

6. Kapitel

Struktur der Materie

Die Entschlüsselung der Struktur der Materie war Jahrhunderte lang ein Traum der Menschheit: der Stein der Weisen versprach Unsterblichkeit und Reichtum. Als es Mitte des vorigen Jahrhunderts tatsächlich gelang, Atome zu spalten, wurde Energie im Überfluss versprochen, die Menschheit schien einer goldenen Zukunft entgegen zu gehen.

Tschernobyl und Fukushima führten zu einem bösen Erwachen. Dabei sind wir noch mit einem blauen Auge davongekommen: Wäre Tschernobyl wenige Wochen später explodiert, hätte fast die ganze Ernte in Europa vernichtet werden müssen, nicht nur einige Züge mit Milchpulver. Hätte der Wind Mitte März 2011 nicht rechtzeitig gedreht, hätte Tokyo evakuiert werden müssen. Dazu kommen die Schrecken eines nuklearen Schlagabtauschs, zu dem es bis heute Gott sei Dank noch nicht gekommen ist.

Aber für die Medizin sind die Kenntnisse über die Struktur der Materie tatsächlich ein Segen: Die Radiologie und Nuklearmedizin sind aus der Diagnostik und Therapie vieler Krankheiten nicht mehr wegzudenken.

„Atomos“ heißt auf Griechisch unteilbar. Unter Atomen verstand man ursprünglich die kleinsten Bausteine der Materie. Für den Bereich der Chemie können die Atome auch heute als unteilbar angesehen werden, während durch die Fortschritte der Kernphysik Atome bzw. deren Kerne gespalten, verschmolzen und durch Kernreaktionen in Atome eines anderen Elementes verwandelt werden können. Man hat gelernt, dass Atome aus Protonen, Neutronen und Elektronen aufgebaut sind und dass auch die eben genannten Bausteine keineswegs als die kleinsten existierenden Teilchen gelten können.

Atome haben einen Durchmesser in der Größenordnung von einigen Ångström (10^{-10} m) und eine Masse in der Größenordnung von etwa 10^{-23} g (relative Atommasse/Loschmidt-konstante). Die Masse des Atoms ist mit über

99,9% im Atomkern konzentriert, obwohl der Durchmesser des Atomkerns nur ca. ein Hunderttausendstel des Atomdurchmessers beträgt.

6.1 Die Atomschale

Um die Jahrhundertwende hielt man die Atome für kleine, kugelförmige, elastische Gebilde, die gleichmäßig mit Materie gefüllt sind. Diese Annahme steht im Einklang mit den Gasgesetzen, die von elastischen Stößen zwischen den Atomen bzw. Molekülen ausgehen.

Dann zeigte *Lenard*, dass schnelle Elektronen eine ca. 2 μm dicke, d.h. aus ca. 8000 Atomschichten bestehende, Aluminiumfolie durchdringen können. Hieraus lässt sich ableiten, dass das Innere der Atome weitgehend leer sein muss, denn

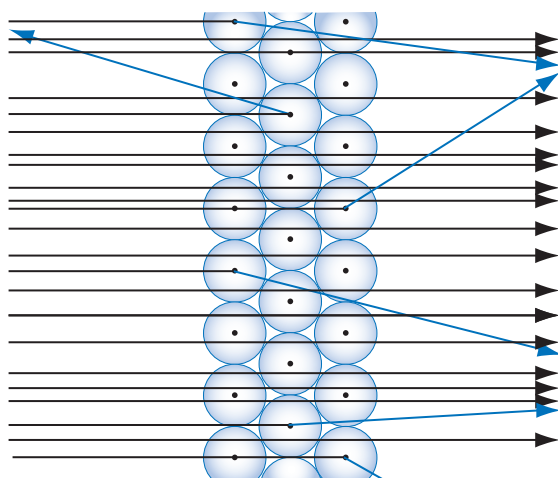


Abbildung 184: Beschuss einer dünnen Metallfolie mit α -Strahlen. Ein Teil der α -Strahlen wird seitlich abgelenkt oder sogar reflektiert. Aus zeichnerischen Gründen sind nur drei Atomschichten dargestellt, obwohl selbst dünne Metallfolien aus mehreren tausend Atomschichten bestehen.

bei einigen Tausend Atomschichten können zwischen den Atomen keine Lücken mehr bestehen. Die Elektronen müssen deshalb die Atome selbst durchdringen.

Rutherford beschoss dünne Metallfolien mit α -Teilchen. α -Teilchen werden beim radioaktiven Zerfall freigesetzt und bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Rutherford stellte fest, dass auch α -Teilchen dünne Metallfolien weitgehend ungestört durchdringen können. Einige α -Teilchen werden von ihrem geradlinigen Weg abgelenkt, verlieren hierbei aber kaum an Geschwindigkeit. Hieraus kann man schließen, dass sie mit Partikeln zusammengestoßen sind, die eine erheblich größere Masse besitzen als sie selber. Diese Partikel sind die Atomkerne, in denen fast die gesamte Masse des Atoms konzentriert ist.

Die Atomkerne sind ebenso wie die α -Teilchen positiv geladen. Beim Zusammenstoß sind deshalb coulombsche Abstoßungskräfte wirksam. Aus den beobachteten Abstoßungswinkeln kann man auf die Größe der coulombschen Kräfte

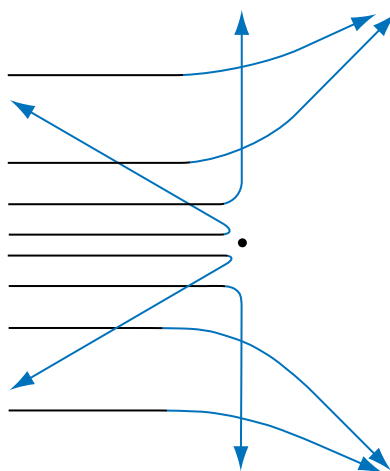


Abbildung 185: Wechselwirkung zwischen α -Strahlen und Atomkern. Je geringer der Abstand zwischen der Flugbahn der α -Strahlen und dem Atomkern, desto größer der Ablenkungswinkel. Die obige Abbildung kann als stark vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 184 verstanden werden.

schließen. Aus der Größe der coulombschen Kräfte wiederum kann man mithilfe des coulombschen Gesetzes errechnen, dass sich die α -Teilchen den Kernen der Metallatome bis auf weniger als 10^{-14} m nähern. Da die Atome voneinander einen Abstand von etwa $2,5 \cdot 10^{-10}$ m haben, folgt daraus, dass der Kerndurchmesser deutlich weniger als ein Zehntausendstel des Atomdurchmessers beträgt. Wenn der Atomkern den Durchmesser eines Stecknadelkopfes (ca. 1 mm) hätte, hätte das gesamte Atom demnach eine Größe von ca. 30 bis 100 Metern.

Das 1911 aufgestellte rutherfordsche Atommodell besagt, dass fast die gesamte Masse des Atoms im positiv geladenen Atomkern konzentriert ist, während die Elektronen in großem Abstand um den Kern kreisen. Zwischen dem positiven Kern und den negativen Elektronen bestehen coulombsche Anziehungskräfte. Andererseits entsteht bei der Kreisbewegung der Elektronen um den Kern eine Zentrifugalkraft. Damit die Elektronen auf ihrer Kreisbahn bleiben und nicht in den Kern stürzen oder nach

außen „wegzentrifugiert“ werden, muss die Bahngeschwindigkeit der Elektronen so bemessen sein, dass sich Fliehkraft und Anziehungskraft gerade die Waage halten. Dasselbe gilt übrigens auch für die Geschwindigkeit der um die Erde kreisenden Satelliten oder des Mondes.

Das Elektron ist in seiner Kreisbahn einer ständigen Richtungsänderung unterworfen. Es erzeugt damit ein wechselndes elektrisches Feld und müsste nach den im Bereich normaler Dimensionen geltenden Gesetzen elektromagnetische Wellen abstrahlen und kontinuierlich an Energie verlieren, dadurch langsamer werden und in den Kern stürzen.

Nils Bohr hat 1913 einen Ausweg aus diesem Widerspruch gewiesen, indem er **zwei Postulate** aufstellte:

- 1) Es gibt bestimmte Bahnen, auf denen die Elektronen ohne Energieverlust um den Kern kreisen können. Diese Bahnen haben unterschiedliche Energieniveaus.
- 2) Beim Sprung von einer Bahn auf eine niedrigere wird die Energiedifferenz durch die Aussendung einer elektromagnetischen Welle mit der Frequenz ν (griech. ν) abgegeben:

$$\Delta E = h \nu$$

Dies bedeutet:

- Die Abgabe der Strahlungsenergie erfolgt unstetig, d. h. „portionsweise“, wobei
- die Menge der in einer „Portion“ abgegebenen Strahlungsenergie ΔE der Frequenz ν der Strahlung proportional ist. Der Proportionalitätsfaktor ist eine allgemeine Naturkonstante und heißt **plancksches Wirkungsquantum h** :

$$\Delta E = h \nu \quad h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Nms}$$

Man bezeichnet deshalb eine elektromagnetische Welle hoher Frequenz als **Lichtquant** und eine Welle noch höherer Frequenz als **γ -Quant**.

Wie im Abschnitt 7.4 noch näher erläutert wird, besteht kein prinzipieller Unterschied zwischen Wärmestrahlung, Lichtstrahlen, ultraviolettem Licht, Röntgenstrahlung und radioaktiver γ -Strahlung. In allen Fällen handelt es sich um elektromagnetische Wellen, die sich allerdings durch ihre Wellenlänge, ihre Frequenz und ihren Energiegehalt unterscheiden und dementsprechend ganz unterschiedlich mit der bestrahlten Materie in Wechselwirkung treten, genauso, wie z. B. eine Schneeflocke, ein Schneeball und eine Lawine im Prinzip auch dasselbe sind, aber aus quantitativen Gründen unterschiedliche Wirkungen hervorrufen können.

6.1.1 Das bohrsche Modell des Wasserstoffatoms

Das Wasserstoffatom ist das am einfachsten aufgebaute Atom, denn der Kern besteht nur aus einem Proton und die Schale nur aus einem Elektron. Bohr hat in seinem Postulat gefordert, dass die erlaubten Bahnen, die das Elektron um den Atomkern beschreibt, folgender Bedingung gehorchen:

$$2 \pi r m_e v = n h \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Hierbei ist r der Bahnradius, m_e die Ruhemasse und v die Geschwindigkeit des Elektrons. Die Hauptquantenzahl n gibt die verschiedenen möglichen Bahnen an.

Zusätzlich muss gelten, dass die Zentrifugalkraft gleich der coulombschen Anziehungskraft zwischen Kern und Elektron ist. Hieraus lassen sich die Bahnradien für die verschiedenen Hauptquantenzahlen errechnen. Aus der Kenntnis von Bahnradius und Geschwindigkeit wiederum lässt sich die Gesamtenergie des Elektrons als Summe seiner kinetischen und potenziellen Energie für die verschiedenen Bahnen angeben.

Das Elektron befindet sich norma-

lerweise im Grundzustand, d. h. in der Bahn mit der niedrigsten Energie. **Unter Energieaufnahme kann das Elektron auf eine Bahn mit höherem Energieniveau gehoben werden.** Dieser Vorgang heißt **Anregung des Atoms.** Wenn das Elektron von der höheren, d. h. energiereicheren Bahn wieder auf seine normale Bahn zurückfällt, sendet es eine elektromagnetische Welle aus, deren Frequenz und Energie umso höher ist, je größer die Energiedifferenz zwischen den Bahnen ist.

Atome können angeregt werden durch

- **Erwärmung:** Hierauf beruhen z. B. das Leuchten glühend heißer Körper und die Wärmestrahlung.
- **Zusammenstöße mit Elektronen:** z. B. charakteristische Röntgenstrahlung (s. S. 171).
- **Einfang eines Lichtquants:** Fluoreszenz.

Wasserstoffgas wird im Lichtbogen zum Leuchten gebracht, weil die Elektronen infolge der heftigen Zusammenstöße der Atome auf höhere Bahnen gehoben werden, aus denen sie unter Aussendung

eines Lichtquants $h\nu$ spontan auf tiefere Bahnen zurückfallen. Die hierbei beobachteten Frequenzen ν entsprechen genau den Energiedifferenzen $h\nu$ zwischen den von Bohr postulierten Bahnen. Hierin liegt ein überzeugender Beweis für die Brauchbarkeit der bohrschen Postulate. Das nachfolgende Schema gibt die verschiedenen Bahnradien des Elektrons im Wasserstoffatom mit den betreffenden Hauptquantenzahlen wieder.

Die Pfeile deuten die Übergänge des Elektrons zwischen den Bahnen an. Je nachdem, auf welche Bahn das Elektron zurückfällt, hat man die vom Wasserstoff ausgesendeten Spektrallinien (vgl. 7.1) zu verschiedenen Serien zusammengefasst, der Lyman-Serie bei der Rückkehr auf den Grundzustand, der Balmer-Serie beim Sprung auf die Bahn mit der Hauptquantenzahl $n = 2$ usw.

Wenn das Wasserstoffatom durch den Einfang eines bestimmten Quantum elektromagnetischer Energie, eines sog. Lichtquants, angeregt wird, wird dieses Lichtquant absorbiert. Zur Anregung eignen sich nur solche Lichtquanten, deren Energie $h\nu$ genau der Energiedifferenz zwischen verschiedenen

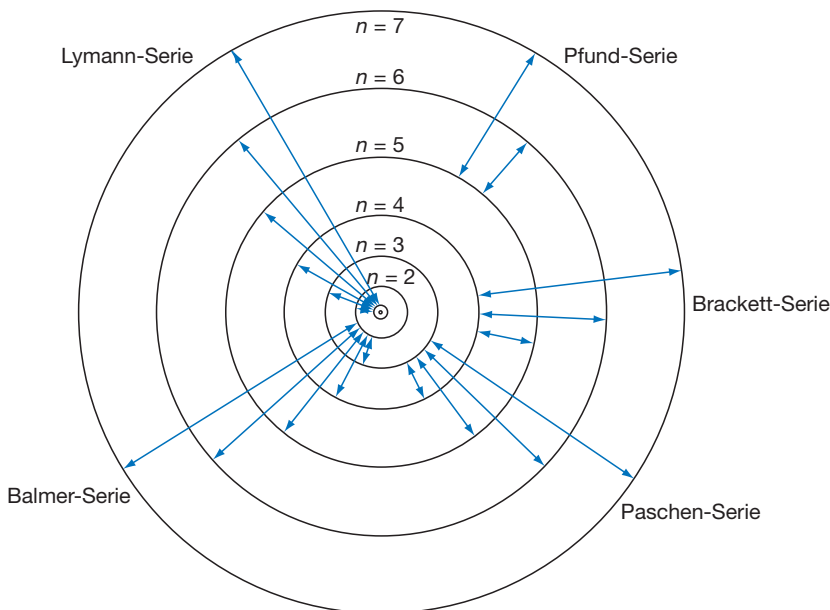


Abbildung 186: Elektronenbahnen des Wasserstoffatoms unter Angabe der Hauptquantenzahl n . Die Spektrallinien der Lyman-Serie werden beim Übergang von bzw. auf die Bahn mit der Hauptquantenzahl $n = 1$ absorbiert bzw. ausgestrahlt. Analoges gilt für die Spektrallinien der Balmer-, Paschen- usw. Serie.

