wandler haben jedoch deutlich geringere Wirkungsgrade (vgl. Abb. 1-23).

Bei der technischen Energieversorgung sind in der Regel mehrere Energieumwandlungen hintereinander erforderlich. Auf diese Weise entsteht eine **Energiewandlungskette**. Die Abbildung 3-2 zeigt die wichtigsten Wandlungen bei der Stromerzeugung in einem Kohlekraftwerk.

Bei der unten dargestellten Energiewandlungskette wird zunächst die chemische Energie der Kohle mit Hilfe des Energiewandlers Feuerung und Kessel in Wärmeenergie des Wasserdampfes umgewandelt. Der nächste Energiewandler, die Dampfturbine, wandelt diese thermische

Energie in kinetische Energie der rotierenden Welle der Turbine um. An die Turbinenwelle ist der Generator angekoppelt, der schließlich die kinetische Energie der sich drehenden Welle in elektrische Energie umwandelt.

Um herzuleiten, wie sich der Gesamtwirkungsgrad einer Energiewandlungskette aus den Einzelwirkungsgraden zusammensetzt, wird noch einmal auf Abb. 3-2 mit den dortigen Bezeichnungen Bezug genommen. Die Einzelwirkungsgrade der Teilsysteme werden der Reihe nach mit η_1 , η_2 und η_3 bezeichnet, sodass 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 nach Definition: $\eta = E_{\text{elektr}}/E_{\text{chem}}$. Genau diesen Quotienten 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:

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

Das bedeutet, da jeder Einzelwirkungsgrad kleiner eins ist, dass der Gesamtwirkungsgrad kleiner als der kleinste Einzelwirkungsgrad ist.

Beispiel

Für die in Abb. 3-2 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. Der Energieinhalt von 73 Tonnen Kohle geht bei der Umwandlung „verloren“!

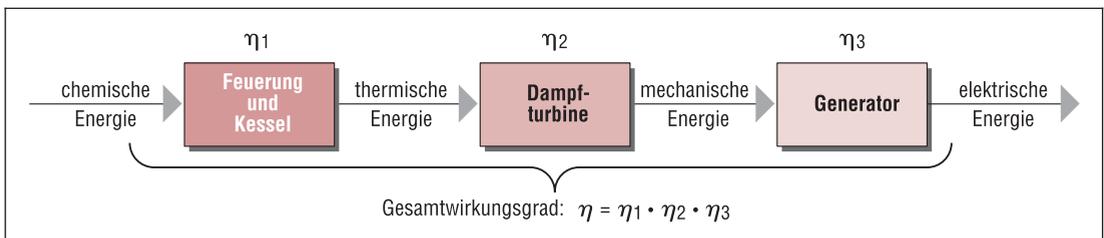


Abb. 3-2: Energiewandlungskette

4 Werkstoffe

4.1 Vorbemerkungen

Historische Anmerkungen zu den Werkstoffen

Entscheidende technische Fortschritte gab es in der Menschheitsgeschichte immer nur im Zusammenhang mit neuen Werkstoffen. Die Werkstoffe prägten die Lebensformen der Menschen so sehr, dass man ganze Epochen nach den dort vorherrschenden Werkstoffen bezeichnet: **Steinzeit, Bronzezeit, Eisenzeit**. Auch die erste industrielle Revolution wäre ohne den Werkstoff Stahl nicht möglich gewesen; Dampfmaschine und Eisenbahn waren Folgeprodukte des nunmehr im industriellen Maßstabe herstellbaren Werkstoffes Stahl. Heute ist die Anzahl der zur Verfügung stehenden Werkstoffe nahezu unübersehbar. Als Schlüsselwerkstoffe gelten zur Zeit die Halbleiter, sodass manche glauben, unsere Zeit könnte im Rückblick einmal „Siliciumzeit“ genannt werden.

Methoden der Werkstofftechnik

Während in früheren Zeiten verbesserte oder neue Werkstoffe empirisch entwickelt wurden, überlässt man heutzutage eine neue Werkstoffentwicklung nicht dem Zufall, sondern setzt gezielt wissenschaftliche Erkenntnisse ein. Zu

diesem Zwecke hat man immer leistungsfähigere Methoden entwickelt, um den inneren Aufbau (die Struktur) der Werkstoffe besser erforschen zu können. Durch gezieltes Ändern im Inneren der Werkstoffe versucht man, Werkstoffe „nach Maß“ mit optimalen Eigenschaften zu entwickeln. Auch hierfür ist die Mikroelektronik ein eindrucksvolles Beispiel, bei dem es gelingt, im Inneren eines Siliciumkristalls feinste, aber hochkomplexe Strukturen zu erzeugen.

