

Energie als zentrale Größe im Physikunterricht

1) Energie und Mechanik

1 a) Lageenergie, Bewegungsenergie, Verformungsenergie

Einstiegsversuch: Eine Masse von 5 kg ruht auf einem Pappkarton. Die Masse wird angehoben um die Höhe h und losgelassen. Beim Fallen wird sie immer schneller, bis sie auf den Karton trifft und den Karton zerstört und dabei zur Ruhe kommt.

Durch Anheben um die Höhe h erhielt die Masse m eine zusätzliche Energie,

die Lageenergie oder potentielle Energie $E_{\text{Lage}} = m \cdot g \cdot h$

g , die "Schwerebeschleunigung", gibt die Kraft pro kg Masse an, bei uns sind das etwa 10 N pro kg.

Um eine Tafel Schokolade (100 g) hochzuheben, benötige ich die Kraft von etwa 1 N

Verallgemeinerung: Wenn ich eine Kraft F aufwenden muss, um einen Körper in Richtung der Kraft um die Strecke s zu verschieben, so muss ich dafür die Energie $E = F \cdot s$ aufwenden. Eine solche mechanische Zufuhr von Energie wird auch als Arbeit bezeichnet.

Einheit der Energie ist 1 J [Joule] = 1 Nm.

Ich muss etwa 1 J aufwenden um eine Tafel Schokolade von 100 g um 1 m anzuheben.

Eine Änderung der Energie pro Zeit heißt Leistung, Einheit 1 W [Watt] = 1 J/s = 1 Nm/s.

Ich muss eine Leistung von 1 W erbringen, wenn ich eine Tafel Schokolade (100 g) in 1s um 1m anheben will.

Wird der angehobene Körper losgelassen, so steigt seine Geschwindigkeit.

Versuch: die Fallschnur: An einer Schnur sind Schraubenmuttern angebracht. Die Schnur wird senkrecht gehalten und losgelassen. Die Schraubenmuttern treffen nacheinander auf dem Boden auf. Die Abstände der Muttern voneinander wurden nun so gewählt, dass die Muttern im gleichen zeitlichen Abstand auftreffen, also im Takt. Es zeigt sich, dass die Fallstrecken quadratisch mit der Zeit zunehmen: 10 cm, 40 cm, 90 cm, 1,60 cm, 2,50 cm.

Überlegungen nach Galileo Galilei:

Die einfachste Form, in der sich die Geschwindigkeit v eines Körpers mit der Zeit t entwickelt, ist $v = a \cdot t$

Die Größe a bezeichnet man als "Beschleunigung"; beim freien Fall ohne Luftwiderstand ist dies $g = 10 \text{ m/s}^2$, ein solcher Körper wird also pro Sekunde um 10 m/s schneller.

Die Durchschnittsgeschwindigkeit v_D eines Körpers im Zeitraum zwischen seinem Start und dem Zeitpunkt t ist dann $v_D = 1/2 a \cdot t$. Die gesamte bis zum Zeitpunkt t zurückgelegte Strecke s ist dann $s = v_D \cdot t = 1/2 a \cdot t^2$

Beim Fallen wandelt sich die Lageenergie des Körpers um in Bewegungsenergie oder kinetische Energie $E_{\text{kin}} = 1/2 m v^2$.

Ist der Körper um die Strecke $h = 1/2 g t^2$ gefallen, so hat er in diesem Moment die Geschwindigkeit $v = g t$.

Für die Energie gilt also: $E = m g h = m g 1/2 g t^2 = 1/2 m g^2 t^2 = 1/2 m v^2$.

Beim Auftreffen wandelt sich die Bewegungsenergie um in Verformungsenergie.

Wenn man eine Feder mit einer Kraft F spannt, so erhält man eine Spannenergie. Falls die Dehnung x auf einfache Weise mit der Kraft F zusammenhängt ($F = D \cdot s$), so gilt. $E_{\text{Spann}} = 1/2 D \cdot x^2$.

Wenn ein physikalisches System nicht Energie von außen erhält oder nach außen abgibt, ändert sich die Summe aller seiner Energien nicht. (Energieerhaltungssatz).

Derartige Erhaltungssätze sind in der Physik von zentraler Bedeutung. Weitere solche Erhaltungssätze gelten für den Impuls, den Drehimpuls und die elektrische Ladung.