Bahnen entspricht. Es handelt sich hierbei um genau dieselben Frequenzen ν , die von angeregten Atomen auch ausgesendet werden. Dabei kann Wasserstoff bei normaler Temperatur nur Linien der Lyman-Serie absorbieren, da die Atome im Grundzustand vorliegen. Bei höheren Temperaturen liegt ein gewisser Anteil der Atome in angeregten Zuständen vor, sodass diese Atome dann auch die Spektrallinien der Balmer-Serie, Paschen-Serie usw. absorbieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Emissionsspektrum des Wasserstoffs gleich dem Absorptionsspektrum ist. Es handelt sich um ein Linienspektrum, in dem die Frequenzen ν der auftretenden Linien den Energiedifferenzen $h\nu$ der von Bohr postulierten Elektronenbahnen entsprechen.

6.1.2 Allgemeiner Aufbau der Atomschale

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem Aufbau der Atomhüllen, gehört in das Grenzgebiet zur Chemie und besitzt für den Bereich Physik nur geringe Prüfungsrelevanz.

Während das bohrsche Atommodell den Aufbau des Wasserstoffatoms in überzeugender Weise deuten kann, liegen die Verhältnisse bei anderen Atomen komplizierter, denn es sind stets mehrere Elektronen in der Atomhülle vorhanden, die sich auch untereinander beeinflussen. Die genaue Beschreibung der Vorgänge in anderen Atomen entzieht sich einem einfachen, anschaulichen Modell und ist nur durch ein abstraktes mathematisches Schema möglich, durch die sog. Wellen- oder Quantenmechanik.

In der Quantenmechanik wird der Zustand eines Elektrons durch vier Quantenzahlen beschrieben:

- **Die Hauptquantenzahl n**
Gemäß der Hauptquantenzahl n lässt sich die Atomhülle in **verschiedene Schalen** unterteilen. Für $n = 1$ erhalten wir die K-Schale, für $n = 2$ die L-, für $n = 3$ die M-, für $n = 4$ die N-Schale usw.
- **Die Nebenquantenzahl l**
Die einzelnen Schalen bestehen aus **verschiedenen Orbitalen, die die räumliche Anordnung der Elektronen in der Schale beschreiben**. Das *s-Orbital* entspricht der Nebenquantenzahl $l = 0$ und ist kugelförmig, das *p-Orbital* entspricht der Nebenquantenzahl $l = 1$ und ist hantelförmig, das *d-Orbital* gilt für die Nebenquantenzahl $l = 2$ und ist rosettenförmig. Welche Werte die Nebenquantenzahl annehmen kann, hängt von der Hauptquantenzahl n ab, wobei l von 0 bis $n-1$ alle ganzzahligen Werte annehmen kann. Bei $n = 2$ kann l demnach die Werte 0 und 1 annehmen, d.h. die L-Schale besitzt ein s- und ein p-Orbital.
- **Die Magnetquantenzahl m**
Die Magnetquantenzahl m kennzeichnet **die Orientierung der Elektronenbahnen beim Anlegen eines homogenen magnetischen Feldes** und kann alle ganzzahligen Werte von $-l$ über 0 bis $+l$ annehmen.
- **Die Spinquantenzahl s**
Die Spinquantenzahl bezieht sich auf die **Eigendrehung des Elektrons um sich selber** und kann die Werte $+\frac{1}{2}$ und $-\frac{1}{2}$ annehmen.

Die eben gegebene Erläuterung der Quantenzahlen geht der besseren Anschaulichkeit halber davon aus, dass die Elektronen kleine Korpuskeln sind, die sich auf bestimmten Bahnen bewegen. Diese Anschauung ist im wellenmechanischen Sinne unzutreffend, denn **in**

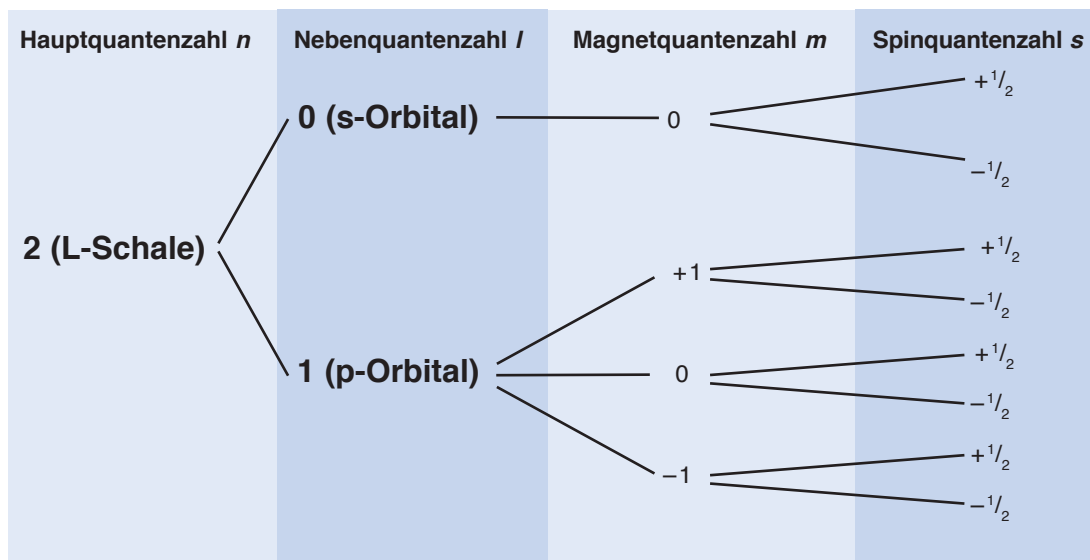


Abbildung 187: Haupt-, Neben-, Magnet- und Spinquantenzahl der acht Elektronen der L-Schale.

der Wellenmechanik ist das Elektron ein räumlich ausgedehntes Gebilde (im Sinne einer Elektronenwolke), dessen Gestalt (im Sinne der Orbitalform) seinem Energieinhalt entspricht.

Die oben zitierten „Bahnen“, in denen das Elektron „kreist“, sind demnach nur die Orte, an denen die Elektronenwolke eine besonders hohe Dichte hat. Die Elektronenwolke ist, ebenso wie eine stehende Welle, als statisch zu betrachten und gibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit an.

Nach dem Pauli-Prinzip müssen sich zwei Elektronen in der Atomhülle in mindestens einer der vier Quantenzahlen unterscheiden. In der K-Schale ist demnach für zwei Elektronen Platz mit $n = 1$ und $s = -1/2$ sowie $n = 1$ und $s = +1/2$.

In der L-Schale können acht Elektronen aufgenommen werden. Ihre Quantenzahlen sind in Abbildung 187 dargestellt.

Edelgaskonfiguration

Der energetisch günstigste Zustand liegt vor, wenn das s- und das p-Orbital der jeweils äußersten Schale mit Elektronen

vollständig besetzt ist. Man spricht dann von der Edelgaskonfiguration oder der Edelgasschale.

Fehlen einem Element zur Komplettierung der entsprechenden Edelgasschale nur ein oder zwei Elektronen, so ist es bestrebt, diese Lücken durch chemische Reaktionen mit anderen Atomen zu füllen, indem es Elektronen aufnimmt (Gruppe VI und VII des Periodensystems). Es ist elektronegativer und wirkt als Oxidationsmittel.

Hat ein Element über die letzte komplette Edelgasschale hinaus einige Elektronen zu viel, so gibt es diese Elektronen bei chemischen Reaktionen ab (Gruppe I und II des Periodensystems, Metalle).

Die in der äußersten Schale (Valenzschale) vorhandenen Elektronen heißen Valenzelektronen. Die Zahl der Valenzelektronen bestimmt die chemische Wertigkeit eines Elementes und ist für die Einordnung in die Gruppe des Periodensystems maßgeblich.

An der Periode, in der ein Element im Periodensystem steht, lässt sich ablesen, welches die äußerste Schale ist (K, L, M, N).

Chemische Bindungen

Wenn zwei Atome eine chemische Bindung eingehen, werden einige Elektronen in der Weise „verschoben“ bzw. „umverteilt“, dass die beiden beteiligten Atome ihre Edelgaskonfiguration erreichen.

Sofern die **Elektronegativität** der in einem Molekül **gebundenen Atome ungefähr gleich** ist, umkreisen die Elektronen, die die chemische Bindung vermitteln, die gebundenen Atome gleichmäßig und man spricht von **homöopolarer** bzw. **kovalenter** bzw. **Atombindung**. Beispiele: O_2 , Cl_2 , Kohlenstoffketten, Makromoleküle wie Proteine, PVC.

Wenn die gebundenen Atome eine **stark unterschiedliche Elektronegativität** besitzen, verbleiben die betreffenden Elektronen beim „Partner-Atom“ und es liegen zwei nach außen elektrisch geladene Atome bzw. Ionen vor. Diese Ionen werden von elektrischen Anziehungskräften zusammengehalten. Man spricht hier von **Ionenbindung** bzw. **ionaler Bindung** bzw. **heteropolarer Bindung**. Diese Art der Bindung liegt bei Salzen vor.

6.2 Der Atomkern

Der Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen. Beide Kernbausteine haben ungefähr dieselbe Masse, die fast 2000-mal so groß wie die Ruhemasse eines Elektrons ist. Deshalb ist die Masse eines Atoms zu mehr als 99,9% im Kern lokalisiert. Protonen und Neutronen werden mit einem zusammenfassenden Begriff als Nukleonen bezeichnet. **Die Zahl der im Kern vorhandenen Nukleonen ist die Massenzahl des Atoms.**

Protonen

Die Zahl der Protonen heißt **Kernladungs- oder Ordnungszahl**.

- Man spricht deshalb von Kernladungszahl, weil die Ladung des positiven Atomkerns proportional zur Anzahl der Protonen ist.
- Von der Ordnungszahl spricht man aus folgendem Grund: Weil die Zahl der Protonen gleich der Zahl der Elektronen in der Hülle ist, bestimmt die Ordnungszahl den Aufbau der Atomschale. Hiermit werden die chemischen Eigenschaften, die Zugehörigkeit zu einem bestimmten Element und die Einordnung in das Periodensystem festgelegt.

Neutronen

Die Anwesenheit der elektrisch neutralen Neutronen ist für den inneren Zusammenhalt des Atomkerns notwendig. Man kann sich die Neutronen als „Kitt“ vorstellen: Der Kern zerfällt, wenn zu viel oder zu wenig Kitt vorhanden ist. Atomkerne sind nur stabil, wenn ein bestimmtes Mischungsverhältnis zwischen Protonen und Neutronen eingehalten wird.

Viele Elemente kommen in verschiedenen Varianten vor, die sich durch die Zahl der Neutronen unterscheiden. **Atome mit unterschiedlicher Neutronen-, aber gleicher Ordnungszahl heißen Isotope**, weil sie aufgrund ihrer gleichen chemischen Eigenschaften zum selben Element gehören und am selben Platz im Periodensystem stehen (gr. *isos*: gleich; *topos*: Ort, Stelle). Ein Kern gegebener Ordnungs- und Massenzahl heißt **Nuklid**. Von den gut hundert bekannten Elementen sind etwa 90 natürlichen Ursprungs und 20 durch künstliche Kernumwandlungen im Labor erzeugt. Es sind etwa 2500 verschiedene Nuklide bekannt, die meisten davon sind instabil.

Der **Massenspektrograf** ist ein Gerät, mit dem man die verschiedenen Isotope eines Elementes unterscheiden kann: Die Atome werden ionisiert und in Richtung einer Fotoplatte beschleunigt. Auf dem Weg

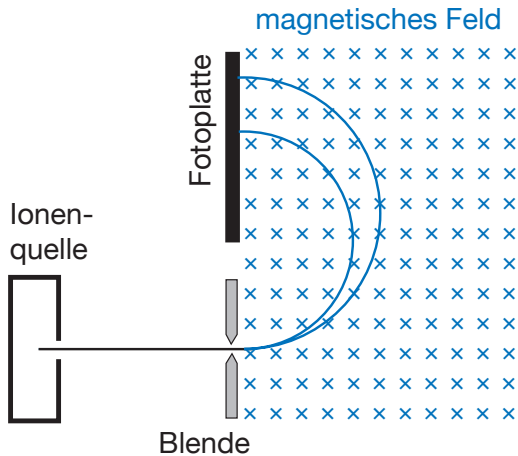


Abbildung 188: Funktionsprinzip des Massenspektrographen. Die oben auf die Fotoplatte treffenden Isotope weisen eine größere Massenzahl auf als die unten auftreffenden.

zur Fotoplatte werden sie je nach Bauart des Gerätes durch ein elektrisches und/oder ein magnetisches Feld abgelenkt. Weil die Isotope in gleicher Weise ionisiert sind, wirkt die elektrische (coulombsche) und magnetische (Lorentz-)Kraft in gleicher Weise auf alle Atome ein. Die Isotope mit größerer Massenzahl setzen den ablenkenden Kräften eine größere Trägheit entgegen und treffen deshalb an einer anderen Stelle auf die Fotoplatte auf.

Aus solchen Messungen hat sich ergeben, dass mehr als zwei Drittel der natürlich vorkommenden Elemente Gemische aus verschiedenen Isotopen sind. Hierbei ist das Mischungsverhältnis auf der Erde weitgehend konstant. So besteht z.B. der Sauerstoff aus drei Isotopen mit 8, 9 und 10 Neutronen, und zwar

zu 99,7575 % aus $^{16}_8\text{O}$,

zu 0,0392 % aus $^{17}_8\text{O}$

und zu 0,2033 % aus $^{18}_8\text{O}$.

Der linke untere Index gibt die Ordnungszahl (bei Sauerstoff 8) und der linke obere Index die Massenzahl an. Die Zahl der Neutronen ergibt sich aus der Differenz aus Massen- und Ordnungszahl.

Kernkräfte

Durch massenspektrografische Untersuchungen kann man die Massen der verschiedenen Atome sehr genau bestimmen. Ein Vergleich der Atommassen mit den ebenfalls bekannten Massen eines einzelnen Protons, Neutrons und Elektrons zeigt, dass Atome stets eine etwas geringere Masse als ihre isolierten Bausteine haben:

Beim Zusammenbau von Protonen und Neutronen zum Atomkern entsteht ein Massendefizit.

Die Tatsache, dass die Atomkerne trotz der coulombschen Abstoßungskräfte zwischen den Protonen stabil sind, zeigt bereits, dass es starke Kräfte geben muss, die für den Zusammenhalt des Kerns sorgen. Aufgrund dieser Kernkräfte wird bei der Verschmelzung der Nukleonen zum Atomkern Energie frei, die an die Umgebung abgegeben wird. Gemäß der einsteinschen Äquivalenz von Masse und Energie

$$E = m c^2$$

(c = Lichtgeschwindigkeit)

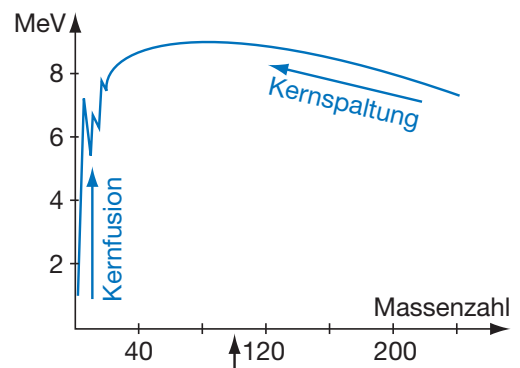


Abbildung 189: Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl. Beispielsweise liegt bei einem Atom mit hundert Nukleonen eine Bindungsenergie von ca. $100 \cdot 8,5 \text{ MeV} = 850 \text{ MeV}$ vor (kleiner Pfeil unterhalb der x-Achse). Die beiden großen Pfeile deuten an, dass bei der Fusion sehr kleiner oder bei der Spaltung sehr großer Kerne Energie gewonnen werden kann.

bedingt diese abgegebene Energie einen Massenverlust. Wir können deshalb aus dem Massendefizit errechnen, wie hoch die Bindungsenergie für die verschiedenen Atome ist. In Abbildung 189 ist die Höhe der Bindungsenergie pro Nukleon gegen die Massenzahl der verschiedenen Atome aufgetragen. Dieses Diagramm veranschaulicht mehrere Tatsachen, die für den Bereich der Kernphysik von fundamentaler Bedeutung sind:

- 1) Zunächst fällt die enorme Höhe der Bindungsenergie auf: Ein Kern mit 100 Nukleonen ist unter der Freisetzung einer Bindungsenergie von ca. 850 MeV aus isolierten Nukleonen entstanden. 1 eV (Elektronenvolt) ist gleich $1,6 \cdot 10^{-19}$ J, wie auf Seite 170 erläutert wird. Entsprechend gilt: $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ J. Bei der – hypothetischen – Entstehung von einem Mol (100 g) eines Elementes mit der Massenzahl 100 aus isolierten Protonen und Neutronen würde demnach folgende Energie E freigesetzt werden:

$$E = \text{Loschmidt-Zahl} \cdot \text{Energie pro Atom}$$

$$\begin{aligned} E &= 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 850 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \\ &= 8,19 \cdot 10^{13} \text{ J} \end{aligned}$$

Dies entspricht etwa der bei der Verbrennung von 3000 Tonnen Steinkohle frei werdenden Wärmemenge.

