

Die Physik – Kurzfassung

Rainer Hauser

April 2012

1. Die Naturwissenschaft Physik und ihre Ziele und Methoden

Das Ziel der Physik ist es, Gesetzmässigkeiten in der Natur zu finden und in Form von mathematischen Zusammenhängen zu formulieren.

Physik als Wissenschaft basiert auf Beobachtungen, die gemessen und durch wiederholbare Experimente von anderen Forschergruppen nachvollzogen werden können. Dies führt zu Hypothesen, die experimenteller Überprüfung standhalten und schliesslich zu umfassenderen Theorien zusammengefasst werden.

Messgrössen bestehen aus einer Masszahl und einer Masseinheit. Masszahlen werden meist in wissenschaftlicher Schreibweise mit einer durch die Anzahl signifikanter Ziffern bestimmten Genauigkeit angegeben, und für die Masseinheiten sind die so genannten SI-Einheiten international festgelegt worden. So schreibt man beispielsweise für 15 000 km in wissenschaftlicher Schreibweise und mit der SI-Einheit Meter $1.50 \cdot 10^7$ m, wobei die Masszahl 1.50 anzeigt, dass drei Ziffern als signifikant zu nehmen sind.

Häufig benutzte mathematische Hilfsmittel sind Diagramme. Für die Darstellung gerichteter Grössen werden Vektoren benutzt, und mathematische Zusammenhänge beschreibt man mit Gleichungen.

2. Kinematik und die Gesetze der Bewegung

Unter der Bewegung eines Körpers versteht man dessen Veränderung des Ortes oder der Ausrichtung. Ist man nur an der Ortsveränderung interessiert, modelliert man den Körper als Massenpunkt.

Aus zwei Ortsmessungen s_1 und s_2 zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 kann man die mittlere Geschwindigkeit v zwischen t_1 und t_2 durch

$$v = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

berechnen. Ist die Geschwindigkeit innerhalb des betrachteten Zeitintervalls konstant, spricht man von gleichförmiger Bewegung, bei der

$$s = s_0 + v \cdot t$$

gilt, wenn sich der Körper zur Zeit $t = 0$ am Ort s_0 befindet.

Ist die Geschwindigkeit nicht konstant, kann man durch zwei Geschwindigkeitsmessungen v_1 und v_2 zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 die mittlere Beschleunigung a zwischen t_1 und t_2 durch

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

berechnen. Ist die Beschleunigung innerhalb des betrachteten Zeitintervalls konstant, spricht man von gleichmässig beschleunigter Bewegung, bei der

$$s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad v = v_0 + a \cdot t \quad v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot (s - s_0)$$

gilt, wenn sich der Körper zur Zeit $t = 0$ mit der Geschwindigkeit v_0 am Ort s_0 befindet. Der freie Fall mit $a = g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ist ein Beispiel einer gleichmässig beschleunigten Bewegung.

3. Dynamik und die Wirkung von Kräften

Eine Kraft wirkt immer von einem Körper auf einen anderen Körper. Dass eine Kraft auf einen Körper wirkt, erkennt man an der resultierenden Deformation oder Beschleunigung.

Der Zusammenhang zwischen den Kräften, die auf einen Körper wirken, und dessen Bewegungsablauf wird durch die drei Newton'schen Gesetze beschrieben:

Das Trägheitsgesetz (das erste Newton'sche Gesetz) geschrieben als

$$\vec{F}_{res} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{v} = \textit{konstant}$$

besagt, dass sich die Geschwindigkeit nicht ändert, wenn die resultierende Kraft verschwindet.

Das Kraftwirkungsgesetz (das zweite Newton'sche Gesetz) geschrieben als

$$\vec{F}_{res} = m \cdot \vec{a}$$

besagt, dass die resultierende Kraft gleich der Masse multipliziert mit der Beschleunigung ist.

Das Wechselwirkungsgesetz (das dritte Newton'sche Gesetz) geschrieben als

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

besagt, dass Kräfte immer paarweise auftreten, und dass die Kraft \vec{F}_{12} , die der Körper K_1 auf den Körper K_2 ausübt, betragsmässig gleich der Kraft \vec{F}_{21} ist, die der Körper K_2 auf den Körper K_1 ausübt, aber in die entgegengesetzte Richtung zeigt.

Beispiele von Kräften sind die Federkraft $F_F = D \cdot d$, die proportional zur Ausdehnung oder Stauchung d ist, die Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$, die von der Erdbeschleunigung g abhängt, die Normalkraft F_N , die immer senkrecht zur Unterlage wirkt, und die Reibungskraft $F_R = \mu \cdot F_N$, die von einer Haft-, Gleit- oder Rollreibungszahl μ abhängt.