1b) Mechanische Energien in der Astrophysik

Beim Fallen von Körpern können riesige Energiemengen frei werden.

Ein Steinmeteorit von 1 m^3 (etwa 2700 kg), der mit $10\,000 \text{ m/s}$ auf die Erde trifft, setzt dabei eine Energie von $1,35 \cdot 10^{11} \text{ J}$ frei.

Stürzt ein Stern unter dem Einfluss der Schwerkraft in sich zusammen, kommt es zu einer Supernova-Explosion, die etwa 10^{44} J freisetzt; dies ist fast so viel wie die gesamte übrige Energieerzeugung des Sterns während seiner gesamten Lebenszeit.

In einem Milchstraßensystem, auch unserer Milchstraße, gibt es im Zentrum je ein großes schwarzes Loch. Fällt Materie in dieses Schwarze Loch hinein, können bis zu 10^{41} W dadurch freigesetzt werden. Objekte, bei denen so viel Energie freigesetzt wird, heißen Quasare.

1c) Energieerhaltung bei einfachen Vorrichtungen

Die Erhaltung der Energie hilft dazu, die folgenden einfachen Vorrichtungen zu verstehen.

- a) **Schiefe Ebene:** Schiebt man einen Körper eine Rampe mit der Strecke s hinauf, um eine Höhe h zu erreichen, braucht man weniger Kraft, als wenn man den Körper hoch hebt. Der Körper gewinnt dabei die Lageenergie $E = m g h$. Für die Kraft F , mit der ich den Körper hoch schiebe, gilt dann: $F s = m g h$, also $F = m g h / s$. Ein Schraubgewinde ist eine aufgewinkelte schiefe Ebene.
- b) **Die feste Rolle:** Die Kraft wird einfach umgelenkt: $F_1 = F_2 \Rightarrow F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2 \Rightarrow s_1 = s_2$
- c) **Die lose Rolle:** Sie hängt an 2 Seilstücken, von denen das eine oben befestigt ist. Zieht man das andere Seilstück mit der Kraft F_1 um die Strecke s_1 nach oben, so bewegt sich die Rolle und mit ihr die Last, die an ihr hängt, um die Strecke $s_2 = 1/2 \cdot s_1$ nach oben. Da $F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2$, so gilt: $F_2 = 2 \cdot F_1$.
- d) **Der Flaschenzug:** Verteilt sich das Gewicht der Last und der unteren Rollen auf 4 Seilstücke, so gilt: $F_2 = 4 \cdot F_1$. Man muss aber 4 Seilstücke um s_2 verkürzen, wenn man die Last um s_2 anheben will, also $s_2 = 1/4 \cdot s_1$.
- e) **Der Hebel:** Lagert eine waagrechte Stange der Länge k am einen Ende und wird am anderen Ende mit einer Kraft F_1 um ein kleines Stück s_1 angehoben, so wird eine Stelle im Abstand r vom Auflagepunkt um die Strecke $s_2 = r/k \cdot s_1$ nach oben angehoben. Eine dort aufgehängte Masse wird dann mit der Kraft $F_2 = k/r \cdot F_1$. Die Größe $r \cdot F_2$ ist damit überall gleich, sie wird als Drehmoment bezeichnet. Im Unterschied zur Arbeit steht hier die Kraft senkrecht auf dem "Hebelarm" r .

2) Energie und Wärmelehre

2a) Temperatur und Wärme

Durch Reibung, z. B. beim Bremsen, kann Bewegungsenergie umgewandelt werden in Wärme. Dabei wandelt sich die Bewegung in ungeordnete Bewegung der Atome und Moleküle um.

Die Temperatur ist die durchschnittliche Bewegungsenergie pro Teilchen bei der ungeordneten Wärmebewegung.

Im festen Körper bewegen sich die Teilchen um ihre Plätze herum, in der Flüssigkeit bewegen sie sich durcheinander, bleiben aber in Verbindung miteinander, und im gasförmigen Zustand fliegen sie, so weit sie können.

Die Erhöhung der Temperatur bedeutet deshalb stärkere Bewegung der Teilchen.

