

<http://maren.desy.de/hex/holm>

Experimentalphysik I/II für Studierende der Biochemie/Molekularbiologie, Biologie und Zahnmedizin

Transparente zur Vorlesung

WS 2005/06, U. Holm

Einleitung	Elektrizität und Magnetismus
Physikalische Größen und Einheiten	Optik
Mechanik	Atom- und Kernphysik
Wärmelehre	Steuerung und Regelung
Schwingungen und Wellen	

Atom- und Kernphysik

Atom:

- **Elektrisch neutral**, Durchmesser $\approx 10^{-10}$ m
- Besteht aus **positiv geladenem sehr kleinen Kern** ($\approx 10^{-15}$ m) mit Z Protonen (positiv) und N Neutronen (neutral) sowie einer **Hülle** aus Z **Elektronen** (**negativ**).
- Praktisch die gesamte **Masse des Atoms ist im Kern konzentriert** (Atomgewicht $A = N + Z$; die Masse von Protonen und Neutronen ist etwa gleich).
- Nach dem anschaulichen (aber nicht richtigen) **Bohrschen Atommodell** bewegen sich die Elektronen auf gewissen Bahnen, die bestimmten Energiezuständen entsprechen, um den Kern.
 - Analog zur Bewegung der Satelliten um die Erde, wo die Zentrifugalkraft die anziehende Gravitationskraft kompensiert, wirkt hier die anziehende Coulombkraft zwischen positivem Kern und negativem Elektron. Im Gegensatz zu den Satelliten, die in beliebigen Höhen über der Erde positioniert werden können, gibt es für die Elektronen **nur ganz bestimmte stationäre Bahnen**.

- Durch Energiezufuhr („Anregung“: z.B. durch Erwärmung, durch Elektronenstoß oder durch Lichtabsorption, wenn die Frequenz des Lichts mit einer Übergangsfrequenz übereinstimmt) werden Elektronen auf höhere Bahnen gebracht.
I.a. fallen sie spontan zurück und senden dabei elektromagnetische Strahlung (z.B. Licht, Röntgenstrahlung) aus, deren Frequenz f proportional zum Energieunterschied ΔW der Bahnen ist:

$$\Delta W = h \cdot f$$

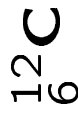
Plancksches Wirkungsquantum: $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

- Sichtbares Licht wird durch Übergänge der äußeren Hüllenelektronen (Valenzelektronen) erzeugt,
- charakteristische Röntgenstrahlung durch Übergänge zwischen den innersten Bahnen (deren Energieunterschiede ΔW größer sind und damit auch die Frequenz f der Strahlung).

Atomkerne (Nuklide) bestehen aus den Nukleonen **Proton** und **Neutron**. Sie werden durch die sehr starken kurzreichweitigen Kernkräfte zusammengehalten (gegen die abstoßenden Coulombkräfte zwischen den positiven Protonen).

Zu einem Element, gekennzeichnet durch die **Kernladungszahl** Z (Z = Zahl der Protonen) gibt es i.a. mehrere **Isotope** mit unterschiedlich vielen Neutronen und damit unterschiedlichen Atomgewichten $A = Z + N$.

Als **Symbol** verwendet man z.B. **für das Kohlenstoff-12-Isotop**



$A = 12$: Atomgewicht, $Z = 6$: Kernladungszahl

Die **Isotope** eines Elements (z.B. ${}^{11}_{6}\text{C}$, ${}^{12}_{6}\text{C}$, ${}^{13}_{6}\text{C}$...) haben die gleiche Elektronenhülle und sind damit **chemisch nicht zu unterscheiden**.

Die Elemente haben i.a. mehrere **stabile** und mehrere **instabile Isotope**. Die instabilen Isotope zerfallen („radioaktiver Zerfall“) von selbst und bilden dann „neue“ Elemente.

