

Atom- und Kernphysik

1. Chemische Grundlagen

=====
Michail Wassiljewitsch Lomonossow (1711-1765) und *Antoine Laurent de Lavoisier* (1743-1794) benutzten als erste Waagen zur Untersuchung von Verbrennungsvorgängen.

Experimente ermöglichten dann die Entdeckung wichtiger chemischer Grundgesetze als Basis der wissenschaftlichen Chemie. Die Zeiten der *Alchemie* waren damit zu Ende

1794 *Lavoisier*: Gesetz von der Erhaltung der Masse:

Bei allen chemischen Umsetzungen bleibt die Gesamtmasse der Reaktionsteilnehmer erhalten.

Die *Relativitätstheorie* begrenzt aufgrund der Umwandelbarkeit von Masse und Energie gemäß

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

die Gültigkeit der Massenerhaltung, allerdings sind diese Effekte nicht messbar.

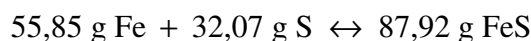
Wird bei einer chemischen Reaktion die Energie von 500 kJ frei, so beträgt der Masseverlust rund $5,6 \cdot 10^{-12}$ kg.

Joseph-Luis Proust (1754-1826) formulierte nach ausführlichen Studien über Kupfercarbonat, Zinnoxide und Eisensulfide das Gesetz von den konstanten Proportionen (1799).

Zwei oder mehrere Elemente verbinden sich in konstanten Masseverhältnissen.

Beispiel:

Beispiel:



FeS (Eisensulfid) besteht daher immer aus 63,52% Eisen (Fe) und 36,48 % Schwefel (S).

Für Stoffe, die die verschiedenen Verbindungen miteinander eingehen können wurde von *John Dalton* (1766-1844) das Gesetz von den multiplen Proportionen (1803) formuliert.

Die Massenverhältnisse von zwei Elementen, die sich zu verschiedenen chemischen Substanzen vereinigen, stehen zueinander im Verhältnis einfacher ganzer Zahlen.

Beispiel :

Gesetz der multiplen Proportionen am Beispiel der verschiedenen Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen

Verbindung	Stickstoffanteil in %	Sauerstoffanteil in %	Massenverhältnis
N ₂ O	63,65	36,25	0,571
NO	46,68	53,32	1,142
N ₂ O ₃	36,85	63,15	1,714
NO ₂	30,45	69,55	2,228
N ₂ O ₅	25,94	74,06	2,855

1805 wurden diese Entdeckungen durch Dalton in der *Atomhypothese* zusammengefasst und gedeutet:

Jede Materie ist aus kleinsten, nicht weiter zerlegbaren Teilchen aufgebaut, die Atome genannt werden. Alle Atome eines chemischen Elements sind untereinander gleich.

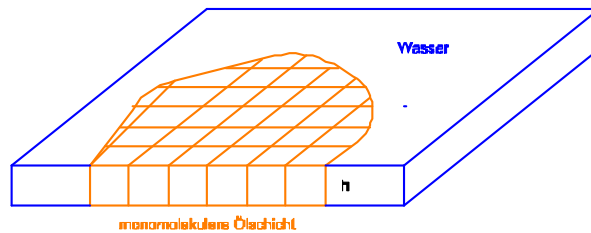
Atome verschiedener Elemente unterscheiden sich durch ihre Masse und Größe. Bei chemischen Reaktionen vereinigen sich die Atome verschiedener Elemente im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen zu Verbindungen, die entweder aus kleinen Einheiten - den Molekülen - oder ausgedehnten Verbänden wie z. B. den Salzen bestehen.

Ein Sauerstoffatom ist 1,14 mal schwerer als ein Stickstoffatom, ein Eisenatom ist 1,74 mal schwerer als ein Schwefelatom.

Chemische Reaktionen bewirken eine Umgruppierung von Atomen, die Anzahl der Atome eines Elements vor und nach einer Reaktion (links und rechts eines Reaktionspfeiles) bleibt gleich.

2. Atome und Teilchenmodell

Ölfleckversuch



Gibt man einen Tropfen mit Leichbenzin verdünnten Öls ($C_{17}H_{33}COOH$) auf Wasser, dann breitet sich das Öl zu einer monomolekularen Schicht aus, während das Benzin verdunstet.

Mischungsverhältnis: $V_{\text{Öl}} : V_{\text{Benzin}} = \frac{1}{k}$

Volumen des Tropfens: V

Ölvolumen: $\frac{1}{k} \cdot V$

Breitet sich der Ölflecks auf eine Fläche der Größe A aus, dann gilt für seine Höhe $h = \frac{\frac{1}{k} \cdot V}{A}$.

Nimmt man an, dass alle Moleküle einen würfelförmigen Raum mit der Kante h einnehmen, dann ist das Volumen dieses Würfels gegeben durch $h^3 = \frac{V^3}{k^3 \cdot A^3}$:

Nimmt man an, dass jedes der 54 Atome, aus denen ein Ölmolekül aufgebaut ist, den gleichen würfelförmigen Raum einnimmt, dann errechnet sich der Atomdurchmesser zu

$$d_{\text{Atom}} = \sqrt[3]{\frac{V^3}{54 \cdot k^3 \cdot A^3}} = \frac{V}{A \cdot k} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{54}}$$

Ergebnis:

Jedes chemische Element setzt sich aus Atomen zusammen. Jedes **Atom** ist noch Träger der Eigenschaften des Elements. Der **Radius** eines Atoms ist in der Größenordnung von 10^{-10} m.

Die Vorstellung, dass die Materie aus kugelförmigen Teilchen ohne innere Struktur aufgebaut ist, ist die Grundlage des Teilchenmodells.

Mit dem Teilchenmodell lassen sich einfache physikalische Phänomene wie die drei Aggregatzustände der Materie, die Temperatur bzw. die innere Energie und der Druck von Gasen plausibel machen.

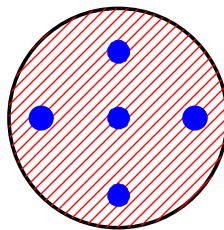
3. Das Thomsonsche Atommodell

1897 entdeckte **Joseph J. Thomson** erstmals, dass die Atome nicht unteilbar sind. Er zeigte, dass die bis dahin unbekanntesten Strahlen, die aus einer Glühkathode einer Vakuumröhre austreten, Teilchen sind.

Diese Teilchen sind elektrisch geladen und wurden als **Elektronen** bezeichnet und sind wesentlich kleiner als die Atome.

Thomson erklärte erstmals den elektrischen Strom als Strom geladener Elektronen. 1906 erhielt er den **Nobelpreis** für Physik.

Darauf basierend entwickelte er das **Thomsonsche Atommodell** (auch "Rosinenkuchen-" oder "Plumpudding-Modell"), wonach die sehr kleinen Elektronen im Inneren der Atome eingebettet seien wie Rosinen in einem Kuchenteig.



1906 konnte Thomson zeigen, dass die Hülle des Wasserstoffatoms genau ein Elektron enthält. 1913 gelang ihm durch die Untersuchung von **Kanalstrahlen** des Neon der Nachweis für die Existenz unterschiedlich schwerer Atomkerne eines Elements.

Kanalstrahlen ist die veraltete Bezeichnung für positiv geladene Ionenstrahlung.

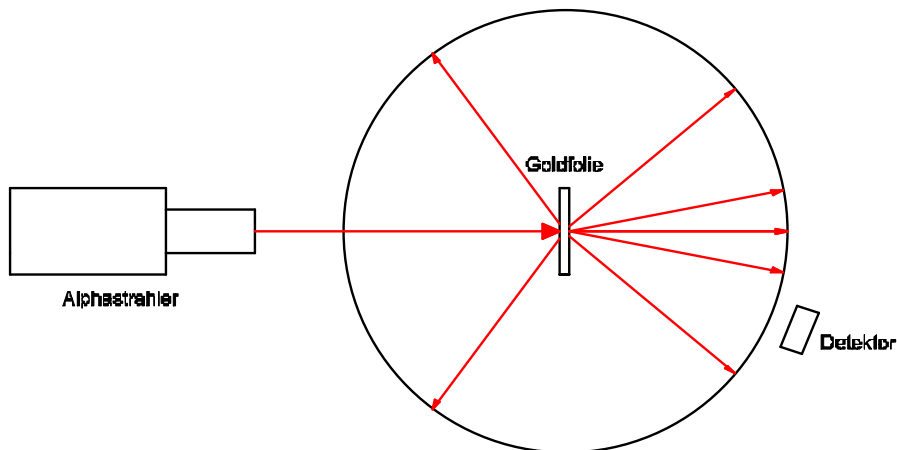
Daraus leitete u.a. **Frederick Soddy** die Theorie der **Isotope** her.

Soddy beschäftigte sich auch mit der Wirtschafts- und Geldtheorie und übte schon damals Kritik an der Funktion der Banken!!

Thomson ist ebenfalls bekannt für seinen Beitrag zur Entwicklung des **Massenspektrometers**.