Temperaturerhöhung im Festkörper bedeutet, dass die Teilchen schließlich so viel Energie erhalten, dass sie ihre Plätze verlassen können: Der Körper schmilzt. Bei der Flüssigkeit erhalten einzelne Teilchen durch Stöße so viel Energie, dass sie die Flüssigkeit verlassen können: Wasser verdunstet. Je mehr die Temperatur steigt, desto mehr Teilchen erhalten diese Energie und desto größer wird die Verdunstung. Beim Verdampfen werden schließlich alle Bindungen zwischen den Teilchen aufgebrochen, und das geschieht nicht nur an der Oberfläche der Flüssigkeit, sondern auch in ihrem Inneren.

Wärme ist die gesamte Bewegungsenergie der ungeordneten Wärmebewegung.
Zum Erwärmen benötigt man viel Energie.

Die zum Erwärmen notwendige Energie E hängt zusammen mit der erwärmten Masse m , der Temperaturdifferenz ΔT und vom Stoff, der erwärmt wird. Es gilt: $E = c \cdot m \cdot \Delta T$. c ist eine Konstante, die vom Stoff abhängt. Um 1 l Wasser um 1 °C zu erwärmen, benötigt man etwa 4160 J, also genau so viel, wie man dafür braucht, um 416 l Wasser um 1 m anzuheben.

Dort, wo in der Erdatmosphäre Energie absorbiert wird, ist die Temperatur höher. Dies ist vor allem der Erdboden, deshalb nimmt die Temperatur normalerweise nach oben hin ab. Oberhalb von 100 km wird sehr energiereiche UV-Strahlung von der Sonne durch Stickstoff und Sauerstoff absorbiert. Dort oben ist die Luft so dünn, dass die Energiezufuhr dort zu sehr hohen Temperaturen (500 - 1800 K) führt. Die sehr dünnen Gase um die Sonne herum heizen sich viel stärker auf (1 000 000 K – 5 000 000 K) als die Sonnenoberfläche (4 000 – 8000 K). Bei der Erde absorbiert Ozon die UV-Strahlung zwischen 200 und 300 nm hauptsächlich in einer Höhe von 50 km. Deshalb hat die Atmosphäre der Erde in dieser Höhe ein Temperaturmaximum und je ein Minimum bei 8 - 15 km und bei 90 km.

Zum Schmelzen oder gar Verdampfen eines Stoffes benötigt man sehr viel Energie.

Um 1 kg Eis zu schmelzen, benötigt man 334 000 J, um 1 kg Wasser zu verdampfen, 2 256 000 J.

Trifft ein kleinerer Meteorit die Atmosphäre, wird er durch die Luft abgebremst und seine Bewegungsenergie verwandelt sich in Wärme. Er wird weißglühend und verdampft schließlich. Deshalb hinterlässt er am Nachthimmel als Sternschnuppe eine weiß leuchtende Spur.

Diese Energie wird jeweils wieder frei, wenn ein Gas flüssig wird oder eine Flüssigkeit erstarrt.

Deshalb können beim Auftreffen von Wasserdampf schlimme Verbrühungen entstehen.

Ungeordnete Bewegung kann man meist nicht wieder vollständig in geordnete Bewegung verwandeln. Deshalb ist 1 J Wärme weniger wertvoll als 1 J elektrische Energie.

Eine Maschine, die Wärme in mechanische Energie umwandeln will, kann maximal den Anteil $1 - T_{\min} / T_{\max}$ erhalten. T_{\min} und T_{\max} sind dabei die höchste und die niedrigste Temperatur beim Einsatz dieser Maschine. Dieser Anteil heißt Wirkungsgrad und ist bei einer Dampfmaschine 10 %, beim Benzinmotor 25 % und beim Dieselmotor 35 %.

2b) Wärmetransporte

Energie kann von einem Ort zum anderen auch in Form von Wärme transportiert werden:

a) Wärmeleitung: Teilchen geben ihre Bewegungsenergie zum Teil an benachbarte Teilchen ab.

Dies führt zu einem Temperatenausgleich zwischen verschiedenen warmen Stellen.

b) Wärmemitführung: Erhitzte Materie wird an einen anderen Ort transportiert und gibt dort ihre Wärme ab.

