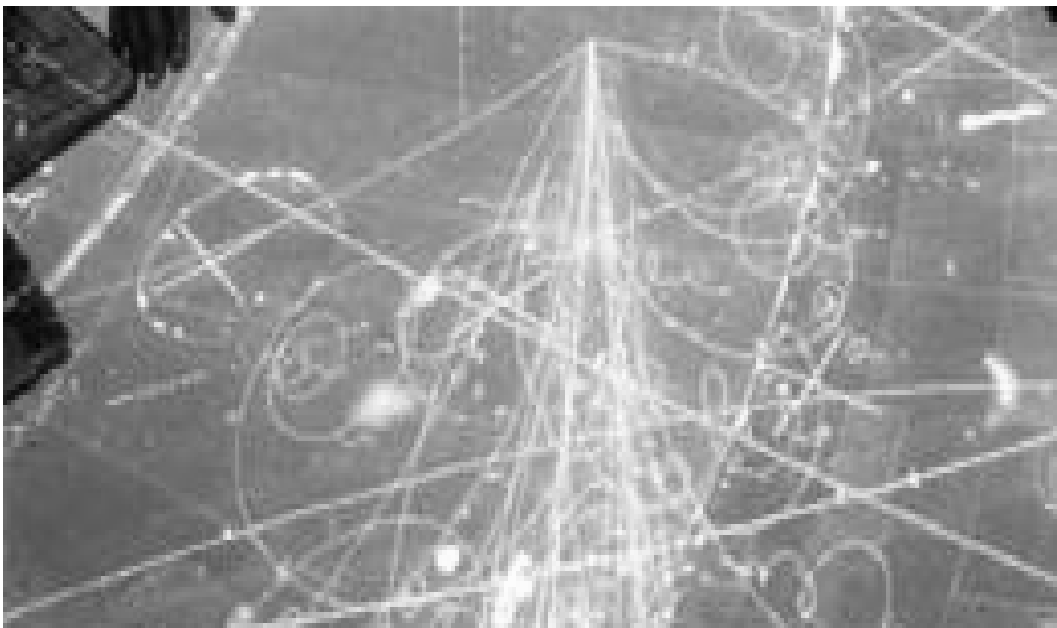


Kernphysik



Skriptum zur Fachvorlesung

**Mag. Peter Schnögl
Mag. Harald Wiltsche**

Spezielle Relativitätstheorie

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts gab es zwei abgeschlossene Theorien:

Newtonsche Mechanik

Diese basiert auf drei Axiomen:

- Trägheitssatz: Jeder Körper verharrt in Ruhe oder in gleichförmiger geradliniger Bewegung, so lange keine Kraft auf ihn einwirkt. Jeder Körper setzt einer Änderung des Bewegungszustandes (Beschleunigung oder Verzögerung) einen Widerstand (Trägheitswiderstand) entgegen.
- Dynamisches Grundgesetz: Eine Masse erfährt unter der Wirkung einer Kraft F eine Beschleunigung a : $F = m \cdot a$
- Wechselwirkungsgesetz: Wirkt ein Körper mit einer Kraft (Aktion) auf einen zweiten Körper, so wirkt der zweite Körper mit einer gleich großen, aber entgegengesetzten Kraft (Gegenkraft, Reaktion) auf den ersten Körper. Kräfte treten immer paarweise auf.

Maxwellsche Elektrodynamik (Maxwellsche Gleichungen)

- Maxwell erkannte den Zusammenhang zwischen veränderlichen elektrischen und magnetischen Feldern und beschrieb die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Analog zu mechanischen Wellen forderte er jedoch ein Medium, in welchem sich elektromagnetische Wellen ausbreiten können (Weltäther).

1905 veröffentlichte A. Einstein 3 Arbeiten:

- statistische Abhandlung d. Brownschen Bewegung
- spezielle Relativitätstheorie (abgeschlossene Theorie als gemeinsame Grundlage für Mechanik und Elektrodynamik)
- Hypothese der Photonen (führte in weiterer Folge zur Quantentheorie und wurde in den 20er Jahren vollendet)

1915 veröffentlichte A. Einstein die allgemeine Relativitätstheorie:

Theorie der Gravitation, konnte noch nicht bewiesen werden, ist jedoch die meistverwendete Theorie in der Astrophysik und Kosmologie.

Ausgangspunkt der Relativitätstheorie

Den Ausgangspunkt der speziellen Relativitätstheorie bildete Faradays Feldkonzept: eine elektrische Ladung verändert den Raumbereich in ihrer Umgebung. Diese Veränderung stellte man sich als elastische Spannung im Äther vor.

Der Äther füllt den ganzen Raum aus und bildet die Grundlage zur Ausbreitung elektromagnetische Wellen, also auch des Lichts. Im Äther breitet sich das Licht in allen Richtungen mit der Geschwindigkeit c aus. Die Erde bewegt sich mit einer Geschwindigkeit v (ca. 30km/s um die Sonne) durch den Äther. Somit müsste die Lichtgeschwindigkeit in Bezug auf die Erde je nach Richtung unterschiedliche Werte annehmen.

Experiment von Michelson und Morley

Das Experiment wurde 1886 durchgeführt und diente zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Erde relativ zum Weltäther.



Albert Abraham Michelson

Der Physik-Nobelpreisträger Albert Abraham Michelson (1852-1931) in einem seiner Laboratorien. Michelson wurde u. a. berühmt für sein Experiment, mit dem er die Geschwindigkeit der Erde gegen den so genannten Lichtäther messen wollte. Michelson konnte die Nichtexistenz eines solchen Äthers beweisen und lieferte damit eine experimentelle Grundlage für die spezielle Relativitätstheorie. (Microsoft® Encarta® Enzyklopädie Professional)

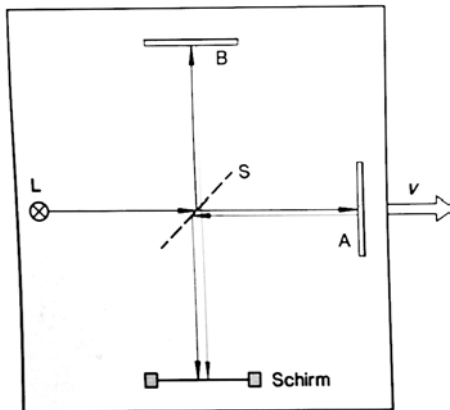
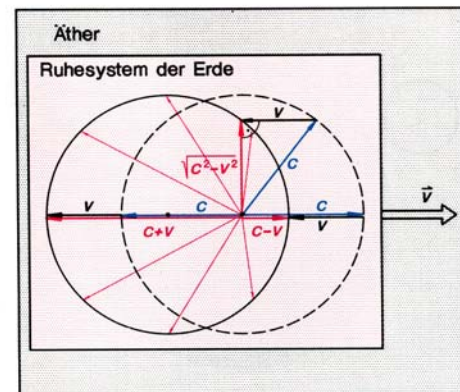


Abb.: Michelson – Interferometer [Sextl 4]



Im Äther breitet sich das Licht nach allen Richtungen mit der Geschwindigkeit c aus (blaue Pfeile). Bewegt sich die Erde mit der Geschwindigkeit v durch den Äther, so sollte die Lichtgeschwindigkeit in Bezug auf die Erde unterschiedliche Werte annehmen (rote Pfeile): entgegen der Richtung der Erdbewegung $c + v$, in Richtung der Erdbewegung $c - v$, normal zur Richtung der Erdbewegung $\sqrt{c^2 - v^2}$.

Bestimmung des Zeitunterschiedes für die Wege SAS und SBS:

$$t_{SAS} = \frac{D}{c-v} + \frac{D}{c+v} = \frac{D(c+v) + D(c-v)}{c^2 - v^2} = \frac{2Dc}{c^2 - v^2} = \frac{2D}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$t_{SBS} = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2D}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} > 1 - \frac{v^2}{c^2} \quad \Rightarrow \quad t_{SBS} < t_{SAS} \quad !! \rightarrow \text{Gangunterschied}$$

Dieser Gangunterschied müsste sich beim Verdrehen der Anordnung um 90° ändern und diese Änderung müsste als Änderung im Interferenzmuster zu beobachten sein. Da trotz mehrmaliger Wiederholung des Experimentes kein Gangunterschied zu beobachten war, herrschte in der Fachwelt Ratlosigkeit bei der Deutung des Messergebnisses.

1905 veröffentlichte Einstein seinen Aufsatz: "Zur Elektrodynamik bewegter Körper". Er stellte fest, dass eine Geschwindigkeit bezüglich des Äthers nicht gemessen werden kann, weil es keinen Äther gibt! Elektromagnetische Wellen benötigen für ihre Ausbreitung kein Medium.

Diese These führte zu einem Widerspruch zu der bis dahin vertretenen Annahme eines ausgezeichneten Inertialsystems (Dem Inertialsystems, in dem der Äther ruht.) Nur in diesem sollten die physikalischen Gesetze besonders einfache Formen annehmen.

Einsteins Annahmen (***Einstein'sche Postulate***):

Relativitätsprinzip:

Alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt. Die Naturgesetze werden in allen Inertialsystemen durch die selben Gleichungen beschrieben.

Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:

Die Lichtgeschwindigkeit ist eine absolute Konstante und besitzt im Vakuum stets den Wert $c \approx 300\,000\text{ km/s}$ (genauer Wert: $2,99792458 \cdot 10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle und des Beobachters.

Beispiel zur Untermauerung dieser Aussagen:

Internationale Atomzeitskala. Hier beträgt die Genauigkeit der Zeitsignale zur Synchronisation von Atomuhren in Europa und Amerika: 10^{-7}s . Entfernung Washington - Braunschweig $D=6000\text{km}$

t_1 gegen Erdbewegung: $t_1 = D / (c+v)$

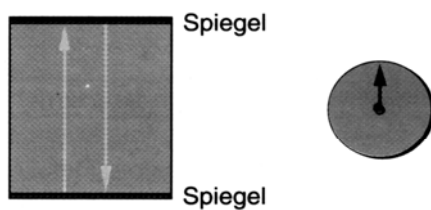
t_2 mit Erdbewegung: $t_2 = D / (c-v)$ (12 Stunden später)

→ $\Delta t \approx 4 \cdot 10^{-6}\text{s}$ (wechselnde Verspätung der Signale müsste leicht nachweisbar sein, ist es aber nicht; es gilt immer $t = D / c$)

Die Zeitdilatation

Man bezeichnet die Zeitdilatation auch als **Relativität von Zeiten** oder als **Relativistische Zeitdehnung**.

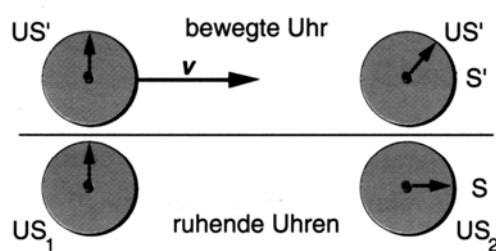
Wir beginnen unsere Überlegungen mit der Untersuchung des Gangs einer bewegten, ganz speziellen Uhr, einer "Lichtuhr". Diese besteht aus einem Zylinder mit einer Blitzlampe am



Lichtuhr mit Anzeige

oberen und einem Spiegel am unteren Ende. Um nun die Zeit zu messen, wird ein Lichtblitz ausgesendet, reflektiert und wenn er wieder oben ankommt die Uhr um eine Zeiteinheit weiter gestellt. Gleichzeitig wird der nächste Blitz gezündet.

Im zweiten Schritt betrachten wir zwei in einem Inertialsystem S ruhende Uhren S_1 und S_2 ,

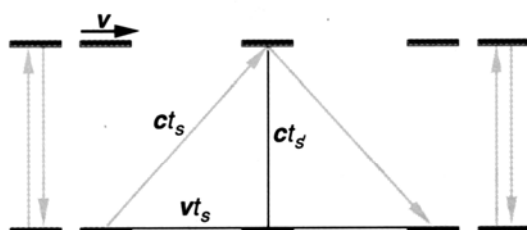


Bewegte Uhren gehen langsamer

die durch einen Lichtblitz genau zwischen den Uhren synchronisiert wurden.

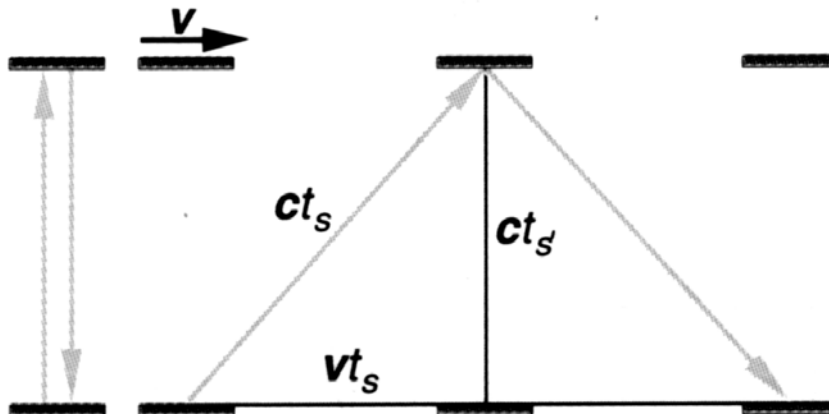
Eine Uhr S' in einem Inertialsystem S' , das sich geradlinig gleichförmig mit Geschw. v relativ zu S bewegt.

Von S aus betrachtet läuft das Licht in der Uhr in S' schräg auf und ab, legt also innerhalb



Der Lichtweg in einer bewegten Uhr ist größer.

eines Taktes einen weiteren Weg zurück als in den ruhenden Uhren und benötigt daher dafür auch mehr Zeit \rightarrow die bewegte Uhr "tickt" langsamer (Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit wird vorausgesetzt!). d.h. für einen im ruhenden Inertialsystem befindlichen Beobachter „geht“ die Uhr im bewegten System langsamer.



- ct_s Lichtweg in der bewegten Lichtuhr, vom ruhenden System aus betrachtet.
 $ct_{s'}$ Lichtweg in der bewegten Lichtuhr, vom bewegten System aus betrachtet.
 vt_s Weg den die Blitzlampe/das Zählwerk der bewegten Lichtuhr, vom ruhenden System aus betrachtet, zurücklegt.

$$(ct_s)^2 = (ct_{s'})^2 + (vt_s)^2$$

$$t_s = \frac{t_{s'}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (> t_{s'} \quad !!)$$

Den Effekt, dass die Zeitmessung mit ein und derselben Uhr in einem „bewegten“ und einem „ruhenden“ System unterschiedliche Messwerte ergibt, bezeichnet man als Zeitdilatation.