4. Das Rutherford'sche Atommodell- der Atomkern

Rutherford'scher Streuversuch



Beschießt man eine dünne Goldfolie mit α -Teilchen d. h. vollständig ionisierten Helimatomen, dann werden die meisten dieser Teilchen nicht oder nur geringfügig abgelenkt.

Nur vereinzelt treten große Ablenkwinkel bis zu 180° auf.

Ein Atom besteht aus einem sehr kleinen positiv geladenen Kern mit 10^{-15} m Radius (Streuzentrum für die α -Teilchen), der fast die ganze Masse des Kerns ausmacht.

Um diesen positiv geladenen Kern bewegen sich Elektronen wie Planeten um die Sonne.

Die Elektronen nehmen einen Raum von 10^{-10} m ein.

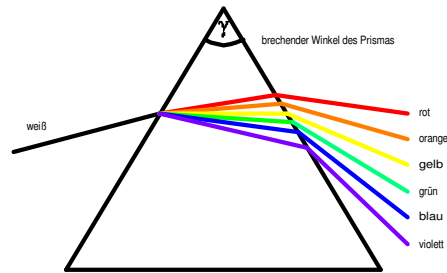
Mängel des Rutherford'schen Atommodells

a) Nach den klassischen Gesetzen der Physik ist das Atom nicht stabil.

Durch Aussendung elektromagnetischer Strahlung müssten die Elektronen an Energie verlieren und in den Kern stürzen.

b) Mit dem Modell kann nicht erklärt werden, wieso Atome nur bestimmte Sorten von Licht ausstrahlen

5. Aufnahme und Abgabe von Energie durch Atome



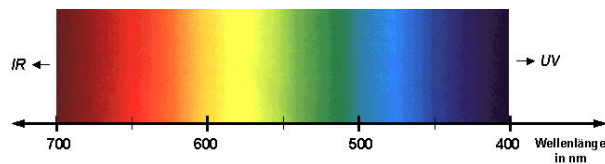
Weißes Licht setzt sich aus verschiedenfarbigem Licht - physikalisch charakterisiert durch die **Wellenlänge** λ - zusammen.

Da Licht verschiedener Wellenlänge unterschiedlich stark gebrochen wird, lässt sich ein weißer Lichtstrahl durch ein Glasprisma in seine unterschiedlichen Wellenanteile zerlegen.

Licht einer bestimmten Wellenlänge kann dann nicht weiter zerlegt werden.

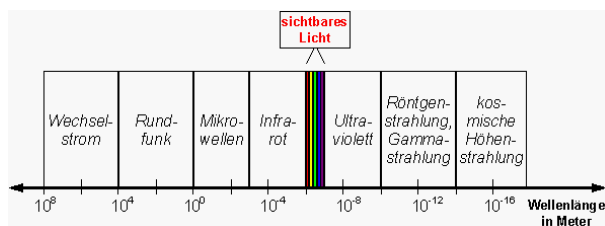
Die elektromagnetischen Wellen, die in unseren Augen unterschiedliche Farbwahrnehmungen erzeugen bilden, das optische **Spektrum**.

Weißes Licht setzt sich aus Licht des gesamten optischen Spektrums zusammen. Man erhält bei der Zerlegung ein **kontinuierliches Spektrum**.



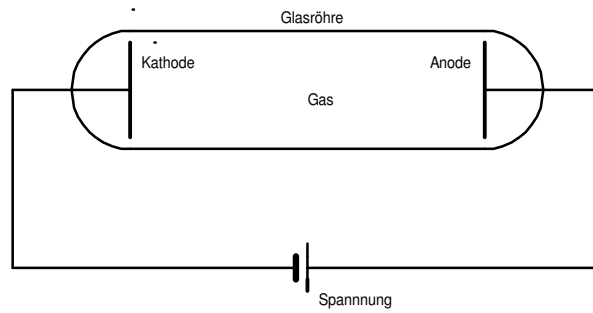
Das optische Spektrum ist Teil des elektromagnetischen Spektrums.

Dies reicht vom **Wechselstrom**, dessen Welleneigenschaften meist vernachlässigt werden können, bis zur kosmischen **Höhenstrahlung**. Das optische Spektrum befindet sich zwischen der **Infrarot-** und der **Ultraviolettstrahlung**.



Farbe	Wellenlänge in nm
Blau	450–482
Grün	497–530
Gelb	575–580
Orange	585–595
Rot	620–780

Im Gegensatz zu dem weißen Licht, das von einer Glühlampe bzw. der Sonne ausgestrahlt wird, senden die Gasatome in einer **Gasentladungsröhre** nur Licht mit bestimmten Wellenlängen aus. Man erhält ein **Linienspektrum**.



Eine Gasentladungsröhre ist eine Glasröhre, die mit einem stark verdünnten Gas gefüllt ist.

Durch Anlegen einer mäßigen Spannungen (500 - 1000 V) kann ein elektrischer Stromfluß aufrecht erhalten werden, der zu intensiven Leuchterscheinungen führt.

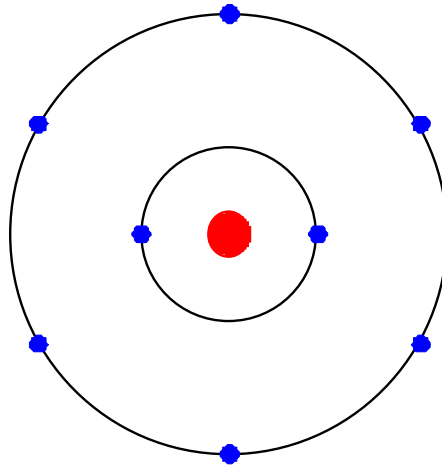
Derartige Gasentladungen werden z.B. als Leuchtreklamen ("Neonröhren") verwendet.

6. Bohrsches Atommodell und Schalenmodell

Die Tatsache, dass Atome nur Licht bestimmter Wellenlängen aussenden, wurde von Niels Bohr im Bohrschen Atommodell für das *Wasserstoffatom* berücksichtigt.

Mit seinem Modell konnte er die Wellenlängen des von Wasserstoffatomen emittierten Lichts berechnen.

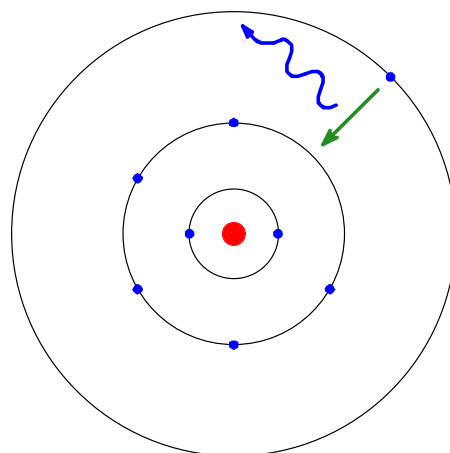
Ein Weiterentwicklung des Bohrschen Atommodells ist das *Schalenmodell*.



1. Die Elektronen können sich nur auf bestimmten Bahnen um den Atomkern bewegen.

Jede Schale kann nur eine bestimmte Anzahl von Atomen aufnehmen.

Auf diesen Bahnen haben sie eine meist negativ gerechnete Energie d.h. sie sind an das Atom gebunden.



2. Im nichtangeregten Atom nehmen die Elektronen den energetisch tiefsten Zustand ein und strahlen keine Energie in Form von Licht ab. Das garantiert den stabilen Zustand der Atome.

3. Hat ein Elektron die Energie E_1 und gerät es durch Energiezufuhr (z. B. durch einen Stoß mit einem anderen Atom) in eine energetisch höhere Bahn und hat es dort die größere Energie E_2 , dann kehrt es in weniger als einer Millionstel Sekunden wieder in den Grundzustand zurück.

Die Energiedifferenz $\Delta E = E_2 - E_1$ wird in Form eines Energiequants, das man auch **Photon** nennt, abgegeben.

Zwischen der Wellenlänge λ eines Photons gemessen in Metern und der Energie des zugehörigen Lichtquants gemessen in eV (Elektronenvolt) besteht die Gleichung

$$E_{\text{Photon}} = \frac{1,25 \cdot 10^{-6}}{\lambda} \text{ m} \cdot \text{eV}$$

Dabei ist 1 eV die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es eine Beschleunigungsspannung von 1 V durchläuft. Daher ist

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{19} \text{ J}$$

Mit dem Schalenmodell lässt sich der Aufbau des Periodensystems erklären.

Linienspektrum des Wasserstoffatoms

Die Bindungsenergien im Wasserstoffatom haben die Werte

$$E_n = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2} \text{ mit } n \in \mathbb{N}$$

Für $n = 1$ erhält man den energetisch tiefsten Zustand mit einer Bindungsenergie von $-13,6 \text{ eV}$ d.h. die Ionisierungsenergie des Wasserstoffatoms beträgt $13,6 \text{ eV}$.