- 2) Bei niedrigen Massenzahlen ändert sich die Bindungsenergie mit Zunahme der Nukleonenzahl sprunghaft. Dies deutet auf komplizierte Gesetzmäßigkeiten der Bindungsverhältnisse im Kern hin, auf die wir im Rahmen dieser kurzen Einführung nicht weiter eingehen wollen. Hervorgehoben sei lediglich, dass Kerne mit gerader Protonenzahl und gerader Neutronenzahl eine besonders hohe Bindungsenergie haben, so z. B. der Heliumkern mit zwei Protonen und zwei Neutronen.

- 3) Aus dem Verlauf der Kurve wird deutlich, dass die Bindungsenergie pro Nukleon stark variiert, wobei die höchsten Werte bei Massenzahlen von etwa 40 bis 100 auftreten:

Beim Übergang von Kernen mit niedriger Bindungsenergie zu Kernen mit hoher Bindungsenergie je Nukleon wird Energie frei.

Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten, die Kernfusion und die Kernspaltung.

Kernfusion

Kernfusion ist die Verschmelzung leichter Atomkerne miteinander, z.B. die Verschmelzung von Wasserstoffkernen zum Heliumkern. Aus diesem Prozess gewinnt die Sonne ihre Energie. Kerne fusionieren nur bei extrem hoher Temperatur und extrem hohem Druck. Technisch konnten diese Bedingungen bisher nur als Wasserstoffbombe realisiert werden, wo als Zünder zunächst eine normale Atombombe explodiert, die die notwendige Hitze erzeugt, damit die Kernfusion in Gang kommt.

Alle Versuche, einen Fusionsreaktor zur Energiegewinnung zu bauen, scheiterten bisher am Problem, die notwendigen Temperaturen von mehreren Millionen Grad zu erzeugen und für eine gewisse Mindestzeit aufrechtzuerhalten. Seit den 50er Jahren wird weltweit mit verschiedenen Ansätzen und Milliardensummen am Fusionsreaktor geforscht. Ein technischer Durchbruch zeichnet sich bisher noch nicht ab.

Ein solcher Fusionsreaktor würde zwar nur mit einer kleinen Menge Wasserstoff als Brennstoff auskommen, aufgrund der auch dort stattfindenden Kernreaktionen ist jedoch mit der Entstehung zahlreicher künstlicher Nuklide zu rechnen, sodass auch hier radioaktiver Abfall zu erwarten ist.

Kernspaltung

Bei der Kernspaltung werden schwere Atomkerne wie z. B. Uran 235 oder Plutonium 239 mit Neutronen beschossen und zerfallen dadurch in zwei Kerne kleinerer Massenzahl. Die Bindungsenergie der Ausgangskerne beträgt etwa 7,6 MeV je Nukleon, die der entstehenden Spaltprodukte 8,4 MeV, sodass für jedes gespaltene Atom eine Energie von ca. 200 MeV frei wird. Hierauf beruhen Atombomben und Kernreaktoren (Einzelheiten s.S. 166 ff.).

6.3 Radioaktivität

Unter Radioaktivität versteht man den **spontanen Zerfall instabiler Atomkerne**. Beim Zerfall wird Energie frei, die in Form sog. radioaktiver Strahlung nach außen abgegeben wird. Hierauf beruht die Bezeichnung „Radio-aktivität“, denn „radio“ heißt im Lateinischen „ich strahle“.

Man unterscheidet zwischen der natürlichen und der künstlichen Radioaktivität: Die zuerst genannte Form geht von einigen in der Natur vorkommenden Atomen aus, während die künstliche Radioaktivität beim Zerfall von Nukliden auftritt, die im Labor oder Kernkraftwerk erzeugt wurden.

6.3.1 Natürliche Radioaktivität

Zerfallsarten

Die natürlich vorkommenden radioaktiven Isotope zerfallen unter Aussendung von α - oder β -Teilchen und γ -Quanten:

Das α -Teilchen ist ein Heliumkern und besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Bei seiner Aussendung verringert sich die Kernladungszahl um 2 und die Massenzahl um 4. Das radioaktive Atom

wird deshalb in das Atom eines anderen Elementes verwandelt.

Das β -Teilchen ist ein Elektron. Es entsteht, indem sich ein Neutron in ein Proton verwandelt, wobei die Ordnungszahl um 1 zunimmt, und die Massenzahl konstant bleibt. Auch hierbei entsteht ein neues Element.

Ebenso wie die Atomschale hat auch der Atomkern eine innere Struktur und kann in verschiedenen Energieniveaus, d. h. angeregten Zuständen vorliegen. Durch eine α - oder β -Emission gerät der Kern meistens in einen angeregten Zustand, aus dem er unter Aussendung eines **γ -Quants** in den Grundzustand (Zustand geringster Energie) zurückfällt.

Eine weitere Zerfallsart, die z. B. beim natürlich vorkommenden ^{40}K eine Rolle spielt, ist der **Elektroneneinfang**, der mit der Aussendung von **Röntgenstrahlung** verbunden ist (s.S. 171). Außerdem gibt es bei künstlich erzeugten Kernen den Zerfall durch Aussendung eines **β^+ -Teilchens**, eines sog. **Positrons** (s.S. 166 und 174).

Man kann α -, β - und γ -Strahlung voneinander trennen, indem man sie durch ein Magnetfeld treten lässt: Während die γ -Strahlung unbeeinflusst bleibt, werden die α - und β -Teilchen aufgrund ihrer entgegengesetzten Ladung in verschiedene Richtungen abgelenkt.

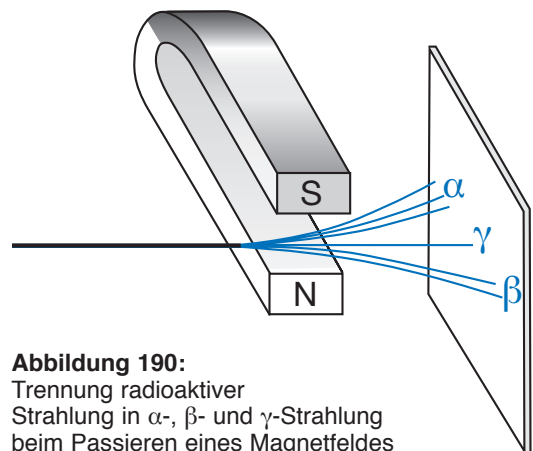


Abbildung 190:
Trennung radioaktiver Strahlung in α -, β - und γ -Strahlung beim Passieren eines Magnetfeldes

Die Energie der α - und β -Teilchen bzw. γ -Quanten liegt in der Größenordnung von Megaelektronenvolt (vgl. 6.4.1). Die Nachweismöglichkeiten der radioaktiven Strahlung werden im Abschnitt 6.5 Dosimetrie ausführlich besprochen.

Zerfallsreihe

Häufig ist der beim radioaktiven Zerfall entstehende Kern instabil und macht einen erneuten radioaktiven Zerfall durch, wobei wiederum ein instabiles Isotop entsteht. Die Reihe von Zwischenstationen, die ein radioaktives Atom durchlaufen muss, ehe es sich in einen stabilen Kern verwandelt, heißt Zerfallsreihe.

Die bedeutsamsten in der Natur vorkommenden radioaktiven Isotope lassen sich in eine der vier Zerfallsreihen einordnen, die in Abbildung 191 dargestellt sind. Die

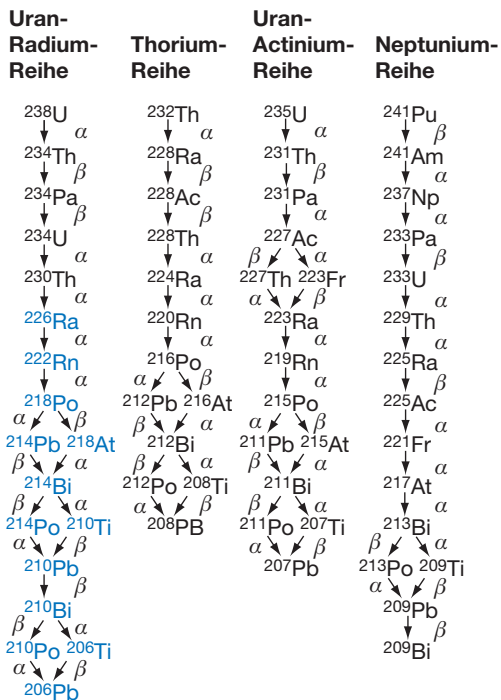


Abbildung 191: Vier Zerfallsreihen unter Angabe der als Zwischenstufen auftretenden Isotope und ihrer jeweiligen Zerfallsart durch Aussendung von α - oder β -Strahlung. Die blau markierten Isotope sind Bestandteil der Radiumeinlage.

Massenzahlen innerhalb einer Zerfallsreihe unterscheiden sich nicht oder durch ein Vielfaches von 4, denn bei der Aussendung eines β -Teilchens tritt keine Änderung der Massenzahl ein, während beim α -Zerfall die Massenzahl um 4 gesenkt wird.

Weil die meisten im Labor verwendeten radioaktiven Präparate aus einer der Zerfallsreihen stammen, geht von den Präparaten α - und β -Strahlung aus, obwohl ein reines Isotop meistens nur auf eine Art, also durch Aussendung von α - oder β -Teilchen zerfällt.

Es gibt aber auch radioaktive Isotope, die nicht in eine Zerfallsreihe einzuordnen sind, weil sie zu stabilen Atomen zerfallen, z. B. ^{40}K oder ^{14}C .

Brachytherapie

Seit über 100 Jahren verwendet man bei der Behandlung von Cervixkarzinomen Radiumeinlagen, die in einer Metallummantelung Radium und seine Zerfallsprodukte enthalten (siehe blau gekennzeichnete Isotope der Uran-Radium-Reihe). Zu den Zerfallsprodukten gehört das Edelgas Radon ^{222}Rn , welches mit einer Halbwertszeit von 3,8 Tagen zerfällt. Dieses Gas darf nicht aus der Radiumeinlage entweichen, weil es aufgrund seiner α -Strahlung schwere Schäden im Körper anrichten würde. Die Metallhülle absorbiert die α - und β -Teilchen, sodass nur die gleichzeitig emittierten γ -Quanten entweichen können und die Zerstörung des Krebsgewebes bewirken. Diese Methode hat gegenüber einer von außen durchgeführten γ -Bestrahlung den Vorteil, dass die Haut geschont wird.

In den letzten Jahrzehnten wurde diese Methode unter dem Namen *Brachytherapie* (griech. kurz, nah) weiterentwickelt und wird jetzt auch bei zahlreichen anderen Tumoren eingesetzt, z. B. im HNO-Bereich, beim Prostata- oder Mammakarzinom.

Um die Strahlenbelastung für das medizinische Personal gering zu halten, wird oft zunächst nur ein leerer Applikator in das Zielgewebe platziert, in den dann ferngesteuert der radioaktive Strahler geschoben und nach Ablauf der Bestrahlungszeit wieder entfernt wird. Eine andere Entwicklung sind Reiskorn große Hüllen, sog. *Seeds*, für das radioaktive Präparat, die im Zielorgan, z. B. der Prostata, verbleiben.

Man arbeitet heute nicht nur mit Radium, sondern verwendet u. a. auch ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{125}I , ^{103}Pd oder ^{106}Ru für die Herstellung der Strahlenquellen.

6.3.2 Das Gesetz des radioaktiven Zerfalls

Der Zeitpunkt, an dem ein radioaktives Atom zerfällt, ist nur vom Zufall abhängig und lässt sich weder von außen beeinflussen noch vorausberechnen. Alle noch nicht zerfallenen Atome desselben instabilen Isotops haben die gleiche mittlere Lebensdauer. Für alle noch nicht zerfallenen Atome besteht dieselbe – meist sehr geringe – Wahrscheinlichkeit, innerhalb der nächsten Sekunde zu zerfallen.

Beispielsweise betrachten wir 1000 000 radioaktive Kerne, wobei für jedes Atom die Wahrscheinlichkeit 1 : 1000 beträgt, dass es in der nächsten Sekunde zerfällt. In der nächsten Sekunde werden von den 1000 000 radioaktiven Kernen 1000 zerfallen. Damit liegt eine Aktivität von 1000 Becquerel (Bq) vor, denn die **Aktivität** einer radioaktiven Substanz ist definiert als Anzahl der Zerfallsakte pro Sekunde:

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Zahl der Zerfallsakte}}{\text{Sekunde}}$$

Die kohärente Einheit im SI ist seit 1978 das **Becquerel** als 1/Sekunde. Der französische Physiker Henri Becquerel hat 1896 die Radioaktivität entdeckt und 1903 gemeinsam mit Marie und Pierre Curie dafür den Nobelpreis erhalten. Bis 1978 galt das Curie (Ci) als Einheit der Aktivität. Ein Curie ist gleich 37 Milliarden Becquerel und entspricht ungefähr der Aktivität von einem Gramm reinem Radium (ohne Zerfallsprodukte, siehe Uran-Radium-Reihe).

Wir kehren zurück zu unserem Beispiel mit den anfänglich 1000 000 radioaktiven Kernen. Nach einer Sekunde sind 1000 Kerne zerfallen, von den verbleibenden 999 000 Kernen wird in der zweiten Sekunde wiederum 1 Promille zerfallen. In

der zweiten Sekunde ist eine Aktivität von 999 Becquerel zu erwarten, in der dritten Sekunde wird die Aktivität auf 998 Bq abfallen usw. Anfänglich wird die Aktivität von Sekunde zu Sekunde um 1 Bq geringer.

Wenn nach einiger Zeit noch 500 000 radioaktive Kerne vorhanden sind, ist die Aktivität auf 500 Bq abgefallen. In der nächsten Sekunde sind noch 499 500 Kerne vorhanden und die zu erwartende Aktivität beträgt 499,5 Bq. Das bedeutet, dass die Aktivität jetzt nur noch mit 0,5 Bq pro Sekunde absinkt.