Um die Dynamik einer Situation zu verstehen, betrachtet man die Kräfte, bestimmt die resultierende Kraft und bekommt so die Beschleunigung, aus der man den Bewegungsablauf bestimmen kann. Verläuft eine Bewegung immer geradlinig, so wird der Körper dabei entweder gar nicht oder aber nur in der Bewegungsrichtung beschleunigt. In diesem Spezialfall zerlegt man die Kräfte in eine Komponente senkrecht und eine Komponente parallel zur Bewegungsrichtung. Die Komponenten senkrecht zur Bewegungsrichtung müssen sich gegenseitig aufheben, sodass die resultierende Kraft in die Bewegungsrichtung zeigt.

4. Gravitation und die gegenseitige Anziehung von Massen

Die Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ ist nur ein Spezialfall einer allgemeineren, Gravitation genannten Kraft, denn alle Massen ziehen sich gegenseitig an. Die Gravitationskraft ist

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \qquad G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

nach dem Newton'schen Gravitationsgesetz.

Die Kepler'schen Gesetze der Planetenbewegung, von denen das erste Gesetz besagt, dass sich die Planeten auf Ellipsen um die Sonne bewegen, lassen sich aus dem Newton'schen Gravitationsgesetz ableiten.

5. Hydrostatik und die Eigenschaften des Drucks

Festkörper, Flüssigkeiten und Gase unterscheiden sich wegen ihrer mikroskopischen Eigenschaften auch makroskopisch. So haben Flüssigkeiten und Gase keine feste Form, während Festkörper eine mehr oder weniger feste Form haben. Festkörper und Flüssigkeiten haben im Gegensatz zu Gasen ein im Wesentlichen fixes Volumen, weil sie sich praktisch nicht komprimieren lassen.

Festen, flüssigen und gasförmigen Körpern kann man eine Dichte

$$\rho = \frac{m}{V}$$

zuzuordnen, die für feste und flüssige Materie eine im grossen Ganzen feste Grösse ist, die für Gase aber stark vom Druck abhängt.

Weil Flüssigkeiten und Gase keine feste Form haben, eignet sich der Druck, der durch

$$p = \frac{F}{A}$$

definiert ist, in der Hydrostatik manchmal besser als die Kraft zur Beschreibung einer Situation. Ist ein Gas oder eine Flüssigkeit eingeschlossen, und wird darauf an einer Stelle Druck ausgeübt, so verteilt sich dieser nach dem Prinzip von Pascal gleichmässig.

Das Wasser in einem See drückt auf das Wasser darunter, auf den Seegrund und auf darin schwimmende Lebewesen. Die Gewichtskraft des Wassers wird so zum Schweredruck p , der sich zusammen mit den äusseren Druck p_a (beispielsweise dem Luftdruck) aus

$$p = p_a + \rho \cdot g \cdot h$$

aus der Tiefe h unter der Wasseroberfläche berechnen lässt.

Weil der Schweredruck auch von unten auf einen ganz eingetauchten Körper drückt und der Gewichtskraft entgegenwirkt, gibt es die Auftriebskraft F_A , für die

$$F_A = \rho_F \cdot V \cdot g$$

gilt, was nach dem Prinzip von Archimedes der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit entspricht.

Schwimmt ein Körper mit der Dichte ρ_K auf einer Flüssigkeit mit der Dichte ρ_F , so gilt $\rho_K < \rho_F$, und es gilt weiter

$$\frac{V_u}{V} = \frac{\rho_K}{\rho_F}$$

für das Verhältnis des Volumens V_u des Teils des Körpers unter der Oberfläche und des Gesamtvolumens V des Körpers.

6. Energie und der Zusammenhang zwischen Arbeit und Energie

Es gibt zwei Grundformen der Energie. Ein Körper in Bewegung hat kinetische Energie, und ein Körper, auf den eine Kraft wirkt, hat potenzielle Energie. Weil auf alle Gegenstände in unserem Alltag die Gravitationskraft wirkt, hat jeder Körper gravitationelle potenzielle Energie.

Wenn ein Körper durch die Kraft \vec{F} in seiner Bewegungsrichtung bewegt wird, wird die Arbeit

$$W = F_{\parallel} \cdot s$$

an ihm verrichtet, wobei s der Weg ist, den der Körper dabei zurücklegt.