Wird das Elektron durch Energiezufuhr auf eine energetisch höhere Bahn mit

$$E = E_m = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{m^2} \text{ und } m \geq 2$$

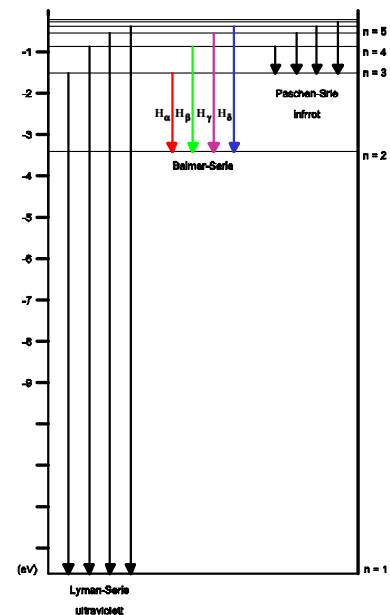
gebracht und kehrt es danach in den Grundzustand zurück, dann erhält man die Linien der **Lyman-Serie**.

Die Energie der abgestrahlten Photonen ergibt sich daher zu

$$E_{\text{Photon}}(m \rightarrow n = 1) = E_m - E_1 = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{m^2} - (-13,6 \text{ eV}) = 13,6 \text{ eV} \cdot \left(1 - \frac{1}{m^2}\right)$$

Das energieärmste abgestrahlte Photon erhält man für $m = 2$. Seine Energie beträgt $10,2 \text{ eV}$:

$$\text{Das ergibt eine Wellenlänge von } \frac{1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{10,2} = 123 \text{ nm.}$$



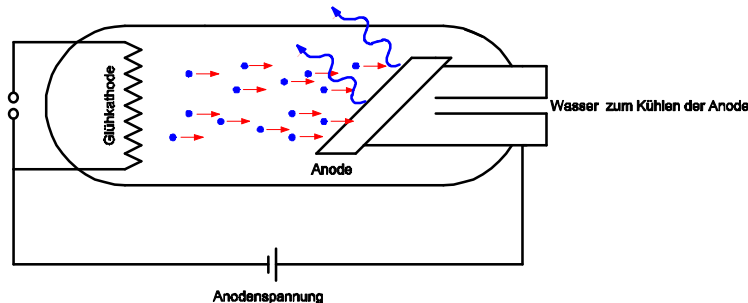
Dies ist Licht im ultravioletten Bereich

Ist $m \geq 2$ und $n = 2$, dann erhält man die Linien der *Balmer-Serie*, die im sichtbaren Bereich liegen.

7. Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlen sind *elektromagnetische Wellen* mit Wellenlängen von 10^{-9} m bis 10^{-11} m.

Man findet sie also im elektromagnetischen Spektrum zwischen dem Bereich des ultravioletten Lichts und dem der *Gammastrahlung*.



Röntgenstrahlen werden in einer evakuierten Röhre erzeugt.

Elektronen werden aus einer Glühkathode herausgelöst und mittels einer zwischen Kathode und Anode liegende Spannung zu dieser hin beschleunigt.

Nach dem Durchlauf der angelegten Hochspannung U_A (ca. 10 kV - 100 kV) besitzen die Elektronen am Ende eine kinetische Energie $E_{\text{kin}} = e \cdot U_A$.

Beim Auftreffen auf die Anode wird die kinetische Energie hauptsächlich (99%) in innere Energie des Anodenmaterial verwandelt. Der Rest wird als Röntgenstrahlung abgestrahlt.

Die Röntgenstrahlung entsteht durch folgende Prozesse

1. Die auftreffenden Elektronen werden durch die Elektronen des Anodenmaterials abgebremst bzw. stoßen mit ihnen unelastisch und geben den Energieverlust in Form eines Energiequants, eines Photons; ab.

Da der Energieverlust beliebige Bruchteile der kinetischen Energie betragen kann, erhält man ein *kontinuierliches Röntgenspektrum*.

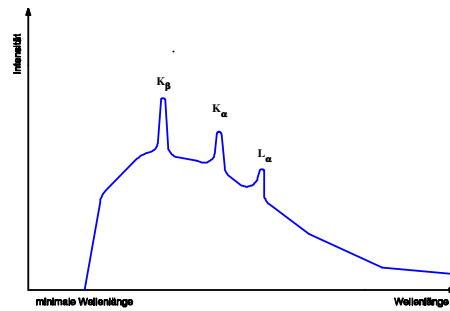
Die maximale Photonenenergie beträgt $E_{\text{max}} = e \cdot U_A$ d.h. die auftretenden Wellenlängen sind nach unten beschränkt.

2. Die auftreffenden Elektronen schlagen Elektronen aus den Schalen der Atome des Anodenmaterials. Dann füllen Elektronen aus den höheren gelegenen Schalen die entstandenen Lücken auf und geben ihren Energieverlust in Form eines Photons ab.

Da die Energieniveaus der Elektronen in den Atomen nur bestimmte Werte haben - man sagt sie sind gequantelt- besitzt diese Photonen ganz bestimmte, vom Anodenmaterial abhängige Energien bzw. Wellenlängen.

Man bezeichnet die so entstehende Strahlung als *charakteristische Röntgenstrahlung*.

Für die Intensität der Strahlung in Abhängigkeit von der Energie bzw. Wellenlänge ergibt sich folgendes Schaubild



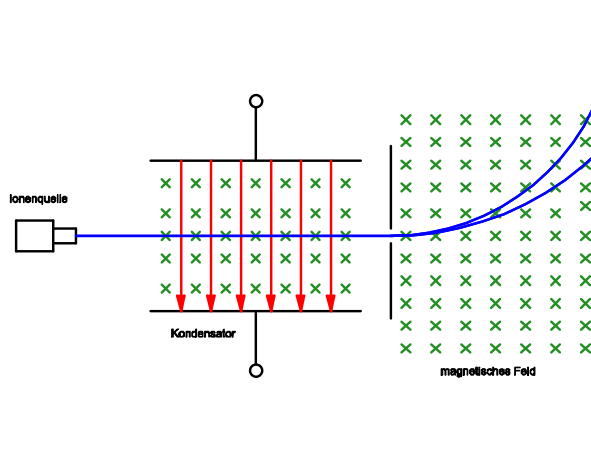
Die Schalen von Atomen werden von innen nach außen mit den Buchstaben K, L, M usw. bezeichnet.

Wird ein Elektron aus der kernnächsten K-Schale herausgeschlagen und die entstehende Lücke von einem Elektron aus der L-Schale gefüllt, dann wird ein Photon der K_{α} -Linie abgestrahlt; wird die Lücke von einem Elektron der M Schale aufgefüllt, dann erhält man ein Photon der K_{β} -Linie.

Je größer die Ordnungszahl eines Elements ist, desto besser absorbiert es die Röntgenstrahlung. Daher absorbieren die Weichteile des menschlichen Körpers die Röntgenstrahlen viel weniger als die Knochen (Röntgenuntersuchung).

8. Der Aufbau der Atomkerne

=====

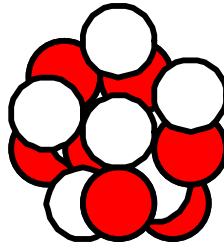


Schickt man ionisierte Atome mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch ein elektrisches Feld, auf dem ein magnetisches Feld senkrecht steht, dann werden nur Ionen mit einer bestimmten Geschwindigkeit nicht abgelenkt.

Verschieden schwere Ionen, aber gleicher Geschwindigkeit, bewegen sich dann in dem sich anschließenden Magnetfeld auf verschiedenen Kreisbahnen und werden verschieden stark abgelenkt. Aus Größe der Ablenkung lässt sich dann die Masse der Ionen bestimmen. Eine derartige Vorrichtung heißt deshalb **Massenspektrograph**.

Aus Messungen mit dem Massenspektrographen ergibt sich:

Atomkerne sind aus zwei **Elementarteilchen** aufgebaut.



a) positiv geladenen **Protonen** mit der Masse $m_p = 1,67262158 \cdot 10^{-27}$ kg und der Ladung $q = e = 1,602176462 \cdot 10^{-19}$ C .

b) neutralen **Neutronen** mit $m_n = 1,67492716 \cdot 10^{-27}$ kg.

Die Masse eines Elektrons ist damit verglichen verschwindend klein

$$m_e = 9,109388 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \approx \frac{1}{1836} m_p .$$

Die Ladung des Elektrons ist dagegen der Ladung des Protons genau entgegengesetzt.

Ein Atom eines bestimmten Elements enthält eine feste Zahl von Protonen. Diese Zahl nennt man **Ordnungszahl** oder **Kernladungszahl Z**.

Im neutralen Atom stimmt die Anzahl der Elektronen in der Hülle und die Anzahl der Protonen im Kern überein.

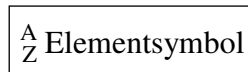
Die Anzahl der Neutronen, die **Neutronenzahl N**, kann dagegen verschiedene Werte annehmen. Von wenigen Ausnahmen abgesehen ist sie größer als die Anzahl der Protonen.