Wenn schließlich nur noch 1000 Kerne verblieben sind, beträgt die Aktivität 1 Bq. Eine Sekunde später liegen noch 999 Kerne vor und die Aktivität ist mit 0,999 zu veranschlagen. Damit sinkt die Aktivität nur noch um 0,001 Bq pro Sekunde.

Zusammenfassend ergibt sich: **Die Aktivität sinkt proportional zur Anzahl der noch vorhandenen radioaktiven Atome.**

Immer, wenn die Zu- bzw. Abnahme einer Größe proportional dem jeweiligen Wert dieser Größe ist, lässt sich das Wachstum bzw. die Verminderung der Größe mit einer Exponentialfunktion (e-Funktion) beschreiben.

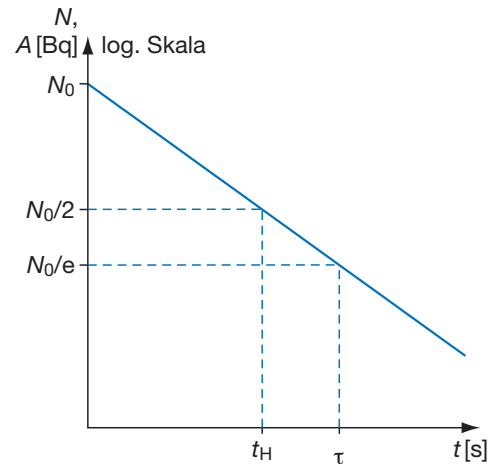
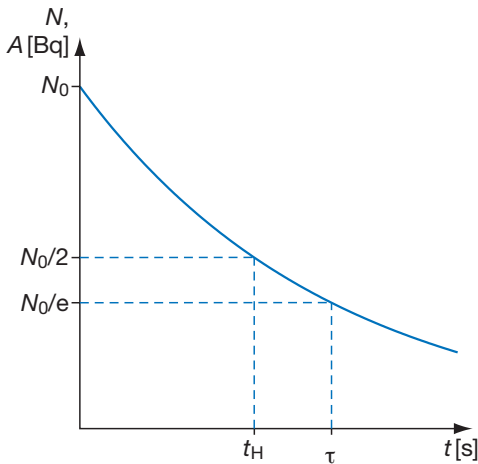
In halblogarithmischer Darstellung ergibt sich dabei eine Gerade. Diese Funktionen sind in den Abbildungen 192 und 193 dargestellt.

Die y-Achse gilt sowohl für die Zahl N der noch nicht zerfallenen Atome als auch für die Aktivität A , da beide Größen zueinander proportional sind. Auf der x-Achse ist die Zeit abgetragen. Die zugehörige Funktion lautet:

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

N_0 : Zahl der zum Zeitpunkt $t = 0$ vorhandenen Atome
 λ : Zerfallskonstante des Isotops
 e: Eulersche Zahl $e = 2,7182818$

Der Exponent hat ein negatives Vorzeichen, weil N bzw. A im Laufe der Zeit abnehmen.



Abbildungen 192 und 193: Radioaktiver Zerfall, links mit einer linear geteilten Ordinate, rechts mit einer logarithmisch geteilten Ordinate. Die Ordinate gilt in beiden Darstellungen sowohl für die Zahl N der noch vorhandenen radioaktiven Kerne als auch für die Aktivität A , weil sich die Aktivität A proportional zur Zahl N der noch vorhandenen radioaktiven Kerne verhält. Die Zeitachse ist in beiden Diagrammen linear unterteilt, t_H gibt die Halbwertszeit und τ die mittlere Lebensdauer der radioaktiven Isotope an.

Zerfallskonstante λ

Verschiedene Isotope unterscheiden sich durch ihre Zerfallskonstante λ (griech. *lambda*): Je größer λ , desto schneller zerfällt das Isotop bzw. desto steiler verläuft die entsprechende e-Funktion.

Mittlere Lebensdauer τ

Wie man mathematisch zeigen kann, ist die *durchschnittliche Lebensdauer* τ (griech. *tau*) mit der Zeit t identisch, in der die Anzahl der radioaktiven Kerne auf den e-ten Teil des Anfangswertes abfällt, also mit der Zeit t , in der N auf N_0/e absinkt.

Um den Zusammenhang zwischen der Zerfallskonstanten λ und der mittleren Lebensdauer τ zu ermitteln, setzen wir für N den Wert N_0/e ein und erhalten:

$$N_0/e = N_0 e^{-\lambda \tau}$$

Wir dividieren beide Seiten der Gleichung durch N_0 :

$$1/e = e^{-\lambda \tau}$$

$1/e$ ist identisch mit e^{-1} . Folglich erhalten wir $e^{-1} = e^{-\lambda \tau}$. Hieraus ergibt sich: $1 = \lambda \tau$

sodass $\frac{1}{\lambda} = \tau$ oder $\frac{1}{\tau} = \lambda$

Die durchschnittliche Lebensdauer τ und die Zerfallskonstante λ sind Kehrwerte.

Weil $\lambda = 1/\tau$, kann man das Zerfallsgesetz auch folgendermaßen schreiben:

$$N = N_0 e^{-t/\tau}$$

Halbwertszeit t_H

Die Zeit, in der ein radioaktives Nuklid zur Hälfte zerfällt, heißt Halbwertszeit t_H und ist für das jeweilige Isotop eine charakteristische Größe. Die Halbwertszeit schwankt je nach Isotop zwischen 10^{-7} s und 10^{10} Jahren.

Nach der doppelten Halbwertszeit ist das Isotop auf $\frac{1}{2}^2 = \frac{1}{4}$, nach der dreifachen Halbwertszeit auf $\frac{1}{2}^3 = \frac{1}{8}$ zerfallen usw.

Ein Isotop wird sowohl durch seine mittlere Lebensdauer τ als auch durch seine Halbwertszeit t_H charakterisiert. Deshalb muss es eine Möglichkeit geben, τ aus t_H

zu berechnen und umgekehrt. Für $t = t_H$ gilt definitionsgemäß $N = N_0/2$. Wir setzen ein und erhalten:

$$N_0/2 = N_0 e^{-t_H/\tau}$$

$$1/2 = e^{-t_H/\tau}$$

Wir logarithmieren beide Seiten der Gleichung und erhalten:

$$\ln 1/2 = -t_H/\tau \quad \text{oder in Zahlen:}$$

$$-0,693 = -t_H/\tau, \quad \text{sodass} \quad t_H = 0,693 \tau$$

Die Halbwertszeit t_H , nach der die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Kerne zerfallen ist, beträgt 69,3 % der mittleren Lebensdauer τ .

Umgekehrt ergibt sich der Umrechnungsfaktor zwischen t_H und τ als

$$\tau = 1/0,693 t_H = 1,44 t_H$$

Anwendung des Zerfallsgesetzes

Das Zerfallsgesetz lässt sich zur Altersbestimmung von ehemals lebenden Objekten wie Holz, Knochen, Stoffresten usw. ausnutzen: Aufgrund der kosmischen Strahlung wird ständig ein – allerdings sehr geringer – Teil des Luftstickstoffs über einen Neutroneneinfang (s.S. 165) in das radioaktive Kohlenstoffisotop ^{14}C verwandelt. Dieses Isotop zerfällt mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren.

Die neu entstandenen Kohlenstoffatome werden zu CO_2 oxidiert und neben stabilem CO_2 von den Pflanzen zur Assimilation aufgenommen. Von dort gelangt eine konstante Mischung aus radioaktivem und stabilem Kohlenstoff in Mensch und Tier. Mit dem Tod einer Pflanze oder eines Lebewesens endet die Aufnahme von Kohlenstoff: das ^{14}C zerfällt gemäß dem Exponentialgesetz. Aus der verbliebenen Restaktivität kann man errechnen, seit wann keine Aufnahme von ^{14}C mehr stattgefunden hat.

Rechenbeispiele

1.) Berechnung von λ und t_H : Für das Beispiel mit einer Million radioaktiven Kernen, von denen 1000 in der ersten Sekunde zerfallen, sollen λ und t_H berechnet werden. Gegeben sind nur zwei Zahlenwerte: $N_0 = 1\,000\,000$ und N_1 für den Zeitpunkt nach $t = 1$ s: $N_1 = 999\,000$. Wir setzen ein:

$$\begin{aligned} N_t &= N_0 e^{-\lambda t} \\ 999\,000 &= 1\,000\,000 e^{-\lambda} \\ 0,999 &= e^{-\lambda} \\ \ln 0,999 &= -\lambda \end{aligned}$$

$$\text{Zerfallskonstante } \lambda = 0,00100050033$$

Weil $\tau = 1/\lambda$ erhalten wir für die mittlere Lebensdauer τ : $\tau = 999,49$ s. Die Halbwertszeit t_H ergibt sich als: $t_H = 0,693 \tau = 692,8$ s.

2.) Aktivitätsberechnungen

Die anfängliche Aktivität A_0 beträgt 1000 Bq. Weil die Aktivität A und die Zahl der radioaktiven Kerne N zueinander proportional sind, sinkt A mit derselben Geschwindigkeit ab wie N . Damit gelten die Werte von t_H , τ und λ auch für Aktivität:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t}$$

Für $A_0 = 1000$ Bq und $t = 3600$ s, also den Zeitpunkt nach genau einer Stunde, ergibt sich

$$\begin{aligned} A &= 1000 \text{ Bq } e^{-\lambda 3600} \\ &= 1000 \text{ Bq } e^{-0,0010005 \cdot 3600} \\ &= 1000 \text{ Bq } e^{-3,618} \\ &= 26,836 \text{ Bq} \end{aligned}$$

Nach 3600 Sekunden, also der gut fünffachen Halbwertszeit, ist die Aktivität von 1000 auf 27 Becquerel gefallen.

3.) Im dritten Rechenbeispiel wollen wir ermitteln, nach welcher Zeit die Aktivität auf 1 Bq, also auf ein Tausendstel des Ausgangswerts, gefallen ist: $A = 1$ Bq, $A_0 = 1000$ Bq, sodass

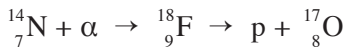
$$\begin{aligned} 1 \text{ Bq} &= 1000 \text{ Bq } e^{-\lambda t} \\ 0,001 &= e^{-\lambda t} \\ \ln 0,001 &= -\lambda t \\ -6,9077 &= -\lambda t \\ t &= 6904 \text{ s} \end{aligned}$$

Nach 6904 Sekunden, also der knapp 10-fachen Halbwertszeit, ist die Aktivität auf ein Tausendstel des Ausgangswerts gefallen. Weil $2^{10} = 1024$, sinkt die Aktivität nach der 10-fachen Halbwertszeit auf genau $1/1024$ des Ausgangswerts.

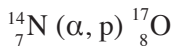
6.3.3 Künstliche Kernumwandlungen

Künstliche Kernumwandlungen werden durch den Beschuss des Atomkerns mit Neutronen, α -Teilchen, Protonen und anderen Reaktionspartnern erzwungen.

Die erste künstliche Kernumwandlung wurde im Jahre 1919 von Rutherford nachgewiesen, indem er $^{14}_7\text{N}$ -Kerne der Luft mit α -Teilchen beschoss. Hierbei entsteht neben einem Proton p das Sauerstoffisotop $^{17}_8\text{O}$:



Bei dieser Reaktion bildet sich zunächst das radioaktive Fluorisotop $^{18}_9\text{F}$, welches unter Aussendung eines Protons zum stabilen Sauerstoff zerfällt. Diese Umwandlung von Stickstoff in Sauerstoff wird in Kurzschreibweise folgendermaßen wiedergegeben:



Hierbei bezeichnet das erste Symbol in der Klammer das eingeschossene und der zweite Buchstabe das emittierte Teilchen.

Künstliche Radioaktivität

Die bei einer künstlichen Kernumwandlung entstehenden Atome sind meistens instabil und zerfallen ebenso wie die natürlichen radioaktiven Isotope mit einer charakteristischen Halbwertszeit.

Während man jedoch bei der natürlichen Radioaktivität nur zwei Zerfallsarten kennt, nämlich den α - und β -Zerfall, beobachtet man bei den künstlich hergestellten Isotopen neben dem α - und β -Zerfall **eine dritte Zerfallsart: die Aussendung eines Positrons**, auch als **β^+ -Zerfall** bezeichnet. Hierbei wandelt sich ein Proton in ein Neutron

um und sendet die überzählige positive Ladung mittels eines Positrons aus.

Das **Positron** hat dieselbe Masse wie ein Elektron, jedoch eine positive Ladung. Das Positron gehört zur sog. Antimaterie: Es löst sich beim Zusammenstoß mit einem Elektron auf. Hierbei wird die Masse von Positron und Elektron gemäß der einsteinischen Äquivalenz von Masse und Energie $E = m c^2$ in zwei γ -Quanten entgegengesetzter Richtung zu je 0,51 MeV überführt.

Als Beispiel für den Positronen- oder β^+ -Zerfall wählen wir den Beschuss von $^{12}_6\text{C}$ mit α -Teilchen (n: Neutron, ^0_1e : Positron):



Zunächst entsteht neben einem Neutron ein instabiles Sauerstoffatom mit der Massenzahl 15, welches sich durch die Aussendung eines Positrons in das stabile Stickstoffatom $^{15}_7\text{N}$ verwandelt. Die Halbwertszeit für diesen β^+ -Zerfall beträgt 2,5 Minuten.

Neutrinos

Neben dem Positron wird ein sog. Neutrino ausgesendet, welches **einen Teil der bei der Kernumwandlung freiwerdenden Energie davonträgt**. Die Ruhemasse des Neutrinos ist null. Das Neutrino hat zumindest im Bereich der Medizin keine praktische Bedeutung, da es kaum in Wechselwirkung mit der Materie tritt. Neutrinos können völlig unverändert die gesamte Erdkugel durchdringen. Beim normalen β -Zerfall treten ebenfalls Neutrinos auf.

Die Existenz der Neutrinos ist aus folgenden Überlegungen vermutet worden: Die beim β -Zerfall desselben Isotopes emittierten Elektronen haben unterschiedliche kinetische Energien. Dies ist erstaunlich, weil mit dem Zerfall stets derselbe Sprung von einem Kern bestimmten Energieinhaltes

zu einem anderen Kern mit ebenfalls konstantem Energieinhalt verbunden ist. Die hierbei frei werdende Energiedifferenz ist also immer gleich groß. Der fehlende Energiebetrag wird von Neutrinos übernommen und ins Weltall hinausgetragen.

Beim α -Zerfall hingegen treten keine Neutrinos auf, alle ausgesendeten α -Teilchen haben dieselbe kinetische Energie.

Elektroneneinfang

In Konkurrenz zur β^+ -Emission tritt häufig der sogenannte Elektroneneinfang auf. Hierbei wird ein Elektron aus der innersten Atomschale, der K-Schale, in den Kern eingefangen, sodass sich ein Proton zum Neutron verwandeln kann. Auch hierbei wird ein Neutrino ausgesendet. Die K-Schale wird wieder aufgefüllt, indem ein Elektron aus einer höheren Schale in die entstandene Lücke springt. Hierbei entsteht die **charakteristische Röntgenstrahlung** (s.S. 171).

Kernbeschuss mit Neutronen

Mit den beim radioaktiven Zerfall frei werdenden α -Teilchen lassen sich nur Kerne mit geringer Ordnungszahl umwandeln, weil Kerne mit hohen Kernladungszahlen aufgrund ihrer starken Ladung große coulombische Abstoßungskräfte gegen die α -Teilchen entwickeln. Die α -Teilchen können deshalb nicht in den Kern eindringen, sondern werden abgestoßen.