Bedeutung der Werkstoffe

Wegen der herausragenden Bedeutung der Werkstoffe ist die Kenntnis über die wichtigsten Werkstoffe sehr wichtig. Ein Einblick in das inzwischen weit verzweigte und hoch spezialisierte Gebiet der Werkstoffe soll hier gegeben werden. Dabei wird versucht, nicht einzelne Werkstoffe in den Mittelpunkt zu stellen und Fakten über deren Eigenschaften anzuhäufen, sondern die Werkstoffe sinnvoll nach ihren Eigenschaften zu gliedern und ihre wichtigsten Eigenschaften aus ihrer inneren Struktur heraus zu verstehen. Damit lassen sich dann am ehesten neue technische Entwicklungen auf dem Gebiete der Werkstoffe verstehen und beurteilen.

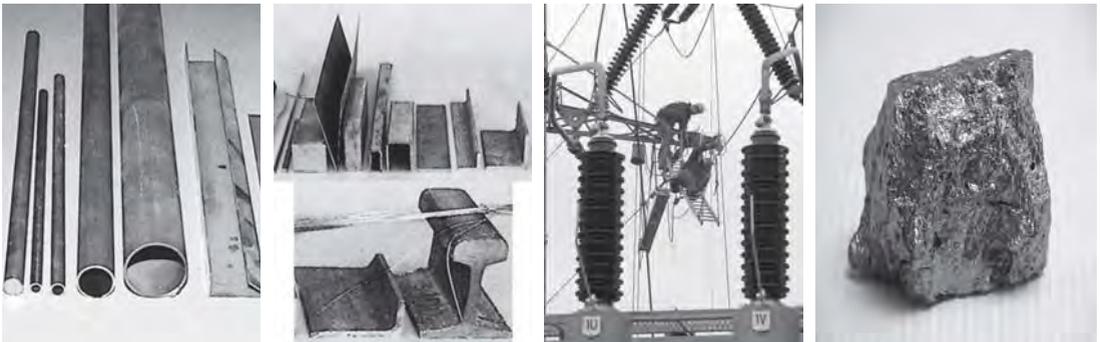


Abb. 4-1: Werkstoffe: Kupfer, Stahl, Porzellan (Keramik), Silicium

4.2 Werkstoffgruppen

Was versteht man unter Werkstoffen?

Werkstoffe sind feste Stoffe, die nutzbare technische Eigenschaften, wie z. B. Festigkeit, elektrische Leitfähigkeit usw., besitzen.

Die Vielzahl der verfügbaren Werkstoffe ordnet man nach Werkstoffgruppen:

Eine erste grobe Einteilung berücksichtigt die überragende Bedeutung der **Metalle** und stellt ihnen die **Nichtmetalle** gegenüber.

Metalle

Ob ein Stoff zu den Metallen gehört, erkennt man in der Regel an seiner elektrischen Leitfähigkeit, die bei Metallen wesentlich höher ist als bei den Nichtmetallen. Da die Wärmeleitfähigkeit zum Teil auf den gleichen Mechanismen wie die elektrische Leitfähigkeit beruht, zeigen Metalle auch eine gute Wärmeleitfähigkeit. Zudem sind der metallische Oberflächenglanz, die gute Verformbarkeit und die Legierbarkeit ebenfalls charakteristische Metalleigenschaften. Die Metalle sind nach wie vor die wichtigsten Konstruktionswerkstoffe, wenn es auf mechanische Festigkeit ankommt.

Hier sind besonders Stahl und Aluminium zu nennen.

Diese erste Grobeinteilung (Metalle – Nichtmetalle) wird zumeist um die **Naturstoffe** erweitert. Man unterscheidet mineralische (Sandstein, Granit, Diamant usw.) und organische (Holz, Kautschuk usw.) Naturstoffe.

Da die so genannten Nichtmetalle außerordentlich unterschiedliche Werkstoffe mit verschiedensten Eigenschaften sind, werden sie noch einmal untergliedert.

Halbleiter

Eine Übergangsstellung zwischen den Metallen und Nichtmetallen nehmen die **Halbleiter** ein. Ihre technisch wichtigsten Vertreter sind Silicium und Germanium. Halbleiter sind bei Raumtemperatur schlechtere elektrische Leiter als die Metalle. Sie leiten aber den elektrischen Strom zumeist besser als die anderen Nichtmetalle. Im Gegensatz zu den Metallen nimmt bei den Halbleitern die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur zu. Insbesondere Silicium hat in der modernen Elektronik eine außergewöhnliche Bedeutung erlangt. Auf Halbleiter wird hier nicht näher eingegangen.