Zeitdilatation:

Eine relativ zu einem Inertialsystem bewegte Uhr geht langsamer als die synchronisierten Uhren im Inertialsystem. Während im Inertialsystem die Zeit t_s vergeht, rückt die Anzeige

der bewegten Uhr um $t_{s'}$ weiter, wobei $t_{s'} = t_s \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

Erst im Jahr 1959 erfolgte die experimentelle Bestätigung der Zeitdilatation im CERN (der Europäischen Organisation für Kernforschung - Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire). In Speicherring mit $v=0,99942c$ kreisende Myonen (diese besitzen ähnliche Eigenschaften wie Elektronen, sind jedoch instabil) besitzen eine Halbwertszeit von $44,6\mu s$ (aus der Sicht des ruhenden Beobachters) anstelle von $1,52\mu s$ aus "Sicht" der Myonen (entsprechen den bewegten Uhren) \rightarrow totale Übereinstimmung mit der Vorhersage der Relativitätstheorie bei einer Messungsgenauigkeit $0,1\%$!

$$T_{\text{bewegt}} = \frac{T_{\text{Ruhe}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1,52\mu s}{\sqrt{1 - (0,99942)^2}} = 44,6\mu s$$

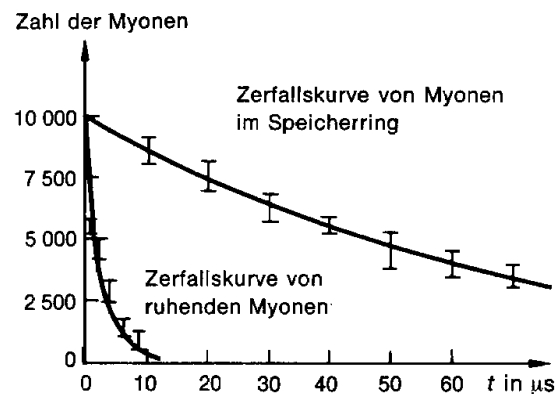


Abb. aus Sexl 4

Myonen entstehen auf "natürliche" Weise durch kosmische Strahlung in ca. 10-15 km Höhe und bewegen sich mit ca. $0,9992c$ auf die Erde zu. Wie lange brauchen Myonen zur Erde?

a) nichtrelativistische Betrachtung:

$$t = \frac{H}{v} = \frac{15 \cdot 10^3 \text{ m}}{0,9992 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}} = 50\mu s$$

t wäre viel größer als Halbwertszeit. Es könnten somit gar keine Myonen bis zur Erde vordringen und das steht im Widerspruch zu der hohen, mit Detektoren erfassten Myonenzahl!

b) relativistische Betrachtung

Dehnung der Halbwertszeit:

$$\tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1,52 \cdot 10^{-6} \text{ s}}{\sqrt{1 - 0,9992^2}} = 38 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Längenkontraktion

Man bezeichnet die Längenkontraktion auch als **Lorentzkontraktion** oder als **Relativistische Längendehnung**.

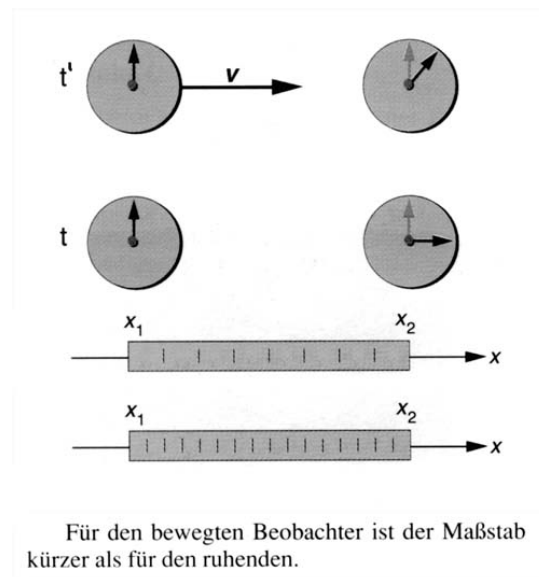
Gedankenexperiment: Wir bewegen uns mit den Myonen in der sekundären kosmischen Strahlung. Dabei gilt für uns die Halbwertszeit ruhender Myonen. Nach klassischer Betrachtung müsste der überwiegende Teil der Begleiter während des Flugs zur Erde zerfallen. Dies ist aber nicht der Fall!

Der mitbewegte Beobachter stellt – zusätzlich zur veränderten Zeit - einen anderen Abstand zur Erde hin fest als der ruhende Beobachter. **Die Strecke ist für den Beobachter im mitbewegten System verkürzt.**

Betrachten wir einen Maßstab der Länge l im ruhenden System S . An jedem Stabende befindet sich eine synchronisierte Uhr. Ein System S' bewegt sich relativ zu S mit v . Eine Uhr in S' wird mit dem Uhrenpaar synchronisiert, sobald diese den Stabanfang passiert. Wenn die Uhr in S' das Stabende passiert, werden die Zeiten t und t' abgelesen und verglichen. Da v konstant ist gilt:

$$v = \frac{l}{t} = \frac{l'}{t'} \Rightarrow l' = l \cdot \frac{t'}{t} = l \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < l$$

d.h.: Die Länge l erscheint für den mitbewegten Beobachter verkürzt.



Lorentzkontraktion:

Aus der Sicht eines ruhenden Beobachters erscheint ein bewegter Gegenstand in seiner Bewegungsrichtung verkürzt. Es gilt:

$$l' = l \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Der relativistische Dopplereffekt

Akustischer Dopplereffekt:

Schallwellen benötigen ein Trägermedium. Dieses Medium wird in der Akustik als ruhendes Bezugssystem angenommen.

bewegter Beobachter $f_B = f_Q \cdot \left(1 + \frac{v_B}{c}\right)$ (Herleitung: $f_Q = \frac{c}{\lambda}$, $f_B = \frac{c+v}{\lambda} = f_Q + \frac{v}{\lambda} = f_Q + \frac{v \cdot f_Q}{c}$)

bewegte Schallquelle $f_B = f_Q \cdot \frac{1}{1 - \frac{v_Q}{c}}$ (Herleitung: $\lambda' = \lambda - v \cdot T = \lambda - \frac{v}{f}$; $\frac{c}{f'} = \frac{c}{f} - \frac{v}{f}$ )

Für Lichtwellen gibt es kein ausgezeichnetes Bezugssystem. Der Dopplereffekt hängt nur von der Relativgeschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger ab.

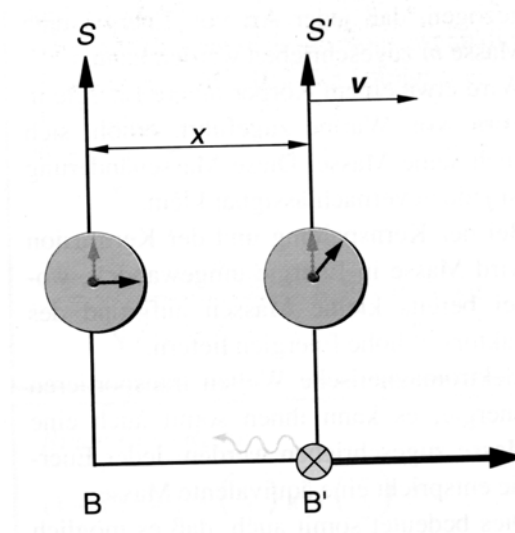


Abb. aus Kraker-Paill, Physik 4

S' sei ein System, das sich mit v relativ zu S gleichförmig bewegt. Beim Vorbeifahren von S' an S werden beide Uhren synchronisiert. Nach einer Zeit t_B wird von S' ein Signal in Richtung S ausgesandt. Nach welcher Zeit t wird es vom Beobachter B im System S wahrgenommen?

$$t = t_B + \frac{x}{c} = t_B + \frac{v \cdot t_B}{c} = t_B \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

$$= \frac{t_{B'}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(1 + \frac{v}{c}\right) = t_{B'} \cdot \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{v}{c}\right)^2}{\left(1 + \frac{v}{c}\right) \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right)}} = t_{B'} \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

$$t_B, t_{B'} \dots \text{Periodendauer} \rightarrow \frac{1}{t_B} \dots \text{Frequenz } f_B$$

$$\frac{1}{f_B} = \frac{1}{f_{B'}} \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} \rightarrow f_B = f_{B'} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$$

Obige Formel gilt für den Fall, dass sich Sender und Empfänger voneinander entfernen. Für eine Annäherung von Sender und Empfänger ist einfach v durch $-v$ zu ersetzen und man erhält

$$f_B = f_{B'} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$$

d.h. **Verminderung der Empfängerfrequenz beim Entfernen und Erhöhung der Empfängerfrequenz bei Annäherung**, unabhängig davon, ob sich Sender oder Empfänger bewegen (nur die **Relativbewegung** geht in die Berechnung ein)

Beispiel:

Das langwelligste Licht der Balmer-Serie von Wasserstoff hat eine Wellenlänge von $\lambda_0 = 656\text{nm}$ (= "Sendewellenlänge λ' "). Im Licht einer entfernten Galaxie wird die Wellenlänge dieser Linie zu $\lambda = 1458\text{nm}$ verschoben ("Empfangswellenlänge") gemessen. Wie groß ist die Geschwindigkeit, mit der sich diese Galaxie von der Erde wegbewegt (f' ... Sendefrequenz, f ... Empfangsfrequenz)?

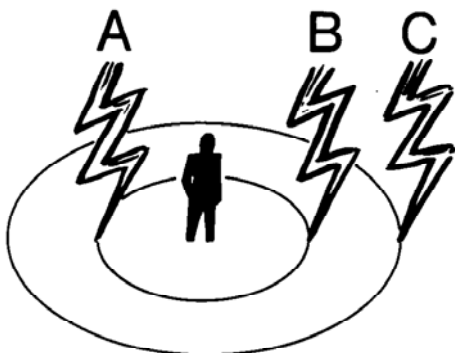
$$f = f' \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}, \quad c = \lambda \cdot f = \lambda' \cdot f', \quad \frac{f}{f'} = \frac{\lambda'}{\lambda}$$

$$\frac{f}{f'} = \frac{\lambda'}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}, \quad \left(\frac{\lambda'}{\lambda}\right)^2 = \frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}, \quad \dots, \quad v = 0,663c$$

Die Relativität der Gleichzeitigkeit

Definition der Gleichzeitigkeit:

Zwei Ereignisse an verschiedenen Orten in einem Inertialsystem finden gleichzeitig statt, wenn sie von Lichtsignalen ausgelöst werden, die gleichzeitig von einer Quelle in der Mitte ausgegangen sind.



Die Ereignisse A, B und C finden gleichzeitig statt. Der Beobachter in der Mitte sieht aber nur A und B gleichzeitig, denn das Licht von C erreicht ihn erst später.



Zwei Uhren werden gleichzeitig von einer Blitzlampe gestartet, die in der Mitte gezündet wurde.

Abb. aus Sexl, Physik 4

Gedankenexperiment:

Blitzlampe in der Mitte eines Waggons; ihre Lichtstrahlen öffnen die Türen. Der Zug bewegt sich gleichförmig mit der Geschwindigkeit v . Für Beobachter B' im Waggon öffnen sich beide Türen gleichzeitig. Für Beobachter B am Bahndamm geht die hintere Tür früher auf als die vordere, da sich die hintere Tür mit v auf den Lichtstrahl zu bewegt.

Relativität der Gleichzeitigkeit:

Ereignisse, die in einem Inertialsystem an verschiedenen Orten gleichzeitig stattfinden, sind aus der Sicht eines relativ zum ersten bewegten Inertialsystems i.a. nicht mehr gleichzeitig.

Mit anderen Worten: Es gibt keine absolute Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse. Finden in einem Inertialsystem zwei Ereignisse an verschiedenen Orten gleichzeitig statt, so finden diese Ereignisse in einem relativ dazu bewegten Inertialsystem zu verschiedenen Zeiten statt.

Relativistisches Additionstheorem der Geschwindigkeiten

Bewegt sich ein Inertialsystem S' mit einer Geschwindigkeit v relativ zu einem Inertialsystem S und bewegt sich ein Körper im Inertialsystem S' relativ zu diesem mit der Geschwindigkeit u' , so hat dieser Körper im Ruhesystem S die Geschwindigkeit :

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

Beispiel:

Eine "Superrakete" fliegt gegenüber einem Ruhesystem mit einer Geschwindigkeit von $c/2$. Von der Rakete wird ein Geschöß mit der Geschwindigkeit $c/2$ abgefeuert. Wie groß ist die Geschwindigkeit des Geschosses auf das Ruhesystem bezogen?

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} = \frac{0,5c + 0,5c}{1 + \frac{0,5c \cdot 0,5c}{c^2}} = 0,8c$$

Die relativistische Massenzunahme

Überlegung:

Wäre es mit einem Auto (oder einer Rakete) durch ständiges Beschleunigen mit $a=10\text{ms}^{-2}$ möglich, Lichtgeschwindigkeit zu erreichen bzw. zu überschreiten?

Newtonsche Physik: $v = a \cdot t$, $t = c/a = 3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1} / 10 \text{ms}^{-2} = 3 \cdot 10^7 \text{s} \approx 1 \text{Jahr}$

d.h. nach der Newtonschen Mechanik wäre das kein Problem, nach der Relativitätstheorie kann jedoch c nicht erreicht bzw. überschritten werden. Das kann man sich nur auf die Art erklären, dass es bei höherer Geschwindigkeit in zunehmendem Maße schwieriger werden muss, die Geschwindigkeit weiter zu erhöhen.

Erklärungsversuch:

Ein Auto mit der Masse m fährt mit einer Geschwindigkeit w ($w \ll c$) gegen eine Wand.

Beim Aufprall schlägt es ein deutliches Loch in die Wand und es bleibt in der Wand stecken, d.h. es überträgt seinen gesamten Impuls $p=m \cdot w$ auf die Wand.

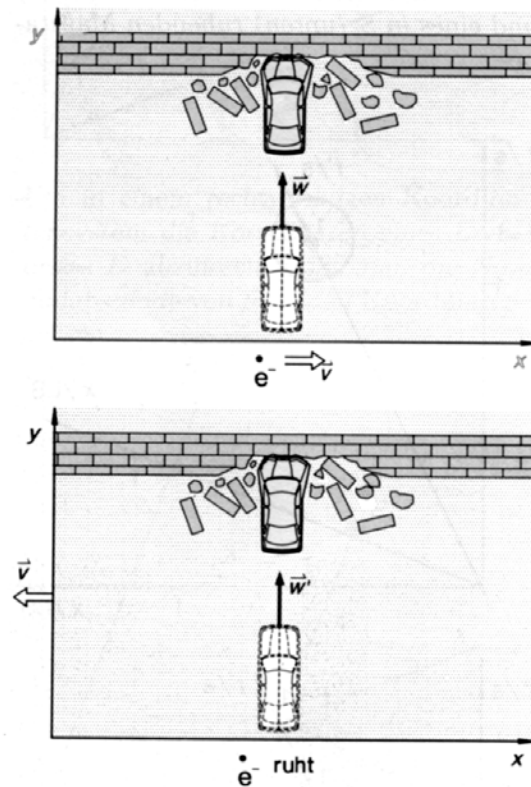


Abb. aus Sexl, Physik 4

Der Crash wird von einem sehr schnell mit v parallel zur Wand fliegenden Elektron "beobachtet". Vom Standpunkt des e^- ist das Auto-Wand-System in Bewegung und aufgrund der Zeitdilatation erfolgt der Aufprall im Zeitlupentempo.