Dies geschieht im Golfstrom, der warmes Wasser vom Golf von Mexiko über den Atlantik bis nach Nordeuropa transportiert. Deshalb ist bei uns das Klima viel milder als in Labrador oder Kamtschatka, die beide auf der gleichen geographischen Breite liegen, und Murmansk, der nördlichste Hafen Russlands ist als einziger der großen russischen Häfen ganzjährig eisfrei, obwohl er der nördlichste ist.

c) Wärmestrahlung: Warme Körper geben Energie als Strahlung ab. Diese Strahlung sehen wir als Glut bei Temperaturen ab 650 °C. Erhöht man die Temperatur, glüht der Körper orange, gelb, weiß bis bläulich-weiß, außerdem nimmt die Abstrahlung mit steigender Temperatur stark zu. Kühlt man den Körper ab, sendet er nur noch die unsichtbare Infrarotstrahlung aus.

Gibt man die Temperatur in K an, so ist die gesamte Abstrahlung einer Oberfläche proportional zu T^4 , d. h. Verdopplung der Temperatur führt zu 16-facher Abstrahlung.

Die Abgabe oder Aufnahme der Wärmestrahlung hängt ab von der Oberfläche: Sehr gut bei schwarzer Oberfläche, schlecht bei weißer Oberfläche und sehr schlecht bei verspiegelter Oberfläche.

Deshalb ist eine Thermoskanne innen verspiegelt.

Temperaturen von Planeten stellen sich so ein, dass sie genau so viel Wärmestrahlung in den Weltraum abgeben, wie sie als Licht von der Sonne empfangen. Bei der Erde wäre dies ohne Erdatmosphäre $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Gase in der Atmosphäre (Wasserdampf, CO_2 , CH_4 , Ozon, N_2O , FCKWs), die von unten kommende Wärmestrahlung zum Teil verschlucken und dann wieder nach oben oder unten abgeben, erhöhen die Temperatur des Bodens (Treibhaus-Effekt).

Bei der Erde bewirkt dieser Effekt eine mittlere Temperaturerhöhung um $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

d) Transport von Schmelzwärme und Verdampfungswärme. Wärme wird z. B. aufgenommen, wo Wasser verdampft. Der Wasserdampf wird transportiert und gibt seine Verdampfungswärme dort ab, wo er wieder kondensiert.

In der Erdatmosphäre bis 6 km Höhe ist dieser Energietransport durch Verdampfungswärme in den Tropen etwa dreimal so groß wie alle anderen Wärmetransporte zusammengenommen, bei uns etwa doppelt so groß. In einem Gewitter strömt Luft mit viel Wasserdampf nach oben. Nach oben wird es kälter. Deshalb wird dort Wasserdampf zu Wasser und gibt die Verdampfungswärme an die Luft ab. Deshalb wird dort die Luft etwas wärmer und leichter und steigt schneller auf. So treibt die Kondensationswärme von Wasserdampf die Winde in den Gewittern und in ähnlicher Weise auch in tropischen Wirbelströmen an.

3) Elektrische und magnetische Energie

3a) Ladung, Feld und Spannung

Es gibt zwei Arten von elektrischer Ladung: positiv (+) und negativ (-).

Die kleinste existierende Ladung ist die Ladung des Elektrons und des Protons, aus praktischen Gründen wählt man jedoch als Einheit für die Ladung 1 C [Coulomb].

-1 C entspricht der Ladung von $6,24 \cdot 10^{18}$ Elektronen.

Positive Ladungen stoßen einander ab, negative Ladungen stoßen einander ab und eine positive und eine negative Ladung ziehen einander an. Diese Kraft reicht unendlich weit, wird aber mit abnehmendem Abstand schnell stärker.

Die Kraft ist für den Abstand r zweier Ladungen proportional zu $1/r^2$. Dies bedeutet: $1/2$ Abstand : 4-fache Kraft, $1/10$ Abstand 100-fache Kraft.

Auf eine elektrische Ladung q wirken die Kräfte aller anderen Ladungen im Kosmos. Da F , die Summe dieser Kräfte, proportional ist zu q , kann man eine Größe $E = F / q$ definieren, das elektrische Feld.

Es gibt für jeden Punkt im Raum die Stärke und die Richtung der elektrischen Kraft an, die dort auf eine Ladung von 1 C wirkt.

Auch im elektrischen Feld gibt es eine elektrische Lageenergie E_{el} . Da diese Energie wieder proportional zur Ladung q ist, definiert man das Potential Φ , das für jeden Punkt im Raum angibt, wie groß dort die Energie einer Ladung von 1 C ist.

Die elektrische Spannung U zwischen den Punkten A und B ist diejenige Energie, die ich aufwenden muss, wenn ich eine Ladung von 1 C von A nach B bringe.