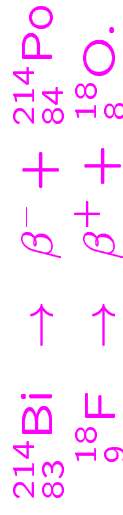
Radioaktivität

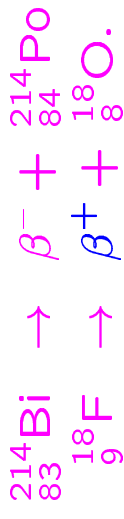
Viele Isotope, natürliche oder künstlich hergestellte, **sind instabil**. Die **Kerne zerfallen mit** einer für das spezielle Isotop **charakteristischen Halbwertszeit** unter Aussendung von radioaktiver Strahlung. Die Strahlungsarten:

α -Strahlung: α (alpha)-Teilchen bestehen aus 2 Protonen und 2 Neutronen (${}^4_2\text{He}$ -Kern). Beim α -Zerfall wird ein neuer Kern gebildet, der eine um 4 verringerte Massenzahl $A = N + Z$ und eine um 2 verringerte Ordnungszahl Z hat.
Beispiel:



β -Strahlung: β (beta)-Strahlung besteht aus Elektronen (β^-) oder Positronen (β^+). Beide stammen aus dem Kern und werden dort durch Umwandlung von Neutronen ($n \rightarrow p + \beta^- + \text{Antineutrino}$) oder Protonen ($p \rightarrow n + \beta^+ + \text{Neutrino}$) gebildet. Nach Emission des β -Teilchens bleibt ein Kern mit einer um 1 erhöhten (bei β^- -Zerfall) bzw. um 1 erniedrigten (bei β^+ -Zerfall) Kernladungszahl zurück. Die Massenzahl ändert sich nicht (Elektronenmasse ist sehr klein). Beispiele:





Die Positronen (β^{+} ; Antimaterie!) reagieren sehr schnell mit in Materie vorhandenen Elektronen und zerstrahlen in zwei diametral auseinanderfliegende γ -Teilchen:



Dieser Effekt wird zur Lokalisierung des Emissionsortes in der **Positronen-Emissions-Tomografie (PET)** genutzt.

γ -Strahlung: Hochenergetische elektromagnetische Wellen. Angeregte Kerne gehen unter Aussendung von γ -Strahlung in einen niedrigeren Energiezustand über (analog den Elektronen in der Atomhülle). Dies passiert häufig nach α - und β -Zerfall. Bei γ -Emission ändert sich weder Kernladungs- noch Massenzahl, d.h. das Isotop bleibt dasselbe.

Exponentielles Zerfallsgesetz:

Der Zerfall der radioaktiven Kerne ist ein statistischer Prozess. Man kann für ein spezielles Isotop eine Wahrscheinlichkeit angeben, mit der innerhalb eines gewissen Zeitintervalls ein Kern zerfällt. Daraus ergibt sich ein **exponentielles Zerfallsgesetz**:

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

N_0 : die zur Zeit $t = 0$ vorhandenen Kerne

$N(t)$: die zur Zeit t noch nicht zerfallenen Kerne

λ : die für das Isotop charakteristische Zerfallskonstante

Halbwertszeit $T_{1/2}$: die Zeit, nach der die Hälfte der Kerne zerfallen ist:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Aktivität A eines radioaktiven Präparats: Zahl der Zerfälle pro Sekunde (A wird mit der Zeit kleiner):

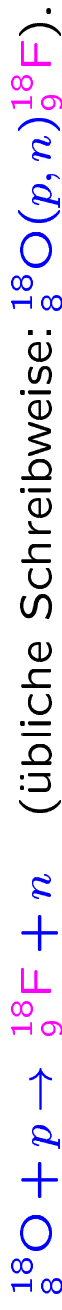
$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = N(t) \cdot \lambda = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t}.$$

SI-Einheit von A : $[A] = 1 \text{ Becquerel (Bq)} = 1 \text{ s}^{-1}$.

Alte Einheit Curie (Ci): $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

Künstliche radioaktive Isotope:

Kernumwandlungen durch Beschuss von Atomkernen mit i.A. Protonen oder Neutronen an Teilchenbeschleunigern und Kernreaktoren, z.B. erzeugt man in PET viel verwendetes radioaktives Isotop „Fluor-18“ am Zyklotronbeschleuniger mit Protonen der Energie 17 MeV über



Das mit ${}^{18}_9\text{F}$ markierte Pharmazeutikum Fludeoxyglukose (FDG) wird den zu untersuchenden Patienten injiziert und von eventuellen Tumoren stärker aufgenommen als das umgebende Gewebe. Der Positronen-Emissions-Tomograf misst die beiden nach dem β^+ -Zerfall des ${}^{18}_9\text{F}$ diametral emittierten γ -Quanten (beide haben eine Energie von 511 keV), rekonstruiert ihren Entstehungsort und lokalisiert damit sehr genau den Tumor.