Verschieden aufgebaute Kerne des gleichen Elements nennt man **Isotope**.

Die Gesamtzahl der Nukleonen eines Kerns (**Nuklid**) heißt **Massenzahl A**. Es gilt

$$A = N + Z$$

Schreibweise für Nuklide :



Beispiele :

a) ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ und ${}^3_1\text{H}$ sind Isotope des Wasserstoffs:

${}^2_1\text{H}$ heißt auch schwerer Wasserstoff oder **Deuterium** und ${}^3_1\text{H}$ nennt man auch **Tritium**.

b) He-3 und He-4 sind Isotope des Heliums

Aus praktischen Gründen hat man definiert :

Ein atomare Masseneinheit 1u ist ein Zwölftel der Masse des Atoms des Kohlenstoffisotops ${}^{12}_6\text{C}$. Damit gilt

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} m_{{}^{12}_6\text{C}} = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg} .$$

Damit ist

$$m_p = 1,00727646688 \text{ u} \quad \text{und} \quad m_n = 1,00866491578 \text{ u} \quad \text{und} \quad m_e = 5,4857991110 \cdot 10^{-4} \text{ u}$$

Die Isotope eines Elementes lassen in einem Ordnungszahl-Neutronenzahl-Gitternetz anordnen. Man nennt diese Anordnung **Nuklidkarte**.

22											${}^{31}_9\text{F}$	
21											${}^{30}_9\text{F}$	

20											${}^{29}_9\text{F}$	
19											${}^{28}_9\text{F}$	${}^{29}_{10}\text{Ne}$
18											${}^{27}_9\text{F}$	${}^{28}_{10}\text{Ne}$
17											${}^{26}_9\text{F}$	${}^{27}_{10}\text{Ne}$
16										${}^{24}_8\text{O}$	${}^{25}_9\text{F}$	${}^{26}_{10}\text{Ne}$
15									${}^{22}_7\text{N}$	${}^{23}_8\text{O}$	${}^{24}_9\text{F}$	${}^{25}_{10}\text{Ne}$
14								${}^{20}_6\text{C}$	${}^{21}_7\text{N}$	${}^{22}_8\text{O}$	${}^{23}_9\text{F}$	${}^{24}_{10}\text{Ne}$
13								${}^{19}_6\text{C}$	${}^{20}_7\text{N}$	${}^{21}_8\text{O}$	${}^{22}_9\text{F}$	${}^{23}_{10}\text{Ne}$
12							${}^{17}_5\text{B}$	${}^{18}_6\text{C}$	${}^{19}_7\text{N}$	${}^{20}_8\text{O}$	${}^{21}_9\text{F}$	${}^{22}_{10}\text{Ne}$
11							${}^{16}_5\text{B}$	${}^{17}_6\text{C}$	${}^{18}_7\text{N}$	${}^{19}_8\text{O}$	${}^{20}_9\text{F}$	${}^{21}_{10}\text{Ne}$
10					${}^9_4\text{Be}$	${}^{15}_5\text{B}$	${}^{16}_6\text{C}$	${}^{17}_7\text{N}$	${}^{18}_8\text{O}$	${}^{19}_9\text{F}$	${}^{20}_{10}\text{Ne}$	${}^{20}_{10}\text{Ne}$
9					${}^{13}_4\text{Be}$	${}^{14}_5\text{B}$	${}^{15}_6\text{C}$	${}^{16}_7\text{N}$	${}^{17}_8\text{O}$	${}^{18}_9\text{F}$	${}^{19}_{10}\text{Ne}$	${}^{19}_{10}\text{Ne}$
8			${}^{10}_2\text{He}$	${}^{11}_3\text{Li}$	${}^{12}_4\text{Be}$	${}^{13}_5\text{B}$	${}^{14}_6\text{C}$	${}^{15}_7\text{N}$	${}^{16}_8\text{O}$	${}^{17}_9\text{F}$	${}^{18}_{10}\text{Ne}$	${}^{18}_{10}\text{Ne}$
7			${}^9_2\text{He}$		${}^{11}_4\text{Be}$	${}^{12}_5\text{B}$	${}^{13}_6\text{C}$	${}^{14}_7\text{N}$	${}^{15}_8\text{O}$	${}^{16}_9\text{F}$	${}^{17}_{10}\text{Ne}$	${}^{17}_{10}\text{Ne}$
6		${}^6_1\text{H}$	${}^8_2\text{He}$	${}^9_3\text{Li}$	${}^{10}_4\text{Be}$	${}^{11}_5\text{B}$	${}^{12}_6\text{C}$	${}^{13}_7\text{N}$	${}^{14}_8\text{O}$	${}^{15}_9\text{F}$	${}^{16}_{10}\text{Ne}$	${}^{16}_{10}\text{Ne}$
5		${}^6_1\text{H}$	${}^7_2\text{He}$	${}^8_3\text{Li}$	${}^9_4\text{Be}$	${}^{10}_5\text{B}$	${}^{11}_6\text{C}$	${}^{12}_7\text{N}$	${}^{13}_8\text{O}$	${}^{14}_9\text{F}$		
4		${}^5_1\text{H}$	${}^6_2\text{He}$	${}^7_3\text{Li}$	${}^8_4\text{Be}$	${}^9_5\text{B}$	${}^{10}_6\text{C}$		${}^{12}_8\text{O}$			
3		${}^4_1\text{H}$	${}^5_2\text{He}$	${}^6_3\text{Li}$	${}^7_4\text{Be}$	${}^8_5\text{B}$	${}^9_6\text{C}$					
2		${}^3_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$	${}^5_3\text{Li}$	${}^6_4\text{Be}$	${}^7_5\text{B}$	${}^8_6\text{C}$					
1	${}^1_0\text{n}$	${}^2_1\text{H}$	${}^3_2\text{He}$									
0		${}^1_1\text{H}$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	9	9	10	

Die positive Ladung der Protonen führt zu einer abstoßenden Kräfte zwischen ihnen. Damit die Nukleonen trotzdem einen stabilen Kern bilden, müssen weitere Kräfte zwischen den Nukleonen, die sog. **Kernkräfte**, wirken.

Die Kernbindung ist dann sehr stabil, wenn etwa gleich viele Protonen und Neutronen im Kern sind. Erst bei großen Kernen überwiegt dann die Anzahl der Neutronen, da die Kernkraft nur zwischen benachbarten Nukleonen wirkt, nicht dagegen die elektrische Abstoßung zwischen den Protonen.

Letztendlich überwiegt aber dann doch die elektrische Abstoßung zwischen den Protonen und die Urannuklide mit der Ordnungszahl 92 sind die größten in der Natur vorkommende Kerne.

9. Quarks

=====

Das Elektron ist echt elementar, in dem Sinn, dass es nicht aus kleineren Teilchen zusammengesetzt ist; dagegen bestehen Protonen und Neutronen aus jeweils drei Quarks.

Die elektrische Ladung der Quarks ist $-\frac{1}{3}$ oder $+\frac{2}{3}$ in Einheiten der Elementarladung e .

Insgesamt werden 6 verschiedene Quarks postuliert.

	elektrische Ladung
up (u)	$+\frac{2}{3}$
down (d)	$-\frac{1}{3}$
strange (s)	$-\frac{1}{3}$
charme (c)	$+\frac{2}{3}$
bottom (b)	$-\frac{1}{3}$
top (t)	$+\frac{2}{3}$

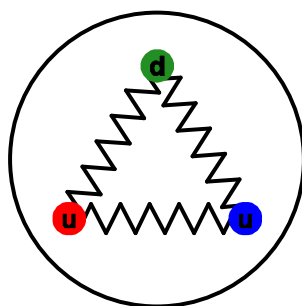
Zu jedem Quark gibt es ein Antiquark.

In der folgenden Tabelle sind nur die ersten zwei Quarks, Up und Down, Bausteine der Materie, so wie wir sie kennen. Die übrigen vier benötigen die großen Energien von Teilchenbeschleunigern zu ihrer Erzeugung.

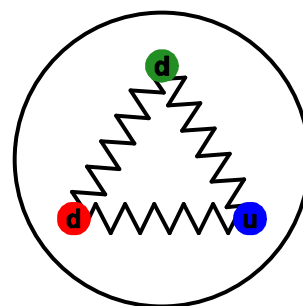
In der physikalischen Modellierung schreibt man jedem Quark einen "Ladung" mit den in Anlehnung an die additive Farbtheorie Farbladungen rot grün und blau zu.

Quarks treten nicht isoliert auf, sondern vereinen sich immer derart, dass nach außen nur ganzzahlige elektrische Ladungen sichtbar sind.

Weiter wird postuliert, dass farbige Quarks niemals einzeln auftreten können. Stattdessen müssen sie sich entsprechend der additiven Farbtheorie stets zu farblosen Teilchen, wie zum Beispiel den Nukleonen, gruppieren.