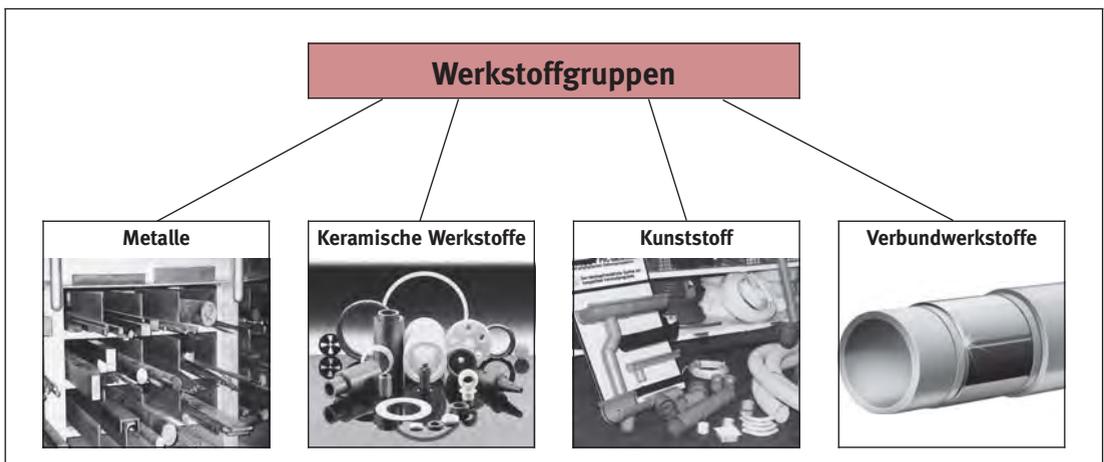


Abb. 4-2: Einteilung der Werkstoffe in Werkstoffgruppen

Keramische Werkstoffe

Ebenfalls zu den Nichtmetallen zählt die Gruppe der **keramischen Werkstoffe**. Dies ist die Gruppe der nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffe. Zu ihnen zählen u. a. die Werkstoffe Glas, Baustoffe und Bindemittel (Ziegel, Zement, Beton), Oxidkeramik (Aluminiumoxid Al_2O_3 u. a.), Ton, Porzellan. Sie sind sehr schlechte elektrische und Wärmeleiter und zeichnen sich durch hohe Schmelztemperaturen sowie große Härte aus. Der Hauptnachteil der Werkstoffe aus dieser Gruppe ist die Sprödigkeit, wie man sie von Glas oder Porzellan her kennt. Man setzt die Werkstoffe dieser Gruppe dort ein, wo es auf große Härte (Schneidkeramik), Hitzebeständigkeit (Ofenausmauerungen) und elektrische Isolierfähigkeit (Hochspannungsisolatoren) ankommt. Zudem gehören die meisten Baustoffe dieser Gruppe an.

Kunststoffe

Die Kunststoffe, oder genauer die Polymerwerkstoffe, sind eine relativ neue Werkstoffgruppe. Sie werden künstlich aus kohlenstoffhaltigen Verbindungen hergestellt. Kunststoffe sind elektrisch isolierend, also sehr schlechte elektrische Leiter und haben niedrige Schmelztemperaturen. Besonders vorteilhaft wirken sich die geringere Masse und die Korrosionsbeständigkeit der Kunststoffe aus. Durch die synthetische Herstellung gelingt es, Kunststoffe mit unterschiedlichsten Eigenschaften zu entwickeln. Dementsprechend sind Kunststoffe in unserer Zeit allgegenwärtig: von der Einkaufstragetasche

bis zu hoch spezialisierten Einsätzen in der Luft- und Raumfahrt reicht das Spektrum.

Verbundwerkstoffe

Eine Sonderrolle nimmt die Gruppe der **Verbundwerkstoffe** ein. Hier handelt es sich eigentlich um keine „neuen“ Werkstoffe; vielmehr besteht ein Verbundwerkstoff aus einem Verbund (einer Kombination) von verschiedenen Werkstoffen, mit dem Ziel, die positiven Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe zu erhalten und die negativen zu kompensieren. Man erhält durch den Verbund einen Werkstoff mit neuen Eigenschaften. Beispiele: Die geringe mechanische Festigkeit von Kunststoff und die Sprödigkeit von Glas, beides unerwünschte Eigenschaften, kompensiert man im glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK). Beton darf nur sehr wenig auf Zug belastet werden, Stahl rostet; beide Werkstoffe kombiniert zu Stahlbeton, ergeben einen Verbundwerkstoff, bei dem der Stahl die Zugkräfte aufnimmt und der Beton den Stahl vor Korrosion schützt.

Tabellarische Zusammenstellung der Eigenschaften

Die Zusammenstellung der Werkstoffe in die vier Werkstoffgruppen hat man nach den Eigenschaften der Werkstoffe vorgenommen. Die einer Gruppe angehörenden Werkstoff haben gemeinsame charakteristische Eigenschaften, die für diese Gruppe typisch sind.