Beim Beschuss mit Neutronen treten diese Probleme nicht auf. Die Neutronen können sich dem Atomkern nähern und in ihn eindringen, ohne dass elektrostatische Kräfte auftreten. Die Atomkerne der meisten Elemente fangen Neutronen ein, sodass es zu einer Kernreaktion kommt, bei der ein neues, meist radioaktives Isotop entsteht. Von den ca. 2500 heute bekannten Kernen, die zum größten Teil künstlich erzeugt worden sind, sind über 80 % instabil.

Nuklearmedizin

Die Nuklearmedizin ist ein medizinisches Fachgebiet, das für diagnostische und therapeutische Zwecke radioaktive Isotope einsetzt. Die in der Nuklearmedizin benutzten radioaktiven Kerne (^{131}J , ^{198}Au , $^{99\text{m}}\text{Tc}$) werden meistens hergestellt, indem man die entsprechenden Ausgangskerne einer starken Neutronenstrahlung aussetzt, wie sie z.B. in einem Kernreaktor herrscht. Weitere Herstellungsmöglichkeiten liegen im Beschuss mit Protonen oder Deuteronen (Kernen von schwerem Wasserstoff ^2_1D), wobei diese Teilchen in einem sog. Zyklotron auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt werden.

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ ist die Abkürzung für **Technetium 99** metastabil, eine Substanz, die in der Diagnostik eine besondere Bedeutung erlangt hat. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ entsteht, wenn $^{99}\text{Molybdän}$ unter Aussendung von β -Strahlung zu $^{99\text{m}}\text{Technetium}$ zerfällt. Das „m“ steht für metastabil und bedeutet, dass die Umwandlung von Molybdän zu Technetium noch nicht abgeschlossen ist, weil die hierbei frei werdende Energie noch nicht abgegeben worden ist. Die mit der Kernumwandlung verbundene Energieabgabe muss noch nachgeholt werden. Sie geschieht in Form eines γ -Quants der Energie 140 KeV.

Das $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ist deshalb selber instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von sechs Stunden zu ^{99}Tc . Hierbei wird lediglich γ -Strahlung freigesetzt, keine α - und keine β -Strahlung. Dies ist für diagnostische Zwecke ideal, denn γ -Strahlung lässt sich mit Gamma-Kameras gut nachweisen und ist für den Patienten relativ ungefährlich, während die α - und β -Strahlung einer in den Körper des Patienten eingedrungenen (inkorporierten) Substanz zwar Strahlenschäden verursacht, aber keine diagnostischen Möglichkeiten bietet.

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ wird beispielsweise eingesetzt, um Metastasen zu suchen oder um die

Nierenfunktion zu prüfen, indem es je nach diagnostischer Zielsetzung an bestimmte Moleküle gekoppelt und dem Patienten eingespritzt wird. Der Verbleib der mit dem ^{99m}Tc markierten Moleküle kann von außen durch Gamma-Kameras, die auf die emittierte γ -Strahlung reagieren, verfolgt werden. Die diagnostische Methode heißt Szintigrafie, weil das Herzstück der Gamma-Kameras ein Szintillationszähler ist (s. S. 178).

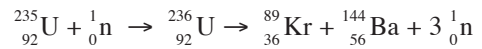
Bei der **Positronen-Emissions-Tomographie (PET)** wird dem Patienten ein Pharmakon gespritzt, welches einen β^+ -Strahler enthält, der mit Hilfe einer künstlichen Kernumwandlung erzeugt wurde. Die hierbei entstehenden Positronen zerstrahlen beim Zusammenstoß mit einem Elektron unter Abgabe von zwei entgegengesetzt gerichteten γ -Quanten mit je 511 KeV, die von außen detektiert werden können, aber für den Patienten nur eine geringfügige Strahlenbelastung bedeuten.

Die PET wird nur bei diagnostisch schwierigen Fragestellungen eingesetzt, denn im Vergleich mit CT und MRT ist die PET deutlich teurer. Zunächst muss der β^+ -Strahler zum richtigen Zeitpunkt hergestellt und an das für den Untersuchungszweck geeignete Pharmakon gekoppelt werden.

Die Untersuchung dauert lange, weil medizinisch gesehen die Dosis des β^+ -Strahlers nicht beliebig erhöht werden kann und weil aus physikalischen Gründen der β^+ -Strahler nur langsam zerfällt und die Detektion der hierbei entstehenden γ -Quanten nur unvollständig erfolgt, so dass sich pro Minute nur wenige auswertbare Signale ergeben. Die lange Untersuchungsdauer bedingt eine Bewegungsunschärfe, weil der Patient nicht über 15 oder 30 Minuten reglos bleiben kann, gerade wenn innere Organe untersucht werden, die durch Atmung und Peristaltik in Bewegung sind. Um eine größere Ortsauflösung zu erreichen, gibt es neuerdings Geräte, die gleichzeitig eine PET- und eine CT- oder MRT-Untersuchung durchführen.

6.3.4 Kernspaltung

Bei Kernreaktionen werden normalerweise nur Neutronen, Protonen, Elektronen, γ -Quanten und als schwerste Teilchen Heliumkerne aus dem umgewandelten Atomkern emittiert. Beim Beschuss von Uran mit langsamen, d. h. langsam fliegenden Neutronen entdeckten *Otto Hahn* und *Fritz Straßmann* 1938 einen völlig neuartigen Prozess: Das Uranisotop $^{235}_{92}\text{U}$ zerbricht nach dem Einfang eines Neutrons in zwei ungefähr gleich große Teile (^1_0n bedeutet Neutron), entweder in:



oder in:



Nach dem Diagramm 189 auf Seite 157 beträgt die durchschnittliche Bindungsenergie pro Nukleon der Spaltprodukte ca. 8,4 MeV, während die Bindungsenergie pro Nukleon des Urans ca. 7,6 MeV beträgt. Bei über 200 beteiligten Nukleonen wird damit durch die Spaltung eines Urankernes eine Energie von ca. 200 MeV freigesetzt, weil die Bruchstücke fester gebunden sind als der Ausgangskern.

Der überwiegende Teil der Energie steckt in der kinetischen Energie der mit hoher Geschwindigkeit auseinander fliegenden Bruchstücke. Dieser Anteil wird unmittelbar in Wärme überführt. Die restliche Energie wird in Form von β - und γ -Strahlung abgegeben, die bei der Spaltung unmittelbar entsteht oder beim Zerfall der radioaktiven Bruchstücke ausgesendet wird.

Die zwei bis drei bei jeder Kernspaltung frei werdenden Neutronen besitzen jeweils eine kinetische Energie von ca. 1,5 MeV. Sie können ein unterschiedliches Schicksal erleiden:

- Sie können nach außen entweichen.
- Sie können von (irgend)einem Atomkern eingefangen werden und über eine Kernreaktion ein meist radioaktives Isotop entstehen lassen.
- Sie können von einem ${}^{235}_{92}\text{U}$ Kern eingefangen werden und eine erneute Kernspaltung auslösen.

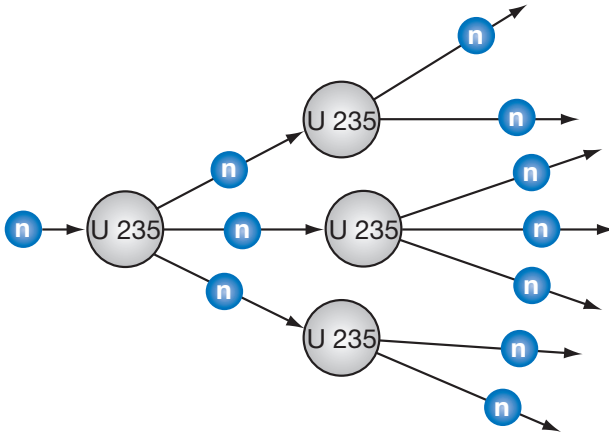


Abbildung 194: Kettenreaktion bei der Kernspaltung von Uran 235. Die Spaltprodukte Kr, Ba, Sr und Xe sind nicht dargestellt.

Bei der Kernspaltung sind grundsätzlich drei Fälle möglich:

- Von den zwei bis drei pro Kernspaltung freigesetzten Neutronen kann im Durchschnitt **weniger als ein Neutron** eine erneute Kernspaltung auslösen. Sofern kein weiterer Neutronenbeschuss von außerhalb erfolgt, sinkt in diesem Fall die Zahl der Kernspaltungen im Laufe der Zeit auf null ab. Das Uran ist dann lediglich noch seinem radioaktiven α -Zerfall unterworfen, der jedoch extrem langsam erfolgt, weil die Halbwertszeit beim ${}^{235}_{92}\text{U}$ $7 \cdot 10^8$ Jahre beträgt.
- Von den zwei bis drei bei jeder Kernspaltung freigesetzten Neutronen können **mehr als eins** eine erneute Kernspaltung verursachen. Damit steigt die Zahl der Spaltungen pro Zeiteinheit

mehr oder weniger schnell an. Der Extremfall eines schnellen Ablaufs dieser Kettenreaktion liegt in der Atombombe vor.

- Die dritte Möglichkeit liegt zwischen den in a) und b) skizzierten Fällen. Sie besteht darin, dass **genau eines** der pro Kernspaltung freigesetzten Neutronen eine erneute Spaltung auslöst. Die Zahl der Kernspaltungen bleibt konstant, es liegt eine kontrollierte Kettenreaktion vor. Dieser Fall liegt im Dauerbetrieb eines Kernkraftwerkes vor. Beim Hochfahren eines Reaktors liegt Fall b) vor, beim Herunterfahren Fall a).

Kernreaktoren

In Kernreaktoren soll die bei der Kernspaltung frei werdende Bindungsenergie in elektrische Energie verwandelt werden. Das Problem besteht darin, die unter c) skizzierte kontrollierte Kettenreaktion zu unterhalten. Die entstehende Wärme wird wie bei normalen Wärmekraftwerken über Turbinen und Generatoren in elektrischen Strom überführt.

Wirkungsquerschnitt

Zur Beschreibung der Wechselwirkung strahlender Teilchen mit Atomkernen hat man den sog. Wirkungsquerschnitt definiert: Vereinfachend gesprochen handelt es sich hierbei um das Flächenstückchen um den Atomkern herum, welches wie eine Zielscheibe getroffen werden muss, damit die entsprechende Wechselwirkung zwischen dem Neutron und dem Atomkern eintritt, für die der Wirkungsquerschnitt gilt. So gibt es z.B. verschiedene Wirkungsquerschnitte für Streuung und Einfang von Neutronen. Je größer der Wirkungsquerschnitt ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen des jeweiligen Ereignisses und umgekehrt.

Der Wirkungsquerschnitt von ${}^{235}_{92}\text{U}$ für den Neutroneneinfang sinkt mit zunehmender Geschwindigkeit der Neutronen. Demnach können die mit hoher Geschwindigkeit herausgeschleuderten Neutronen nur mit geringer Wahrscheinlichkeit sofort eine erneute Spaltung auslösen. Das in der Natur vorkommende Uran besteht nur zu 0,7% aus ${}^{235}_{92}\text{U}$ und zu 99,3% aus ${}^{238}_{92}\text{U}$.

Das Isotop ${}^{238}_{92}\text{U}$ spaltet sich nach dem Einfang

eines Neutrons normalerweise nicht (nur bei sehr hochenergetischen Neutronen), sondern geht unter Abgabe von β -Strahlung in $^{239}_{94}\text{Pu}$ Plutonium über. *Wenn Uran 238 die Neutronen einfängt, bevor sie einen Kern des Urans 235 spalten können, kann sich keine Kettenreaktion bilden.*

Zur Überwindung dieses Problems gibt es zwei Möglichkeiten, die Verwendung eines Moderators und die Verwendung von angereichertem Uran.

Moderator

Bei niedrigen Geschwindigkeiten der Neutronen ist der Einfangquerschnitt von Uran 235 soviel größer als der von Uran 238, dass eine Kettenreaktion entstehen kann, obwohl erheblich mehr Kerne $^{238}_{92}\text{U}$ als $^{235}_{92}\text{U}$ vorhanden sind. Man muss die emittierten Neutronen deshalb möglichst schnell auf niedrige Geschwindigkeiten abbremmen. Die Abbremsung geschieht in Form elastischer Stöße mit Atomkernen. Hierzu muss man Atome verwenden, die einen möglichst geringen Einfangsquerschnitt für Neutronen haben. Außerdem sollten die Atome eine möglichst geringe Massenzahl haben, denn je geringer die Masse der Kerne ist, mit denen die Neutronen zusammenstoßen, desto mehr Energie können sie bei jedem Stoß übertragen und desto schneller werden sie abgebremst.

Als **Bremssubstanz** oder **Moderator** eignet sich z. B. Kohlenstoff (Graphit) oder normales Wasser (wegen der sehr leichten Wasserstoffatome). Noch besser ist sog. schweres Wasser, bei dem der Kern des Wasserstoffatoms neben einem Proton noch ein Neutron enthält, weil der Einfangquerschnitt von $^2_1\text{H} = ^2_1\text{D}$ (D = Deuteron) erheblich kleiner als von ^1_1H ist.

Regelstäbe

Neben dem Uran und dem Moderator besteht der Reaktor aus einem dritten wichtigen Bauelement, den Regelstäben, aus einem Material, z. B. Bor, mit sehr hohem **Einfangquerschnitt** für Neutronen. Wenn die Regelstäbe in den Kern des Reaktors eingeschoben werden, verschlucken sie Neutronen und bringen die Kettenreaktion zum Stillstand. Ein Herausziehen der Regelstäbe hat zur Folge, dass weniger Neutronen eingefangen werden und die Zahl der Kernspaltungen pro Zeiteinheit zunimmt.

Urananreicherung

Die zweite Möglichkeit zur Lösung des Problems, dass die Kerne des Uran 238 zu viele Neutronen einfangen und damit die Entwicklung einer kontrollierten Kettenreaktion unterbinden, liegt darin, dass

man anstelle der natürlichen Uranmischung **angereichertes Uran** verwendet. Im angereicherten Uran ist die Konzentration des $^{235}_{92}\text{U}$ höher als in der natürlichen Isotopenmischung, dementsprechend ist die Konzentration des Uran 238 geringer. Da sich hierbei die Abbremsung der Neutronen erübrigt, benötigt man auch keinen Moderator.

Meistens werden die beiden Lösungsmöglichkeiten zur Aufrechterhaltung einer kontrollierten Kettenreaktion gleichzeitig beschritten, d. h., man arbeitet sowohl mit einem Moderator als auch mit angereichertem Uran. Bei Anwendung beider Methoden braucht das Uran nicht so hoch angereichert zu werden und an die Moderatorsubstanz werden geringere Anforderungen gestellt, als wenn nur eine Methode verwendet wird.

Schnelle Brüter

Von den 2,5 bei jeder Kernspaltung emittierten Neutronen ist nur ein Neutron zur Unterhaltung der kontrollierten Kettenreaktion notwendig. Die restlichen 1,5 Neutronen können nutzbringend angewendet werden, indem sie $^{238}_{92}\text{U}$ -Kerne in $^{239}_{94}\text{Pu}$ Plutonium umwandeln.

In solchen als Schnelle Brüter bezeichneten Reaktoren ist es theoretisch möglich, dass ungefähr die 1,2-fache Menge an Plutonium entsteht, wie an Uran 235 (oder Plutonium) verbraucht wird.

Plutonium wird ebenso wie Uran 235 beim Neutroneneinfang gespalten und eignet sich deshalb ebenso wie $^{235}_{92}\text{U}$ als Spaltmaterial für Kernreaktoren und zum Bau von Atombomben. Schnelle Brüter heißen deshalb schnell, weil sie mit ungebremsten Neutronen arbeiten, und sie heißen deshalb Brüter, weil sie neben der Elektrizitätserzeugung mehr Kernbrennstoff erbrüten als sie verbrauchen.