Die mittlere Leistung ist definiert durch

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

und beschreibt, wie viel Arbeit in einer Zeitspanne verrichtet wird.

Ein Körper kann mit seiner Energie Arbeit an einem Körper verrichten, aber er hat nur deshalb Energie, weil vorher Arbeit an ihm verrichtet worden ist. Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten, und es gilt

$$\Delta E = E_2 - E_1 = W$$

für den Zusammenhang zwischen der Energie vor und der Energie nach der Verrichtung der Arbeit.

Die kinetische Energie

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

hängt nur von der Masse und der Geschwindigkeit ab, während die (gravitationelle) potenzielle Energie

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

nur von der Masse und der Höhe abhängt. Beide Energieformen gelten nicht absolut, sondern nur in Bezug auf ein Bezugssystem.

7. Energieumwandlungen und die Wirkung von Reibung

Bei Energieumwandlungen wird Energie von einer Form in eine andere umgewandelt. Lässt man beispielsweise einen Stein von einem Turm fallen, so wird potenzielle Energie in kinetische Energie umgewandelt.

Wenn bei Energieumwandlungen keine Energie in Wärme umgewandelt wird, spricht man von mechanischer Energieumwandlung. Im Alltag sind aber immer Reibungsverluste im Spiel, die zu einer Erwärmung führen. Der Wirkungsgrad einer Energieumwandlung ist definiert durch

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

als Verhältnis von in gewünschter Form vorliegender Energie zu zugeführten Energie.

Es gilt der Erhaltungssatz, dass die Gesamtenergie konstant ist, dass Energie also weder erzeugt noch vernichtet, jedoch in andere Formen umgewandelt werden kann. In einem geschlossenen System ändert sich die Gesamtenergie nicht, während in einem offenen System der Unterschied zwischen der Gesamtenergie zu zwei Zeitpunkten der an die Umgebung abgegebenen oder von ihr aufgenommenen Energie entspricht.

8. Impuls und zentrale, elastische oder unelastische Stöße

Für den Impuls, der als Produkt

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

von Masse und Geschwindigkeit definiert ist, gibt es auch einen Erhaltungssatz, der besagt, dass in einem geschlossenen System die Vektorsumme aller Impulse konstant ist. Das kann man auf elastische und unelastische Stöße anwenden. Bei vollkommen elastischen Stößen deformieren sich die Körper nicht, während sie bei vollkommen unelastischen Stößen nach dem Zusammenstoß zusammenkleben.

9. Wärmelehre und die innere Energie eines Körpers

Weil Materie aus Atomen und Molekülen besteht, misst man die Stoffmenge mit Hilfe der Avogadro-Konstanten, indem man

$$N = n \cdot N_A \qquad N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

festlegt, wobei N_A Wasserstoffatome gerade die Masse 1 g haben.

Die Brown'sche Bewegung zeigt, dass Atome und Moleküle in ständiger Bewegung sind, die zur inneren Energie eines Körpers beiträgt. Die Stärke dieser so genannten thermischen Bewegung hängt von der Temperatur ab und hört beim absoluten Nullpunkt, der bei -273.15°C liegt, ganz auf.

Körper dehnen sich bei Temperaturzunahme gemäss

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \qquad \Delta V = \gamma \cdot \Delta T \cdot V$$

aus oder ziehen sich bei Temperaturabnahme entsprechend zusammen.

Für den Zusammenhang zwischen Druck, Volumen und Temperatur bei Gasen gilt

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = N \cdot k \cdot T$$

mit der universellen Gaskonstanten beziehungsweise der Boltzmann-Konstanten. Die Beziehung zwischen der durch die thermische Bewegung verursachten mittleren kinetischen Energie und der Temperatur wird durch die Gleichung

$$E_k = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

beschrieben.

10. Wärmeprozesse und die durch Wärme geleistete Arbeit

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre besagt, dass die innere Energie durch das Verrichten von Arbeit und Zuführen von Wärme nach dem Energieerhaltungssatz um

$$\Delta U = W + Q$$

zunimmt.

Führt man einem Material Wärme zu, steigt einerseits die Temperatur, ändert sich aber auch der Aggregatzustand. In Phasen, in denen der Aggregatzustand nicht ändert, gilt

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

mit der spezifischen Wärmekapazität c des Materials. In Phasen mit Aggregatzustandsänderung nimmt die Temperatur nicht weiter zu, und es gilt

$$Q = L \cdot m$$

mit der spezifischen Schmelz- beziehungsweise Verdampfungswärme L .