Auto: $t, w, \Delta y$ (normal zu v des e^- , daher keine Lorentzkontraktion!)

e^- : $t', w', \Delta y$

$$t = t' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

... aus der Sicht des Elektrons

$$w' = \frac{\Delta y'}{\Delta t'} = \frac{\Delta y}{t} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = w \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Wie kann nun ein Auto bei so geringer Geschwindigkeit so ein tiefes Loch in die Wand s

Da der Impuls erhalten bleiben muss, muss aus einer Verringerung der Geschwindigkeit eine Zunahme der Masse folgen:

$$p = m \cdot w = m' \cdot w' = m' \cdot w \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$m = m' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow m' = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Bewegt sich ein Körper mit der Geschwindigkeit v , so erscheint seine Masse m_r einem

ruhenden Beobachter als $m_r = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, wobei m_0 die Ruhemasse des Körpers ist.

*m_r bezeichnet man als **relativistische Masse** des Körpers.*

Deutung:

Die Massenzunahme verhindert ein Erreichen der Lichtgeschwindigkeit, da für eine unendlich große Masse auch eine unendlich hohe Energie erforderlich wäre.

Seit ihrer Herleitung wurde die relativistische Massenzunahme in zahlreichen Experimenten überprüft und ihre Gültigkeit mit einer Genauigkeit von 0,05% bestätigt. Die klassische Berechnung führt hingegen zu völlig falschen Ergebnissen.

Konsequenz:

In Teilchenbeschleunigern sind Magnetfelder hoher Feldstärke, d.h. Elektromagnete hoher Leistungsaufnahme notwendig. Um z.B. ein Proton bei $v=0,999\,997\,26c$ im Kreis zu schicken ($m_r=427m_0$), benötigt man eine Leistung von 135MW !!

Lichtteilchen (Photonen) bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit. Daraus folgt, dass sie keine Ruhemasse besitzen können.

Relativistische Energie - Masse-Energie-Äquivalenz

Klassische Mechanik: die resultierende Kraft, die auf einen Massenpunkt einwirkt ist gleich der zeitlichen Änderung des Impulses:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{d(m \cdot v)}{dt} = \frac{dp}{dt}$$

Die Arbeit, die dadurch verrichtet wird, ist gleich der Änderung der kinetischen Energie des Massenpunktes.

$$E_{kin} = \int F ds = \int \frac{dp}{dt} ds = \int dp \frac{ds}{dt} = \int v dp$$

In der relativistischen Mechanik wird jetzt nur der Impuls (oder eigentlich die Masse) durch den **relativistischen Impuls** (relat. Masse) ersetzt.

$$E_{kin} = \int_0^u v dp = \int_0^u v d(mv) = \int_0^u v d\left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\right) = \int_0^u m_0 v d\left(\frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\right)$$

durch einfaches Differenzieren kann gezeigt werden, dass $d\left(\frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\right) = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{3}{2}} dv$ ist.

damit erhält man für die kinetische Energie

$$E_{kin} = \int_0^u m_0 v d\left(\frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\right) = \int_0^u m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{3}{2}} v dv =$$

$$= \dots \text{Substitutionsmethode} \dots = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \text{ oder}$$

$$E_{kin} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 = m_r c^2 - m_0 c^2$$

Der Ausdruck setzt sich also aus einem konstanten Term (m_0c^2) und einen geschwindigkeitsabhängigen Term zusammen. Dieser konstante Term wird als **Ruheenergie** der Körpers bezeichnet.

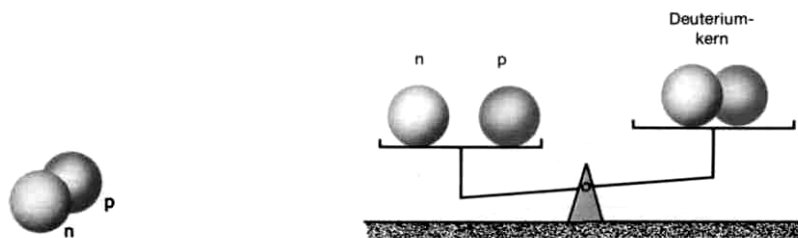
$$\text{Ruheenergie} \quad E = m_0 \cdot c^2$$

Die **Gesamtenergie** wird als Summe aus kinetischer Energie und Ruheenergie definiert

$$E = E_{kin} + m_0c^2 = m_r c^2$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich die **Äquivalenz von Energie und Masse**. Führt man einem Körper Energie zu, so erhöht man auch seine Masse. Umgekehrt muss es auch möglich sein, durch Verringerung der Masse eines Körpers Energie freizusetzen. (→ Umwandlung von Masse in Energie bei der Kernspaltung und Kernfusion, **Massendefekt** !)

Beispiel: Massendefekt



Der Deuteriumkern besteht aus einem Proton und einem Neutron. Um diese Teilchen zu trennen, muss die Bindungsenergie aufgebracht werden. Wegen des Massendefekts ist die Masse des Deuteriumkerns etwas geringer als die Summe der Massen von Proton und Neutron.

Jeder Atomkern ist aus Protonen und Neutronen aufgebaut. Der Kern des schweren Wasserstoffes (Deuterium) besteht z.B. aus einem Proton und einem Neutron. Die Masse eines Protons beträgt $1672,62 \cdot 10^{-30}$ kg, die Masse eines Neutrons $1674,93 \cdot 10^{-30}$ kg. Ein Deuteriumkern sollte daher eine Masse von $3347,55 \cdot 10^{-30}$ kg aufweisen. In Wirklichkeit hat er aber nur $3343,59 \cdot 10^{-30}$ kg. Wie lässt sich das erklären?

Protonen und Neutronen sind im Atomkern durch starke **Kernkräfte** aneinander gebunden. Um ein Teilchen aus dem Atomkern zu entfernen, muß man Arbeit gegen die Kernkräfte verrichten, also Energie aufwenden. Fügt man dem Atomkern dagegen ein Teilchen hinzu, so wird Energie frei. Man nennt sie die **Bindungsenergie** des Teilchens.

Die Abgabe der Bindungsenergie ΔE bedeutet einen Massenverlust des Atomkerns um $\Delta m = \Delta E/c^2$. Für Deuterium beträgt dieser Massendefekt $3,96 \cdot 10^{-30}$ kg:

Masse des Protons	+1672,62 • 10 ⁻³⁰ kg
Masse des Neutrons	+1674,93 • 10 ⁻³⁰ kg
Masse des Deuteriumkernes	-3343,59 • 10 ⁻³⁰ kg
Massendefekt	3,96 • 10 ⁻³⁰ kg

Daraus können wir die Bindungsenergie des Deuteriumkernes berechnen:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 3,96 \cdot 10^{-30} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} = 3,56 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 2,22 \text{ MeV}$$

Dieses Ergebnis stimmt mit den Messungen überein. Die Messungen zeigen auch, dass die Kernteilchen in Kernen von Atomen mittlerer Massenzahl stärker gebunden sind als bei Kernen kleiner oder großer Massenzahl. Am stärksten sind Protonen und Neutronen in Eisenkernen gebunden (stabilstes Element).

[Sextl, Physik 4]

Bemerkung:

Für Geschwindigkeiten $u \ll c$ reduziert sich der Term

$$E_{kin} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \text{ zu}$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

Begründung:

Potenzreihenentwicklung des Klammersausdrucks - vernachlässigen hoher Potenzen.

aus der binomischen Reihe erhält man

$$(a + b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^{n-k} b^k = a^n \left(1 + \frac{b}{a}\right)^n$$

$$(1 \pm x)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k = 1 \pm nx + \frac{n(n-1)}{2!} x^2 \pm \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} x^3 + \dots$$

für negative Exponenten gilt :

$$(1 \pm x)^{-n} = 1 \mp nx + \frac{n(n+1)}{2!} x^2 \mp \frac{n(n+1)(n+2)}{3!} x^3 + \dots$$

Folgerung :

$$\text{für } \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ erhält man daher } 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \frac{15}{48} \frac{v^6}{c^6} + \dots \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

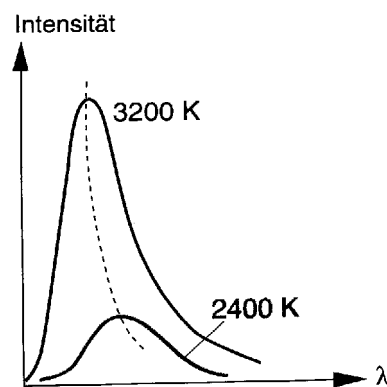
Quantennatur des Lichtes

Wiensches Verschiebungsgesetz

Die spektrale Energieverteilung eines schwarzen Strahlers ist nur von seiner Temperatur abhängig.

Für jede Temperatur gibt es eine ganz bestimmte kontinuierliche Verteilung der Strahlungsenergie über die Wellenlänge (Frequenz). Die Wellenlänge λ_{\max} des Strahlungsmaximums wird durch das Wiensche Verschiebungsgesetz angegeben:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK} = \text{konst}$$



Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Strahlungsmaximum zu kürzeren Wellenlängen hin.

Plancksches Wirkungsquantum

Zur Erklärung der Strahlungsemission stellte man sich atomare Oszillatoren vor, die thermisch zum Schwingen angeregt werden (Planck um 1900).

Erwin Schrödinger beschrieb die diskreten Energiewerte der Atome als Eigenschwingungen der Elektronenverteilung (Schrödingergleichung 1926!).

*Plancks Grundaussage: Ein Oszillator kann Energie nur in "Paketen", den **Energiequanten** absorbieren oder emittieren. Diese Energieänderung ΔE ist proportional zur Schwingungsfrequenz des Oszillators. $\Delta E \sim f$*

Proportionalitätsfaktor h ... Plancksches Wirkungsquantum

$$\Delta E = h \cdot f \quad [h] = \frac{[E]}{[f]} = 1 \text{ Js} \quad h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

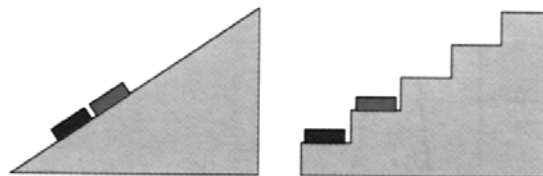
Eine Größe, deren Einheit das Produkt aus der Einheit der Energie mit der Einheit der Zeit darstellt, bezeichnet man als *Wirkung*.

Auch der Drehimpuls hat die Einheit einer Wirkung und ist (im atomaren Bereich) gequantelt:

$$L = I \cdot \omega \quad [L] = \text{kgm}^2 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Nms} = 1 \text{ Js}$$

$$L = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

Die Energiequantelung wird erst im atomaren Bereich wirksam bzw. nachweisbar. In der Makrophysik kann die Energie jeden beliebigen Wert annehmen (klassische Physik).

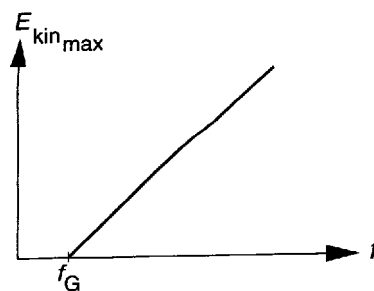
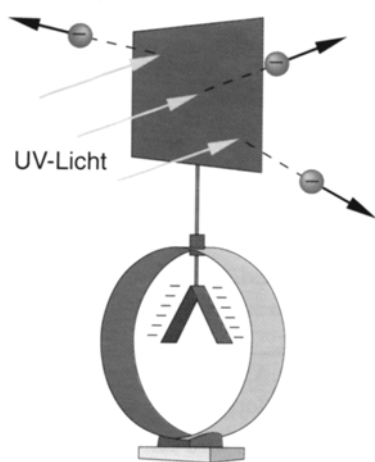


Links: Im makroskopischen Bereich gilt die klassische Physik. Die Energie kann jeden beliebigen Wert annehmen. - *Rechts:* Im atomaren Bereich gilt die Quantenphysik. Die Energie kann nur bestimmte (diskrete) Werte annehmen.

Der Photoeffekt

Licht kann von einem Metall Elektronen ablösen. Experimente liefern dabei folgende Ergebnisse:

- Die Anzahl der abgelösten e ist proportional zur Lichtintensität.
- Die kinetische Energie der e hängt nicht von der Lichtintensität, jedoch von der Frequenz des Lichtes ab.
- **Unter einer bestimmten Grenzfrequenz f_G werden überhaupt keine e abgelöst, auch wenn die Lichtintensität noch so groß ist.**



...kann mit der Wellentheorie nicht erklärt werden. Die kinet. Energie der e müsste demnach von der Intensität abhängen; Grenzfrequenz lässt sich nicht erklären.



Abb.: Schreiner S. 202

Einstein 1905: Lichtquantenhypothese; Photonenhypothese (Nobelpreis 1921): Licht besteht aus Lichtquanten, den Photonen (Licht ist ein Photonenstrom).