Aufbau des Protons



Aufbau des Neutrons

$$\text{rot} + \text{grün} + \text{blau} = \text{weiß}$$

10. Die radioaktive Strahlung

=====

Bequerel (1896):

Uranhaltige Stoffe senden eine Strahlung aus, die Fotoplatten schwärzt.

Marie und Pierre Curie:

Entdeckung der radioaktiven Elemente **Thorium**, **Polonium** und **Radium**.

Eigenschaften radioaktiver Strahlung:

- a) Schwärzung photographischer Platten
- b) Ionisierung der Luft
- c) Hervorrufen von Leuchterscheinungen bei leicht anregbaren Stoffen wie Zinksulfid.

Arten radioaktiver Strahlung und ihr Nachweis

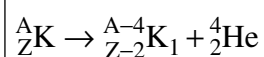
α -Strahlung und Wilsonsche Nebelkammer

In Atomkernen mit großer Massenzahl können sich zwei Neutronen und zwei Protonen zu einem Heliumkern zusammenschließen.

Durch die Bildung des Heliumkerns ist es dann energetisch möglich, dass dieser Heliumkern gegen den Einfluß der Kernkräfte den Restkern verlassen kann. Dabei wird kurzzeitig der Energieerhaltungssatz verletzt (**Tunneleffekt**).

Ist der Heliumkern außerhalb der Reichweite der Kernkräfte, dann stoßen sich der Heliumkern und der Restkern aufgrund ihrer Ladung ab.

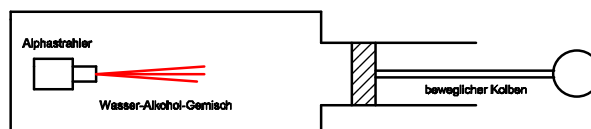
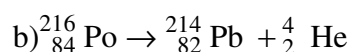
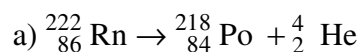
Die allgemeine Zerfallsgleichung lautet



Die Heliumkerne bilden die α -Strahlung.

α -Strahlen haben wegen ihrer hohen Ionisationsfähigkeit in Luft nur eine Reichweite von wenigen Zentimetern und können bereits ein Blatt Papier nicht mehr durchdringen.

Beispiele:



Eine mit Alkoholdampf gesättigte Kammer wird **adiabatisch** d.h. ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung expandiert. Da sich dadurch die Luft abkühlt, ist die Kammer mit Alkoholdampf übersättigt.

Die längs der Bahn eines α -Teilchens erzeugten Ionen bilden **Kondensationskeime** für den Alkoholdampf. Die Bahn wird als Kondensstreifen sichtbar.

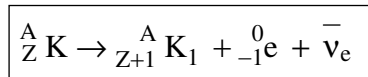
β^- -Strahlung und das Geiger-Müller-Zählrohr

Zum β^- -Zerfall kommt es, wenn im Kern ein Neutron in ein Proton und ein Elektron zerfällt.

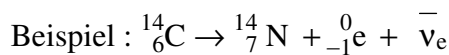
Zusätzlich entsteht beim Zerfall ein Elektron-Antineutrino.

Ein Neutrino ist ein nur schwer nachweisbares Elementarteilchen.

Das Elektron und Elektron-Antineutrino verlassen den jeweiligen Kern. Die Elektronen bilden die β^- -Strahlung.

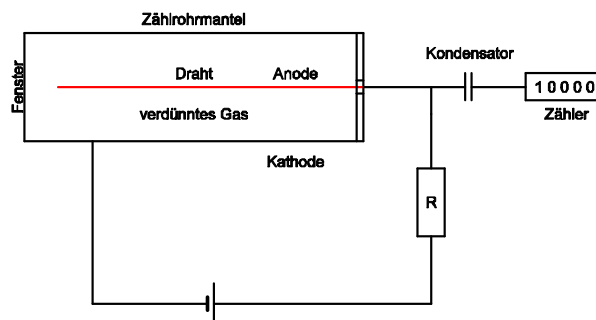


Durch den β^- -Zerfall bauen Kerne mit zu hoher Neutronenzahl den Überschuss an Neutronen ab.



Die β^- -Strahlung hat in Luft eine Reichweite von mehreren Metern und kann Papier, aber keine Metallplatten durchdringen.

Der Nachweis der β^- -Strahlung erfolgt mit dem **Geiger-Müller-Zählrohr**.



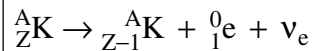
Die in das Zählrohr eindringende radioaktive Strahlung ionisiert das verdünnte Gas und macht es leitend. Dadurch kommt es zu einem Stromstoß und einem Spannungsabfall am Widerstand.

Die Spannung zwischen dem Metalldraht und dem Gehäuse des Zählrohrs sinkt und die Entladung erlischt. Ein Zähler registriert den Stromstoß.

Die Anzahl der pro Sekunde registrierten Impulse nennt man die **Zählrate**.

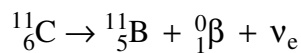
Besitzt ein Kern eine überschüssige Protonenzahl, dann kommt es zum β^+ -Zerfall. Ein Proton wird in ein Neutron umgewandelt.

Dabei entstehen ein Positron und Elektron-Neutrino, die den Kern verlassen. Das Positron ist das Antiteilchen des Elektrons. Es hat die gleichen Eigenschaften wie das Elektron, aber die entgegengesetzte Ladung.



Treffen ein Elektron und ein Positron zusammen, dann zerstrahlen sie zu zwei oder drei Photonen.

Beispiel:



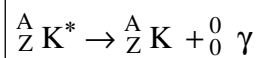
Ein Konkurrenzprozess zum β^+ -Zerfall ist der sogenannte **Elektroneneinfang**.

Hierbei verwandelt sich ein Proton des Kerns durch Einfangen eines Elektrons aus einer kernnahen Schale der Atomhülle in ein Neutron und ein Neutrino.

γ -Strahlung

Die dritte Art der radioaktiven Strahlung besteht aus energiereichen elektromagnetischen Wellen. Diese γ -Strahlung hat in Luft eine Reichweite von vielen m und kann nur durch dicke Bleimäntel abgeschirmt werden.

Zum γ -Zerfall kommt es, wenn bei einem α - oder β -Zerfall ein angeregter Kern entsteht, der seine Anregungsenergie in Form eines Energiequants d.h. eines Photons abgibt.



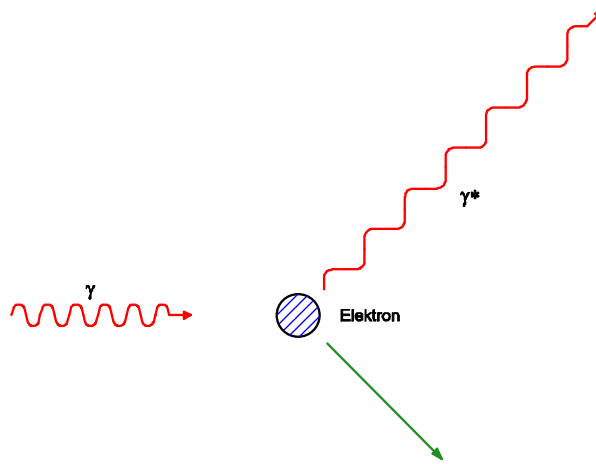
Das γ -Spektrum eines Kerns ist ein Linienspektrum.

Bei der Absorption von γ -Strahlung spielen drei Effekte eine wesentliche Rolle.

Der Photoeffekt

Ein γ -Quant überträgt seine Energie vollständig auf ein Hüllenelektron eines Atoms und löst es los. Das γ -Quant hört auf zu existieren.

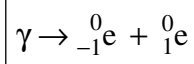
Der Comptoneffekt



Ein γ -Quant stößt auf ein freies Elektron und überträgt einen Teil seiner Energie auf das Elektron. Es bleibt ein γ -Quant niedriger Energie übrig. Die Wellenlänge vergrößert sich.

Der Paarbildungseffekt

Das γ -Quant verwandelt sich in der Nähe eines massereichen Objekts z.B. eines Atomkerns in ein *Elektron-Positron-Paar*.



Das γ -Quant muss dabei eine Mindestenergie von $2m_e \cdot c^2 = 1,022 \text{ MeV}$ besitzen.

11. Zerfallsreihen

Zerfällt ein schwerer Atomkern, dann ist meist der entstehende Kern, den man auch Tochterkern nennt, selbst radioaktiv. Auch dieser Kern kann radioaktiv sein usw.

Es finden solange radioaktive Zerfälle statt, bis ein stabiler Kern entsteht. Man spricht von einer Zerfallsreihe.

Da sich nur beim α -Zerfall die Massenzahl eines Kerns ändert, gibt es vier Zerfallsreihen.

Drei dieser Zerfallsreihen kommen natürlich vor.