Damit kann man die Endtemperatur eines Gemischs berechnen. Gibt man beispielsweise Eiswürfel in ein Glas Orangensaft und betrachtet das System bestehend aus Trinkglas, Saft und Eiswürfel als geschlossen, so muss die vom Glas und Orangensaft abgegebene Wärme gleich der von den Eiswürfeln beim Erwärmen und Schmelzen aufgenommenen Wärme sein.

Wärme kann durch Leitung gemäss

$$\frac{Q}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d}$$

abhängig von der Wärmeleitfähigkeit λ des Materials, durch Strömung oder durch Strahlung transportiert werden. Nur die Strahlung kann dabei ein Vakuum überwinden.

Wärme lässt sich einsetzen, um Arbeit zu verrichten, denn beim Erwärmen verrichtet Materie Expansionsarbeit. Gemäss dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre ist der Wirkungsgrad dabei höchstens

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_k}{T_w}$$

mit der wärmeren Temperatur vor und der kälteren Temperatur nach verrichteter Arbeit.

Dampfmaschinen, Benzinmotoren und Wärmepumpen sind Beispiele von technischen Anwendungen, bei denen die Wärmelehre ausgenutzt wird. Ein Kühlschrank funktioniert wie eine Wärmepumpe und basiert darauf, dass sich Wärme vom kälteren zum wärmeren Ort transportieren lässt, weil die spezifische Siedebeziehungsweise Verdampfungstemperatur vom Druck abhängt.

Der spezifische Heizwert H eines Materials ist definiert durch

$$Q = H \cdot m$$

und gibt an, wie viel Wärme beim Verbrennen von 1 kg Masse dieses Materials abgegeben wird.

11. Strahlenoptik und die geometrische Seite des Lichts

Licht bewegt sich im Vakuum mit der Geschwindigkeit $c_{\text{Vakuum}} = 2.9979246 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und ist in durchsichtigen Materialien etwas langsamer. Weil es im Universum riesige Distanzen gibt, misst man dort Entfernungen in Lichtjahren.

Trifft ein Lichtstrahl auf einen Körper, so wird das Licht je nach Beschaffenheit des Körpers reflektiert, gebrochen oder absorbiert. Bei der Reflexion ist der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel, und bei der Brechung hängt der Ausfallswinkel von den Materialien und ihren Brechzahlen ab, sodass

$$\alpha_1 = \alpha_2 \qquad n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2)$$

für die Ein- und Ausfallswinkel bei Reflexion beziehungsweise Brechung gilt.

Weisses Licht wird durch ein Prisma in Licht von verschiedenen Farben aufgeteilt, weil Licht von verschiedener Farbe nicht exakt gleich stark gebrochen wird. Dieses Phänomen nennt man Dispersion.

Linsen sind so geschliffen, dass die Brechung für den gewünschten Effekt ausgenutzt wird. Eine Sammellinse bündelt paralleles Licht so, dass die verschiedenen Lichtstrahlen alle durch den Brennpunkt gehen. Sammellinsen werden in Fotoapparaten eingesetzt, um das zu fotografierende Abbild auf den Sensor zu bringen. Um die Abbildungseigenschaften einer Sammellinse zu berechnen, benutzt man die beiden Formeln

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \qquad v = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

für die Brennweite f und das Abbildungsverhältnis v .

12. Harmonische Schwingungen und Wassertropfen in einer Welle

Ein periodischer Vorgang mit der Periode T befindet sich zur Zeit t im gleichen Zustand wie zur Zeit $t - T$. Manchmal benutzt man lieber die Frequenz $f = \frac{1}{T}$ statt der Periode.

Eine harmonische Schwingung ist ein periodischer Vorgang, bei dem ein Massenpunkt so ausgelenkt wird, dass die Gleichung

$$s(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \qquad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

die Auslenkung s zur Zeit t bestimmt. Dabei ist A die Amplitude, ω die Winkelgeschwindigkeit und φ die Phasenverschiebung, die durch geschickte Wahl der Zeit $t = 0$ zum Verschwinden gebracht werden kann.

13. Harmonische Wellen und viele Teilchen in Schwingung

Eindimensionale Wellen können Transversal- oder Longitudinalwellen sein. Nur Transversalwellen können polarisiert werden, während Interferenz bei allen Wellen vorkommt. Die Geschwindigkeit c einer periodischen Welle ist

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

für die Wellenlänge λ .