Auch die Reaktoren, die mit abgebremsten Neutronen arbeiten, erbrüten Plutonium, jedoch nicht in der Menge wie die Schnellen Brüter. Die 1,5 zur Erhaltung der Kettenreaktion nicht notwendigen Neutronen verlieren sich dort zum größten Teil in der Bremssubstanz, in den Regelstäben oder dringen nach außen.

In den 1960er- und 1970er-Jahren war man davon ausgegangen, dass die mit Uran 235 arbeitenden Reaktoren zunächst nur für eine Übergangszeit von etwa 30 bis 50 Jahren die hauptsächlichen Energielieferanten sein und dass die späteren Kernreaktoren mit dem von Schnellen Brütern erzeugten Plutonium arbeiten sollten. Es war beabsichtigt, weltweit mehr als 50 Schnelle Brüter zu errichten, die Energie und Plutonium im Überfluss bereitstellen sollten. Der Schnelle Brüter

von Kalkar, der nach jahrelanger Verzögerung und einer Explosion der Baukosten wegen technischer Mängel nach seiner Fertigstellung keine Betriebsgenehmigung erhalten hat, zeigt, wie komplex die mit solchen Anlagen verbundenen technischen Probleme sind.

Wiederaufbereitungsanlage

Um das im Schnellen Brüter oder in einem normalen Kernreaktor erzeugte Plutonium für die Herstellung neuer Brennstäbe oder für die Produktion von Atombomben verwenden zu können, muss es in einer Wiederaufbereitungsanlage aus dem Brennstab herausgelöst werden. Dieser enthält nicht nur Uran 235, Uran 238 und Plutonium, sondern auch zahlreiche andere radioaktive Elemente, die durch den starken Neutronenfluss im Reaktorkern durch Kernumwandlungen erzeugt worden sind.

Die Kernbrennstäbe sind von einer festen Hülle einer besonders widerstandsfähigen Metalllegierung umgeben, weil das gesamte Kernkraftwerk sonst innerhalb kürzester Zeit radioaktiv verstrahlt wäre. Bei der gefürchteten Kernschmelze im Rahmen eines Reaktorunfalls schmelzen die Hüllen der Brennstäbe.

In der Wiederaufbereitungsanlage gehört das Auftrennen der Brennstäbe zur Routine, aber das Problem, die Radioaktivität am Entweichen zu hindern, kann noch nicht zufriedenstellend gelöst werden. Die Anlagen von La Hague in Frankreich und Windscale/Sellafield in England machten durch eine Serie von Leckagen von sich reden. Noch an der norwegischen Küste ist das von Sellafield in die Irische See entweichende Plutonium nachweisbar.

In Wackersdorf sollte ein 200 m hoher Schornstein gebaut werden, damit die entweichende Radioaktivität weiträumig genug verteilt nicht die behördlich festgesetzten Grenzwerte überschreiten würde. Aufgrund des Widerstandes der Bevölkerung wurde 1989 der Bau der Wiederaufbereitungsanlage Wackersdorf eingestellt, der bis zu diesem Zeitpunkt bereits Baukosten in Höhe von mehreren Milliarden DM verschlungen hatte.

In einer Wiederaufbereitungsanlage kann sich bis zum Hundertfachen (!) der Menge an radioaktiven Spaltprodukten befinden, die in einem 1000-MW-Reaktor vorhanden sind. Welches Gefahrenpotenzial hiermit verbunden ist, wird deutlich, wenn man bedenkt, dass in Tschernobyl dank des selbstlosen Einsatzes russischer Liquidatoren nur ein Bruchteil der radioaktiven Isotope eines 1000-MW-Reaktors freigesetzt wurde. Viele Liquidatoren mussten mit ihrem Leben bezahlen.

6.4 Röntgenstrahlung

6.4.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung

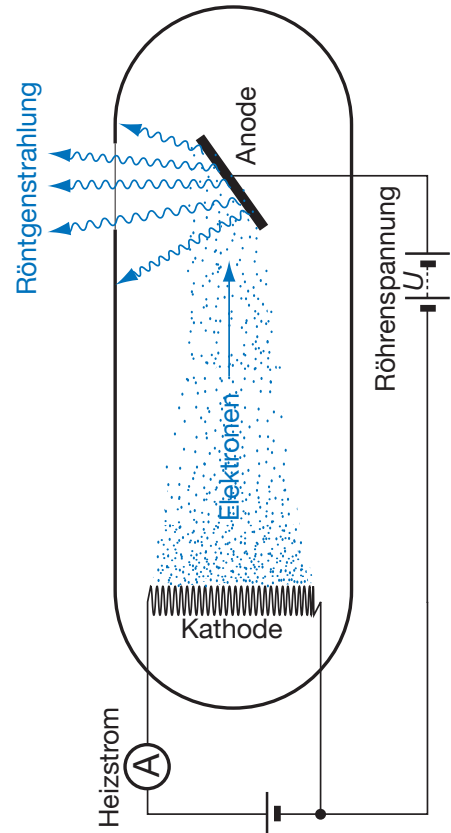


Abbildung 195: Funktionsprinzip der Röntgenröhre. Die Röhrenspannung beträgt ca. hunderttausend Volt, weitere Erläuterungen im Text.

Röntgenröhre

Die Röntgenröhre ist ein Gerät zur Erzeugung von Röntgenstrahlung. Ebenso wie bei der Vakuumdiode und der Verstärkerröhre treten Elektronen aus der geheizten Glühkathode aus und werden durch das elektrische Feld in Richtung auf die positiv geladene Anode beschleunigt. Während die Spannung zwischen Glühkathode und Anode bei

Vakuumdiode und Verstärkerröhre in der Größenordnung von 100 Volt liegt, beträgt sie bei der Röntgenröhre ca. 100 000 Volt. Deshalb treffen die Elektronen mit hoher Geschwindigkeit und hoher kinetischer Energie auf die Anode. Dort werden sie abrupt abgebremst und müssen ihre kinetische Energie abgeben. Dies geschieht durch Aussendung von Röntgenstrahlen, elektromagnetischen Wellen, die noch kurzwelliger als ultraviolettes Licht sind.

Elektronenvolt

Da das entstehende Röntgenquant seine Energie nur von einem Elektron bezieht, ist die Energie eines einzelnen Elektrons besonders interessant. Die Energie, mit der ein einzelnes Elektron auf die Anode auftrifft, errechnet sich als Produkt aus der Ladung des Elektrons und der Spannung zwischen Glühkathode und Anode:

$$\text{Spannung} = \frac{\text{Energie}}{\text{transportierte Ladung}}$$

Energie = transportierte Ladung · Spannung

Für die Energie eines Elektrons existiert eine besondere Maßeinheit, das Elektronenvolt:

Ein Elektronenvolt ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es im elektrischen Feld zwischen zwei Punkten beschleunigt wird, die eine Potenzialdifferenz von einem Volt haben:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$$

Herleitung:

Die elektrische Energie ergibt sich als Produkt von Ladung und Spannung. Die übliche Einheit ist Wattsekunde (Ws):

$$1 \text{ Ws} = 1 \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1 \text{ As} \cdot 1 \text{ V}$$

Ein Coulomb bzw. eine Amperesekunde entspricht der Ladung von $6,25 \cdot 10^{18}$ Elektronen. Deshalb hat ein Elektron die Ladung von

$$1 \text{ As} / 6,25 \cdot 10^{18} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As.}$$

Röntgenbremsspektrum

In der Röntgenröhre herrschen zwischen der Glühkathode und der Anode Spannungen von je nach Bauart etwa 30 000 V bis 200 000 V. Die einzelnen Elektronen treffen daher mit einer kinetischen Energie von 30 000 bis 200 000 Elektronenvolt auf die Anode auf. Die meisten Elektronen verwandeln ihre Energie beim Aufprall in Wärme.

Einige wenige Elektronen (einige Promille) rufen sofort beim Aufprall die Aussendung eines Röntgenquants hervor, andere bewirken die Aussendung eines Röntgenquants erst, nachdem sie einen Teil ihrer Energie bereits als Wärmeenergie abgegeben haben.

Die von den abgebremsten Elektronen erzeugten Röntgenstrahlen sind energieärmer und haben eine größere Wellenlänge als die sofort beim Aufprall der Elektronen ausgesendeten Röntgenstrahlen. Die Röntgenröhre sendet deshalb Strahlen verschiedener Wellenlänge aus: Die Verteilung der erzeugten Strahlen, das sog. **Röntgenbremsspektrum**, weist keine Lücken auf. Es handelt sich um ein kontinuierliches Spektrum mit kurzwelliger Grenze.

Diese Grenze entspricht den Elektronen, die sofort nach ihrem Aufprall auf die Anode ihre gesamte Energie für die Aussendung eines Röntgenquants zur Verfügung stellen. Es gibt keine noch kurzwelligeren Strahlen, weil es keine noch energiereicheren Elektronen gibt.

Die Frequenz ν_0 bzw. Wellenlänge λ_0 der kurzwelligsten Röntgenquanten errechnet sich folgendermaßen aus der Röhrenspannung U_0 :

$$\nu_0 = \frac{U_0 e}{h} \quad \lambda_0 = \frac{c h}{U_0 e}$$

Hierbei ist e die Elementarladung, d.h. die Ladung eines Elektrons, h das plancksche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit. Wie bereits auf Seite 152 erläutert errechnet sich die Energie eines

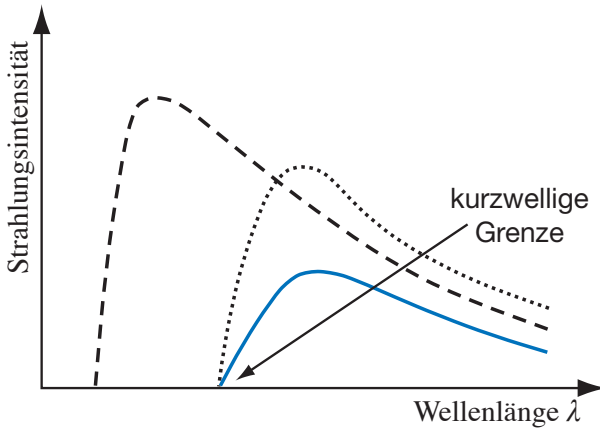


Abbildung 196:
Wellenlänge und Intensität
der Röntgenstrahlung
in Abhängigkeit vom
Heizstrom I und von der
Röhrenspannung U .

- Spektrum der
Röntgenstrahlung bei
gegebener Röhren-
spannung U_0 und ge-
gebenem Heizstrom I_0 .
- $U > U_0$ und $I = I_0$
- $U = U_0$ und $I > I_0$

einzelnen γ -Quants als Produkt seiner Frequenz ν und des planckschen Wirkungsquantums h :

$$E = h \nu_0 \quad \text{sodass} \quad \nu_0 = U_0 e/h$$

Für die Lichtgeschwindigkeit c gilt (s. S. 205):

$$c = \nu \lambda \quad \text{sodass} \quad \nu_0 = c/\lambda_0$$

Eingesetzt ergibt sich $c/\lambda_0 = U_0 e/h$, was sich zu $\lambda_0 = c h/(U_0 e)$ umformen lässt.

Je höher die Röhrenspannung U_0 ist, desto höher ist die Frequenz ν_0 und desto kleiner ist die Wellenlänge λ_0 .

Je kürzer die Wellenlänge der Röntgenstrahlen, desto größer ist ihre Durchdringungskraft.

Kurzwellige Röntgenstrahlen werden als *harte*, langwellige als *weiche Strahlen* bezeichnet.

Abbildung 196 gibt an, wie sich eine Erhöhung der Röhrenspannung und eine Erhöhung des Heizstromes auf das Röntgenbremsspektrum auswirken.

Mit steigender Röhrenspannung steigen Intensität und Härte der Röntgenstrahlung. Die Intensität steigt, weil mehr Elektronen von der Glühkathode abgesaugt werden; die Härte steigt, weil die Elektronen mit höherer Geschwindigkeit auf die Anode prallen.

Die Intensität lässt sich auch unabhängig von der Härte erhöhen, indem ein stär-

kerer Heizstrom mehr Elektronen aus der Glühkathode austreten lässt.

Charakteristische Röntgenstrahlung

Das Röntgenbremsspektrum – welches vom Anodenmaterial völlig unabhängig ist – wird durch eine charakteristische Röntgenstrahlung überlagert.

Die charakteristische Röntgenstrahlung ist ein **Linienpektrum**, dessen **Zusammensetzung sich nach dem Anodenmaterial richtet**.

Sie entsteht, indem ein auf der Anode auftreffendes Elektron ein Elektron aus einer inneren Atomschale des Anodenmaterials auf eine höhere Bahn bringt (Anregung – siehe bohrsches Atommodell). Wenn dieses auf eine höhere Bahn gehobene Elektron wieder auf seine alte Bahn zurückfällt, sendet es seine überschüssige Energie in Form eines Röntgenquants aus.

Dieser Vorgang ist mit der Aussendung sichtbaren Lichtes zu vergleichen, mit dem Unterschied, dass es sich bei der Aussendung sichtbaren Lichtes um äußere Elektronen handelt, die in ihre Bahnen zurückfallen.

Die charakteristische Röntgenstrahlung ist ein Linienpektrum, weil es nur bestimmte Frequenzen (Linien) enthält, die den Energiedifferenzen der möglichen Elektronenbahnen entsprechen.

6.4.2 Eigenschaften der Röntgen- und γ -Strahlung

Röntgen- und γ -Strahlung sind seit jeher Bestandteil unserer natürlichen Umwelt. Aus dem Weltall gelangt die *Höhenstrahlung* auf die Erde, die in unterschiedlicher Dosierung alle Bereiche des elektromagnetischen Spektrums umfasst, also auch die Röntgen- und γ -Strahlung.

Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Elementen mit radioaktiven Isotopen, z. B. ^{40}K oder ^{226}Ra , sodass sich der Mensch in seiner natürlichen Umwelt durch terrestrische Strahlung, Nahrungsaufnahme und Inhalation ständig in Kontakt mit niedrigdosierter Strahlung befindet.

Röntgen- und γ -Strahlen sind elektromagnetische Wellen hoher Energie. Die Bezeichnung bezieht sich auf die Herkunft: **Röntgenstrahlung entsteht in der Atomschale, γ -Strahlung im Atomkern.** Röntgenquanten haben eine Energie im Bereich von etwa 100 eV bis 200 keV, γ -Quanten im Bereich von etwa 1 keV bis hin zu vielen MeV, d. h. die Frequenzbereiche von Röntgen- und γ -Strahlen überschneiden sich.

Bei einer Wechselwirkung mit Materie tritt stets ein **einzelnes** Röntgen- oder γ -Quant in Wechselwirkung mit einem einzelnen Atom, Molekül oder Elektron.

Entscheidend für die Art der Wechselwirkung ist (abgesehen vom Reaktionspartner) lediglich die Energie des Quants. Die Intensität der Strahlung, also die Zahl der Quanten, spielt keine Rolle. Es spielt auch keine Rolle, ob dieses Quant in einer Atomschale oder einem Atomkern entstanden ist, also ob es sich um Röntgen- oder γ -Strahlung handelt.

Nachweisbarkeit

Röntgen- und γ -Strahlen sind für das menschliche Auge unsichtbar. Sie sind jedoch in der

Lage, einen fotografischen Film zu schwärzen. Hierauf beruht das Anfertigen von Röntgenaufnahmen.