1. Die **Thorium-Zerfallsreihe**, die mit Th-232 beginnt und bei Pb-208 endet.

Alle Kerne dieser Zerfallsreihe haben die Massenzahl $4n$ mit $n \in \mathbb{N}$.

2. Die **Uran-Radium-Reihe**, die mit U-238 beginnt und bei Pb-206 endet.

Alle Kerne dieser Zerfallsreihe haben die Massenzahl $4n + 2$ mit $n \in \mathbb{N}$.

3. Die **Uran-Actinium-Zerfallsreihe**, die mit U-235 beginnt und bei Pb-207 endet.

Alle Kerne dieser Zerfallsreihe haben die Massenzahl $4n + 3$ mit $n \in \mathbb{N}$.

Jede dieser Zerfallsreihen ist Teil einer größeren Zerfallsreihe, wenn man künstlich erzeugte Elemente dazu nimmt.

Die vierte Zerfallsreihe, die **Neptunium-Zerfallsreihe**, beginnt mit ${}^{241}_{94}\text{Pu}$ und endet mit ${}^{207}_{79}\text{Tl}$

Benannt ist die Reihe nach Isotop ${}^{237}_{91}\text{Np}$, das der Reihe angehört, das aber seit seiner Entstehung zerfallen ist.

Als Startkern nimmt man ${}^{241}_{94}\text{Pu}$, da man diese Kerne in Reaktoren herstellen kann.

12. Kernreaktionen

=====

Der radioaktive Zerfall ist eine natürliche Kernumwandlung. Schießt man Teilchen auf Kerne, dann können künstliche Kernumwandlungen stattfinden.

Man unterscheidet zwei Arten von Reaktionen, die direkte Reaktion (Teilchenaustausch) oder die **Compound-Reaktion**, bei der ein äußerst kurzlebiger, hoch angeregter Zwischenkern (Compoundkern) entsteht.

Beispiele:

a) ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p}$ - Entdeckung des Protons durch **Ernest Rutherford** 1919

Man schreibt auch ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, \text{p}){}^{17}_8\text{Ne}$ und das α -Teilchen **Projektil** und das Proton **Ejektil**.

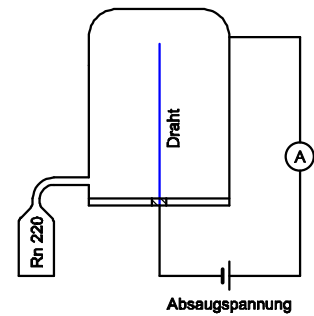
b) ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$ - Entdeckung des Neutrons durch **Chadwick** 1932

Man schreibt auch ${}^9_4\text{Be}(\alpha, \text{n}){}^{12}_6\text{C}$

13. Das Zerfallsgesetz für radioaktive Kerne

=====

Eine **Ionisationskammer** besteht aus einem hohlen Metallzylinder, in den ein davon isolierter Metallstab ragt. Zylinder und Stab sind mit den Polen einer Spannungsquelle verbunden.



Die Spannung U ist so gewählt, dass alle Ionen, die durch Ionisation der Luft im Hohlraum entstehen abgesaugt werden und einen **Ionisationsstrom** erzeugen

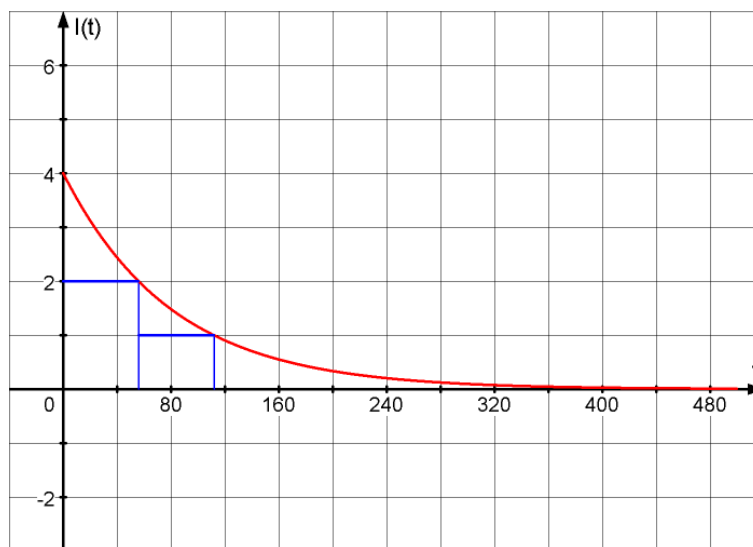
Man drückt eine bestimmte Menge des radioaktiven Gases Radon in den Hohlraum einer Ionisationskammer und misst den zeitlichen Verlauf des Ionisationsstroms I .

Ergebnis:

Die Stromstärke halbiert sich ca. alle 56 s d. h. ist I_0 die Stromstärke unmittelbar nach dem Einfüllen des radioaktiven Gases und nennt man $t_H = 56$ s die Halbwertszeit, dann gilt für die Stromstärke $I(t)$ nach Ablauf der Zeit t

$$I(t) = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_H}}$$

Graphische Veranschaulichung :



Folgerung:

Radioaktive Stoffe zerfallen nicht auf einmal.

Die Anzahl der Kerne eines radioaktiven Stoffes die pro Sekunde heißt Zerfallsrate oder Aktivität A .

Es ist

$$[A] = 1 \text{ Zerfall pro Sekunde} = 1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Bq} \quad (\text{Bequerel})$$

Ist also ΔN die Anzahl der Kerne, die in der Zeitspanne Δt zerfallen, dann gilt für die mittlere Aktivität in dieser Zeitspanne

$$\bar{A} = \frac{\Delta N}{\Delta T}$$

Die Aktivität einer bestimmten Menge eines radioaktiven Stoffes halbiert sich demzufolge jeweils nach Ablauf der sog. Halbwertszeit t_H . Ist A_0 die Aktivität zur Zeit $t = 0$, dann beträgt die Aktivität $A(t)$ nach Ablauf der Zeit t

$$A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_H}}$$

Die Aktivität einer Probe hängt von der Art des radioaktiven Elements und ihrer Masse und damit der Anzahl der vorhandenen Kerne ab.

Folgerung :

In der Halbwertszeit t_H muss jeweils die Hälfte der Kerne einer radioaktiven Probe zerfallen.

Ist N_0 die Anzahl der noch unzerfallenen Kerne zur Zeit $t = 0$, dann ist die Zahl $N(t)$ der noch unzerfallenen Kerne zur Zeit t gegeben durch

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_H}}$$

Die Zahl der bis dahin zerfallenen Kerne beträgt

$$\Delta N = N_0 - N(t) = N_0 - N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_H}} = N_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_H}} \right]$$

Für die mittlere Aktivität in diesem Zeitraum gilt

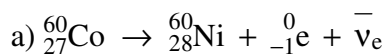
$$\bar{A} = \frac{\Delta N}{t}$$

Beispiel:

Ein radioaktives Präparat bestehe aus 1 µgmg des künstlich hergestellten Betastrahlers $^{60}_{27}\text{Co}$. Das Isotop zerfällt mit einer Halbwertszeit von 5,2714 a in $^{60}_{28}\text{Ni}$.

- Stelle die Zerfallsgleichung auf.
- Wie viele Co-60 Kerne sind anfangs in dem Präparat vorhanden?
- Wie viele Kerne zerfallen am ersten Tag?
- Bestimme mit Hilfe von c) näherungsweise die Anfangsaktivität der Probe?
- Veranschauliche den zeitlichen Verlauf der Aktivität in einem Diagramm.
- Wie groß ist die Aktivität der Probe nach einem 100 Jahren ?

Lösung:



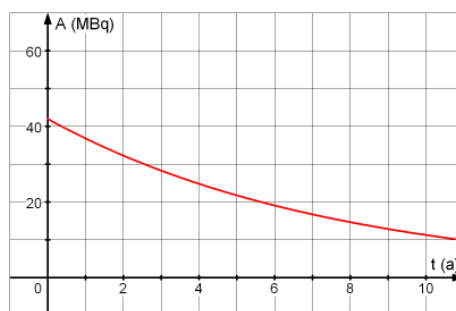
b) Masse eines $^{60}_{27}\text{Co}$ -Atoms: $60\text{u} = 9,96 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$

Anzahl der Atome: $10^{-9} \text{ kg} : 9,96 \cdot 10^{-26} \text{ kg} = 1 \cdot 10^{16}$

c) $\Delta N = 10^{16} \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1 \text{ d}}{5,2714 \cdot 365 \text{ d}}} \right] = 3,6 \cdot 10^{12}$

d) $A_0 \approx \frac{3,6 \cdot 10^{12}}{24 \cdot 3600 \text{ s}} = 42 \text{ MBq}$

e)



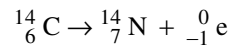
f) $A = 42 \text{ MBq} \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{100 \text{ a}}{5,2714 \text{ a}}} = 82 \text{ Bq}$

14. Anwendungen der Radioaktivität

Die C 14 - Methode

Auf der Erde ist der Anteil von radioaktivem C-14 konstant, da sich ein Gleichgewicht von Zerfall und Produktion durch kosmische Strahlung gebildet hat.