14. Schallwellen und die Gesetze der Harmonie

Schallwellen sind Longitudinalwellen und brauchen einen Schalleiter, um sich auszubreiten. Je nach Material und Temperatur leiten feste Körper, Flüssigkeiten und Gase Schall mit verschiedener Geschwindigkeit. Bei 15°C breitet sich Schall in der Luft mit $c = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aus, sodass man aus der Anzahl Sekunden zwischen Blitz und Donner einfach die Entfernung eines Gewitters schätzen kann. Schall entsteht durch Luftdruckschwankungen, die sich bei Sprechen im Bereich zwischen 10^{-4} bis 10^{-2} mbar bewegen.

15. Elektromagnetische Wellen und die Wellennatur des Lichts

Licht gehört zum Spektrum der elektromagnetischen Wellen, zu denen auch die für den Rundfunk benutzten Lang-, Mittel-, Kurz- und Ultrakurzwellen sowie die in der Medizin verwendeten Röntgenstrahlen gehören. Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen, sodass sie sich polarisieren lassen.

Wegen der Wellennatur des Lichts gibt es Beugung, die sich aus dem Prinzip von Huygens herleiten lässt. Beugung kann man jedoch nur feststellen, wenn eine Welle auf eine Öffnung oder ein Hindernis trifft, das dieselbe Grössenordnung wie die Wellenlänge hat.

16. Materiewellen und erste Schritte in die Quantenmechanik

Die Quantenmechanik löst den Widerspruch im Welle-Teilchen-Dualismus auf, den nicht nur Licht, sondern auch Materie zeigt. Sie ordnet Quantenobjekten eine Wellenfunktion $\Psi(x, t)$ zu, die dessen Zustand beschreibt. Dabei wird $|\Psi(x, t)|^2$ als Wahrscheinlichkeit dafür interpretiert, dass sich das Quantenobjekt zur Zeit t an der Stelle x befindet.

Von der Wellennatur der Materie sieht man deshalb im Alltag nichts, weil die Wellenlängen für Alltagsobjekte extrem klein sind und damit nicht die gleiche Grössenordnung wie die Öffnungen und Hindernisse haben, mit denen die Objekte konfrontiert werden. Die Beugungserscheinungen sind aus diesem Grund nicht feststellbar.

17. Kernphysik und die innere Struktur der Atome

Atome als Grundbausteine der Materie bestehen aus einer Atomhülle und einem Atomkern. Der Durchmesser des Atomkerns ist grössenordnungsmässig 10 000-mal kleiner als der Durchmesser des ganzen Atoms. Die Atomhülle besteht aus negativ geladenen Elektronen und der Atomkern aus positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen. Die Protonen und Neutronen, die unter dem Begriff Nukleonen zusammengefasst sind, werden durch die Kernkraft zusammengehalten, die stärker ist als die gegenseitige Abstossung der positiv geladenen Protonen. Die Bindungsenergie pro Nukleon ist ein Mass für die Stabilität eines Atomkerns.

Sowohl Elektronen als auch Atomkerne können gemäss Quantenmechanik nur gewisse Energien haben. Das kleinste Energieniveau heisst Grundzustand, während die anderen als angeregte Zustände bezeichnet werden. Durch äussere Anregung wie etwa durch einen Zusammenstoss mit einem anderen Atom können die Elektronen in der Atomhülle oder die Atomkerne in einen angeregten Zustand geraten. Fallen sie in einen weniger angeregten Zustand oder in den Grundzustand zurück, sodass sich ihre Energie um ΔE ändert, senden sie ein Photon mit der Energie

$$E_{\text{photon}} = \Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

aus. Bei den Elektronen passiert das häufig, und die Wellenlänge des abgestrahlten Lichtes ist im sichtbaren Bereich. Bei Atomkernen ist die Energie um mehrere Grössenordnungen grösser und die Wellenlänge liegt deshalb jenseits derjenigen von Röntgenstrahlen.

In der Nuklidschreibweise wird ein Kohlenstoffatom mit 12 Nukleonen, von denen 6 Protonen sind, als $^{12}_6\text{C}$ geschrieben. Die chemischen Eigenschaften eines Atoms sind durch die Ordnungszahl, also die Anzahl Protonen, bestimmt. Zu den Elementen gibt es aber immer verschiedene Nuklide, die sich nur in der Anzahl Neutronen unterscheiden. Man spricht von Isotopen Nukliden (oder einfach Isotopen). Neben dem gewöhnlichen Isotop $^{12}_6\text{C}$ gibt es beispielsweise auch das seltenere Isotop $^{14}_6\text{C}$, das instabil ist.