Röntgen- und γ -Quanten können über die **Fluoreszenz** direkt sichtbar gemacht werden. Hierunter versteht man die Eigenschaft bestimmter Kristalle, z. B. Natriumjodid, γ -Quanten einzufangen und Lichtstrahlen auszusenden. Der Leuchtschirm bei der Röntgendurchleuchtung beruht auf diesem Prinzip. Früher, als man über die Gefahren radioaktiver Strahlung noch wenig wusste, hat man die Ziffernblätter von Uhren mit einer Leuchtfarbe bemalt, die einerseits radioaktive Substanzen und andererseits fluoreszierende Kristalle enthielt. Diese Ziffernblätter leuchten in der Dunkelheit wegen der fluoreszierenden Wirkung der γ -Strahlen.

Außerdem sind Röntgen- und γ -Strahlen aufgrund ihrer **ionisierenden Wirkung** nachweisbar. Hierauf beruhen der Geigerzähler und die Ionisationskammer (s. S. 176 ff.).

Wechselwirkung mit Materie

Röntgen- und γ -Strahlen können Materie wesentlich besser durchdringen als sichtbares Licht. Hierauf beruht die Röntgendiagnostik. Beim Durchtritt von Röntgen- und γ -Strahlung durch Materie sind fünf Arten der Wechselwirkung möglich:

- Die Strahlen können **gestreut** werden.
- Die Strahlen können **absorbiert** werden.
- Sie können mit einem Elektron zusammenstoßen, wobei sie durch den sogenannten **Compton-Effekt** eine Richtungsänderung erfahren und einen Teil ihrer Energie abgeben.
- γ -Quanten mit einer Energie von mehr als 1 MeV können sich auf dem Weg der **Paarbildung** in ein Elektron und ein Positron verwandeln.
- γ -Quanten mit Energien von mehreren

MeV können **Kernprozesse** auslösen, sodass die durchstrahlte Materie radioaktiv wird.

Welche der hier genannten Prozesse sich im Einzelfall in welcher Häufigkeit abspielen, hängt von der Frequenz der γ -Quanten ab und davon, welche Ordnungszahl die durchstrahlte Materie aufweist.

Streuung

Bei der sogenannten klassischen Streuung geben die Röntgen- und γ -Quanten keine Energie ab, die Strahlung ändert lediglich ihre Richtung.

Röntgen- und γ -Strahlung wird erheblich stärker gestreut als sichtbares Licht.

Bei Röntgenaufnahmen ist die Streustrahlung schwer kontrollierbar und stellt eine erhebliche Gefahrenquelle dar. Sie durchsetzt den ganzen Raum und ist für Arzt und Schwester auch dann gefährlich, wenn sie weit entfernt vom Strahlenkegel stehen. Deshalb verlässt das medizinische Personal nach Möglichkeit während der Röntgenaufnahme den Raum und beobachtet den Patienten durch eine Bleiglasscheibe.

Die **Frequenzabhängigkeit der Streuung** elektromagnetischer Wellen ist auch der Grund dafür, dass der Himmel blau ist. Das Blau des Himmels ist Sonnenlicht, welches in der Atmosphäre zum Teil mehrfach gestreut worden ist. Der blaue kurzwellige Anteil des Spektrums wird stärker gestreut als der rote langwellige Anteil.

Beim Sonnenuntergang wird die Sonne, die tagsüber weißlich gelb war, plötzlich rot: Bei tief stehender Sonne ist der Weg der Sonnenstrahlen durch die Lufthülle besonders lang und dabei sind die Strahlen der Streuung in besonderem Maße ausgesetzt. Der kurzwellige blaue Anteil wird fast völlig aus dem Strahlenkegel herausgestreut, sodass der langwellige rote Anteil zurückbleibt.

Absorption

Die Absorption ist der wichtigste Prozess, durch den Röntgenstrahlen beim Durchgang durch Materie geschwächt werden.

Hierbei geben die Röntgen- oder γ -Quanten ihre Energie an **Elektronen** der Atomhülle weiter, die **aus der Atomschale herausgeschlagen werden**. Diese Elektronen heißen Sekundärelektronen und besitzen – ebenso wie beim Fotoeffekt – die kinetische Energie $h\nu - E_{\text{Auslösearbeit}}$, mit der sie auf das durchstrahlte Material einwirken und dieselbe biologische Wirkung wie von außen einwirkende β -Strahlung entfalten.

Die Absorption der Röntgenstrahlung ist von der Zusammensetzung der durchstrahlten Materie abhängig. Hierbei kommt es nur darauf an, aus welchen Elementen die durchstrahlte Materie besteht, die Art der chemischen Bindung ist gleichgültig.

Die Absorption steigt ungefähr mit der dritten Potenz der Ordnungszahl an.

Deshalb ist Blei mit einer Ordnungszahl von 82 ein gutes Material zur Abschirmung von Röntgenstrahlen. Die Absorption der Röntgenstrahlung erzeugt die Kontraste im Röntgenbild. Das Gewebe besteht hauptsächlich aus Wasser und damit Sauerstoff mit der Ordnungszahl 8, während der Knochen viel Kalzium mit der Ordnungszahl 20 enthält. (Blei: $82^3 = 551\,368$, Sauerstoff: $8^3 = 512$, Kalzium: $20^3 = 8000$)

Die Absorption nimmt ungefähr mit der dritten Potenz der Wellenlänge zu.

Deshalb wird langwellige, also energieärmere Röntgenstrahlung als *weiche* und kurzwellige Röntgen- und γ -Strahlung als *harte* Strahlung bezeichnet.

Compton-Effekt

Gemäß der Dualität des Lichtes (Welle-Korpuskel) können sich γ -Quanten unter bestimmten Bedingungen wie kleine

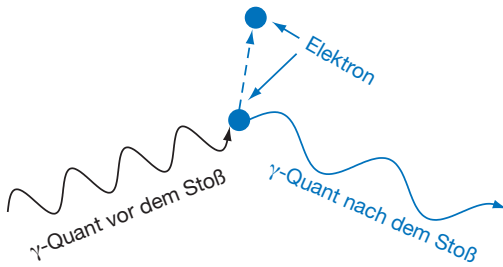


Abbildung 197: Compton-Effekt beim Zusammenstoß eines γ -Quants mit einem Elektron.

Korpuskel verhalten und beim Zusammenstoß mit Elektronen einen elastischen Stoß ausüben. Das Elektron wird dabei beschleunigt, das γ -Quant wird in seiner Richtung abgelenkt und gibt einen Teil seiner Energie an das Elektron ab. Deshalb hat das γ -Quant nach dem Stoß eine größere Wellenlänge und geringere Frequenz.

Paarbildung

Quanten mit einer Energie von einigen MeV können unter bestimmten Bedingungen ihre Energie nach der Beziehung $E = m c^2$ in Masse verwandeln. Dabei entsteht ein Paar aus einem negativen Elektron und einem positiven Positron.

Das Positron gehört zur sog. Antimaterie. Beim Zusammenstoß mit einem Elektron zerstrahlen Positron und Elektron, indem sie zwei entgegengesetzt gerichtete γ -Quanten von je 0,51 MeV aussenden. Die Energie 0,51 MeV entspricht nach der Beziehung $E = m c^2$ der Ruhemasse eines Elektrons bzw. Positrons.

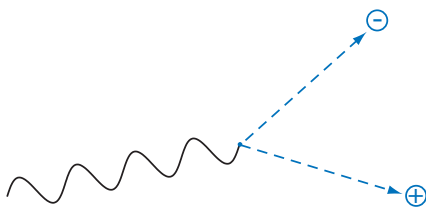


Abbildung 198: Paarbildung: Ein hochenergetisches γ -Quant wandelt sich in ein Positron und ein Elektron um.

In der Positronen-Emissions-Tomografie, PET, (s. S. 166) finden Positronen neuerdings Anwendung als Grundlage eines bildgebenden Verfahrens. Sie entstehen dort allerdings beim Zerfall künstlich erzeugter Nuklide und haben nichts mit der Schwächung von γ -Strahlung zu tun.

Kernreaktionen

Gelegentlich fragen Patienten, die eine Vielzahl von Röntgenaufnahmen über sich ergehen lassen müssen, ob sie dadurch radioaktiv werden können.

Diese Frage kann verneint werden, denn Röntgenquanten haben eine Energie von ca. 100 000 eV, während γ -Quanten eine Energie von mehreren Millionen eV besitzen müssen, um künstliche Kernumwandlungen einleiten zu können.

Kernreaktionen spielen deshalb bei der Schwächung von Röntgenstrahlung keine Rolle, ebenso wenig wie die Paarbildung.

6.4.3 Exponentielles Schwächungsgesetz

Röntgenstrahlung wird beim Durchtritt durch Materie durch Absorption, Streuung und den Compton-Effekt geschwächt. Die Strahlung wird umso mehr geschwächt,

- je höher die Ordnungszahl der durchstrahlten Materie ist,
- je langwelliger oder weicher die Strahlung ist,
- je größer die Schichtdicke der durchstrahlten Materie ist.

Je höher die Intensität der Strahlung ist, desto mehr Strahlung wird absorbiert. Die Schwächung einer monoenergetischen Strahlung wird durch eine Exponentialfunktion beschrieben, denn

immer, wenn die Zu- oder Abnahme einer Größe proportional ihrem jeweiligen Wert ist, lässt sich ihre Zu- oder Abnahme durch eine Exponentialfunktion beschreiben. Weitere Erläuterungen werden beim Gesetz des radioaktiven Zerfalls auf Seite 161 ff. und beim lambert-beerschen Gesetz auf Seite 222 gegeben.

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

I_0 : Intensität vor
der Schichtdicke d
 I : Intensität hinter
der Schichtdicke d

Der Schwächungskoeffizient μ ist umso größer,

- je höher die Ordnungszahl der durchstrahlten Materie ist und
- je langwelliger oder weicher die Strahlung ist.

Weil die Röntgenstrahlung keine einheitliche Wellenlänge hat, hat μ keinen einheitlichen Wert, so dass das exponentielle Schwächungsgesetz nur in Annäherung gilt. Mit zunehmender Eindringtiefe in das Gewebe wird die Röntgenstrahlung zwar schwächer aber auch härter, weil zunächst die weichen Anteile der Strahlung absorbiert werden.

Halbwertsdicke

Die Halbwertsdicke d_H ist die Schichtdicke, nach der die Intensität auf die Hälfte abgefallen ist.

Nach der doppelten Halbwertsdicke fällt die Intensität der Strahlung auf ein Viertel ab, nach der dreifachen Halbwertsdicke auf ein Achtel usw. Die Halbwertsdicke d_H ist so bemessen, dass

$$\begin{aligned} I/I_0 &= 0,5 = e^{-\mu d_H} \\ \ln 0,5 &= -\mu d_H = -0,693 \\ \mu d_H &= 0,693 \\ d_H &= 0,693/\mu \end{aligned}$$

Die Halbwertsdicke hängt vom Schwächungskoeffizienten μ und damit von der Art des durchstrahlten Materials und von der

Wellenlänge bzw. Frequenz der Strahlung ab:

Je höher die Frequenz, d. h. je energiereicher und härter die Strahlung ist, desto kleiner ist μ und desto größer ist d_H .

Wie aus der Abbildung 196 hervorgeht, ist Röntgenstrahlung jedoch nicht monoenergetisch, sondern besteht aus verschiedenen Wellenlängen mit jeweils einem anderen Schwächungskoeffizienten μ und damit jeweils einer anderen Halbwertsdicke d_H .

Die Halbwertsdicke d_H sagt lediglich aus, nach welcher Dicke nur noch die Hälfte der ursprünglichen Strahlung vorhanden ist.

Halbwertsdicke für β -Strahlung

Bei der Absorption und beim Compton-Effekt entsteht aus der Röntgenstrahlung β -Strahlung, wobei die **biologische Gefährlichkeit zunehmen kann**, weil β -Strahlung eine *deutlich kürzere Halbwertsdicke* hat und ihre Energie damit schneller auf die durchstrahlte Materie überträgt.

Halbwertsdicke für α -Strahlung

Die Halbwertsdicke für α -Teilchen liegt in festen und flüssigen Stoffen unterhalb eines Millimeters. Weil sich bei so geringen Halbwertsdicken kein Strahlenkegel aufbauen kann, ist der Begriff Halbwertsdicke für α -Teilchen nicht üblich.

Zusammenfassung

Die Interaktion zwischen radioaktiver Strahlung und durchstrahlter Materie ist komplex, weil sich die Strahlung beim Durchtritt durch die Materie verändert. Dies spielt insbesondere bei der Bestrahlungsplanung von Tumorpatienten eine Rolle, zumal dort der Grat zwischen Nutzen und Schaden in der Regel sehr schmal ist.

Insgesamt gilt bezüglich der Halbwertsdicken die **Faustregel**:

α Buchseite, β Buch, γ Bibliothek

6.5 Dosimetrie

6.5.1 Maßeinheiten

Die Dosimetrie beschäftigt sich mit der Messung ionisierender Strahlung. Im Vordergrund steht die Messung der Strahlendosis (Dosismetrie), aber natürlich wird auch die Art der ionisierenden Strahlung berücksichtigt, also, ob es sich um α -, β -, γ -, Röntgen- oder Neutronenstrahlen handelt.

Energiedosis

Die Energiedosis gibt an, welche Energie von der Strahlung auf die bestrahlte Materie übertragen wird.

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{durchstrahlte Masse}}$$

Die kohärente Einheit im SI ist das **Gray**, abgekürzt Gy, als $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Ws/kg}$.

Es ist zu beachten, dass sich die Energiedosis auf die durchstrahlte Masse bezieht. Beispielsweise werden bei der Bestrahlung von Tumoren *Herddosen* von ca. 40–60 Gy angewendet. Wenn bei einem 70 kg schweren Patienten ein 700 g schwerer Tumor eine durchschnittliche Herddosis von 50 Gy erhält und wenn – als Rechenbeispiel – im gesunden Gewebe keine Strahlung absorbiert würde, ergäbe sich rechnerisch eine *Ganzkörperdosis* von 0,5 Gy.

Ionendosis

Eine wichtige Einheit ist auch die Ionendosis, die sich auf die durch Ionisation in Luft entstehende Ladung bezieht.

Die Erzeugung von Ionen ist das gemeinsame Kennzeichen von α -, β -, γ -, Röntgen- und Neutronenstrahlen.

$$\text{Ionendosis} = \frac{\text{entstandene Ladung}}{\text{durchstrahlte Masse}}$$

Die kohärente Einheit im SI ist Coulomb pro Kilogramm.

Die Energiedosis und Ionendosis lassen sich ineinander umrechnen, wobei der Umrechnungsfaktor vom durchstrahlten Material abhängt, weil die pro Ionenpaar vom Material aufgenommene Energie unterschiedlich ist.

Dieselbe Strahlung kann in verschiedenen Materialien eine unterschiedliche Ionen- bzw. Energiedosis entfalten, denn bei der Interaktion zwischen Strahlung und durchstrahltem Material kommt es auf beide Partner an.

Unter der **Dosisleistung** versteht man die pro Zeit aufgenommene Ionen- bzw. Energiedosis.

6.5.2 Messgeräte

Die verwendeten Messgeräte beruhen auf zwei Prinzipien, auf der Ionisation und auf der Fluoreszenzwirkung ionisierender Strahlung. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit der Filmdosimetrie, etwa in Form der Plaketten, die vom medizinischen Personal in Röntgenabteilungen getragen werden.