Sie sind nachfolgend tabellarisch dargestellt:

Tabelle 13: Die charakteristischen Eigenschaften von Werkstoffen aus den jeweiligen Werkstoffgruppen

Metalle	Keramische Werkstoffe	Kunststoffe	Verbundwerkstoffe
sehr gute elektrische Leiter	schlechte elektrische Leiter	schlechte elektrische Leiter	Kombination von mindestens zwei Werkstoffen
Oberflächenglanz	hohe Wärmebeständigkeit	geringe Wärmebeständigkeit	nutzt die Vorteile, kompensiert die Nachteile
gute Verformbarkeit	sehr große Härte	sehr leicht	z. B. GFK, Stahlbeton
hohe Festigkeit	Nachteil: Sprödigkeit	geringe Festigkeit	z. B. Beton: korrosionsbeständig Stahl: hohe Zugfestigkeit

5 Kernenergie

5.1 Physikalische Grundlagen der Kernenergie

Vorbemerkung

In Kohlekraftwerken, wie bei der Verbrennung überhaupt, setzt man Energien aus den Elektronenhüllen von Atomen oder Molekülen frei, so genannte **chemische Energie**. Bei der Nutzung von **Kernenergie** wird hingegen Energie aus den Atomkernen verfügbar gemacht. Es handelt sich demzufolge um eine völlig andere Art, Energie zu gewinnen, die erst in den letzten fünf, sechs Jahrzehnten durch die Wissenschaft entwickelt wurde. Zunächst stand allerdings nicht die friedliche Nutzung der Kernenergie im Vordergrund, sondern die Entwicklung der Atombombe. Um verstehen zu können, wie sich aus Atomkernen Energie freisetzen lässt, sind einige kernphysikalische Grundlagen erforderlich.

Atommodelle

Das atomare Geschehen erschließt sich die Wissenschaft mit Hilfe von Modellvorstellungen, welche die nicht direkt zugängliche Realität mehr oder weniger genau beschreiben. Im Laufe der Entwicklung der Atom- und Kernphysik sind immer genauere Modelle entwickelt worden. Zum Verständnis der Kernenergie genügt das im Folgenden dargestellte Modell.

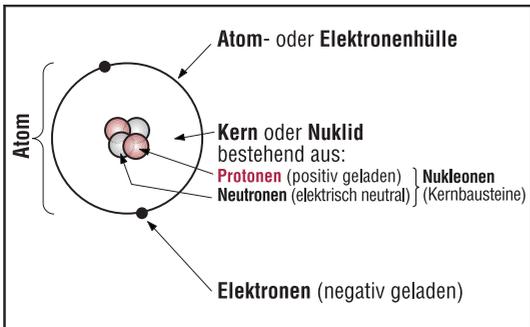


Abb. 5-1: Atommodell, zusammen mit den wichtigsten Begriffen, am Beispiel des Heliumatoms

Demzufolge besteht ein Atom aus einem Kern, der von einer bestimmten Anzahl von **Elektronen** umkreist wird. Den Aufenthaltsort der Elektronen nennt man die Hülle des Atoms. Jedes dieser Hüllelektronen trägt eine negative **Elementarladung** $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (Coulomb). Der Kern setzt sich aus den positiv geladenen **Protonen**, von denen jedes eine positive Elementarladung trägt, und den elektrisch neutralen **Neutronen** zusammen. Protonen und Neutronen, also die Kernbausteine, erhalten als Oberbegriff den Namen **Nukleonen** und der **Atomkern** wird auch als **Nuklid** bezeichnet. Da ein Atom im Normalzustand genauso viele positiv geladene Protonen besitzt wie in der Atomhülle negativ geladene Elektronen kreisen, ist ein Atom nach außen elektrisch neutral.

Der Atomkern hat im Vergleich zum gesamten Atom sehr geringe Abmessungen; der Atomdurchmesser beträgt etwa das 10^4 fache des Kerndurchmessers. Zum Vergleich: Wenn der Kerndurchmesser 1 cm betrüge, dann hätte das gesamte Atom einen Durchmesser von 100 m. Außerdem ist fast die gesamte Masse eines Atoms im Kern konzentriert, da ein Nukleon eine um den Faktor 1840 größere Masse besitzt als ein Elektron.

Ein Atom besteht demnach aus einer vergleichsweise sehr großen, negativ geladenen, aber überwiegend leeren Atomhülle und aus dem winzigen, positiv geladenen Kern, der fast die gesamte Masse des Atoms enthält.

Man führt noch die **Kernladungszahl** Z ein, das ist die Anzahl der Protonen, die ein Kern enthält. Mit N bezeichnet man die **Anzahl der Neutronen** und mit A die **Anzahl der Nukleonen** insgesamt, sodass gilt:

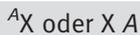
$$A = Z + N.$$

A heißt **Massenzahl**.