Ein weiterer Vorteil der künstlich erzeugten radioaktiven Isotope ist i.a. ihre kurze Halbwertszeit (z.B. ${}^{18}_9\text{F}$: $T_{1/2} = 110 \text{ min}$) und die damit verbundene relativ geringe Strahlenbelastung des Organismus.

Röntgenstrahlung (engl. X-rays)

Erzeugung: In evakuierter Röhre setzt Heizstrom Elektronen aus Glühkathode frei. Eine hohe Spannung ($U \approx 100 \text{ kV}$) beschleunigt die Elektronen von der Kathode zur Anode (i.A. aus Wolfram).

Dabei wird potentielle Energie der Elektronen in kinetische Energie umgewandelt:

$$e \cdot U \Rightarrow \frac{1}{2} m v^2.$$

In Anode werden Elektronen innerhalb weniger Atomlagen wieder abgebremst, wobei der größte Teil (99%) der elektrischen Energie in Wärme umgesetzt wird.

Nur etwa 1% wird als Röntgenstrahlung emittiert: Beim „Abbremsen“ werden die Elektronen im Coulombfeld der Kerne des Anodenmaterials abgelenkt (analog einem Kometen im Gravitationsfeld der Sonne).

Die Ablenkung ist mit einer (Zentrifugal-) Beschleunigung verbunden, was dazu führt, dass die Elektronen Röntgenquanten (-strahlung) emittieren (beschleunigte Ladungen strahlen elektromagnetische Wellen ab).

Röntgenbremsspektrum zeigt minimale Wellenlänge $\lambda_{\min}$:

Gibt Elektron seine gesamte Energie $W_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 = e \cdot U$ an **ein** Röntgenquant ab, so hat Röntgenquant die maximal mögliche Energie $W_{\text{max}} = h \cdot f_{\text{max}} = e \cdot U$. Der maximalen Frequenz $f_{\text{max}} = \frac{e \cdot U}{h}$ entspricht (wegen $c = f \cdot \lambda$) die **minimale Wellenlänge**

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\text{max}}} = \frac{c \cdot h}{e \cdot U}.$$

Härtere Röntgenstrahlung:

Erhöhung der Anodenspannung U : $\lambda_{\min}$ wird zu kleineren Wellenlängen verschoben, d.h. die Röntgenstrahlung wird **energiereicher** und damit durchdringungsfähiger. Zudem wird bei Erhöhung von U die Intensität größer.

Wird nur der Heizstrom erhöht, so erhöht sich nur die Intensität der Röntgenstrahlung. Die Form des Röntgenbremsspektrums ändert sich nicht.

Charakteristische Röntgenstrahlung:

Beschleunigte Elektronen stoßen Elektronen aus den innersten Bahnen (der Atomhülle) der Anodenatome heraus. Elektronen aus höheren Schalen „fallen“ in die unteren und „füllen die Lücken“. Dabei wird (analog dem sichtbaren Licht bei Übergängen von Elektronen in den äußeren Schalen) charakteristische Röntgenstrahlung emittiert. Das entsprechende **Linienpektrum ist charakteristisch für das Anodenmaterial**.

Röntgenstrahlung in der Medizin:

Hauptsächlich zur **Diagnose**. Bei Durchleuchtungen wird die Röntgenstrahlung von z.B. Knochen wesentlich stärker absorbiert als vom umgebenden Gewebe. Der Grund dafür ist der hohe Kalzium-Anteil im Knochen.

Großes Z von Ca ($Z = 20$) führt zu wesentlich stärkerer Absorption durch den Photoeffekt im Vergleich zu den Elementen H ($Z = 1$), C ($Z = 6$), O ($Z = 8$) des Gewebes. Als Folge der stärkeren Absorption erscheinen die Knochen als Schatten auf dem Schirm bzw. dem Röntgenfilm.

Röntgenbilder sind also Schatten und keine optischen Abbildungen. Röntgenlinsen, die bessere Bilder möglich machen würden, gibt es nicht, da die Brechzahlen aller Materialien für Röntgenwellenlängen etwa 1 sind.

Wechselwirkungen von Teilchen- und γ -Strahlung mit Materie

- **Geladene Teilchen** (z.B. α - und β -Teilchen) verlieren ihre Energie beim Durchgang durch Materie hauptsächlich durch **Anregung** und **Ionisation** der Moleküle. Sie geben ihre Energie in vielen kleinen Schritten ab.