Atomkerne, die nicht stabil sind, zerfallen radioaktiv in Bruchstücke, wodurch andere Atomkerne entstehen. Es gibt verschiedene Zerfallsarten. Beim α -Zerfall schießt ein ^4_2He -Kern und beim β -Zerfall ein Elektron mit hoher Energie aus dem zerfallenden Atomkern. Die γ -Strahlung ist eine sehr energiereiche elektromagnetische Strahlung, die entsteht, wenn Atomkerne von einem angeregten Zustand in einen weniger angeregten Zustand zurückfallen und die Energie in Form eines Photons abgeben.

Der radioaktive Zerfall läuft spontan ab. Ist λ die Wahrscheinlichkeit, dass ein Atomkern in der nächsten Sekunde zerfällt, und ist N_0 die Anzahl Atome einer gegebenen Menge eines radioaktiven Materials zur Zeit $t = 0$, so gilt

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

für die Anzahl $N(t)$ der Atome zur Zeit t . Weil die Zerfallsprodukte eines radioaktiven Zerfalls häufig wieder instabil sind und somit ebenfalls radioaktiv zerfallen, gibt es ganze Zerfallsketten, bis schliesslich ein stabiles Endprodukt erreicht ist.

Die Masse der einzelnen Protonen und Neutronen eines Atomkerns zusammengezählt ist grösser als die Masse des Atomkerns. Dieser so genannte Massendefekt hängt mit der Bindungsenergie E_B und dem Gesetz

$$E_B = \Delta m \cdot c^2$$

zusammen. Wenn sich ein Atomkern aus Protonen und Neutronen bildet, wird diese Energie in Form von Photonen abgestrahlt.

18. Anwendungen und Gefahren der Kernphysik

Trifft radioaktive Strahlung auf einen lebenden Körper, werden Atome und Moleküle in einer Zelle ionisiert. Die Zelle hat zwar die Fähigkeit, schädliche Substanzen zu eliminieren, sind aber zu viele Moleküle betroffen, stirbt die Zelle. Weil immer wieder neue Zellen entstehen und alte Zellen auch aus anderen Gründen absterben, ist das nicht schlimm, wenn nicht gleichzeitig sehr viele Zellen absterben und deshalb ganze Organe ausfallen. Radioaktive Strahlung tötet nicht nur Zellen ab, sondern kann auch die Erbinformation verändern. Entstehen so Genschäden, die durch die Zelle nicht mehr repariert werden können, wird die geschädigte Erbinformation bei der Zellteilung an die Tochterzelle weitergegeben. So können einerseits Tumore entstehen, wenn gewöhnliche Zellen betroffen sind, kann es aber auch zu Missbildungen beim Nachwuchs kommen, wenn die Genschäden in Keimzellen entstanden sind.

Die verschiedenen radioaktiven Strahlentypen dringen unterschiedlich tief in einen Körper ein. Für die menschliche Haut ist die maximale Eindringtiefe von α -Strahlung etwa 0.05 mm, sodass dieser Strahlentyp bereits vollständig durch ein Blatt Papier abgeschirmt werden kann, während β -Strahlung maximal etwa 5 mm tief eindringt und durch eine Plexiglasscheibe zu 100% abgeschirmt werden kann. Keine maximale Eindringtiefe und somit auch keinen hundertprozentigen Schutz gibt es für die γ -Strahlung. Selbst hinter mehreren Metern Blei ist noch γ -Strahlung messbar. Die Intensität der γ -Strahlung nimmt aber exponentiell ab, sodass man eine Halbwertsdicke einführen kann, die von der Energie der γ -Strahlung und dem zur Abschirmung benutzten Material abhängt.

Radioaktive Substanzen werden sowohl in der medizinischen Diagnose als auch in der Therapie eingesetzt. So werden so genannte Radiopharmaka, die kurzlebige Nuklide enthalten, mit der Nahrung oder mit Spritzen in den Körper gebracht, wo sie beispielsweise von den Zellen einer bestimmten Tumorart aufgenommen werden. In der Tumorbekämpfung werden zudem mit γ -Strahlen Krebszellen abgetötet. Weil dabei das gesunde Gewebe möglichst wenig geschädigt werden soll, wird mit dem so genannten Gamma-Knife das kranke Gewebe von möglichst vielen Seiten bestrahlt, sodass nur dort, wo sich die verschiedenen Strahlen kreuzen, eine hohe Intensität entsteht.