Eigenschaften der Photonen:

- Die Energie eines Lichtquants (Photons) einer monochromatischen Strahlung mit der Frequenz f beträgt $E = h \cdot f$ (d.h. die Energie eines Photons hängt nur von der Frequenz der e.m. Strahlung ab und ist gequantelt)
- Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit und müssen daher die Ruhemasse Null besitzen.
- Nach der Energie-Masse-Äquivalenz kann dem Photon eine Masse zugeordnet werden:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{hf}{c^2}$$

- Photonen besitzen einen Impuls. $p = m \cdot v = \frac{E}{c^2} \cdot c = \frac{h \cdot f}{c} = h \cdot \lambda$

Photonen können mit den Elektronen wie Teilchen in Wechselwirkung treten. Jedes Elektron wird dabei durch genau ein Photon ausgelöst. Damit Licht e aus einem Metall lösen kann, muss daher die Energie eines Photons mindestens gleich der Austrittsarbeit W_A eines e sein.

$$h \cdot f_G = W_A$$

Überschüssige Energie verbleibt als Bewegungsenergie des Elektrons.

$$h \cdot f = W_A + E_{\text{kin}}$$

Austrittsarbeit für einige Metalle:

Cs	1,99	eV
Pt	5,66	eV
Cu	4,84	eV
Zn	4,34	eV

Beispiel:

Energie eines Photons für Licht mit der Wellenlänge $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$

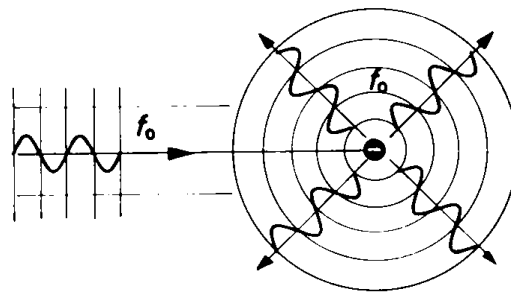
$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 3,98 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,5 \text{ eV}$$

Die Zahl der abgelösten e ist proportional zur Photonenzahl und damit zur Lichtintensität.

Der Comptoneffekt

Der Compton-Effekt beschreibt die Übertragung von Energie und Impuls energiereicher Photonen auf Elektronen.

Nach dem Wellenmodell wird eine Lichtwelle an einem kleinen, ruhenden Teilchen (z.B. einem e) als Kugelwelle gestreut. Dabei gibt es keine Möglichkeit der Frequenzänderung. Das Teilchen sendet Wellen mit der Erregerfrequenz aus.

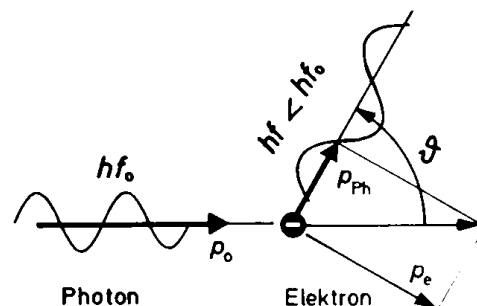
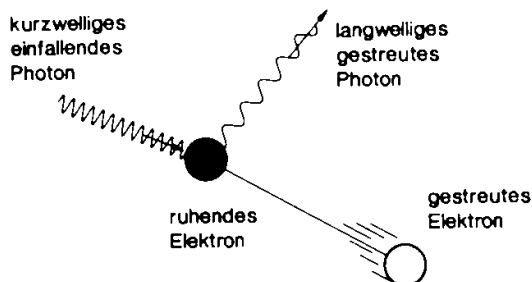


Streuung einer Welle an einem ruhenden Teilchen; die Frequenz der Streuwelle ist und bleibt die Frequenz, mit der die Welle erregt wurde.

Abb. aus Schreiner, Angewandte Physik

Beschreibung nach dem Quantenmodell:

Trifft ein Photon auf ein ruhendes e , so findet ein elastischer Stoß statt. Dabei gilt der Energie- und der Impulserhaltungssatz. Das um den Streuwinkel θ abgelenkte (gestreute) Lichtquant muss einen Teil seiner Energie auf das e übertragen; es muss daher nach dem Stoß eine verminderte Energie $h \cdot f$ und damit eine verringerte Frequenz haben.



Beschreibung der Streuung von Licht nach dem Quantenmodell; das Streulicht hat verminderte Frequenz, also größere Wellenlänge.

Die maximale Energieübertragung findet statt, wenn die Massen der Stoßpartner annähernd gleich sind. Daraus ergibt sich eine bestimmte Wellenlänge für die e.m. Strahlung:

$$m_{ph} = m_e \Leftrightarrow \frac{h}{c\lambda} = m_e \Rightarrow \lambda = \frac{h}{m_e c} = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ m} \quad (\text{Comptonwellenlänge des Elektrons})$$

... Wellenlänge einer kurzwelligigen Röntgenstrahlung.

Compton konnte die vorhergesagte Frequenzänderung der Streustrahlung experimentell bestätigen. Bei sichtbarem Licht ist auf Grund der geringeren Frequenz die relative Frequenzänderung sehr gering.

Dualismus des Lichtes

Elektromagnetische Strahlung verhält sich einmal wie eine Welle und dann wieder wie Teilchen. Wellen- und Teilchenbild **schließen einander allerdings aus**.

Um die **Lichtausbreitung** zu beschreiben, benützen wir das **Wellenmodell**. Vorgänge wie Interferenz, Reflexion, Brechung und Beugung werden mit Hilfe der Wellenoptik erklärt. Ein Grenzfall der Wellenoptik ist die Strahlenoptik. Sie gilt, wenn die Wellenlänge klein ist gegenüber den Abmessungen von Objekten. **Trifft Licht jedoch auf Materie** auf und wird es dabei in eine andere Energieform umgewandelt, dann tritt die **Quantennatur** ("Teilchennatur") des Lichtes in Erscheinung. Als Beispiele dafür haben wir den Photoeffekt und Comptoneffekt kennen gelernt. So reicht etwa ein einziges Photon aus, um in einem vollkommen dunkel adaptierten menschlichen Auge einen Reiz auszulösen.

Durch elektromagnetische Strahlung wird Energie transportiert. Im Wellenbild gilt für die Intensität der Strahlung

$$I = \frac{\epsilon_0 c E_0^2}{2}$$

Im Teilchenbild ergibt sich die Intensität als Energie des Photonenstroms, der pro Sekunde durch die Flächeneinheit hindurch tritt:

$$I = \frac{hfN}{At} \quad \text{N... Anzahl der Photonen}$$

Aufgaben:

1. Wie viel Ruhemasse müsste in Energie umgewandelt werden, um eine 100-Watt-Glühbirne zehn Jahre lang leuchten zu lassen? (Lösung: 0,35 mg)

$$E = P \cdot t = 100 \text{ W} \cdot 10 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 = 3,15 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

$$m_0 = E / c^2 = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ kg} = 0,35 \text{ mg}$$

2. Ein Lichtbündel der Wellenlänge 400 nm besitze eine Intensität von 100 W/m².

- a) Wie groß ist die Energie eines Photons dieses Strahls? (Lösung: 4,97 · 10⁻¹⁹ J)

$$E = h \cdot c / \lambda = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 400 \cdot 10^{-9} = 4,97 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- b) Wie viel Energie fällt auf eine Fläche von 1 cm², die senkrecht zum Strahl steht, in einer Sekunde? (Lösung: E = 0,01 J)

$$E = I \cdot A \cdot t = 0,01 \text{ J}$$

- c) Wie viele Photonen fallen damit in einer Sekunde auf diese Fläche? (Lösung: N = 2,01 · 10¹⁶ Photonen)

$$N = E / E_{\text{Photon}} = 0,01 \text{ J} / 4,97 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,01 \cdot 10^{16}$$

3. In einer Dunkelkammer, in der Schwarz-Weiß-Photopapiere entwickelt werden, ist ständig eine Rotlichtlampe eingeschaltet, die keine Schwärzung des Fotopapiers hervorruft. Die Belichtung des Papiers erfolgt durch eine Weißlichtquelle. Wie lässt sich dies erklären?

4. Eine fotografische Schicht enthält AgBr-Kristalle. Diese benötigen eine Mindest-Photonenenergie von 2,8 eV, um ein Elektron freizusetzen. Welcher Wellenlänge des Lichtes entspricht das? Für welchen Bereich des sichtbaren Lichtes ist AgBr empfindlich?

(Lösung: $\lambda = 0,44 \mu\text{m}$ d.h. blau-violett; AgBr ist unempfindlich gegenüber grünem, gelbem und rotem Licht. Durch Zusatz von Farbstoffen kann eine fotografische Schicht auch für diese Farben sensibilisiert werden.)

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,44 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0,44 \mu\text{m}$$

5. Das menschliche Auge kann im allgemeinen Licht mit einer Leistung von 2⁻¹⁸ W bei einer Wellenlänge von 0,6 μm noch wahrnehmen. Wie viele Photonen pro Sekunde treffen auf? (Lösung: 6)

$$P = \frac{N \cdot h \cdot f}{t} = \frac{N \cdot h \cdot c}{\lambda \cdot t}$$

$$\frac{N}{t} = \frac{P \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{2 \cdot 10^{-18} \cdot 6 \cdot 10^{-7}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 6 \text{ Photonen / s}$$

Kernphysik

1896 Henri Becquerel entdeckt Radioaktivität (Fluoreszenzlicht und "Strahlung" von Uransalzen) . Erster Hinweis auf Existenz von Atomkernen.

Ernest Rutherford: Einteilung der radioaktiven Strahlung in α -, β - und γ – Strahlung.

1911 Streuexperimente mit α -Teilchen durch Rutherford, H. W. Geiger und E. Marsden führen zu modernem Atombild:

Atome bestehen aus einem kleinen, massiven Kern mit einem Radius von ca. 1 – 10 fm (1 fm = 10^{-15} m) und einer Elektronenwolke, die den Kern in einem relativ großen Abstand von ca. 0,1 nm (=100 000 fm) umgibt.

1919 erster künstl. Kernzerfall in Experiment von Rutherford

1932 Entdeckung des Neutrons von J. Chadwick und des Positrons von C. Anderson

1938 Otto Hahn, Fritz Strassmann: Zerfall von Uran durch Neutronenbeschuss

1939 Lise Meitner, Otto Frisch: Kernspaltungshypothese

6. 8.1945 Uranbombe auf Hiroshima

9. 8.1945 Plutoniumbombe auf Nagasaki

Aufbau der Atomkerne

Ausdehnung und chemische Eigenschaften von Atomen werden durch die Elektronenhülle bestimmt. Diese trägt aber nur ca. 0,05% zur Masse eines Atoms bei.

Atomkerne bestehen aus nur zwei Arten von Teilchen (**Nukleonen**) annähernd gleicher Masse: dem **Proton**, mit der Ladung +e, und dem nur 0,02 Prozent schwereren, ungeladenen **Neutron**.

Die Anzahl Z von Protonen in einem Kern heißt **Ordnungszahl** oder Kernladungszahl. Für ein nicht ionisiertes Atom ist Z somit auch gleich der Anzahl der Elektronen in der Atomhülle.

Die Anzahl N der Neutronen im Kern ist für leichte Kerne etwa gleich, für schwerere Kerne etwas größer als die Ordnungszahl Z.

$$A = Z + N$$

Die Summe aus Ordnungszahl und Neutronenzahl nennt man **Massenzahl** eines Kerns.

Obwohl sich die Isotope in ihrer Masse deutlich unterscheiden, besitzen sie alle annähernd dieselben chemischen Eigenschaften, da sie jeweils die gleiche Anzahl an Hüllenelektronen besitzen. Eine Isotopentrennung bzw. allgemein die Bestimmung von Atommassen erfolgt mit einem **Massenspektrometer**.

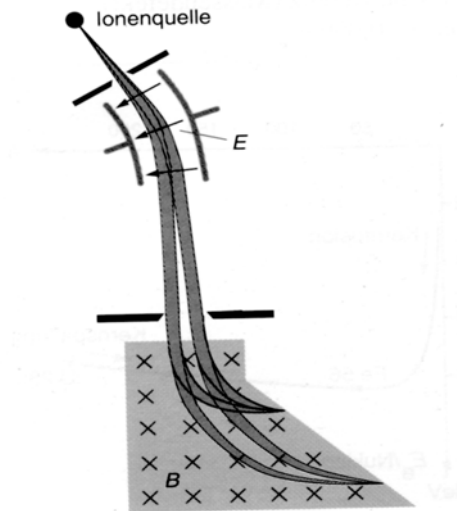


Abb.: Massenspektrometer, Kraker-Paill, Physik 4

Zur Ermittlung der **Kernradien** streut man Elektronen mit hoher Energie an Atomkernen. Aus den Beugungserscheinungen (Interferenzmuster) lässt sich der Kernradius ermitteln.

Dabei erhält man zwischen dem Kernradius R und der Massenzahl A den Zusammenhang

$$R = r_0 \cdot A^{\frac{1}{3}} \quad \text{wobei } r_0 \approx 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/index.html> sehr gute Physik-Seite mit vielen Java-Applets zu verschiedenen Bereichen der Physik

Die Kernkraft

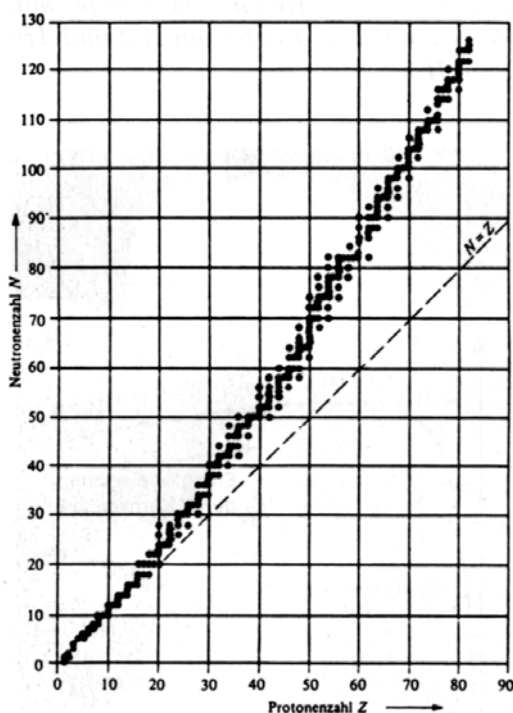
Zwischen den positiv geladenen Protonen wirken Coulombsche Abstoßungskräfte. Damit trotzdem ein stabiler Kern existieren kann, muss es noch andere Kräfte geben.

Innerhalb des Kerns übt ein Nukleon eine starke anziehende Kraft auf seine nächsten Nachbarn aus. Diese Kraft heißt **starke Kernkraft** oder **hadronische Kraft** und wird oft auch als **starke Wechselwirkung** bezeichnet. Sie ist um ein Vielfaches stärker als die elektrostatische Abstoßung zwischen den Protonen und die Gravitationskraft zwischen den Nukleonen. Letztere ist so schwach, dass sie in der Kernphysik stets vernachlässigt werden kann (Verhältnis der Kräfte ca. $1 : 10^{-1} : 10^{-38}$).

Die starke Kernkraft ist zwischen zwei Protonen, einem Proton und einem Neutron bzw. zwei Neutronen ungefähr gleich. Zwei Protonen unterliegen jedoch zusätzlich der elektrostatischen Abstoßung, so dass die Anziehung etwas vermindert wird. Die starke Kernkraft fällt rasch mit dem Abstand zwischen den Nukleonen ab und wird innerhalb einiger Femtometer

vernachlässigbar. Die starke Kernkraft besitzt also eine verblüffende Eigenschaft, die es weder bei der Gravitation noch bei der elektromagnetischen Wechselwirkung gibt: Sie ist extrem **kurzreichweitig** und außerhalb des Atomkerns nicht mehr wirksam.