Reichweite in Gewebe:

α -Teilchen (4 MeV): nur 30 μm
 β -Teilchen (2 MeV): 10 mm

- **Neutronen** wechselwirken mit der Materie über **Kernreaktionen**. Dabei **entstehende geladene Teilchen ionisieren anschließend die Materie**.

Zum Beispiel wird bei der elastischen Streuung von insbesondere schnellen Neutronen an Wasserstoffkernen (Protonen) die n -Energie auf die Protonen übertragen (weil die Stoßpartner dieselbe Masse haben; bei zentralem Stoß). Die Protonen geben ihre Energie dann wieder über Anregung und Ionisation an die Materie ab.

- Energiereiche **Röntgen- und γ -Strahlung** wechselwirken mit Materie über folgende Effekte:

Photoeffekt: Das γ -Quant „stößt“ mit einem Hüllenelektron. Die Energie $W = h \cdot f$ des γ -Quants abzüglich der Ablösearbeit des Elektrons vom Atom wird als kinetische Energie auf das Elektron übertragen.

Compton-Effekt: Streuung des γ -Quants an einem Hüllenelektron. Auf das Elektron wird ein Teil der ursprünglichen Energie ($W = h \cdot f$) als kinetische Energie übertragen. Das γ -Quant wird mit geringerer Energie $W' = h \cdot f' < W$ gestreut.

Paarbildung: Bei einer Energie $W > 2mc^2 \approx 1,02 \text{ MeV}$ des γ -Quants ($m =$ Elektronenmasse) kann aus dem γ -Quant ein Elektron-Positron-Paar entstehen.

Photoeffekt: überwiegt bei **weicher Röntgenstrahlung** und **großem Z** der absorbierenden Materie
Comptoneffekt: überwiegt bei **kleinem Z (biologisches Gewebe)**
Paarbildung: dominiert bei **sehr hohen Energien**.

Die bei diesen Prozessen entstehenden Elektronen und Positronen ionisieren dann wieder die absorbierende Materie.

Exponentielles Schwächungsgesetz:

Alle Prozesse zusammen sorgen für Schwächung der γ -Intensität bei Durchgang durch Materie:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

γ -Anfangsintensität I_0
Materieschichtdicke x
Absorptionskoeffizient μ : abhängig von γ -Energie, Z und Dichte ρ der Materie

Halbwertsdicken:

	Blei	Wasser (gewebeähnlich)
100 keV Röntgenstrahlung	0,1 mm	40 mm
1 MeV γ -Strahlung	10 mm	100 mm

Nachweis von Teilchen- und γ -Strahlung

Genutzt wird i.A. die Eigenschaft der primären bzw. sekundären **geladenen Teilchen**, Materie zu **ionisieren und anzuregen**.

Ionisationskammer (z.B. ein Plattenkondensator oder meistens ein metallisches Rohr mit Draht als Elektrode in der Mitte, Füllgas und dünnem Eintrittsfenster):

Beim Durchgang der Strahlung durch das Gas der Kammer werden Elektron-Ion-Paare gebildet, die durch angelegte Spannung getrennt und als Stromimpuls gemessen werden.

Die Spannung ist so hoch, dass alle gebildeten Ionen und Elektronen zu den Elektroden gelangen. Der Strom ist dann nur noch von der Intensität und Art der einfallenden Strahlung abhängig, man **misst direkt die Ionendosis**.

Geiger-Müller-Zählrohr (GMZ):

Die **Spannung** zwischen dem Draht als positiver Elektrode und dem konzentrischen Zylinder als negativer Elektrode **wird weiter erhöht**. Die bei der primären Ionisation erzeugten Elektronen werden dann so weit beschleunigt, dass sie selbst durch Stöße Gasatome ionisieren können.

Dabei bildet sich **Elektronenlawine** aus. Dieser Vorgang findet im wesentlichen in der Nähe der Drahtelektrode statt, weil dort die elektrische Feldstärke stark ansteigt.

Man hat eine Vervielfachung der ursprünglichen Ladung, der gemessene Strom ist nicht mehr proportional zur Strahlungsintensität.

Das **GMZ ist ein Auslösezähler**, d.h. es misst die Zahl der primären Ionisierungsereignisse, die wiederum proportional zur Intensität der Teilchenstrahlung ist. Zur Dosismessung kann das GMZ nur benutzt werden, wenn Strahlungsart und -energie bekannt sind.