Da beim Atom die Zahl der Protonen gleich der Zahl der Hüllelektronen ist, ist die Kernladungszahl Z identisch mit der **Ordnungszahl** des betreffenden chemischen Elements im Periodensystem der Elemente (PSE) (vgl. Kapitel „Chemische Grundlagen“). Die Kernladungszahl und die Massenzahl dienen zur symbolischen Darstellung von Kernen:

A_ZX A: Massenzahl
Z: Kernladungszahl
X: chemisches Elementsymbol
(z. B. He für das Element Helium)

In dieser Schreibweise ist die Kernladungszahl eigentlich überflüssig, weil sich aus dem Elementsymbol mit Hilfe des PSE die Ordnungszahl und damit auch die Kernladungszahl ergibt, sodass die Angaben



zur eindeutigen Kennzeichnung eines Kerns genügen.

Beispiele:

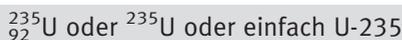
Der Atomkern des Wasserstoffs besteht aus einem Proton:



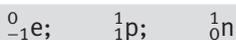
Der Heliumkern besitzt 2 Protonen und 2 Neutronen:



Ein Urankern mit 235 Nukleonen hat die Bezeichnungen:



Für Elektron (e), Proton (p) und Neutron (n) schreibt man:



Isotope

Atome mit gleicher Kernladungszahl aber unterschiedlicher Massenzahl nennt man Isotope.

Das bedeutet, dass Isotope gleich viel Protonen, aber eine unterschiedliche Neutronenzahl besitzen; sie haben damit dasselbe chemische Elementsymbol.

Beispiele:

Das Element Wasserstoff kommt in der Natur in drei Isotopen vor:

- (normaler) Wasserstoff (zu über 99,9 % in natürlichem Wasserstoff enthalten): ${}^1_1\text{H}$
- schwerer Wasserstoff, auch **Deuterium** genannt: ${}^2_1\text{H}$
- überschwerer Wasserstoff oder **Tritium**: ${}^3_1\text{H}$

Auch das Element Uran hat verschiedene Isotope, von denen zwei für die Kernenergie besonders wichtig sind:

- das nicht spaltbare U-238; es ist zu 99,3 % in Natururan enthalten
- das spaltbare U-235; es kommt nur mit einem Anteil von 0,7 % im natürlichen Uran vor

Maßeinheiten der Atomphysik

Da die üblichen Einheiten für Masse und Energie in der Atom- und Kernphysik zu groß sind, benutzt man hier üblicherweise andere Einheiten.

Masse

Massen gibt man in der atomaren Masseneinheit u an. Dabei legt man fest, dass 1 u der 12. Teil der Masse eines ${}^{12}\text{C}$ -Nuklids ist. Es gilt die Umrechnung

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Damit ist 1 u etwa die Masse eines Nukleons. Mit Hilfe der Massenspektrografie kann man Massen im atomaren Bereich sehr genau bestimmen. Für die Massen der Teilchen Elektron, Proton und Neutron gilt:

$$m_e = 0,000549 \text{ u}; \quad m_p = 1,007276 \text{ u}; \\ m_n = 1,008665 \text{ u}$$

Energie

Energien gibt man in eV (Elektronenvolt) an, das ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es eine Spannungsdifferenz von 1 V (Volt) durchläuft:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Massendefekt

Betrachtet man einen Heliumkern, der aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, so sollte man erwarten, dass seine Masse

$$m = 2m_p + 2m_n = 2 \cdot 1,007276 \text{ u} + 2 \cdot 1,008665 \text{ u} = 4,031882 \text{ u}$$

beträgt. Tatsächlich misst man aber eine Nuklidmasse des He von nur

$$m({}_2^4\text{He}) = 4,001506 \text{ u.}$$

Es besteht also die Massendifferenz $\Delta m = 4,031882 \text{ u} - 4,001506 \text{ u} = 0,030376 \text{ u}$. Eine Massendifferenz stellt man bei allen Kernen fest.

Allgemein lässt sich festhalten:

Die Masse eines Nuklids ist stets kleiner als die Summe der Massen seiner Nukleonen. Diese Differenz bezeichnet man als Massendefekt Δm . Er berechnet sich gemäß:
 $\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m$

Dabei bezeichnet m die tatsächliche Masse des Kerns.