Durch die geringe Reichweite der Kernkraft wird jedes Teilchen im Kern nur von seinen nächsten Nachbarn angezogen. Bei großen Kernen wird daher die Abstoßung stärker, da ein Proton nur von seinen Nachbarn angezogen, aber von allen anderen Protonen abgestoßen wird. Dies erklärt auch die Zunahme der Neutronenzahl bei schwereren Atomkernen sowie die Abnahme der Stabilität großer Kerne.



In der Nuklidkarte ist jeder Kern als Punkt in der N-Z-Ebene dargestellt (N Neutronenzahl, Z Protonenzahl). Dargestellt sind hier nur die stabilen Isotope.

Masse und Bindungsenergie

Die Masse eines Kerns ist nicht gleich der Summe der Massen seiner Bestandteile. Wenn zwei oder mehrere Nukleonen einen stabilen Kern bilden, nimmt die gesamte Ruhemasse ab, und Energie wird frei. Umgekehrt muss Energie aufgewendet werden, um einen Kern in seine Bestandteile zu zerlegen. Die Energiedifferenz zwischen der Ruheenergie eines Kerns und der seiner einzelnen Bestandteile (Massendefekt Δm) ergibt die gesamte

Bindungsenergie des Kerns:

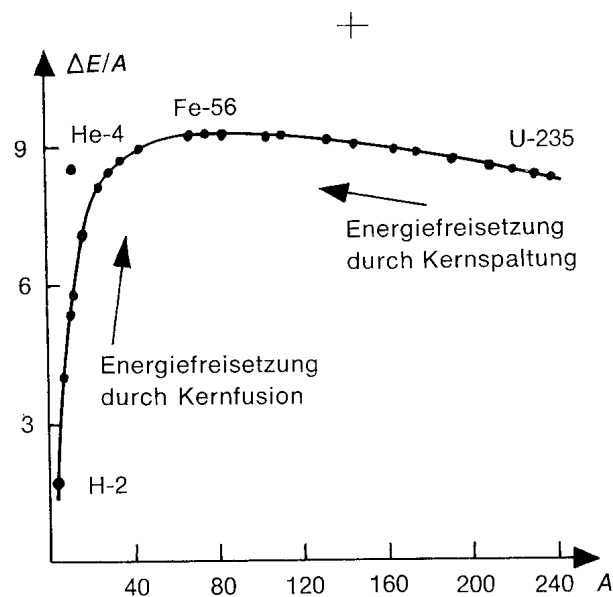
$$E_B = \Delta m \cdot c^2$$

z.B. C-12 – Kern: enthält 6 Protonen und 6 Neutronen. Die Differenz der Masse der vollständig getrennten Nukleonen zur Kernmasse beträgt $\Delta m = 0,099 \text{ u}$ (u ... **atomare Masseneinheit**, ein Zwölftel des neutralen C-12 Atoms; $m_p = 1,007276 \text{ u}$; $m_n = 1,008665 \text{ u}$; die einer atomaren Masseneinheit entsprechende Ruheenergie ist $1 \text{ u}c^2 = 931,5 \text{ MeV}$)
Bindungsenergie des C-12 Kerns beträgt somit 92,2 MeV

Dividiert man die Bindungsenergie durch die Anzahl der Nukleonen, so erhält man die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon. Diese ist nicht für alle Elemente gleich groß, sondern hängt vom der Kerngröße und dem Verhältnis der anziehenden Kernkräfte und der abstoßenden Coulombkraft ab.

$$\text{C-12: } \frac{E_B}{A} = \frac{92 \text{ MeV}}{12} = 7,7 \text{ MeV}$$

Diese Bindungsenergie pro Nukleon ist für Eisen und die Nachbarelemente am größten, d.h. diese Elemente sind am stabilsten.



Der Kernspin

Wie die Elektronen der Atomhülle haben auch die einzelnen Kernbausteine einen **Eigendrehimpuls (Spin)** und verhalten sich wie winzige Magnete. Bei Kernen mit gerader Nukleonenzahl können sich die magnetischen Momente der Kernbausteine kompensieren, bei ungerader Nukleonenzahl kann dies nicht erfolgen. Der Kern besitzt dann einen resultierenden Gesamtspin und ein **magnetisches Moment**.

Der Wasserstoffkern besteht aus einem einzigen Proton und hat daher ein magnetisches Moment. Bringt man einen Wasserstoffkern in ein Magnetfeld, so kann sich sein Spin entweder parallel oder antiparallel zum Feld einstellen. Die beiden Einstellungen stellen verschiedene Energiezustände dar, die Energiedifferenz hängt von der Stärke des Magnetfeldes und der Größe des magnetischen Moments, also von Spin und Masse des Kerns, ab.

Mit einem kurzen Radiowellenimpuls, dessen Frequenz der Energiedifferenz entspricht, kann man den Kernspin aus dem energetisch tieferen in den energetisch höheren Zustand umklappen. Wenn die Kerne anschließend in ihre energetisch günstigere Orientierung zurück kippen, senden sie genau jene Frequenz aus, die sie zuvor absorbiert haben. Die Resonanzfrequenz hängt vom Magnetfeld am Ort des Kernes ab. Dieses wird einerseits durch das externe Magnetfeld, andererseits durch die von den Elektronen der Umgebung hervorgerufenen Magnetfelder bestimmt.

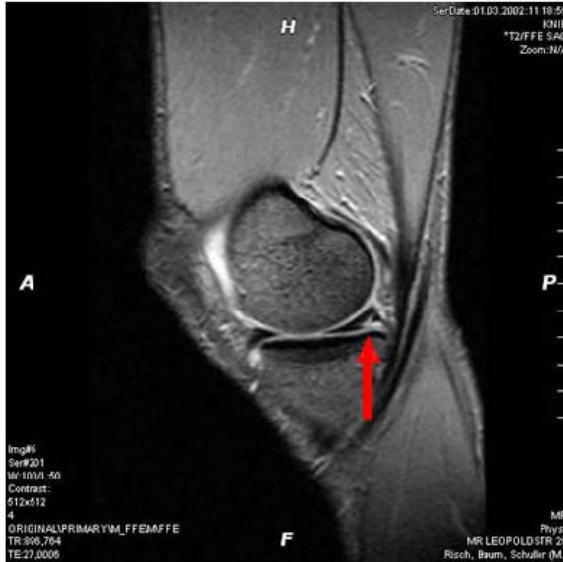
In der Chemie wird dieser Effekt in der **NMR-Spektroskopie** (Kurzbezeichnung für nuclear magnetic resonance spectroscopy) zur Strukturanalyse hauptsächlich von organischen Verbindungen genutzt, in der Medizin zur Diagnose mittels **Kernspintomographie**.

Der Kernspintomograph (NMR-Tomograph)

Die Kernspintomographie nutzt das besonders große magnetische Moment der Wasserstoffkerne. Ein Großteil des menschlichen Körpers besteht aus Wasser, dessen Verteilung mit Hilfe der NMR-Tomographie in Schnittbildern dargestellt wird. Dadurch werden **Gewebeunterschiede** deutlich sichtbar. Bei der Untersuchung befindet sich der Patient im Inneren einer großen stromdurchflossenen Spule, die ein starkes, völlig homogenes Magnetfeld erzeugt. Die Wasserstoffkerne richten sich in diesem Feld aus. Eine Hochfrequenzantenne dient als Sende- und Empfangsantenne. Zusatzspulen erzeugen ein weiteres Magnetfeld, dessen Stärke in einer vorgegebenen Richtung linear ansteigt. Dadurch werden nur die Wasserstoffkerne in einer bestimmten Schnittebene durch den Körper zur

Kernspinresonanz angeregt. Die von den Kernen emittierte Hochfrequenzstrahlung wird digital gespeichert, analysiert und in einem aufwändigen Rechenverfahren zu einem Bild verarbeitet.

Die folgenden Bild stammt von einer solchen Kernspintomographie.



Nach Beschwerden am rechten Knie ließ sich der Patient untersuchen. Dabei wurde festgestellt, dass der Innenmeniskus hinten eingerissen ist.

Die entsprechende Stelle ist mit dem Pfeil markiert.

Metalle am oder im Körper kann Nebenwirkungen und Bildstörungen verursachen. Manche Metallfremdkörper (z. B. Eisensplitter im Auge oder Gehirn) können dabei sogar, durch Verlagerung oder Erwärmung während der Untersuchung, gefährlich sein, so dass eine Kernspununtersuchung bei solchen Patienten unmöglich sein kann.



Auch Träger eines Herzschrittmachers und ähnlicher Geräte dürfen daher bisher nicht untersucht werden. Bei entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen sind allerdings auch Untersuchungen bei Personen, die einen Herzschrittmacher tragen, schon möglich.

Schnell bewegliche Organe wie das Herz lassen sich nur mit eingeschränkter Qualität darstellen.

Radioaktivität

1896 entdeckte **A. H. Becquerel** bei Untersuchungen über Fluoreszenz, dass die dazu verwendeten Uranverbindungen eine lichtdicht verpackte Photoplatte schwärzen konnten. Becquerel vermutete, dass vom Uran eine bislang unbekannte Strahlung ausgeht. Er hatte damit die Radioaktivität entdeckt.

Radioaktivität ist die Eigenschaft instabiler Kerne, spontan zu zerfallen und dabei energiereiche Teilchen und Photonen auszusenden

Instabile Kerne sind **radioaktiv** und werden als **Radionuklide** bezeichnet. Der radioaktive Zerfall erfolgt ohne äußeren Einfluss, also spontan. Der Ausgangskern wird als **Mutterkern**, der sich bildende Kern als **Tochterkern** bezeichnet. Ist der Tochterkern instabil, dann zerfällt er selbst wieder. Auf diese Weise entstehen radioaktive **Zerfallsreihen**.

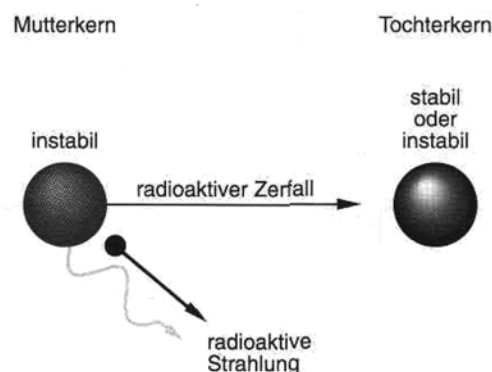


Abb. aus Kraker-Paill, Physik 4

Das Zerfallsgesetz

Die Anzahl der zerfallenden Kerne pro Zeiteinheit - die **Zerfallsgeschwindigkeit** ("Aktivität") dN / dt - ist stets proportional zur Anzahl N der noch nicht zerfallenen Kerne:

$$\frac{dN}{dt} \sim N$$

Mit der **Zerfallskonstanten** λ als Proportionalitätsfaktor erhält man eine Differentialgleichung. Durch den Zerfall verringert sich die Anzahl der Kerne und damit auch die Zerfallsgeschwindigkeit. Dies wird durch ein negatives Vorzeichen ausgedrückt:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

Die Zerfallskonstante λ ist charakteristisch für den betreffenden Kern und gibt an, welcher Teil der gerade vorhandenen radioaktiven Substanz in der Zeiteinheit zerfällt.

Die Lösung der Differentialgleichung erfolgt durch "Trennung der Variablen" und Integration. Dabei wird die Integrationskonstante in der Form $\ln C$ angeschrieben:

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \Leftrightarrow \ln N = -\lambda t + \ln C \Leftrightarrow N = C \cdot e^{-\lambda t}$$

Zerfallsgesetz:

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

$N(t)$... Anzahl der nach der Zeit t noch nicht zerfallenen Kerne

N_0 ... Anzahl der Anfangs vorhandenen Kerne

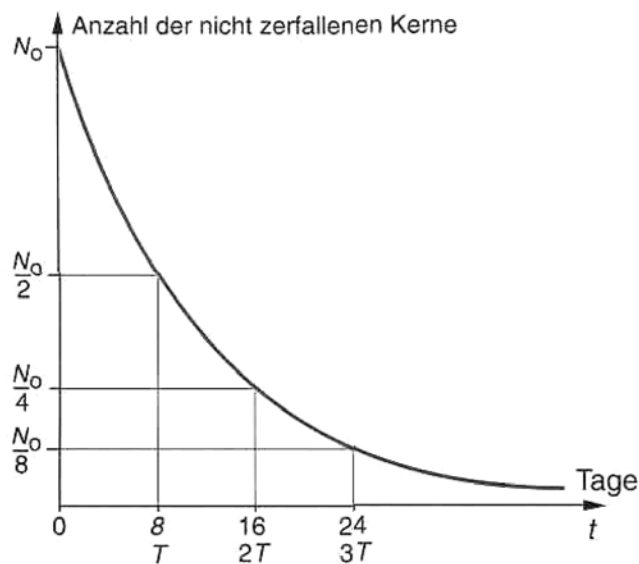


Abb.: Zerfallskurve für Jod 131, [Kraker-Paill 4]

Die Kerne zerfallen unabhängig voneinander. Es lässt sich auch nicht voraussagen, wann ein bestimmter Kern zerfällt. Aber für eine große Zahl von Kernen lässt sich die Wahrscheinlichkeit (λ) für den Zerfall angeben.

Da der radioaktive Zerfall von außen nicht beeinflusst werden kann, ist die Zerfallskonstante λ , im Gegensatz zu vielen anderen physikalischen "Konstanten" unabhängig von Temperatur und Druck. Die Zerfallskonstante λ ist ein Maß für die Zerfallsgeschwindigkeit. Üblicherweise wird diese jedoch durch die **Halbwertszeit T** ausgedrückt.

Die Halbwertszeit T ist jene Zeit, nach der die Hälfte der anfangs vorhandenen Kerne noch nicht zerfallen ist.

So ist z. B. nach 10 Halbwertszeiten die Zahl der nicht zerfallenen Kerne auf ca. 1 Promille gesunken.