Andere gebräuchliche Nachweisgeräte (Detektoren) für Teilchenstrahlung:

- **Szintillationszähler:** **Szintillatoren** werden beim Durchgang von ionisierender Strahlung **zum Leuchten angeregt**. Die entstehende (geringe) Lichtmenge wird mit empfindlichen **Photomultipliern** in elektrische Impulse umgewandelt.
- **Halbleiterdetektoren:** Arbeiten **wie Zählrohre**, nur ist das Füllgas durch Halbleitermaterialien (**Si, Ge**) ersetzt. Sie sind **sehr empfindlich**, da die für die Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren notwendige Energie sehr viel kleiner ist als bei Gasen.

Röntgen- oder γ -Strahlung werden mit den gleichen Detektoren nachgewiesen wie die geladenen Teilchen. Sie erzeugt über Photo-, Compton- und Paarbildungseffekt **Elektronen**, die dann die Füllgase **ionisieren**.

Neutronen müssen erst **über Kernreaktionen geladene Teilchen erzeugen**. Dazu werden die Detektoren häufig mit Materialien (z.B. ${}^{10}_5\text{B}$) ausgekleidet, die einen großen Wirkungsquerschnitt für Neutronen haben und damit für eine hohe Ausbeute an geladenen Teilchen sorgen (bei ${}^{10}_5\text{B}$ sind das α -Teilchen).

Dosimetrie

Die Dosimetrie beschreibt die Wirkung von Quanten- oder Teilchenstrahlung auf die **bestrahlte Materie (Organismus)**. Besonders geeignet hierfür sind die Größen

$$\text{Energiedosis } D = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{Masse der bestrahlten Materie}}$$

Einheit $[D] = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \text{ Gray (Gy)}$ (alte Einheit 1 Rad (rd) = 0,01 Gy)

sowie die

$$\text{Ionendosis } I = \frac{\text{erzeugte Ladung eines Vorzeichens}}{\text{Masse der bestrahlten Materie}}$$

mit der Einheit $[I] = 1 \frac{\text{C}}{\text{kg}}$ (alte Einheit 1 Röntgen (R) = 0,26 mC/kg).

α -Teilchen und durch Neutronenreaktionen erzeugte Sekundärteilchen (z.B. Protonen) verlieren ihre Energie i.a. auf sehr kurzem Wege, sie erzeugen also „viel Schaden“ in einem kleinen Körpervolumen.

Reparaturmechanismus des Körpers funktioniert nicht mehr so gut, die Strahlung hat eine höhere relative biologische Wirksamkeit RBW.

Dies wird berücksichtigt durch die

$$\text{Äquivalentdosis } H = q \cdot D$$

Einheit: $[H] = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \text{ Sievert (Sv)}$ (alte Einheit 1 rem = 0,01 Sv).

q - Werte:

	q
Röntgen-, γ -Strahlung	1
β -Strahlung	1
α -Strahlung	20
Neutronen	2-10

Die pro Zeiteinheit absorbierte Dosis ist die

$$\text{Äquivalentdosisleistung } \frac{dH}{dt} = \frac{\text{absorbierte Äquivalentdosis}}{\text{Zeiteinheit}}$$

Einheit: $\left[\frac{dH}{dt} \right] = 1 \frac{\text{Sv}}{\text{s}}$.

Strahlenschutz

Ionisierende Strahlung kann Zellen schädigen. Es kann zur Veränderung von Genen kommen, Karzinome und Mutationen können auftreten, die Zellen können inaktiv werden.

Da schon einzelne γ -Quanten oder Teilchen Wirkungen hervorrufen können, sollte man die **Strahlenbelastung des Körpers so gering wie möglich halten**.

Allerdings ist man ständig **natürlicher Strahlung** (z.B. kosmische und terrestrische Strahlung) von im Mittel **2,5 mSv/Jahr** ausgesetzt, gegen die man sich kaum „wehren“ kann.

Dazu kommt noch eine **künstliche Strahlungsdosis** von im Mittel **1,5 mSv/Jahr** (hauptsächlich Röntgendiagnostik).

Beim Umgang mit Strahlungsquellen (z.B. radioaktiven Präparaten) sollte man die **drei Grundsätze des Strahlenschutzes** beherzigen:

- **Abstand** halten: Die Dosis nimmt mit $1/r^2$ ab;
- **Aufenthaltsdauer** kurzhalten: Die Dosis ist proportional zur Expositionszeit;
- **Abschirmung**: Strahlung kann durch Absorption in Materie stark geschwächt werden.