C-14 zerfällt mit einer Halbwertszeit von 5730 a durch β - Zerfall mit der Zerfallsgleichung



Auf ein C-14-Atom treffen $1,3 \cdot 10^{12}$ C-12-Atome. Enthält Luft 1 g Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid, dann sorgen die enthaltenen C-14-Atome für eine Aktivität von $13,5 \text{ min}^{-1}$.

Lebende Pflanzen und Tiere den gleichen Anteil an radioaktivem Kohlenstoff, da sie ständig Kohlenstoff aus der Luft aufnehmen.

Stoppt dieser Kreislauf mit dem Absterben der Pflanze oder des Tiers, dann nimmt die Aktivität nach mit

$$A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730\text{a}}}$$

ab.

Beispiel:

In einer Höhle wurden Reste an Holzkohle gefunden, die aufgrund ihres Gehaltes an ${}^{14}_6\text{C}$ nur noch eine Aktivität $12,5 \text{ min}^{-1}$ pro Gramm aufwiesen.

Wie alt ist die Holzkohle?

Lösung:

$$A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_H}} \Rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_H}} = \frac{A(t)}{A_0} \Rightarrow t = t_H \cdot \log_{\frac{1}{2}} \frac{A(t)}{A_0}$$

$$t = 5730 \text{ a} \cdot \log_{\frac{1}{2}} \frac{12,5 \text{ min}^{-1}}{13,5 \text{ min}^{-1}} \approx 600 \text{ a}$$

Beispiel :

1991 entdeckten Bergsteiger im abschmelzenden Eis der Öztaler Alpen eine Leiche. Nach ihrer Bergung wurde sie mit Hilfe der Radiocarbon-Methode untersucht: die Skelettknochen enthielten 53% des ursprünglichen C-14-Gehaltes.

Vor wie vielen Jahren etwa hat dieser Mensch gelebt?

Lösung:

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_H}} \Leftrightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_H}} = \frac{N(t)}{N_0} \Leftrightarrow t = t_H \cdot \log_{\frac{1}{2}} \frac{N(t)}{N_0}$$

$$t = 5730 \text{ a} \cdot \log_{\frac{1}{2}} 0,53 \approx 5250 \text{ a}$$

Die Uran-Blei-Methode

$^{238}_{92}\text{U}$ zerfällt in einer Zerfallskette zu $^{206}_{82}\text{Pb}$.

Aus dem Verhältnis der der Zahl der vorhandenen Atome jedes Elements der Zerfallskette lässt sich das Alter von Gesteinsproben bestimmen.

Markierungsverfahren

Durch Einnahme von ^{131}J und Aktivitätsmessungen an der Schilddrüse wird die Jodaufnahme und der Jodeinbau in die Schilddrüsenhormone untersucht.

15. Gefahren radioaktiver Strahlung

Biologische Strahlenwirkungen

Sie beruhen auf der ionisierenden Wirkung der radioaktiven Strahlung, die Moleküle aufbrechen kann.

Es können bei hoher Strahlenbelastung Schäden im Erbgut auftreten. Bei Schäden am Gesundheitszustand unterscheidet man **Frühschäden** z.B. Verbrennungen und **Spätschäden** wie Krebs.

Natürliche und künstliche Strahlenbelastung

Zu einer natürlichen Strahlenbelastung (**Nulleffekt**) kommt es infolge der **kosmischen Strahlung** die aus zu einem großen Teil Atomkernen und sonst aus Elektronen besteht. 93% der Kerne sind Protonen, 6% Heliumkerne und 1% schwere Kerne.

Das Magnetfeld der Erde schützt vor diesem Bombardement, aber durch Wechselwirkung mit den Molekülen der Luft entstehen radioaktive Isotope wie C-14 und H-3.

Weiterhin sind radioaktive Reste aus der Entstehungszeit des Sonnensystems vorhanden, die Kerne der Zerfallsreihen und das langlebige Kaliumisotop K 40.

Diese sind Ursache der terrestrischen Strahlung (Mauersteine, Beton, Fliesen).

Die Aufnahme C 14 und K 40 bewirken die **Eigenstrahlung** des menschlichen Körpers.

Die Technik führt zu einer **künstlichen Strahlenbelastung**.

Äußere und innere Strahlenbelastung

	äußere Strahlenbelastung	innere Strahlenbelastung
Alphastrahlung	Kein Eindringen in die Keimschicht der Haut	Erhöhtes Schadensrisiko wegen des hohen Ionisationsvermögens
Betastrahlung	Hautschäden bei hoher Intensität - Trübung der Augenlinse	Erhöhtes Schadensrisiko
Gamma- und Neutronenstrahlung	Weites Eindringen in den Körper und Zellschädigung	

Maßgrößen für die Strahlenbelastung

Die Energie, die ein Körper pro kg seiner Masse aufnimmt, heißt Energiedosis D. Also

$$\text{Energiedosis } D = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse}}$$

$$D = \frac{E}{m} \quad [D] = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1\text{Gy} \quad (\text{Gray})$$

Da die radioaktive Strahlung verschieden stark ionisiert, ergibt erst die Multiplikation der Energiedosis D mit einem Bewertungsfaktor w einen Wert, die Äquivalentdosis, der den biologischen Schaden charakterisiert.

$$\text{Äquivalentdosis } H = \text{Bewertungsfaktor} \cdot \text{Energiedosis}$$

$$H = w \cdot D \quad [H] = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{Sv} \quad (\text{Sievert})$$

Bewertungsfaktoren

Strahlungsart	Ladung	Bewertungsfaktor
Alphastrahlung	+ 2	20
Betastrahlung	±1	1
Gammastrahlung	0	1
Röntgenstrahlung	0	1
Neutronenstrahlung (therm.)	0	3
Neutronenstrahlung (schnell)	0	10
Ionen und Kerne	±4 bis ±10	20

Deterministische Strahlenschäden

Stochastische Strahlenschäden (Krebs): Strahlenschäden, bei denen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens, nicht aber die Schwere des Schadens von der Dosis abhängig ist.

Stochastische Strahlenschäden sind ohne Schwellenwert schon ab kleinsten Dosen möglich, treten aber nicht mit Sicherheit in jedem Fall auf.

Deterministische Strahlenschäden: Strahlenschäden, die erst ab einem Schwellenwert der Dosis auftreten und bei denen die Schwere des Schadens von der Dosis abhängt.

bis 0,25 Sv	keine unmittelbare Schäden
0,25 Sv	Schwellenwert Veränderung im Blutbild (Abnahme der Anzahl der Leukozyten)
bis 1 Sv	Subletale Dosis Mattigkeit, Haarausfall, Schwächung des Immunsystems
bis 4 Sv	Mittelletale Dosis : Überlebenschance von 50%
ab 8 Sv	Letale Dosis : Tod

16. Kernenergie

Die Äquivalenz von Masse und Energie

Masse und Energie sind äquivalente (gleichwertige) Größen.

Ändert sich die Energie E eines Körpers, dann ändert sich seine Masse m und umgekehrt.

Die Umrechnung von der einen Größe erfolgt zur anderen Größe ist gegeben durch

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

Selbst ein ruhender Körper mit der Ruhemasse m_0 hat die Ruheenergie $E_0 = m_0 \cdot c^2$.

Erhält er zusätzlich die kinetische Energie E_{kin} , dann gilt für seine Energie $E = E_0 + E_{\text{kin}}$ und für seine - dynamische - Masse gilt

$$m = \frac{m_0 \cdot c^2 + E_{\text{kin}}}{c^2}$$

Beispiele:

a) Ein Elektron hat die Ruhemasse $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ u}$.

Damit beträgt seine Ruheenergie

$$E_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot \left(3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 8,20 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 0,51 \text{ MeV}$$

Durchläuft das Elektron eine Beschleunigungsspannung von 100 kV dann ergibt sich eine Massenzunahme von

$$\Delta m = \frac{E_{\text{kin}}}{c^2} = \frac{100 \text{ keV}}{\left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{\left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2} = 1,8 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

b) Erwärmt man 100 Liter Wasser um 40 K, dann beträgt die Massenzunahme

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{4,19 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ g} \cdot 40 \text{ K}}{\left(3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2} = 1,9 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$$

Der relative Massenzuwachs beträgt als $\frac{\Delta m}{m_e} = 0,20 = 20\%$ e Masse nimmt als

Der Massendefekt

Die Masse m_K eines Atomkerns A_ZK ist kleiner als die Summe m der Massen seiner Bestandteile.