Sie ist also die Differenz der Potentiale bei A und bei B.

Einheit der Spannung ist 1 V [Volt] = $1\text{ J} / \text{C}$.

Spannungen ab 50 V , die am menschlichen Körper anliegen, können tödlich sein.

3b) Der elektrische Stromkreis, Stromstärke

In einem normalen Stromkreis fließen Elektronen. Sie erhalten an der Spannungsquelle Energie, fließen damit zum Verbraucher und geben dort ihre Energie ab. Ohne Energie gehen sie auf einem

anderen Weg wieder zurück zur Spannungsquelle.

Dies kann man darstellen durch das Kärtchenspiel: Schüler (Elektronen) erhalten an einer Stelle (Spannungsquelle) Karteikärtchen (Energie), gehen mit ihnen zum "Verbraucher" und geben sie dort ab. Ohne Kärtchen kehren sie auf einem anderen Weg wieder zurück zur "Spannungsquelle".

Die elektrische Stromstärke gibt darüber Auskunft, wie viele Elektronen in einer Sekunde an einer Stelle vorbeikommen. Einheit: $1 \text{ A [Ampère]} = 1 \text{ C / s}$. In einem unverzweigten Stromkreis ist die Stromstärke überall gleich. Im Verbraucher werden keine Elektronen verbraucht.

Die elektrische Spannung gibt an, wie viel Energie ein Elektron trägt.

Wenn nichts anderes angegeben wird, bezieht sich dabei die Potentialdifferenz auf einen der Pole der Spannungsquelle. Eine Straßenbahn erhält vom Elektrizitätswerk lebensgefährliche Elektronen mit 500 V. Diese Elektronen geben ihre Energie in der Straßenbahn in Motoren und Lampen ab und gehen ohne Energie, also bei 0 V, wieder zum Elektrizitätswerk zurück. Die Stromstärken durch Oberleitung und Schienen sind gleich, aber das Betreten der Gleise ist, wegen der kleinen Spannung, völlig ungefährlich.

Die elektrische Leistung P , die Energie, die pro Sekunde an einer Stelle vorbeifließt, ist also $P = U \cdot I$, Einheit $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot \text{A}$

3c) Der elektrische Widerstand als Energiewandler; Reihen- und Parallelschaltung

Wenn Elektronen fließen, verlieren sie normalerweise Energie durch Stöße mit den Atomen des Stromleiters. Eine Stromstärke I erzeugt einen Energieverlust und damit einen Spannungsabfall U längs eines Leiters. Meist ist U proportional zu I , also $U = I \cdot R$.

Die Konstante R wird als elektrischer Widerstand dieses Leiters bezeichnet. Einheit $1 \Omega [\text{Ohm}] = 1 \text{ V} / \text{A}$

Fließt ein Strom nacheinander durch 2 Widerstände R_1 und R_2 (Reihenschaltung), so ist die Stromstärke in beiden Widerständen gleich. Die Energieabgaben und damit die Spannungsabfälle in beiden Widerständen addieren sich. Beide Widerstände verhalten sich gemeinsam so wie ein Widerstand $R = R_1 + R_2$.

In unserem Haushalt hängen viele Elektrogeräte an der gleichen Spannung von 230 V (Parallelschaltung). Hier addieren sich die Ströme, die durch die einzelnen Widerstände fließen. $I = I_1 + I_2 = U/R_1 + U/R_2$. Teilt man diese Gleichung durch die Spannung U , so erhält man $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$.

3c) Energie im elektrischen und magnetischen Feld

Zwischen räumlich getrennten positiven und negativen Ladungen existiert ein elektrisches Feld. dieses Feld erhält Energie.

So kann ein Kondensator (positiv geladene Platte steht einer negativ geladenen gegenüber) ein Speicher elektrischer Energie sein.

Die Energiedichte (Energie pro cm^2) im elektrischen Feld E beträgt $\rho_{\text{el}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2$

Ein von Strom durchflossener Draht erzeugt um sich her ein Magnetfeld, das eine Kraft auf Magnetpole ausübt., besonders, wenn der Draht zur Spule aufgewickelt ist.. Das von einer Spule erzeugte Magnetfeld enthält Energie.

In einem Transformator wird durch das Magnetfeld Energie berührungslos von einer Spule zu einer anderen übertragen. Die Energiedichte (Energie pro cm^2) im magnetischen Feld B beträgt $\rho_{\text{mag}} = \frac{1}{2} 1/(\mu_0 \mu) B^2$.