Aus dem Zerfallsgesetz ergibt sich der Zusammenhang:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Halbwertszeiten einiger Isotope		
Isotop	Zerfall	Halbwertszeit
U-238	α	$4,5 \cdot 10^9 \text{ a}$
K-40	β, γ	$1,3 \cdot 10^9 \text{ a}$
U-235	α, γ	$6,8 \cdot 10^8 \text{ a}$
Pu-239	α	24065 a
C-14	β	5730 a
Ra-226	α, γ	1580 a
Cs-137	β	30 a
Sr-90	β	28 a
Co-60	β, γ	14,4 a
H-3	β	12 a
J-131	β, γ	8 d
Rn-222	α	3,8 d
Be-8	α	$2 \cdot 10^{-16} \text{ s}$

Die Aktivität

Die mittlere Anzahl der Zerfälle pro Sekunde (d.h. der Betrag der Zerfallsgeschwindigkeit dN/dt) wird als **Aktivität A** ("Radioaktivität") bezeichnet:

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = A = \lambda \cdot N$$

d. h. die Aktivität einer radioaktiven Substanz hängt von der Zerfallskonstanten und von der Anzahl der gerade vorhandenen Kerne (Substanzmenge) ab. Da bei einem Zerfall radioaktive Strahlung abgegeben wird, ist die Aktivität ein **Maß für die Strahlungsintensität**. Die Anzahl N der Kerne nimmt wegen des Zerfalls ab, daher verringert sich auch die Aktivität einer radioaktiven Substanz:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad [A] = 1/s = 1 \text{ Bequerel} = 1 \text{ Bq} \quad (1 \text{ Zerfall pro s})$$

Eine alte, in der Praxis noch verwendete Einheit ist **Curie (Ci)**. 1 Ci entspricht der Aktivität von 1g Radium (1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq).

Arten der radioaktiven Strahlung

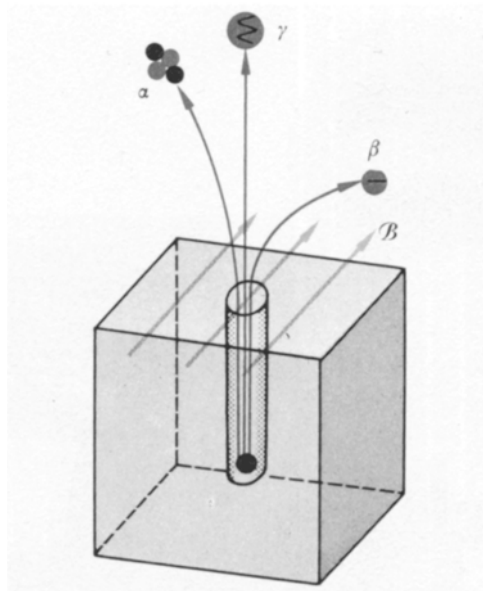
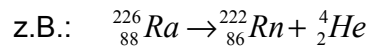


Abb.: Die Komponenten der radioaktiven Strahlung können im Magnetfeld getrennt werden [Sexl, 4]

Rutherford zeigte 1902 die Existenz dreier Arten ionisierender Strahlung. 1909 konnte er α -Strahlen als He-Kerne identifizieren.

α -Strahlung

α -Teilchen sind **He-4-Kerne** ($2p + 2n$). Diese sind zweifach positiv geladen und besitzen die Massenzahl $A = 4$. Bei einem α -Zerfall verringert sich daher die Massenzahl des Kerns um 4 und die Kernladungszahl um 2. Es findet eine **Kernumwandlung** statt.



α -Teilchen sind schwer und daher relativ langsam. Ihre Geschwindigkeiten sind in der Größenordnung von 1/10 der Lichtgeschwindigkeit, ihre Energie beträgt ca. 5 MeV. Trifft ein α -Teilchen auf ein Atom, dann wird dieses **ionisiert**. Es entstehen ein Elektron und ein positives Ion. Das α -Teilchen verliert dabei einen Teil seiner Energie. Ein α -Teilchen kann auf seinem Weg durch Materie eine große Zahl von Ionenpaaren bilden. Dabei verliert es ständig Energie, bis es schließlich vollständig abgebremst ist.

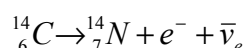
Fängt es schließlich zwei Elektronen ein, wird es zu einem He-Atom. Die Reichweite eines α -Teilchens hängt von seiner Energie und von der Dichte der Materie ab, die durchquert wird. In Luft beträgt die Reichweite einige cm und in menschlichem Gewebe ca. 40 μm . Zur Abschirmung genügt ein Blatt Papier.

β -Strahlung

β -Strahlung tritt bei Kernen auf, die zu viele oder zu wenige Neutronen besitzen, um stabil zu sein. Beim β -Zerfall bleibt die Massenzahl des Kerns unverändert. Hingegen ändert sich die Kernladungszahl Z um +1 beim β^- -Zerfall oder um -1 beim β^+ -Zerfall; β^- und β^+ stehen synonym für e^- bzw. e^+ , je nachdem ob ein *Elektron* oder ein *Positron* emittiert werden.

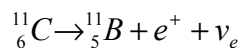
Beim **β^- -Zerfall** zerfällt im Atomkern ein Neutron in ein Proton und ein Elektron. Gleichzeitig wird als weiteres Teilchen ein (ladungsfreies) **Antineutrino** ausgesendet.

z.B. Zerfall von C-14 in N-14:



Beim **β^+ -Zerfall** zerfällt im Atomkern ein Proton in ein Neutron und ein Positron. Als weiteres Teilchen wird ein (ladungsfreies) **Neutrino** ausgesendet.

z.B. Zerfall von C-11 ($T \approx 20$ min; Verwendung in der Nuklearmedizin) in Bor:



Die meisten in einem Kernreaktor erzeugten Radionuklide besitzen einen Neutronenüberschuss und sind daher β -Strahler. Die Energie der β -Teilchen erstreckt sich über einen großen Bereich. Im Gegensatz zu den α -Teilchen ist das **Energiespektrum kontinuierlich**.

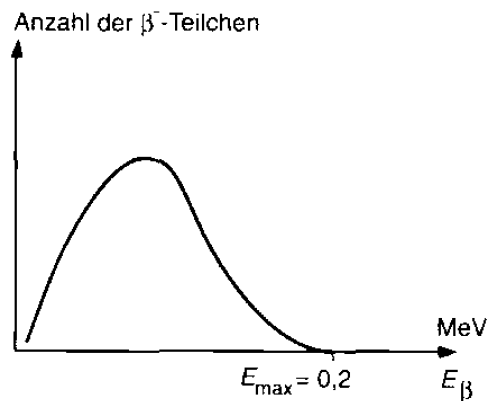
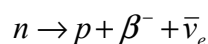


Abb.: Energieverteilung der Elektronen beim β -Zerfall [Kraker-Paill, Physik 4]

Als man die kontinuierliche Energieverteilung entdeckte, trat folgendes Problem auf. β -Teilchen, die nicht die maximale Energie besitzen, verletzen den Energiesatz. Daher hat der Österreicherische Physiker *W. Pauli* im Jahre 1930 ein weiteres Teilchen, das **Neutrino** (bzw. **Antineutrino**), vorgeschlagen. Dieses ist elektrisch neutral und übernimmt beim β -Zerfall die restliche Energie.



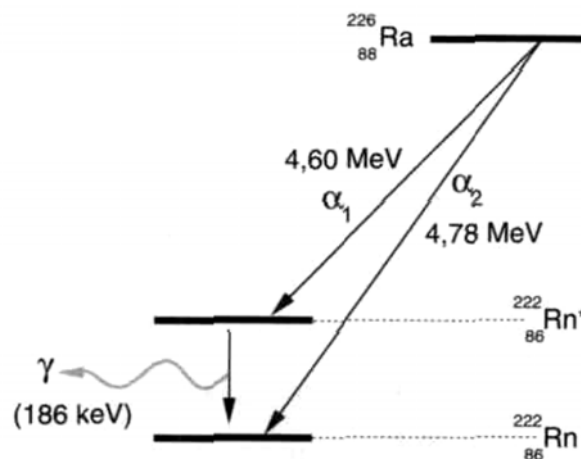
β -Teilchen besitzen annähernd Lichtgeschwindigkeit. Sie können auf ihrer Bahn Atome ionisieren. Ihr Ionisationsvermögen ist geringer als das der α -Teilchen, daher haben sie eine größere Reichweite. Diese beträgt in Luft einige m, in Aluminium einige mm und in menschlichem Gewebe ca. 2 mm (bei ca. 0,5 MeV).

γ -Strahlung

γ -Strahlung ist eine **elektromagnetische Strahlung mit sehr kurzer Wellenlänge** (sehr hoher Frequenz). Sie tritt oft zusammen mit einem α -Zerfall oder einem β -Zerfall auf.

Im Kern existieren diskrete Energiezustände. Ein stabiler Kern befindet sich im Grundzustand. Ein α -Zerfall oder ein β -Zerfall kann zu einem angeregten Tochterkern führen. Dieser angeregte Kern geht unter Aussendung eines γ -Quants in den Grundzustand über. Dies lässt sich mit den Übergängen zwischen den Energiezuständen der Elektronenhülle und der damit verbundenen Emission eines Lichtquants vergleichen.

Der α -Zerfall von Ra 226 ist mit einer γ -Strahlung verbunden. Es entstehen beim α -Zerfall auch angeregte Rn 222-Kerne. Diese gehen unter Abgabe eines γ -Quants (0,186 MeV) in den Grundzustand über.



Die Energie der γ -Strahlung kann (so wie auch jene der α - und β -Strahlung) der Nuklidkarte entnommen werden.

Da die γ -Strahlung durch Übergänge zwischen diskreten Energieniveaus entsteht, ist das Energiespektrum ein Linienspektrum. γ -Strahlung ist eine kurzwellige (harte) elektromagnetische Strahlung mit sehr großer Durchdringungsfähigkeit. Ihre Reichweite ist wesentlich größer als die der α - und β -Teilchen. Eine Abschirmung ist durch Blei- und Betonplatten möglich.

Während α - und β - Teilchen auf ihrer Bahn gebremst werden, also Energie und Geschwindigkeit abnehmen, bewegt sich ein Strahlungsquant mit Lichtgeschwindigkeit. Es kann aber bei einer einzigen Wechselwirkung seine gesamte Energie abgeben und damit verschwinden. Die Schwächung der γ -Strahlung erfolgt bei Energien bis etwa 100 keV im wesentlichen durch den **Photoeffekt**, bei höheren Energien durch den **Comptoneffekt**. Ist die Energie des γ -Quants größer als 1 MeV, kann es zu einer **Paarbildung** kommen. Dabei verschwindet das γ -Quant, und es tritt ein Elektron-Positron-Paar auf, d.h. bei der Paarbildung wird aus elektromagnetischer Strahlung Materie erzeugt. Die bei diesen Prozessen frei werdenden Elektronen können ionisieren.

Natürliche Radioaktivität

Von natürlicher Radioaktivität spricht man dann, wenn das Radionuklid in der Natur vorkommt. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Es gibt eine Reihe von Radionukliden, die aus der **Entstehungszeit der Erde** stammen, wegen ihrer langen Halbwertszeit aber noch nicht vollständig zerfallen sind (z.B.: K 40, Rb 87, Th 232, U 238, U 235).
- Die Radionuklide Th 232, U 235 und U 238 zerfallen in radioaktive Tochternuklide, die wiederum in radioaktive Tochternuklide zerfallen usw. Der Zerfall geht so lange weiter, bis schließlich ein stabiles Nuklid entstanden ist. Auf diese Weise werden ständig Radionuklide neu gebildet. Alle Nuklide, deren Massenzahl größer als 209 ist, sind instabil. Ein Beispiel dafür ist die **Thoriumreihe**. Beginn der Zerfallsreihe ist das Th 232. Die Reihe endet beim stabilen Pb 208. Der instabile Tochterkern Bi 212 neigt sowohl zum α - als auch zum β -Zerfall. Daher verzweigt sich die Reihe an dieser Stelle.

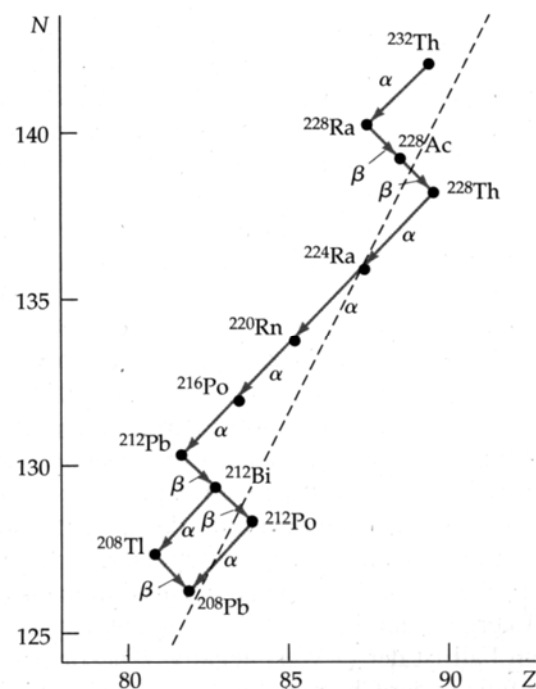


Abb.: Thorium-Reihe [Tipler]

- c) Schließlich werden in der Erdatmosphäre durch Einwirkung ***kosmischer Strahlung*** laufend die Radionuklide C 14 und Tritium (H 3, überschwerer Wasserstoff) gebildet. Der Tritiumkern besteht aus einem Proton und zwei Neutronen und ist ein β -Strahler mit einer Halbwertszeit von ca. 12 Jahren. Es ist zu erwarten, dass Tritium bei der Kernfusion eine wichtige Rolle spielen wird.

Künstliche Radioaktivität

Werden Radionuklide vom Menschen hergestellt, spricht man von künstlicher Radioaktivität. Das erste künstliche Radionuklid wurde im Jahre 1913 erzeugt (Aluminium wurde einer α -Strahlung ausgesetzt; es bildete sich ein radioaktives Phosphorisotop). Einen derartigen Vorgang bezeichnet man ganz allgemein als *Kernreaktion*. Dabei findet eine *Kernumwandlung* statt.

Seit diesem Zeitpunkt sind weit über 1000 Radionuklide hergestellt worden. Als "Geschosse für eine Kernumwandlung können u. a. α -Teilchen, Protonen oder (häufigste Methode) Neutronen (z.B. aus Kernreaktoren) verwendet werden. So wird das Radioisotop Co 60 durch Neutronenbestrahlung aus dem stabilen Co 59 hergestellt. Durch Einfangen eines Neutrons entsteht der instabile Co-60-Kern. ${}_{27}^{59}\text{Co} + n \rightarrow {}_{27}^{60}\text{Co}$

Ionisierende Strahlung kann Bakterien und Keime abtöten. Geeignete Isotope werden zur Sterilisation (z.B. von Einwegspritzen) verwendet. Die Bestrahlung von Lebensmitteln zur Konservierung ist in Österreich verboten.