Äquivalenz von Masse und Energie

Eine Deutung des Massendefekts gelingt mit der berühmten **Formel Albert Einsteins**, die er 1905 im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie entwickelte:

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

Es bedeuten:

E : Energie in J

m : Masse in kg

c : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$c = 299\,793 \text{ km/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

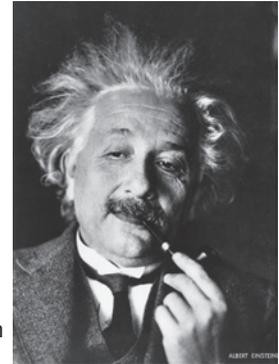


Abb. 5-2: Albert Einstein (1879–1955)

Diese Formel besagt, dass Masse und Energie zwei einander äquivalente Größen sind. c^2 spielt in der Formel nur die Rolle einer Proportionalitätskonstanten. Um zu sehen, welche Energiemenge 1 g Masse entspricht, wird nach der einsteinschen Formel folgende Umrechnung durchgeführt:

$$E = m \cdot c^2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Zur besseren Beurteilung dieser Menge erfolgt noch die Umrechnung in kWh und in t SKE:

$$E = 9 \cdot 10^{13} \text{ J} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ kWh} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ t SKE}$$

In 1 g Masse steckt also die unvorstellbare Menge Energie von ca. 3000 t Steinkohle. Es existiert jedoch keine technische Möglichkeit, mit der diese Energie freigesetzt werden könnte. Als zweites Beispiel wird noch berechnet, wie viel Energie einer atomaren Masseneinheit u entspricht:

$$E = m \cdot c^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

Schließlich wird dieser Wert noch in eV umgerechnet, man erhält:

$$1 \text{ u} = 933 \text{ MeV}$$

Bindungsenergie

Mit Hilfe der einsteinschen Formel lässt sich der Massendefekt folgendermaßen deuten: Die beim Zusammenbau eines Kerns aus seinen Nukleonen „verloren gegangene“ Masse, der Massendefekt, wird als Energie freigesetzt, und zwar ist das genau die Bindungsenergie,

6 Effiziente und Ressourcenschonende Energieanwendung

Energie ist ein knappes, teures Gut – muss es auch sein, damit es nicht verschwendet wird. Anthropogener¹ Energieeinsatz bedeutet derzeit nämlich Vernichtung unwiederbringlicher Ressourcen und beträchtliche Umweltbelastungen. Selbst wenn in Zukunft ein höherer Anteil des Energiebedarfs durch regenerative Ener-

gien gedeckt wird, muss mit Energie weiterhin sparsam und effizient umgegangen werden. Das sind wichtige Maßnahmen bei der Energienutzung durch den Menschen. Es gilt nämlich: Die vermiedene Kilowattstunde ist die umweltverträglichste und Ressourcen schonendste Kilowattstunde überhaupt.

6.1 Bilanzierung von Energiewandlungssystemen

Unsere derzeitigen Energieversorgungssysteme sind zum überwiegenden Teil auf erschöpflichen Energievorräten aufgebaut und belasten im hohen Maße die Umwelt. Sie werden damit dem Leitbild einer „nachhaltigen Entwicklung“, wie es auch bei der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung in Rio 1992 und bei der Folgekonferenzen u. a. in Kyoto 1997 gefordert wurde und wird, nicht gerecht. Die unterschiedlichen Energieversorgungssysteme müssen deshalb danach beurteilt werden, ob sie einer nachhaltigen Energieversorgung dienen, d. h., ob sie ohne Raubbau an der Natur und nicht auf Kosten nachkommender Generationen betrieben werden können.

Beispielsweise ist nicht von vornherein klar, ob die Stromerzeugung mit Solarzellen diesem Ziel gerecht wird: Es muss vielmehr erst untersucht werden, ob die bei der Herstellung der Siliciumzellen benötigte Energie während des Lebenszyklus der Zellen wieder gewonnen werden kann und ob die Schadstoffemission bei der Herstellung, beim Transport usw. nicht zu hoch ist. Was mit den Zellen am Ende ihres Lebensweges wird, muss ebenfalls in die Bilanz einbezogen werden. Auch bei der Entscheidung, ob sich jemand einen Pkw mit Otto- oder Dieselmotor anschafft, werden häufig nur wirtschaftliche Aspekte gesehen. Man überlegt, welche Variante weniger Kraftstoffkosten verursacht, wie es mit den Kosten für Steuer und Versicherung aussieht usw. Das alles sind wichtige Entscheidungsfaktoren, aber im Sinne