Ein sich änderndes elektrisches Feld erzeugt um sich her ein Magnetfeld. Ein sich änderndes Magnetfeld erzeugt um sich her ein elektrisches Feld.. Die Kopplung beider Prozesse erzeugt Felder, die mit Lichtgeschwindigkeit (etwa 300 000 km / s) durch den Raum fliegen und dabei

Energie transportieren. Solche sich ausbreitende Felder sind Radiowellen, Fernsehwellen, Mikrowellen, Infrarotstrahlung, sichtbares Licht, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung.

Auf diese Weise strömt von der Sonne zur Erde ein Energiestrom von über 1300 W pro Quadratmeter.

4) Schwingungen und Wellen

4a) Schwingung als Energieaustausch

Eine schwere Kugel hängt an einem Faden. sie wird zur Seite gezogen und erhält damit Lageenergie. Sie wird losgelassen und schwingt wieder zurück. Dabei erhält sie Bewegungsenergie, die am Ausgangspunkt so groß ist wie die zugeführte Lageenergie. Diese Lageenergie treibt die Kugel weiter zum Anstieg in der anderen Seite, bis sie wieder ihre maximale Lageenergie erreicht.. Dann schwingt sie wieder nach innen.

Bei einer Schwingung findet ständig ein Austausch zwischen verschiedenen Formen der Energie statt.

Hängt eine Masse an einer Feder, so findet ständig ein Austausch zwischen der Bewegungsenergie der Masse und der Summe von Lageenergie der Masse und Spannenergie der Feder statt.

:In einem elektrischen Schwingkreis findet ein Austausch zwischen elektrischer Energie in einem Kondensator und magnetischer Energie in einer Spule statt..

Die Stärke der Schwingung nimmt ab, wenn ein Teil der Energie jeweils in Wärme umgewandelt wird oder als elektromagnetische Strahlung ausgesandt wird. Dieser Vorgang wird als Dämpfung bezeichnet.

Führt man einem schwingenden System jeweils im richtigen Moment etwas Energie zu (dies nennt man Resonanz), so schaukelt sich die Schwingung so stark auf, dass sie möglicherweise das gesamte System zerstören kann.

4b) Wellen

Wird Energie, wie bei einer Schwingung, an ein benachbartes Teilchen weitergegeben, aber von diesem nicht zurückgegeben, sondern an ein übernächstes Teilchen, so hat man eine Welle, die sich ausbreitet und dabei Energie transportiert..

Beispiele: Schallwellen sind Verdichtungen und Verdünnungen der Luft breiten sich mit Schallgeschwindigkeit aus, in Luft etwa mit 1/3 km / s..

Wasserwellen: Ein Stein, ins Wasser geworfen, erzeugt kreisförmige Wellen auf der Wasseroberfläche.

Elektromagnetische Wellen: elektrische und magnetische Felder breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit (etwa 300 000 km / s aus. Zu dieser Art von Wellen gehören die Radio- und Fernsehwellen, die Infrarotstrahlung , unser sichtbares Licht, UV-, Röntgen- und γ -Strahlung.

Wellen im Raum breiten sich meist wie Kugelschalen aus.

5) Energieniveaus in Atomen und Molekülen

5 a) Energieniveaus

Viele physikalische Systeme können nur wenige Werte für die Energie annehmen, die sogenannten Energieniveaus. Aufnahme und Abgabe von Energie geschieht meist als sichtbares oder unsichtbares Licht (Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlung).

Die Frequenz und damit die Farbe dieses Lichtes hängt ab von der Differenz der Energien der Energieniveaus; für den Zusammenhang zwischen abgegebener Energie E und der Frequenz gilt

$$E = h \cdot \nu$$

Energie wird damit immer in Portionen (Quanten) abgegeben; Licht besteht also aus Teilchen (Photonen).

5 b) Zustände eines Elektrons im Atom

Ein Atom besteht aus dem schweren Atomkern im Zentrum und aus Elektronen.

Das Wasserstoff-Atom ist das einfachste Atom, es hat nur ein Elektron. Dieses Elektron kann nur in wenigen bestimmten Zuständen (Orbitale) auftreten.

Bei den anderen Atomen gibt es für die Elektronen ähnliche Zustände.