Anwendung von Radioisotopen

Indikatormethode

Eine bekannte Anwendung in der Medizin ist der **Radiojod-Test** zur Untersuchung der Schilddrüse. Jod wird in der Schilddrüse gespeichert. Nimmt ein Patient eine geringe Menge radioaktives J^{131} zu sich, so kann dessen γ -Strahlung von außen gemessen werden. Damit lässt sich der Weg des Radionuklids im Körper verfolgen und die Verteilung in der Schilddrüse ermitteln (Funktionsdiagnostik). Auch andere Organe lassen sich mit dieser Methode untersuchen. Es muss nur das Element, das von dem betreffenden Organ aufgenommen wird, teilweise durch ein Radioisotop ersetzt werden.

Die Verwendung radioaktiver Indikatoren beruht darauf, dass ein Radionuklid sich von dem zu verfolgenden Element chemisch nicht unterscheidet. Im Idealfall ist das gewählte Radionuklid ein Isotop des betreffenden Elements.

In der Biologie dient die Indikatormethode etwa der Erforschung von Stoffwechselfvorgängen. In der Technik wird sie z.B. für Verschleißuntersuchungen, zur Lecksuche und für die Untersuchung industrieller Kreisläufe verwendet.

Strahlenbehandlung

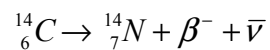
Durch die Einwirkung energiereicher Strahlung können im Zellkern irreparable Schäden entstehen, die zum Zelltod führen können. Das Ziel einer Strahlentherapie ist die Vernichtung von Tumorzellen. Von besonderer Bedeutung dabei ist die Schonung des gesunden Gewebes in der Umgebung des Tumors. Die Strahlendosis im gesunden Gewebe soll möglichst gering sein. Aus diesem Grund wird der Tumor durch einzelne Strahlenbündel aus verschiedenen Richtungen bestrahlt. Bei einer Protonenstrahlung etwa lässt sich eine bestimmte Reichweite durch Veränderung der Energie einstellen. Auf diese Weise bleibt das Gewebe hinter dem Tumor praktisch unbestrahlt.

Altersbestimmung

Da der radioaktive Zerfall von außen unbeeinflusst vor sich geht, kann er zur Zeitbestimmung benutzt werden. Eine wichtige Anwendung ist die **C-14-Methode** (*Radiokohlenstoff-Methode*) in der Archäologie. In der Atmosphäre wird durch Einwirkung der kosmischen Strahlung laufend das Radionuklid C 14 gebildet. Es hat eine Halbwertszeit von 5730 Jahren. Dieses C 14 verbindet sich mit Sauerstoff zu radioaktivem Kohlendioxid.

Dieses wird von den Pflanzen aufgenommen und gelangt über die Nahrungskette in alle anderen lebenden Organismen. Zwischen dem zerfallenden und neu gebildeten C 14 stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein. Das führt dazu, dass in allen Organismen eine bestimmte Konzentration an C 14 vorhanden ist, die über viele Jahrtausende annähernd konstant geblieben ist.

Unter 10^{12} C-12-Atomen befindet sich im Mittel ca. ein C-14-Atom (in einem Gramm Kohlenstoff bewirken die C-14 Atome ca. 15 Zerfälle pro Minute). Stirbt ein Organismus ab, dann wird kein C 14 mehr aufgenommen, und der C-14-Gehalt sinkt nach dem radioaktiven Zerfallsgesetz ab. Wird der C-14-Gehalt einer Probe gemessen, so lässt sich daraus die Zeitspanne seit dem Absterben der Probe berechnen (z.B. bei ca. 7,5 Zerfällen pro Minute und Gramm wäre die Probe die Halbwertszeit 5700 Jahre alt).



Den Anteil an C-14 kann man experimentell mit einem Beschleunigungsmassenspektrometer ermitteln (*VERA - Vienna Environmental Research Accelerator* am Institut f. Radiumforschung u. Kernphysik an der Univ. Wien, Währingerstr. 17).

Mess-und Überwachungsverfahren

γ - und β -Strahlung werden in vielfältiger Weise zur Messung bzw. Kontrolle der Dicke (Schichtdicke proportional zur Abschwächung der Strahlung) oder Füllhöhe und zur Schweißnahtprüfung verwendet.

Strahlenschutz

Biologische Wirkung ionisierender Strahlung

Bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung wurde beobachtet, dass sich die Haut nach einer Bestrahlung rötet. In der Folge erkannte man auch, dass Körperzellen zerstört werden. Energiereiche Strahlung (Elektronen, Protonen α -Teilchen, Photonen und Neutronen) kann Atome oder Moleküle ionisieren. Deshalb spricht man auch von **ionisierender Strahlung**. Als Folge treten chemische Veränderungen auf. Ionisierende Strahlung spaltet Moleküle und erzeugt **Radikale**.

Von besonderer Bedeutung ist die Strahleneinwirkung auf die lebende Zelle. Der Zellkern enthält ein kompliziert aufgebautes Molekül, die DNS (Desoxyribonucleinsäure). In der DNS sind alle für die Funktion und die Vermehrung der Zelle nötigen Informationen ("genetischer Code") gespeichert. In vielen Körpergeweben kommt es zu einer ständigen Erneuerung der Zellen. Im menschlichen Körper werden pro Sekunde Millionen Zellen durch Zellteilung neu gebildet. Auch jedes Wachstum ist eine Folge von Zellteilungen.

Ein Strahlenschaden an einer Zelle kann zum **Zelltod** führen. Es können sich aber auch andere weit reichende Folgen einstellen. Die Veränderung der im Zellkern gespeicherten Informationen kann zu einer Fehlfunktion der Einzelzelle führen. Bei einer Zellteilung können falsche Informationen an neue Zellgenerationen weitergegeben werden. Zellschäden oder Übertragungsfehler bei der Zellteilung sind nicht immer Folgen energiereicher Strahlung, sondern können auch spontan, unter normalen Umweltbedingungen auftreten. Jede Zelle besitzt einen Reparaturmechanismus, der verschiedene Fehler und Schäden korrigieren kann. Da dieser Mechanismus nicht fehlerfrei arbeitet, kann das Risiko nicht ausgeschaltet, sondern nur verringert werden. Schon ein einziges Strahlungsquant kann einen irreparablen Schaden verursachen.

Mit zunehmender Strahlungsdosis nimmt auch das Risiko für irreparable Schäden zu. Treten Mutationen des Erbgutes auf, so entartet die Zelle zur **Krebszelle**. Handelt es sich um Keimzellen und gelangt eine dieser Zellen zur Fortpflanzung, kommt es zu **Mutationen** und Schäden an der Nachkommenschaft. Befindet sich die Zelle im Stadium der Teilung, so ist die Reparatur nicht möglich. Daher sind Embryonen und im Wachstum befindliche Kinder, aber auch das Knochenmark von Erwachsenen besonders gefährdet.

Während der Zellteilung sind die Zellen besonders empfindlich gegenüber Strahlenschaden. Je größer die Zellteilungsrate ist, umso größer ist auch die Empfindlichkeit. Daraus erklärt sich die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit verschiedener Organe. Am empfindlichsten sind die blutbildenden Organe (Knochenmark, Milz, Lymphknoten) und die Keimdrüsen (Gonaden). Auch der Embryo im Mutterleib ist besonders gefährdet, da in ihm rasch aufeinander folgende Zellteilungen ablaufen.

Durch energiereiche Strahlung können **somatische und genetische Strahlenschäden** verursacht werden. Die somatischen Schäden betreffen den bestrahlten Menschen selbst. Genetische Schäden treten an Keimdrüsen und -zellen auf und wirken sich als Erbschaden aus.

Durch eine hohe kurzzeitige Strahlendosis kommt es zu einem akuten Strahlenschaden, d.h. Schwächung des Immunsystems, zu Störungen im Fortpflanzungssystem und zu einem Absinken der Anzahl der Blutzellen. Bei einer einmaligen Dosis von 0,15 Sv kann es zur **Strahlenkrankheit** kommen. Das akute Strahlensyndrom äußert sich vor allem in Übelkeit, Veränderungen des Blutbildes, des Wasser- und Elektrolythaushaltes und in einem Versagen der Schleimhäute. Eine Ganzkörperdosis von 3 Sv führt innerhalb von 30 Tagen in etwa 50% der Fälle zum Tod (8 Sv ... 100% Todesfälle).

Nach dem Abklingen der Strahlenkrankheit können **Strahlenspätsschäden** (Krebs, Leukämie) auftreten. Strahlenspätsschäden (somatisch und genetisch) können auch durch eine niedrige Strahlendosis ausgelöst werden. Obwohl ein Strahlenschaden umso wahrscheinlicher wird, je größer die Strahlendosis ist, kann auch durch den Zerfall eines einzigen Radionuklids im Körper ein Strahlenschaden ausgelöst werden.

Größen und Einheiten im Strahlenschutz

Dosisgrößen stellen ein Maß für die Wirkung der ionisierenden Strahlung auf den lebenden Organismus dar. Dosismessung wird auch als **Dosimetrie** bezeichnet. Ein **Dosimeter** misst die in einem bestimmten Zeitraum absorbierte Energiedosis (Äquivalenzdosis). In einem Filmdosimeter wird die Schwärzung eines Filmes genutzt.

Relativ unübersichtlich ist die Vielzahl an Dosisgrößen und –einheiten. Vor allem führen bei den Einheiten alte und neue Normen zusätzlich zu Verwirrungen.

Die **Ionendosis I** gibt an, wie viele Ionen gleichen Vorzeichens in 1 kg durchstrahlter Luft entstehen. Sie wird in C/kg angegeben (alte Einheit 1 R (Röntgen) $1\text{C/kg} = 3876\text{ R}$)

Die **Energiedosis D** gibt die pro kg Masse (Gewebe) absorbierte Strahlungsenergie an. Die entsprechende Maßeinheit ist 1 **Gray** (Gy) = 1 J/kg; (alte Einheit rad - radiation absorbed dose; $1\text{ Gy} = 100\text{ rad}$)

Bemerkung:

Ionisierende Strahlung mit vergleichsweise geringer Energie ruft große biologische Wirkungen hervor. So ist eine Energiedosis von 10 Gy (10 J/kg) tödlich, während eine Wärmemenge von 10 J 1kg Wasser um $0,002^\circ\text{ C}$ erwärmen kann.

Für die schädigende Wirkung auf den Organismus ist neben der Energiedosis auch die **Strahlenart** von entscheidender Bedeutung. Um die unterschiedliche **biologische Wirkung** der verschiedenen Strahlenarten vergleichen zu können, hat man den **Qualitätsfaktor Q** eingeführt.

Das **Produkt aus Qualitätsfaktor Q und Energiedosis D** wird als **Äquivalentdosis H** bezeichnet. Die Maßeinheit für die Äquivalentdosis ist das **Sievert (Sv)**. (alte Einheit 1 rem - roentgen equivalent man; $1\text{ Sv} = 100\text{ rem}$)

Gleiche Äquivalenzdosen verschiedener Strahlenarten rufen gleiche biologische Wirkungen hervor.

Äquivalentdosis $H = Q \cdot D$	
Röntgen-, β -, γ Strahlung	$Q = 1$
schnelle Neutronen	$Q = 10$
α -Strahlung	$Q = 10 - 20$

Unter der **Dosisleistung** versteht man den Quotienten aus Dosis und der Zeitdauer der Strahleneinwirkung.

Die Strahlenbelastung des Menschen

Sie wird für Österreich mit rund 2,5 - 3 mSv/a angegeben (rel. große regionale Unterschiede) und stammt etwa zu gleichen Teilen aus der **natürlichen Strahlung** und **zivilisationsbedingter Strahlung**.

Die von außen auf unseren Körper wirkende Strahlung stammt aus dem Weltraum (kosmische Strahlung; kann bei Polflügen im Falle gleichzeitiger hoher Sonnenaktivität bis zu 10mSv / Flug betragen) sowie aus radioaktiven Elementen in unserer Umgebung (terrestrische Strahlung), sei es vom Boden oder von Baustoffen, aus denen unsere Häuser gebaut sind. Das aus verschiedenen Gesteinen und Baustoffen austretende gasförmige Rn 222 ist ein α -Strahler, der vom Menschen eingeatmet wird. Daher sollten Räume öfter gelüftet werden und Wände gasdurchlässig sein (man vermutet, dass 20% der Lungenkarzinome von Nichtrauchern durch Inhalation von Radon verursacht werden).

Die Gesteinsstrahlung hängt davon ab, wie viele Elemente der natürlichen Zerfallsreihen im Gestein vorhanden sind.

Auch über Nahrung und Atmung gelangen radioaktive Stoffe in unseren Körper (**innere Strahlenbelastung**); z.B. Radionuklide K 40, C 14, Ra 226 und Rn 222.

Diese werden entweder mit der Nahrung (Ingestion) oder beim Atmen (Inhalation) aufgenommen. Die innere Strahlenbelastung beträgt im Mittel etwa 1 mSv / Jahr.

Zur natürlichen Strahlenbelastung kommen heute **zivilisatorische Belastungen**, z.B. Strahlenbelastung durch radioaktive Elemente aus oberirdischen Kernwaffentests bis in die Sechziger Jahre oder aus dem Reaktorunglück 1986 von Tschernobyl (Belastung vor allem über die Nahrung und die Atmung aufgenommene Nuklide).

Der weitaus größte Teil der externen Strahlenbelastung wird durch Röntgenuntersuchungen und Radioisotope in Medizin und Technik verursacht.

Bei einer Aufnahme von radioaktiven Stoffen durch den Menschen (Inkorporation), werden manche Radionuklide vorzugsweise in einem bestimmten Organ (kritisches Organ) angereichert. Verschiedene Isotope eines chemischen Elementes verhalten sich im Stoffwechsel gleich. Das Radionuklid J 131 wird hauptsächlich in der Schilddrüse angelagert. Auch chemisch verwandte Elemente können oft nicht unterschieden werden: Cs 137 wird mit Kalium verwechselt und im Muskelgewebe, in Leber und Niere angelagert. Sr 90 wird mit Calcium "verwechselt" und in den Knochen angelagert. Auf diese Weise kann es zu einer sehr hohen Strahlenbelastung (Dosis) in einzelnen Organen kommen, die viel schädlicher sein kann als eine Verteilung der Strahlung über den ganzen Körper.

Akute Strahlenschäden

Strahlenschäden treten sofort oder innerhalb weniger Wochen auf und setzen hohe Strahlendosen von einigen tausend Millisievert (mSv) voraus. Sie machen sich erst bemerkbar, wenn ein bestimmtes Maß geschädigter Zellen überschritten wird. Daher tritt diese Art von Schäden auch erst ab einer bestimmten Strahlendosis innerhalb eines vergleichsweise kurzen Zeitraumes, dem Schwellenwert, auf. Dieser liegt beim Menschen bei einmaliger Bestrahlung des ganzen Körpers zwischen 200 und 300 mSv. Es zeigen sich kurzzeitige, nur vom Arzt feststellbare Veränderungen des Blutbildes. Je höher die Strahlendosis ist, desto schwerer ist der Schaden, beginnend beim sogenannten Strahlenkater mit Übelkeit und Erbrechen über Schleimhautentzündungen und Fieber bis hin zum Tod.