¹ durch den Menschen verursachter

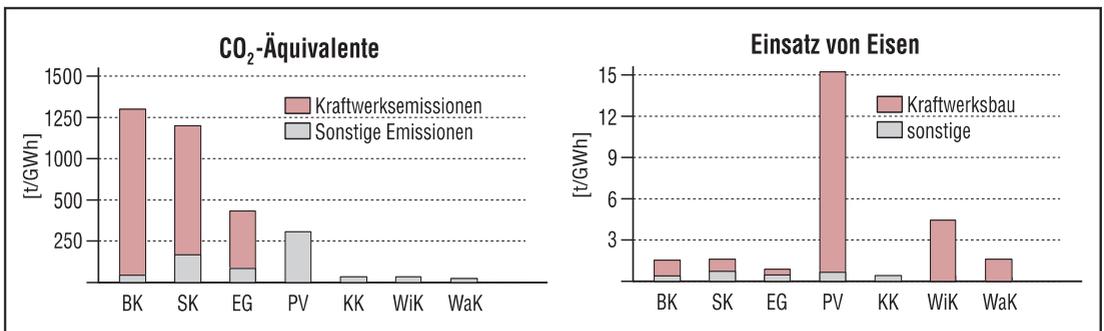


Abb. 6-1: Beispielhafte Resultate für Lebensweganalysen: Treibhausgasemissionen und Aufwand an nicht-energetischen Rohstoffen am Beispiel von Eisen für verschiedene Stromerzeugungstechniken. BK = Braunkohle, SK = Steinkohle, EG = Erdgas, PV = Photovoltaik, KK = Kernkraft, WiK = Windkraft, WaK = Wasserkraft

einer **nachhaltigen Entwicklung** stellen sie nur Teilaspekte dar. So werden die ökologischen Gesichtspunkte meist unzureichend bei einer Kaufentscheidung berücksichtigt.

Dass solche Untersuchungen **quantitativ** (= zahlenmäßig) durchgeführt werden müssen, zeigt die Abbildung 6-1 sehr deutlich. So sind die kumulierten (= aufsummierten) CO₂-Emissionen pro Energieeinheit bei Photovoltaikanlagen (PV) höher als bei der Stromerzeugung durch Kernkraftwerke, was an den hohen energetischen Aufwendungen bei der Herstellung der Solarzellen liegt. Bei den fossilen Kraftwerken entstehen die meisten Emissionen im Betrieb, bei den anderen beim Bau der Anlagen (linkes Diagramm). Auch der Einsatz von Eisen pro erzeugter Energieeinheit (also bei Materialaufwendungen) ist bei Photovoltaikanlagen sehr hoch im Vergleich zu anderen Kraftwerken, wie das rechte Diagramm zeigt.

Natürlich sind die exemplarisch abgebildeten Diagramme keineswegs ausreichend, um die genannten Energiewandlungssysteme in Bezug auf ihre Nachhaltigkeit beurteilen zu können. Erst eine ganzheitliche Bilanzierung liefert die notwendigen Vergleichszahlen.

Tabelle 23: Auf 1 kWh erzeugter elektrischer Energie bezogene Input-Output-Werte bei verschiedenen Energiewandlern (Sachbilanz)

Bilanzgröße	Einheit	Braunkohle	Steinkohle	Kernkraft	Photovoltaik	Windkraft
Staub	mg/kWh	222	64	25	124	18
CO₂	g/kWh	1 054	838	17	334	36
C_mH_n	mg/kWh	94	4 716	0	908	166
NO_x	mg/kWh	830	696	48	443	49
SO₂	mg/kWh	401	275	73	507	68
Rn-222	kBq/kWh	–	–	17	–	–
C-14	kBq/kWh	–	–	31	–	–
Radioaktivität	10 ⁻¹² PersSv/kWh	7	12	4656	1 693	27
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	19	20	27	2 041	44
Eisen	mg/kWh	2 102	2 306	420	5 346	5 212
Kupfer	mg/kWh	8	2	6	241	65
Kalkstein	mg/kWh	20 302	12 837	806	10 523	2 493

Quelle: IER Forschungsbericht, Universität Stuttgart 2000

Ganzheitliche Bilanzierung

Bei der Methode der ganzheitlichen Bilanzierung werden alle Stoff- und Energieströme während des gesamten Lebenszyklus eines Produktes (Herstellung, Nutzung und Entsorgung) erfasst und in die Bilanz einbezogen. Es handelt sich um ein sehr aufwendiges Verfahren, mit einer enormen Datenmenge, die nur computergestützt bewältigt werden kann. Nach der Erfassung der Input- und Outputflüsse (= **Sachbilanz**) müssen diese einer **Wirkungsanalyse** unterzogen werden. Beispielsweise muss bewertet werden, wie hoch die Umweltbelastung der einzelnen emittierten Stoffe einzuschätzen ist.

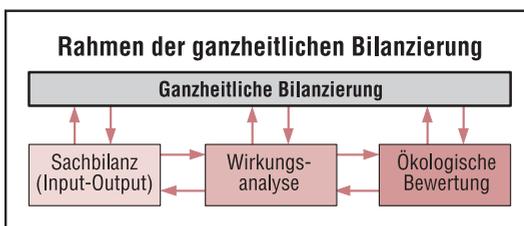


Abb. 6-2: Zusammenhänge bei der ganzheitlichen Bilanzierung

Die Wirkungsanalyse schließlich führt zu der ökologischen Bewertung des Produkts bzw. Systems, weshalb man statt von ganzheitlicher Bilanzierung auch häufig von einer **Ökobilanz** spricht.