Ein Elektron, das nicht in einem Atom oder Molekül gebunden ist, kann beliebige Energien haben.

5 c) Basiszustände

Jeder Zustand eines Elektrons im Atom kann als Linearkombination seiner Basis-Zustände dargestellt werden.

Ein Zustand ist dann dadurch gekennzeichnet, wie viele Elektronen in einem der Basis-Zustände sind.

Entsprechend wie in der Geometrie im Raum lassen sich zur Beschreibung eines Zustandes verschiedene Sätze von Basis-Zuständen wählen. Für diese neuen Basis-Zustände muss man einen neuen Satz von Besetzungszahlen bestimmen.

5 d) Pauli-Prinzip

Zwei Elektronen können nicht im gleichen Zustand sein.

Dies bedeutet, dass die Elektronen in einem Atom die Zustände mit der geringsten Energie besetzen. Deshalb hat ein Wasserstoff-Atom 1 Elektron in einem der beiden 1s-Zustände, während ein Kohlenstoff-Atom 2 Elektronen in den beiden 1s-Zuständen, 2 Elektronen in den beiden 2s-Zuständen und 2 Elektronen in 2 von den 6 2p-Zuständen hat. Damit erklären sich die chemischen Eigenschaften der Elemente. (Die hier angegebenen Anzahlen der Zustände berücksichtigen, dass es für jeden Zustand 2 Einstellungen für den Spin des Elektrons gibt.)

5 e) Boltzmann-Faktor

In der Wärme stoßen die Teilchen einander und tauschen dadurch Energie aus. Viele Teilchen gewinnen dadurch wenig Energie, wenige Teilchen viel Energie.

Von n Teilchen erreicht dadurch nur der Anteil $n \cdot e^{-\frac{E}{kT}}$ eine zusätzliche Energie von mindestens E .

Die Zahl der Wassermoleküle, die eine Wasseroberfläche verlassen können, und damit der Dampfdruck von Wasser, nimmt also mit steigender Temperatur sehr stark zu. Wenn Luft in der Nacht abkühlt, kann sie nicht mehr so viel Wasserdampf tragen und der überschüssige Wasserdampf scheidet sich ab als Tau.

5 f) Bosonen

Lichtteilchen (Photonen) gehen um so lieber in einen neuen Zustand, je mehr dieser Teilchen bereits im neuen Zustand sind.

Wenn z. B. schon 100 Teilchen im neuen Zustand sind, geht das neue Teilchen $100 + 1$ mal so gerne in den neuen Zustand, als wenn noch kein Teilchen dort wäre.

In einem Laser werden Atome durch Energiezufuhr sendebereit gemacht. Ein vorbeifliegendes Photon löst ein weiteres aus, diese beiden ein drittes u.s.w.. So kommt es schließlich zu einer Lawine von Photonen im selben Zustand. Diese Wirkung wird dadurch verstärkt, dass man durch Spiegel an den Enden des Lasers die Photonen immer wieder den gleichen Weg durchlaufen lässt.

Bei der Supraleitung bewegen sich Elektronenpaare, die ebenfalls gern im gleichen Zustand sein wollen.

5 g) Energie beim Austausch von Elektronen

Kann ein Teilchen zwischen zwei Atomen ausgetauscht werden, in denen es jeweils die Energie E hat, so entsteht durch den Austausch die Möglichkeit einer Bindung zwischen beiden Atomen.

Durch den Austausch zwischen den Zuständen 1) und 2) gibt es zwei neue Basis-Zustände für das Elektron, die dann die geänderten Energien $E - A$ und $E + A$ haben. Die Energie $E - A$ bedeutet, dass man die Energie A investieren muss, wenn man beide Atome voneinander trennen will, dass beide Atome also aneinander gebunden sind (Kovalenz-Bindung).

Im Atomkern werden die Protonen und Neutronen durch den Austausch von Pionen zusammengehalten. Auch die elektrische Kraft zwischen geladenen Teilchen erklärt man heute als Wirkung des Austauschs von Photonen.

In einigen Molekülen, z. B. Benzol, können die Elektronen zwischen zwei möglichen Konfigurationen (*mesomere Grenzzustände*) hin- und herwechseln. Dadurch werden diese Moleküle besonders stabil (*Mesomerie-Stabilisierung*).