Wirkung ionisierender Strahlen bei Kurzeiteinwirkung (einige Stunden)	
mehr als 7000 mSv	absolut tödliche Dosis
4500 mSv	50% Todesfälle (auch bei Behandlung)
1000-2000 mSv	schwere Blutbildveränderung, vereinzelt Todesfälle
500-1000 mSv	merkbare Änderungen im Blutbild, Erholung nach einigen Monaten

Strahlenschutz

Schutz gegen äußere Bestrahlung ist gegeben durch

- ◆ Abstand (Strahlung $\sim 1 / r^2$)
- ◆ Abschirmung
- ◆ kurze Bestrahlungszeit

Für γ -Strahlung kann keine Reichweite angegeben werden. Die Abschwächung erfolgt nach einem Exponentialgesetz. Die Abschirmung eines Materials wird durch die Halbwertsdicke (jene Wandstärke zur Halbierung der Dosis) angegeben. Sie ist von der Energie der γ -Strahlung abhängig. Für Strahlung mit einer Energie von 1 MeV gilt ungefähr:

Material	Halbwertsdicke
<i>Wasser</i>	<i>15 cm</i>
<i>Beton</i>	<i>7 cm</i>
<i>Eisen</i>	<i>2 cm</i>
<i>Blei</i>	<i>1 cm</i>

Kernenergie

Die Bindungsenergie von Atomkernen ist millionenfach höher als die Energien, die in der Elektronenhülle auftreten. Die **Abhängigkeit der Bindungsenergie von der Massenzahl** ermöglicht es, zwei verschiedene Wege zur Freisetzung von Kernenergie einzuschlagen.

Bei der **Kernfusion** werden zwei Atomkerne geringer Massenzahl zu einem großen Atomkern verschmolzen. Dieser Vorgang vollzieht sich seit Jahrmilliarden im Inneren der Sterne. Er bildet die Energiequelle der Sonne und damit allen Lebens auf der Erde. Bei der Explosion von Wasserstoffbomben wird dieser Vorgang technisch nachvollzogen.

Ein zweiter Weg zur Freisetzung von Kernenergie ist die Spaltung von Kernen hoher Massenzahl in zwei oder mehrere Bruchstücke. Auf dieser **Kernspaltung** beruht die Energiegewinnung in Kernkraftwerken.

Bei der Fusion leichter Kerne und bei der Spaltung schwerer Kerne wird Bindungsenergie freigesetzt.

Kernfusion

Die Betrachtung der mittleren Bindungsenergie pro Nukleon zeigt, dass die Verschmelzung (Fusion) von sehr leichten Kernen zu einem Kern mit größerer Bindungsenergie führen kann. Die Energieerzeugung in den Fixsternen erfolgt auf diese Weise.

Damit die Fusion zweier Kerne stattfinden kann, müssen sich diese gegen die Coulomb'schen Abstoßungskräfte bis auf den Wirkungsbereich der Kernkräfte nähern. In den Fixsternen erhalten die Kerne die erforderliche hohe kinetische Energie durch die hohe Temperatur (ca. 10^7 K) im Sterninneren. Auch in den Fusionslaboratorien wird mit so hohen Temperaturen gearbeitet. Bei diesen Temperaturen sind die Atome vollständig ionisiert. Dieses Gemisch aus positiven Ionen und negativen Elektronen wird als **Plasma** bezeichnet. Stoßen zwei Kerne zusammen, kann es zu einer Fusion kommen. Wegen der hohen Temperatur spricht man auch von einer **thermonuklearen Reaktion**. Ein Plasma dieser Temperatur kann natürlich nicht einfach in einem Gefäß eingeschlossen werden. Da die Teilchen elektrisch geladen sind, lassen sie sich durch magnetische Felder zusammenhalten

(magnetischer Einschluss). Bei der *Tokamak-Anordnung* ist der evakuierte Plasmaraum toroidförmig von einer Spule umgeben.

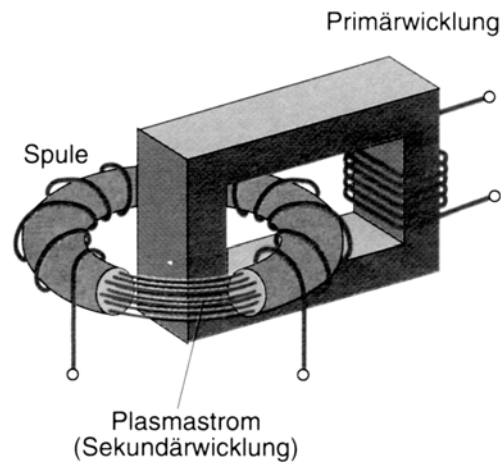
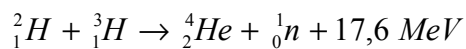


Abb.: Tokamak – Anordnung eines Fusionsreaktors [Kraker-Paill, Physik 4]

Das ringförmige Plasma bildet aber auch die Sekundärwicklung eines Transformators. Durch diesen Transformator wird ein Strom im Plasma induziert. Dieser Strom erzeugt ebenfalls ein Magnetfeld und dient auch zum Aufheizen des Plasmas. Eine mögliche Reaktion ist die Deuterium-Tritium-Fusion



Das Wasserstoffisotop Deuterium kommt im natürlichen Wasserstoff mit einer Konzentration von 0,015 % vor. Das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium konnte im Reaktor mit Hilfe der frei werdenden Neutronen aus Lithium hergestellt werden. Fusionsforschung wird seit der Mitte des 20. Jh. betrieben. Es ist aber derzeit nicht absehbar, wann ein Fusionsreaktor zur Stromerzeugung zur Verfügung stehen wird.

[Kraker-Paill, Physik 4]

Kernspaltung - Die Spaltung von U 235

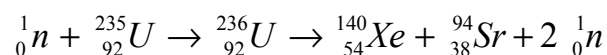
Im Jahr 1938 wurde die Spaltung von U-235-Kernen durch Neutronenbeschuss nachgewiesen (Otto Hahn und Fritz Strassmann). Wird ein U-235-Kern mit langsamen Neutronen beschossen, so kann der Kern dieses Neutron einfangen. Dabei entsteht ein U-236-Kern, der sich in einem angeregten Zustand befindet. Nach dem "Tröpfchenmodell" stellt man sich vor, dass dieser angeregte Zwischenkern ins Schwingen gerät und dabei deformiert wird. Bei großen Deformationen nimmt der Zwischenkern auch lang gestreckte

Formen an, sodass praktisch zwei getrennte positive Ladungsschwerpunkte auftreten, die einander abstoßen.

Dadurch wird der Zwischenkern weiter eingeschnürt und zerbricht schließlich in zwei Stücke. Die entstehenden Kerne mit mittlerer Massenzahl fliegen infolge der abstoßenden elektrischen Kräfte mit großer Geschwindigkeit auseinander. Die Kernspaltung kann daher als

Energiequelle dienen, wenn es gelingt, eine ausreichende Anzahl von Kernen unter kontrollierten Bedingungen zu spalten.

Es gibt eine große Anzahl verschiedener Spaltreaktionen. Dabei kommen (radioaktive) Spaltprodukte mit $A \approx 95$ und $A \approx 140$ am häufigsten vor. Eine mögliche Spaltreaktion ist folgende:



Die schweren Kerne - wie U 235 - enthalten relativ gesehen mehr Neutronen als die mittelschweren Kerne, wie etwa Sr-94. Auf Grund dieses Neutronen-Überschusses werden **2 bis 3 Neutronen** frei. Auch die Spaltprodukte besitzen noch immer einen Neutronenüberschuss. Sie sind daher instabil und zerfallen unter β -Emission. Im allgemeinen sind die einzelnen Kerne einer Zerfallsreihe angeregt. Daher tritt neben der β -Strahlung auch γ -Strahlung auf. Die frei werdende Energie lässt sich aus der Massenbilanz mit Hilfe des Massendefektes berechnen. Eine Abschätzung der Energie kann auch über die mittlere Bindungsenergie der Nukleonen erfolgen:

Zur Spaltung von U 235 wird eine Energie von rund 7,5 MeV/Nukleon benötigt. Bei der Bildung von Xe-140 wird eine Energie von rund 8,3 MeV/Nukleon und bei der Bildung von Sr-94 wird eine Energie von rund 8,5 MeV/Nukleon frei. Damit ergibt sich folgende Energiebilanz:

$$(140 \cdot 8,3 + 94 \cdot 8,5 - 235 \cdot 7,5) \text{ MeV/Kern} \approx \mathbf{200 \text{ MeV/Kern}}$$

Die bei der Kernspaltung frei werdenden Energien sind ca. um den Faktor 10^6 größer als bei chemischen Reaktionen. Wird einmal ein U-235-Kern gespalten, so kann jedes der zwei bis drei frei werdenden Neutronen selbst wieder eine Spaltung einleiten. Auf diese Weise kann die Anzahl der Spaltungen lawinenartig ansteigen. Man spricht dann von einer **Kettenreaktion**. Dabei kann sich die Zahl der an der Spaltung beteiligten Neutronen von „Generation zu Generation“ rasch vermehren. Diese Vermehrung beschreibt man durch den **Multiplikationsfaktor k**.

Für $k > 1$ steigt die Anzahl der an der Spaltung beteiligten Neutronen lawinenartig an. Dadurch wird das Uran unter Abgabe ungeheurer Energiemengen in Sekundenbruchteilen gespalten. Dies geschieht in der Atombombe.

Für $k = 1$ bleibt die Zahl der Neutronen und der Spaltungen zeitlich konstant. Eine derart gesteuerte Kettenreaktion liefert kontinuierlich Energie und entspricht dem stationären Betrieb eines Kernreaktors.

Für $k < 1$ nimmt die Anzahl der Neutronen und der Kernspaltungen dagegen mit der Zeit sehr rasch ab, und die Kettenreaktion kommt zum Stillstand. Dies tritt z.B. ein, wenn ein hoher Prozentsatz der erzeugten Neutronen das spaltbare Material verlässt, ohne weitere Kernspaltungen auszulösen. Um dies zu vermeiden, ist eine Mindestmenge an spaltbarem Material erforderlich, die man als **kritische Masse** bezeichnet. Für U-235 beträgt die kritische Masse rund 50 kg. Dies entspricht einer Urankugel mit einem Durchmesser von 17 cm.

Kernreaktoren

Natururan enthält 99,3 % U-238 und 0,7 % U-235. U-238 kann zwar durch schnelle Neutronen gespalten werden, aber mit größerer Wahrscheinlichkeit werden Neutronen eingefangen, ohne dass es zu einer Spaltung kommt. Daher kommt es im U-238 zu keiner Kettenreaktion, und es ist als Kernbrennstoff nicht geeignet.

U-235 ist der einzige in der Natur vorkommende Kern, mit dem sich eine Kettenreaktion aufrecht erhalten lässt. Dabei nimmt die Wahrscheinlichkeit für eine Spaltung von U-235 mit zunehmender Neutronenenergie ab. Die bei der Spaltung frei werdenden schnellen Neutronen müssen daher abgebremst werden. Entspricht ihre Energie der Umgebungstemperatur ($E \approx 0,025$ eV), dann bezeichnet man sie als **thermische Neutronen**. Das Abbremsen erfolgt in einem **Moderator**, mit dessen Kernen die Neutronen zusammenstoßen. Damit ein Neutron bei einem Stoß viel Energie verliert, sollen sich die Massen von Neutron und Moderatorkern möglichst wenig unterscheiden. Auch darf der Moderator nicht zu viele Neutronen absorbieren. Die wichtigsten Moderatorstoffe sind Wasserstoff (H-1) als Leichtwasser, Deuterium (D-2) als Schwerwasser und Kohlenstoff (C) als Graphit.

Damit eine Kettenreaktion abläuft, muss mindestens ein Neutron, das bei der Spaltung frei wird, zu einer weiteren Spaltung führen ($k=1$). Ist die Spaltmasse zu gering oder die

geometrische Anordnung ungünstig, dann können zu viele Neutronen entweichen, und es kommt zu keiner Kettenreaktion. Graphit und Schwerwasser absorbieren so wenige Neutronen, dass eine Kettenreaktion auch mit Natururan möglich ist. Leichtwasser ist zwar ein wirksamerer Moderator, absorbiert aber mehr Neutronen, so dass als Brennstoff **angereichertes Uran** (ca. 3 % U-235) erforderlich ist.

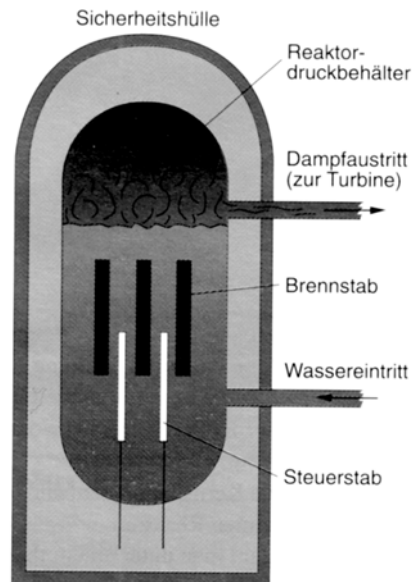


Abb.: Siedewasserreaktor [Kraker-Paill, Physik4]

Das hohe Absorptionsvermögen bestimmter Stoffe für Neutronen wird zur Steuerung des Reaktors verwendet. Die so genannten **Regelstäbe** enthalten Cd oder B. Je tiefer sie in das Reaktorinnere hinein geschoben werden, desto mehr Neutronen werden absorbiert. Damit kann die Kettenreaktion gesteuert werden. Treten beim Reaktorbetrieb Probleme auf, so fallen die Regelstäbe automatisch in den Reaktor und bringen die Kettenreaktion zum Stillstand. In der Atombombe (Kernspaltungsbombe) verläuft die Kettenreaktion ungesteuert. Die Energie wird dabei in äußerst kurzer Zeit freigesetzt.

Die große kinetische Energie der Spaltprodukte im Reaktor führt zu einer starken Erwärmung der Brennstäbe. Die Wärme wird mit einem Kühlmittel abgeführt. In einem **Siedewasserreaktor** dient Leichtwasser als Moderator und als Kühlmittel. Der Dampf (ca. 300°C, 70 bar) kann unmittelbar zum Antrieb einer Turbine verwendet werden. Die Turbine kann sich aber auch in einem Sekundärkreislauf befinden, der über einen Wärmetauscher angekoppelt ist.