Die Kernphysik hat neben der Medizin auch die Archäologie beeinflusst. Weil durch den Sonnenwind dauernd instabile ^{14}C -Atome entstehen, sodass das Verhältnis von ihnen zu den gewöhnlichen ^{12}C -Atomen über die Jahrtausende mehr oder weniger konstant $1.3 \cdot 10^{-12}$ war, und weil lebende Organismen durch Stoffwechsel Kohlenstoffatome beider Isotope aufnehmen, enthalten lebende Körper beide Isotope in diesem Verhältnis. Mit dem Tod hört aber der Stoffwechsel auf und keine neuen ^{14}C -Atome kommen hinzu, während die bereits im Körper gelagerten ^{14}C -Atome gemäss $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ radioaktiv zerfallen. Aus dem jetzigen Verhältnis der beiden Isotope kann man somit berechnen, wann der Organismus etwa gestorben ist. Die Methode liefert Resultate bis etwa zu einem Alter von 50 000 Jahren.

Ein drittes Gebiet, in dem das Wissen aus der Kernphysik angewendet wird, ist die Gewinnung von Strom aus Kernkraftwerken. Weil die Bindungsenergie pro Nukleon in den Kernen von ^{56}Fe -Atomen am stärksten ist, kann bei Atomen mit Ordnungszahl kleiner als 26 nur Energie gewonnen werden, wenn man Atomkerne verschmelzt, während bei Atomen mit grösserer Ordnungszahl die Energie bei der Spaltung

entsteht. In beiden Fällen ist die Bindungsenergie pro Nukleon in den Ausgangsatomen kleiner als in den entstehenden Atomen, sodass die durch den damit verbundenen Massendefekt $E = \Delta m \cdot c^2$ entstehende Energie als Wärme freigesetzt wird.

Heutige Kraftwerke basieren auf der Kernspaltung. Sie sind aus zwei Gründen problematisch. Einerseits können sie in einen unkontrollierbaren Zustand geraten wie in Tschernobyl 1986 und Fukushima 2011, sodass Hunderte Quadratkilometer unbewohnbar werden, und andererseits entstehen radioaktive Abfälle, die entsorgt werden müssen. Fusionsreaktoren, die auf der Verschmelzung von Wasserstoffisotopen zu Helium basieren, würden keine radioaktiven Abfälle produzieren, stehen aber vor noch ungelösten technischen Problemen.

19. Elektrische Energie und der Fluss der Elektronen in Leitern

Es gibt zwei verschiedene Arten von *elektrischen Ladungen*. Die eine nennt man positiv und die andere negativ. Die in der Natur gemessenen elektrischen Ladungen sind immer ein Vielfaches der Elementarladung $e = 1.60219 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. *Protonen* haben die positive Ladung $Q_{\text{Proton}} = e$, und *Elektronen* haben die negative Ladung $Q_{\text{Elektron}} = -e$. Besteht eine Ladung Q aus N Elektronen, so gilt $Q = N \cdot (-e)$.

In einem elektrischen Leiter gibt es eine grosse Zahl von freien Elektronen, die nicht mehr an ihre Atomkerne gebunden sind und sich als so genanntes Elektronengas frei bewegen. Zurück bleiben Ionen. Die freien Elektronen bewegen sich schnell und kollidieren mit den Ionen und den anderen Elektronen. Dadurch werden sie abgebremst. Die Bewegung ist ungeordnet.

Ein Kupferdraht ist ein Leiter. Weil die Bewegung der freien Elektronen ungeordnet ist, bewegen sich etwa gleich viele von ihnen von links nach rechts an einer bestimmten Stelle des Drahtes vorbei wie von rechts nach links. Es resultiert also keine Ladungsverschiebung an dieser Stelle vorbei. Gibt es jedoch eine solche resultierende Ladungsverschiebung an der betrachteten Stelle des Drahtes, so fliesst dort ein elektrischer Strom. Die Ladung Q pro Zeiteinheit Δt ist die *Stromstärke*

$$I = \frac{Q}{\Delta t}$$

dieser resultierenden Ladungsverschiebung.

20. Elektrische Stromkreise und die Wirkung von Spannung

Ein elektrischer Strom fliesst nicht ohne Ursache. Wird Beschleunigungsarbeit W an der Ladung Q in einem Draht verrichtet, sodass ein Strom resultiert, so nennt man die Grösse

$$U = \frac{W}{Q}$$

die *Spannung*. Die bekanntesten Spannungsquellen sind die Steckdose und die Batterie. Aus den Definitionen von Stromstärke und Leistung folgt für die elektrische Leistung $P = I \cdot U$.