In einem Metall können bestimmte Elektronen, die "Leitungselektronen" zwischen sehr vielen Atomen wechseln. Deshalb spaltet dort jeder Zustand eines Elektrons in sehr viele dicht nebeneinander liegende Zustände auf. Man erhält ein Band von Zuständen ("Valenzband", "Leitungsband"). Falls ein solches Band nicht vollständig gefüllt ist, können Elektronen darin sehr leicht in einen anderen Zustand übergehen und sich fast so bewegen, als ob sie frei wären wie die Atome in einem Gas ("Elektronengas").

5 h) Wahrscheinlichkeiten

Wird einem Teilchen Energie zugeführt, so gibt es diese überschüssige Energie oft wieder spontan ab. Es lässt sich dabei nicht mehr vorhersagen, wann dies bei einem einzelnen Atom geschieht, man kann nur Aussagen über die Wahrscheinlichkeit eines solchen Prozesses machen.

Von 100 radioaktiven Atomen z. B. zerfällt innerhalb von 5 Minuten (Halbwertszeit) die Hälfte, vom Rest innerhalb der nächsten 5 Minuten wieder die Hälfte, von den verbliebenen 25 innerhalb der nächsten Halbwertszeit wieder die Hälfte, usw.. Dies betrifft den radioaktiven Zerfall, aber auch die Aussendung von Licht, z. B. in der Fluoreszenz.

Mathematisch beschreibt man eine derartige Abnahme der Anzahl $N(t)$ mit der Zeit t durch eine Exponentialfunktion $N(t) = N(t=0) \cdot e^{-s \cdot t}$.

Auch bei der Absorption von Licht oder Teilchen in Materie nimmt Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen in dieser Materie die Strecke x zurücklegen kann, ohne absorbiert zu werden, exponentiell mit x ab. Für die Intensität des durchtretenden Lichts gilt deshalb: $I(x) = I(x=0) \cdot e^{-k \cdot x}$

Abnahme kann man z. B. im Nebel wunderbar sehen. Dünne Wolken sind hell, dicke sehr dunkel.

Die räumliche Ausbreitung von Teilchen lässt sich nur durch eine Wahrscheinlichkeit beschreiben: Lichtteilchen, aber auch Elektronen, treten als punktförmige Teilchen auf, aber man kann nur die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der es an einer bestimmten Stelle auftreten wird. Diese Wahrscheinlichkeit hat die Form einer Welle und heißt deshalb *Wellenfunktion*.

Für das Wasserstoff-Atom lassen sich die Wellenfunktionen der Basiszustände berechnen und veranschaulichen.

Aus den Eigenschaften der Wellenfunktion folgt, dass Teilchen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Barrieren überwinden ("durchtunneln") können (*Tunneleffekt*).

Literaturhinweise:

Houghton, John T.: The physics of atmospheres. Cambridge 1977.

Deutscher Bundestag, Referat Öffentlichkeitsarbeit (Hrsg.): Schutz der Erdatmosphäre. Eine internationale Herausforderung. Zwischenbericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" mit Plenardebatte am 9. März 1989. Bonn, 1989².

Unsöld, Albrecht und Baschek, Bodo: Der neue Kosmos. Eine Einführung in die Astronomie und Astrophysik, 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: 1999

Feynman, Richard P., Leighton, Robert B. und Sands, Matthew: The Feynman Lectures on Physics. Mainly Mechanics, Radiation and Heat. Reading (Massachusetts), Menlo Park (California), London, Sydney, Manila 1967³.

Feynman, Richard P., Leighton, Robert B. und Sands, Matthew: The Feynman Lectures on Physics. Quantum Mechanics. Reading (Massachusetts), Menlo Park (California), London, Sydney, Manila 1970⁴.

Grehn, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik. 2., durchgesehene Auflage, Gesamtband. Hannover 1992.
Griesel, Heinz und Postel, Helmut: Mathematik heute. 5. Schuljahr. Hannover 1994.
Kuhn, Wilfried (Hrsg.): Lehrbuch der Physik. Band II, 2. Teil: Klasse 12/13. Braunschweig 1990.
Wichmann, Eyvind H.: Berkeley Physik Kurs Band 4, Quantenphysik. 3., verbesserte Auflage, Braunschweig und Weisbaden 1989.

Dr. Reiner Hennig
299, Moo 2
Tambon Lum Sum
Amphoe Sai Yok
Kanchanaburi
71150
Thailand
email: reinerhennig@freenet.de