Dieses Phänomen als auch den Wert von $\Delta m = m - m_K$ bezeichnet man als Massendefekt:

Erklärung:

1. Die Existenz von Atomkernen beruht auf der Existenz anziehender Kräfte zwischen den Nukleonen. Man nennt diese Kernkräfte und spricht von der starken Wechselwirkung.
2. Die Reichweite der Kernkräfte ist klein. Bei größeren Abständen wirken abstoßende elektrische Kräfte. Daher sind für die Fusion von Kern hohe Aktivierungsenergien erforderlich.
3. Geraten die Nukleonen in den Bereich der Kernkräfte, dann verrichten diese Arbeit. Potentielle Energie wird in kinetische Energie verwandelt. Diese wird frei.

Der auftretende Energieverlust ΔE ist äquivalent zu einem Massenverlust $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$.

4. Umgekehrt muss man diese Energie wieder aufwenden, um den Kern in seine Bestandteile zu zerlegen.

Man bezeichnet daher diese Energie auch als Bindungsenergie E_B des Kerns.

Beispiel:

$$1 \text{ u} = 1,660538782 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Elektron	$m_e = 5,485799110 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 9,10938188 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Proton	$1,00727646688 \text{ u} = 1,67262158 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Neutron	$1,00866491578 \text{ u} = 1,67492716 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Die Masse des ${}^4_2\text{He}$ -Atoms beträgt $m_{\text{He}} = 4,002603 \text{ u}$.

Damit ergibt sich

$$\Delta m = (2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n + 2 \cdot m_e) - m_{\text{He}} = 0,0304 \text{ u} = 5,044 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \hat{=} 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 28,1 \text{ MeV}$$

Ein Maß für die Stabilität eines Kerns ist die Bindungsenergie pro Nukleon. Sie nimmt von einigen Ausnahmen abgesehen mit wachsender Massenzahl zunächst zu, erreicht bei ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ ein Maximum und nimmt dann mit zunehmender Massenzahl ab.

Bindungsenergien verschiedener Nuklide

Nuklid	Bindungsenergie in MeV	Bindungsenergie pro Nukleon in MeV
H-2	2,23	1,12
He-4	28,29	7,07
Li-7	40,15	5,74
Be-9	58,13	6,46
Fe-56	492,24	8,79
Ag-107	915,23	8,55
I-127	1072,53	8,45
Pb-206	1622,27	7,88
Po-210	1645,16	7,83
U-235	1783,80	7,59
U-238	1801,63	7,57

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass es zwei möglich Form der Energiegewinnung gibt:

a) Spaltung großer Kerne (engl. *fission*).

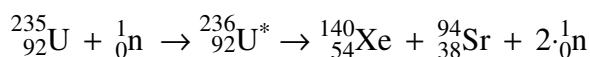
b) Synthese kleiner Kerne (engl. *fusion*)

Kernspaltung und Anwendung

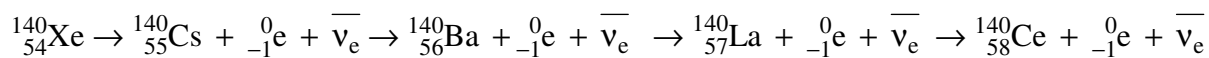
Bestrahlt man $^{235}_{92}\text{U}$ -Atome mit thermischen Neutronen, dann durchdringen diese die Atomhülle und dringen in den Kern ein. Der Kern wird angeregt und spaltet sich in zwei etwa gleich große Bruchstücke

Bei dieser Spaltung des Kerns werden selbst zwei bis drei sehr schnelle Neutronen frei.

Beispiel :



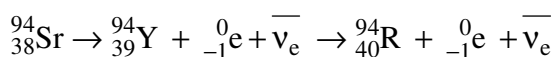
Die Bruchstücke sind nicht stabil und erhöhen ihre Protonenzahl auf Kosten überschüssiger Neutronen durch β -Zerfall.



mit den Halbwertszeiten

t_H	14 s	64 s	13 d	40 h	stabil
-------	------	------	------	------	--------

bzw.



mit den Halbwertszeiten

t_H	75 s	19 min	stabil
-------	------	--------	--------

Da die Bindungsenergie pro Nukleon bei einem mittleren Kern bei ca. 8,5 MeV pro Nukleon liegt und bei einem großen Kern bei 7,6 MeV, werden ca.

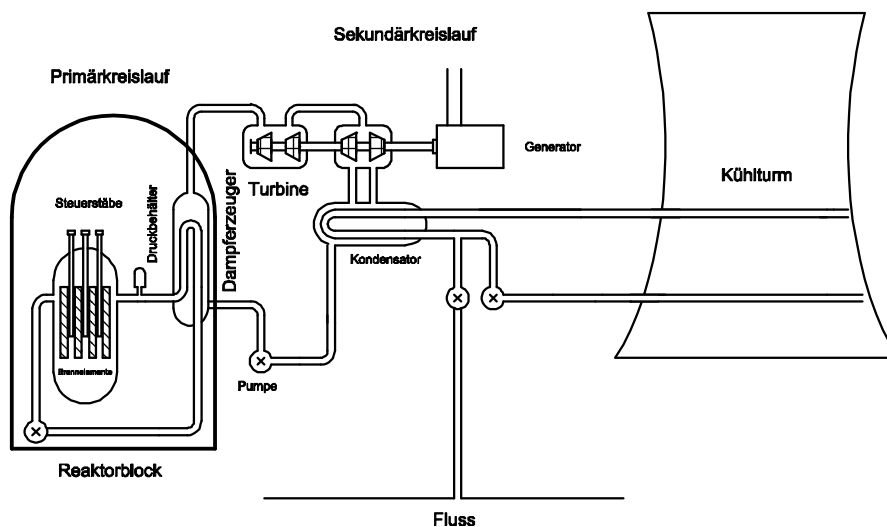
$$2 \cdot 120 \cdot 8,5 \text{ MeV} - 240 \cdot 7,6 \text{ MeV} \approx 200 \text{ MeV}$$

bei der Spaltung in zwei gleiche Bruchstücke frei.

Bremst man die bei der Spaltung frei werdenden Neutronen ab, dann können diese Neutronen selbst wieder einen Kern spalten. Es kommt zu einer sog. **Kettenreaktion**.

Kontrolliert man sie, dann hat man einen Kernreaktor, eine unkontrollierte Reaktion findet in der Atombombe statt.

Aufbau eines Kernreaktors am Beispiel eines Druckwasserreaktors



Die **Brennelemente** enthalten U-235 oder Pu-239. Bei der Spaltung der Kerne wird Energie in Form von kinetischer Energie der Bruchstücke frei.

Das umgebende Wasser wird dadurch erwärmt.

Im Druckwasserreaktor wird es durch hohen Druck am Sieden gehindert und überträgt im Dampferzeuger seine innere Energie auf das Wasser im Sekundärkreislauf, dass dadurch verdampft. Der Dampf wird durch Turbinen geleitet, die dann Generatoren antreiben.

Die **Steuerstäbe** (Bor, Cadmium, Gadolinium) absorbieren Neutronen und verhindern dadurch die ungezügelte Vermehrung der Neutronen.

Eine **Moderators substanz** (Beryllium, leichtes oder schweres Wasser sowie Graphit) dient zur Verlangsamung der bei der Spaltung entstehenden Neutronen. Dies ist erforderlich, weil sich U-235 nur durch langsame sog. **thermische Neutronen** spalten lässt .

Auch Plutonium lässt sich einfacher durch thermische Neutronen spalten.

Wird der Reaktor überhitzt, nimmt die moderierende Eigenschaft des Wassers ab und die Leistung des Reaktors sinkt, da weniger Spaltungen stattfinden. Das erhöht die Reaktorsicherheit. Man spricht von **Eigenstabilität**. Graphit hat diese Eigenschaft nicht.

Atombombe

Die Kettenreaktion in einer kleinen Kugel aus spaltbarem Material erlischt schnell, da viele der entstehenden Neutronen das Material über die Oberfläche der Kugel verlassen.

Vergrößert man den Radius, dann wächst das Volumen stärker als die Oberfläche. Es entstehen mehr Neutronen und ein kleinerer Prozentsatz von Neutronen verlässt das spaltbare Material. Es gibt daher eine kritische Masse für das spaltbare Material, ab der im Schnitt bei jeder Spaltung ein Neutron entsteht, das selbst eine Spaltung verursacht.

Vergrößert man die Masse weiter, dann erhält man eine superkritische Masse, die sich in einer Millionstel Sekunde in ein viele Millionen Grad heißes Plasma verwandelt.

In einer Atombombe werden zwei unterkritische Massen zu einer kritischen Masse vereinigt.

Kernfusion

Sterne und Wasserstoffbomben setzen Energie durch Kernfusion frei. Bei der Verschmelzung zweier leichter Kerne zu einem einzigen entsteht ein Kern mit höherer Bindungsenergie Masse pro Nukleon und es wird damit Energie freigesetzt.

Damit die abstoßende Kraft zwischen den positiv geladenen Kernen überwunden werden kann, bedarf es einer hohen kinetischen Energie der Kerne. Im Innern der Sterne ist dies bei einer Temperatur von ca. 1 Milliarde Kelvin der Fall.

Dabei ergeben sich folgende Kernreaktionen