Durch die Kollisionen im Leiter werden die freien Elektronen einerseits abgebremst, verstärken aber auch die thermische Bewegung der Ionen. Der Leiter wird dadurch erhitzt. Dies ist der elektrische Widerstand des Leiters, den man auch numerisch fassen kann. Bei gewissen Leitern sind Spannung U und Stromstärke I proportional, sodass $U = R \cdot I$ gilt. Solche Leiter nennt man Ohm'sche Widerstände. Die Grösse

$$R = \frac{U}{I}$$

ist auch dann interessant, wenn R kein konstanter Proportionalitätsfaktor ist. Sie ist ein Mass dafür, welchen Widerstand der Strom überwinden muss, und wird deshalb elektrischer *Widerstand* genannt. Durch die Kollisionen der freien Elektronen mit den freien Elektronen erhitzt sich der Leiter, und

$$P = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$$

ist die Heizleistung. Der Widerstand hängt einerseits vom Material des Leiters und andererseits von der Länge L und dem Querschnitt A ab. Der Widerstand ist

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$$

mit dem materialabhängigen *spezifischen Widerstand* ρ .

Strom fließt nur in einem Stromkreis, der beispielsweise in einer Taschenlampe eine einfache Verbindung von einem Pol der Batterie zu einer Glühbirne und zurück zum anderen Pol der Batterie sein kann. Stromkreise können aber auch komplexe Gebilde mit Verzweigungen und Hintereinanderschaltungen von Geräten sein. Sie lassen sich immer aus so genannten Parallel- und Serienschaltungen von N Geräten mit Widerständen R_i zusammensetzen. Im Folgenden werden elektrische Geräte auf ihre physikalische Funktion in einem Stromkreis reduziert und als Widerstände dargestellt.

Bei einer *Parallelschaltung* von N Widerständen R_1, \dots, R_N ist U überall gleich, und für die einzelnen Stromstärken I_i gilt $I = I_1 + \dots + I_N$. Diese Parallelschaltung kann durch den Ersatzwiderstand R mit

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

ersetzt werden.

Bei einer *Serienschaltung* von N Widerständen R_1, \dots, R_N ist I überall gleich, und für die einzelnen Spannungen U_i gilt $U = U_1 + \dots + U_N$. Diese Serienschaltung kann durch den Ersatzwiderstand R mit

$$R = R_1 + \dots + R_N$$

ersetzt werden.

Elektrizität kann gefährlich sein, denn einerseits können Menschen durch einen Stromschlag verletzt werden oder umkommen, und andererseits können Kurzschlüsse in Leitungen zu Hausbränden führen. Die drei Sicherheitsvorkehrungen Sicherungen, Schutzleiter und Fehlerstromschalter helfen, Unfälle zu verhindern.

21. Elektrostatik und der Ursprung des Phänomens Magnetismus

Reibt man einen Bernstein mit einem Wolltuch, werden Elektronen vom Wolltuch auf den Bernstein übertragen. Dadurch wird das Wolltuch positiv und der Bernstein negativ geladen. Gleich geladene Körper stoßen sich ab, und verschieden geladene Körper ziehen sich an. Nach dem Coulomb'schen Gesetz ist

$$F_E = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \qquad k = 9.0 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

die Anziehungs- beziehungsweise Abstossungskraft zwischen den beiden Ladungen Q_1 und Q_2 im Abstand r . Die Grösse k ist abhängig vom Material, das die Ladungen umgibt. Der gegebene Wert gilt für das Vakuum.

Statt die Kraft, die zwischen zwei geladenen Körpern wirkt, kann man auch das Kraftfeld, das von geladenen Körpern ausgeht und durch kleine Probeladungen gemessen werden kann, betrachten. Weil die elektrische Kraft proportional zur Probeladung Q_P ist, können wir die elektrische Kraft F_E durch die Probeladung Q_P teilen und bekommen die vektorielle Grösse

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{Q_P}$$

die *elektrische Feldstärke* heisst.

Neben dem elektrischen Feld gibt es auch ein Magnetfeld. Bewegt sich eine elektrische Ladung Q mit einer Geschwindigkeit \vec{v} durch ein Magnetfeld \vec{B} , so wirkt die *Lorentzkraft*

$$\vec{F}_L = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

darauf und lenkt sie von ihrer Flugbahn ab. Ist die Ladung positiv und fliegt sie senkrecht zu den magnetischen Feldlinien, so bilden Flugrichtung, Magnetfeldlinie und Lorentzkraft ein Rechtssystem.