Sachbilanz

Der erste Schritt bei der ganzheitlichen Bilanzierung, nämlich die **Sachbilanz**, erfordert das Erfassen einer breiten Datenbasis, die mit Hilfe von Berechnungen, Messungen, Schätzungen und Statistiken gewonnen werden muss. Dazu müssen alle in das Produkt einfließenden und von diesem ausgehenden Mengen quantitativ erfasst werden. Die Sachbilanz für unterschiedliche Systeme zur Stromerzeugung ist in Tabelle 23 wiedergegeben.

Die Sachbilanz gibt in Tabelle 23 jeweils die kumulierten Werte aus dem Bau, dem Betrieb und dem Abriss der entsprechenden Anlage wieder. Alle Größen sind auf 1 kWh erzeugter elektrischer Energie bezogen. Nur so ist ein Vergleich der Zahlenwerte möglich. Die Sachbilanz ergibt vergleichsweise hohe Werte für Photovoltaikanlagen, diese ergeben sich nicht aus dem Betrieb, sondern in erster Linie aus der Herstellung der Solarzellen. Wegen der ge-

ringen Energiedichte erfordern sie einen hohen Materialeinsatz pro erzeugter Kilowattstunde. Dieser Herstellungsprozess treibt auch die Werte für die Emissionen nach oben. Diese Sachbilanz macht bereits deutlich, dass hier umweltschonendere Herstellungsprozesse und Produkte erforderlich sind. Mit den amorphen Siliciumzellen (oben sind die Werte für polykristalline angegeben) ist man bereits auf dem richtigen Weg.

Wirkungsanalyse

Nach dem Aufstellen der Sachbilanz ist zu bewerten, in welchem Maße die erfassten Energie- und Stoffströme auf die Umwelt einwirken, welche Schäden sie an der Natur und an Sachgegenständen verursachen. Beispielsweise sind die Fragen zu beantworten: Welchen Folgen hat die Emission von CO₂ im Vergleich zu SO₂? Wie ist der Verbrauch erschöpflicher Energievorkommen zu bewerten.

In Abbildung 6-3 ist der Einsatz an erschöpflicher Primärenergie bei den verschiedenen Stromerzeugungssystemen (BK = Braunkohlekraftwerk, SK = Steinkohlekraftwerk, KK = Kernkraftwerk, PV = Photovoltaikanlage, WiK = Windkraftwerk) im Kraftwerksbetrieb und beim Bau

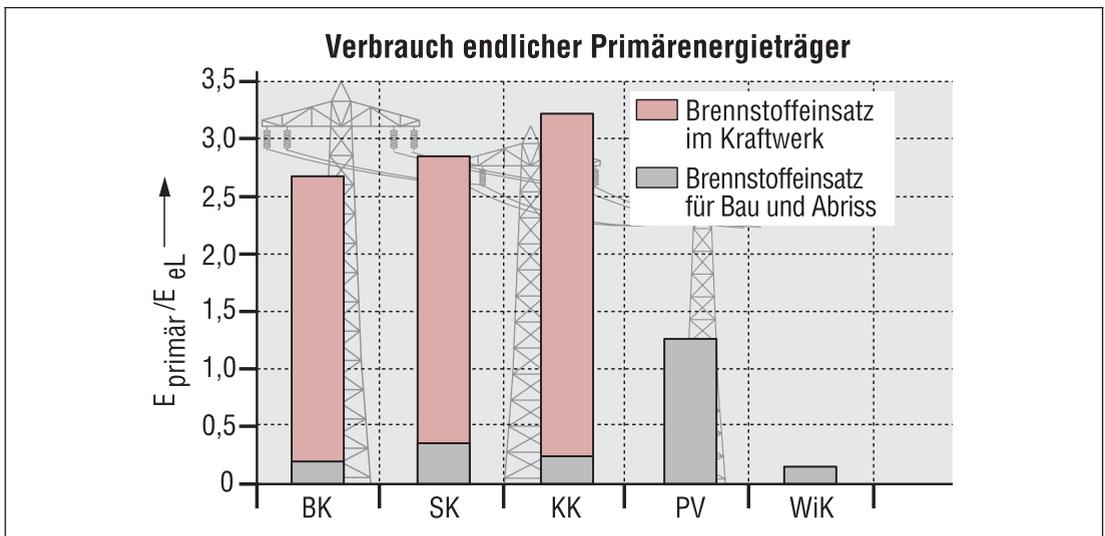


Abb. 6-3: Einsatz an erschöpflicher Primärenergie bei den verschiedenen Stromerzeugungssystemen (BK = Braunkohle, SK = Steinkohle, KK = Kernkraft, PV = Photovoltaik, WiK = Windkraft)