Geiger-Müller-Zählrohr

Dieses häufig auch einfach als Geigerzähler oder als Zählrohr bezeichnete Gerät besteht aus einem Metallrohr, in dessen Mitte sich ein dünner Draht befindet, der gegen die Rohrwandung eine hohe Spannung aufweist. Ein in das Rohr eintretendes α - oder β -Teilchen bzw. γ -Quant ionisiert einige Gasmoleküle, die im elektrischen Feld des Rohres so stark beschleunigt werden, dass sie beim Zusammenstoß mit anderen Molekülen diese ebenfalls ionisieren. Durch diesen **Stoßionisation** genannten Vorgang bildet sich eine Lawine von Ladungsträgern (Elektronenlawine). Es kommt zu einem kurzen Stromstoß und die am Zählrohr

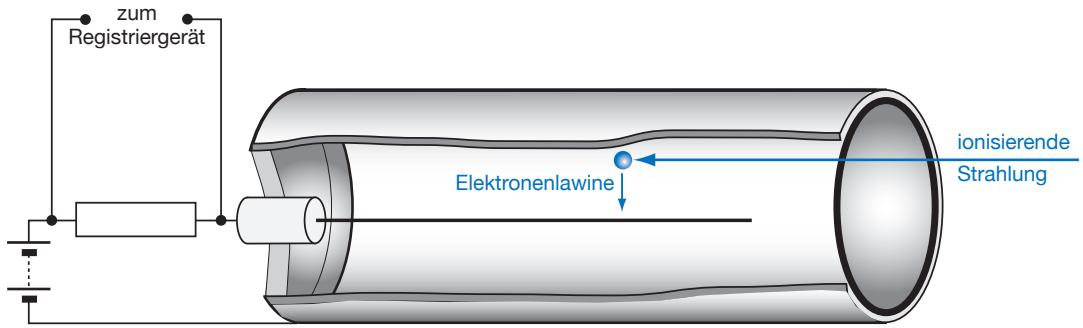


Abbildung 199: Funktionsprinzip des Geiger-Müller-Zählrohres. Zwischen dem Draht in der Mitte des Zählrohres und der Wand liegt eine sehr hohe Spannung, damit jedes ionisierte Gasmolekül eine Stoßionisation auslöst.

anliegende Spannung sinkt ab, sodass der Stromfluss zum Erliegen kommt. Im Geiger-Müller-Zählrohr ruft also jedes α - und β -Teilchen bzw. jedes γ -Quant einen kurzen Stromstoß hervor, der einzeln registriert werden kann.

Um die Stoßionisation zu erleichtern, befindet sich das Gas im Inneren der meisten Zählrohre unter erniedrigtem Druck. Deshalb muss das Eintrittsfenster mechanische Stabilität aufweisen, was die Durchlässigkeit des Fensters für α -Strahlen und niederenergetische β -Strahlen einschränkt.

Die Registrierung von γ -Strahlung kann nur mit geringer Empfindlichkeit erfolgen, weil – je nach Frequenz bzw. Härte der γ -Strahlung – nur etwa eins von 100 in das Rohr eintretenden γ -Quanten dort eine Ionisation bewirkt, während die restlichen 99 das Zählrohr unverändert wieder verlassen.

Wegen seiner geringen Empfindlichkeit wird der Geigerzähler im medizinischen Bereich fast überhaupt nicht verwendet.

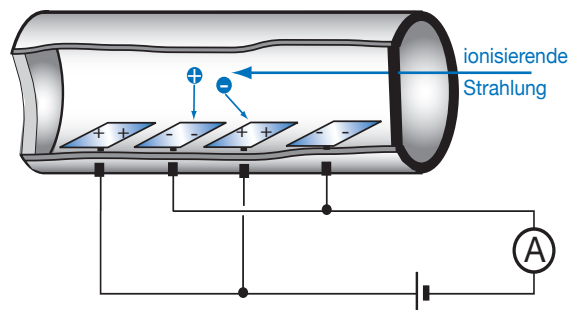
Abbildung 200: Funktionsprinzip der Ionisationskammer: Die durch Strahlenwirkung entstehenden Ionen werden zu den gegennamigen Elektroden abgesaugt und über ein empfindliches Amperemeter gemessen.

Ionisationskammer

Wenn man nicht an der Anzahl der einzelnen α -, β - oder γ -Strahlen interessiert ist, sondern wissen möchte, **welche Ionenmenge durch die Strahlung erzeugt wird**, benutzt man die Ionisationskammer:

In der Ionisationskammer befinden sich negativ und positiv geladene Elektroden, die die bei den Ionisationsvorgängen entstehenden Ionen ansaugen sollen. Das elektrische Feld in einer Ionisationskammer ist so stark, dass die entstehenden Ionen sich umgehend zur gegennamigen Elektrode bewegen, bevor sie sich wieder vereinigen. Hierbei wird das in der Ionisationskammer befindliche Gas entladen, d. h. von Ladungsträgern befreit.

Das elektrische Feld ist aber nicht so stark, dass es zur Stoßionisation kommt, also neue Ladungsträger erzeugt werden. Die an den Elektroden ankommende Ladung entspricht deshalb genau der durch Ionisation entstandenen Ladung.



Szintillationszähler

Der Szintillationszähler (lat. *scintilla*: Funke) ist ein empfindliches Nachweisgerät für γ -Strahlung. Er beruht auf der **Fluoreszenzwirkung**, die γ -Quanten in einem Natriumjodidkristall entfalten. Die in den NaJ-Kristall einfallenden γ -Quanten erzeugen Lichtblitze, deren Stärke zur Energie der γ -Quanten proportional ist.

Die Lichtblitze werden in einem dem NaJ-Kristall angeschlossenen Fotomultiplier in elektrische Spannungstöße verwandelt. Hierbei werden durch den Fotoeffekt (s. S. 132) aus der Fotokathode Elektronen ausgelöst. Diese werden auf dem Weg von einer Metallplatte zur anderen durch ein elektrisches Feld beschleunigt und schlagen beim Aufprall auf die Metallplatte stets neue Elektronen aus der Platte heraus.

Die Spannungstöße werden einem Registriergerät zugeführt, welches sowohl die Zahl als auch die Energie der einfallenden γ -Quanten erfassen kann.

Bei **szintigrafischen Untersuchungen**, etwa bei der Suche nach Metastasen oder bei der Funktionsdiagnostik der Nieren, wird ^{99m}Tc an geeignete Moleküle

gekoppelt und intravenös gespritzt. Die mit ^{99m}Tc markierten Moleküle wandern zu den Metastasen oder werden über die Nieren ausgeschieden. Das ^{99m}Tc zerfällt wie auf Seite 165 besprochen zu ^{99}Tc und sendet dabei einen γ -Quant der Energie von 140 KeV aus. Durch die Messung der ausgesandten γ -Quanten kann von außen der Verbleib der markierten Moleküle verfolgt werden.

Die Messung geschieht über sog. Gamma-Kameras. Diese bestehen aus einem Szintillationszähler, dem als „Linse“ ein Bleikollimator vorgeschaltet ist. Dies ist ein Bleiklotz mit vielen dünnen Bohrungen, die nur solche γ -Strahlen passieren lässt, die genau aus der Richtung dieser Bohrungen kommen.

Fast jedes in den Natriumjodid-Kristall einfallende γ -Quant erzeugt dort auch einen Lichtblitz und kann registriert werden. Daraus ergibt sich die hohe Empfindlichkeit des Szintillationszählers, die Voraussetzung dafür ist, dass die Patienten nicht stärker strahlenbelastet werden als unvermeidlich ist.

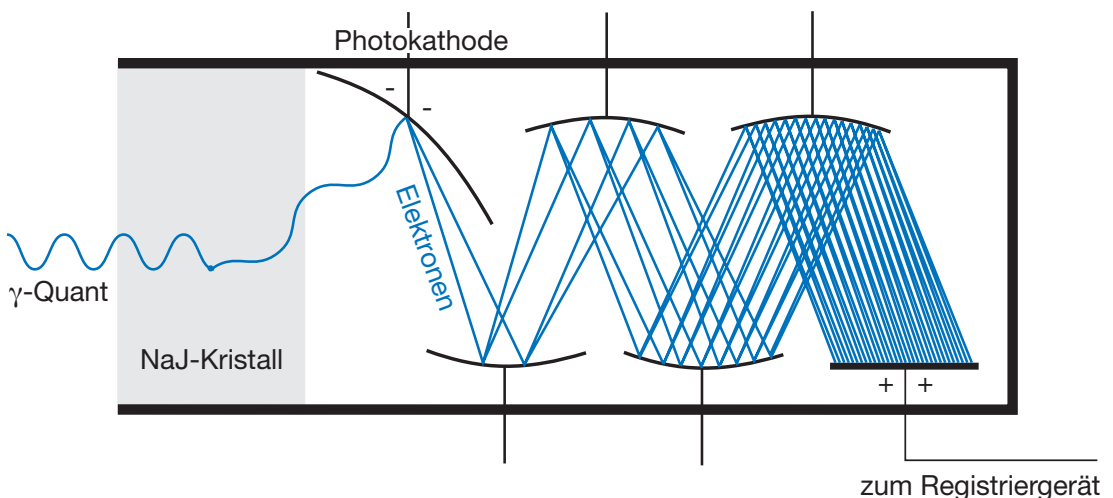


Abbildung 201: Funktionsprinzip eines Szintillationszählers: Das kurzwellige γ -Quant erzeugt in Natriumjodidkristall einen Lichtblitz, der im angeschlossenen Fotomultiplier eine Elektronenlawine auslöst.

6.6 Strahlenschutz

Wilhelm Conrad Röntgen und *Marie Curie*, die Pioniere der Röntgenstrahlung und Radioaktivität, sind an den Folgen ihrer Forschungen gestorben, an Leukämie, einer von ionisierenden Strahlen ausgelösten Blutkrankheit.

Doch es dauerte lange, bis man die Gefährlichkeit ionisierender Strahlung erkannt hat. Noch in den 1950er-Jahren gehörte es zum guten Ton eines modernen Schuhgeschäftes, die Füße seiner Kunden mit Röntgenstrahlen zu durchleuchten, um zu überprüfen, ob die Schuhe auch bequem sitzen.

Ionen, freie Radikale, Molekülbrüche

α -, β -, γ -, Röntgen- und Neutronenstrahlen hinterlassen beim Durchtritt durch pflanzliche, tierische oder menschliche Zellen eine Spur der Zerstörung.

Sie können große Molekülketten wie etwa die DNS-Stränge direkt zerbrechen. Ihre Wirkung beruht jedoch hauptsächlich darauf, dass sie Moleküle ionisieren und in sog. freie Radikale zerspalten, extrem reaktionsfreudige Rumpfmoleküle.

Die eigentliche Zerstörung erfolgt durch nachfolgende chemische Reaktionen. Hierbei spielt auch die Inaktivierung von Enzymen eine wichtige Rolle. Die schweren α -Teilchen werden sehr schnell abgebremst, d. h. die Schäden werden unmittelbar hintereinander angerichtet. Dadurch ist eine Reparatur kaum möglich und die biologischen Schäden sind bezogen auf die übertragene Energie 20-mal schwerer als bei β - oder γ -Strahlen.

Die Abbremsung von β -Strahlen erfolgt etappenweise, indem es immer wieder zu Kollisionen kommt und die Elektronen dabei schrittweise langsamer werden. Die von einem Elektron angerichteten Schäden ver-

teilen sich deshalb auf verschiedene Zellen und können in der Regel repariert werden.

Zur Ionisation eines Moleküls oder Atoms muss Arbeit, die sog. **Ionisierungsenergie**, geleistet werden. Dies gilt für feste oder flüssige Stoffe genauso wie für Gase. Hierzu sind – je nach der chemischen Beschaffenheit des zu ionisierenden Moleküls – Quanten mit einem Energiegehalt von ca. 30–60 eV erforderlich. Dies entspricht ungefähr der Grenze zwischen UV-Licht und sehr weichen Röntgenstrahlen (vgl. Seite 197).

Äquivalentdosis

Die Äquivalentdosis bezieht sich auf den biologischen Schaden, der durch α -, β -, γ -, Röntgen- und Neutronenstrahlung hervorgerufen wird. Die Einheit im SI ist das Sievert.

- Für β -, Röntgen- und γ -Strahlen entspricht der in Sievert gemessene Schaden der absorbierten Strahlendosis in Gray.
- Für α -Strahlen ist der Sievert-Wert 20-mal größer als der Gray-Wert.
- Für Neutronenstrahlen, die in der Krebsbehandlung eingesetzt werden und bei Atombombenexplosionen auftreten, liegt der Umrechnungsfaktor je nach ihrer Geschwindigkeit zwischen 5 und 20.

Effektive Äquivalentdosis

Die Äquivalentdosis gibt an, welchen Schaden die Strahlung im durchstrahlten Gewebe anrichtet. Der Schaden, den der **gesamte Organismus** nimmt, hängt aber auch davon ab, welche Organe betroffen sind.

Zum Zwecke der Standardisierung geht man nach der Internationalen Strahlenschutzkommission davon aus, dass der Mensch aus 13 „Organen“ besteht, wobei die Gonaden den Wichtungsfaktor 0,20 besitzen, das rote Knochenmark, der Dickdarm, der Magen und die Lunge je 0,12, die Schilddrüse, die Blase, die Brust,

die Leber und die Speiseröhre je 0,05, die Knochenoberfläche und die Haut je 0,01 und alle restlichen Organe zusammen nochmal 0,05.

Die effektive Äquivalentdosis des Gesamtorganismus errechnet sich als Summe der nach dem obigen Schema gewichteten in den einzelnen Organen akkumulierten Äquivalentdosis.

Maßeinheit ist das **Sievert (Sv)**.

Grenzwerte

1902, noch bevor Conrad Röntgen und Marie Curie an Leukämie erkrankt waren, hielt man eine effektive Äquivalentdosis von 25 Sievert für ungefährlich, 1920 glaubte man, 1 Sv wäre unbedenklich, 1936 galten 0,25 Sv als unschädlich. 1948 wurde der Grenzwert auf 0,15 Sv festgesetzt.

Seit 1956 gelten $0,05 \text{ Sv} = 50 \text{ mSv pro Jahr}$ als Grenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen.

Praktischer Strahlenschutz

Im Krankenhaus und im Isotopenlabor läuft der Strahlenschutz auf die Beachtung folgender Prinzipien hinaus:

- geringstmögliche Dosis
- größtmöglicher Abstand
- bestmögliche Abschirmung

Wie diese Prinzipien zu erfüllen sind, hängt von den Umständen des Einzelfalls ab.

Geringstmögliche Dosis bei Röntgenuntersuchungen heißt z. B.: Strahlenfeld so klein wie möglich, Verwendung sog. Verstärkerfolien, automatische Belichtungssteuerung, um Überbelichtungen zu vermeiden, optimale Einstellung des Entwicklungsgerätes. Bei der Röntgendurchleuchtung bedeutet es: Verwendung eines Bildwändlers statt eines Leuchtschirms, minimale Einschaltzeit, Strahlenfeld so klein wie möglich.

Quadratisches Abstandsgesetz

Das quadratische Abstandsgesetz besagt, dass die **Dosis mit dem Quadrat des Abstandes sinkt**. Dieses Gesetz gilt auch in der Optik und in der Akustik, denn es beruht auf der räumlichen Geometrie.

In der untenstehenden Abbildung ist ein Strahlenkegel dargestellt. Mit zunehmender Entfernung von der Strahlenquelle steigt sowohl die Breite a als auch die Breite b des Strahlenkegels. Die Fläche $a \cdot b$ des Strahlenkegels steigt damit proportional zum Quadrat des Abstandes.

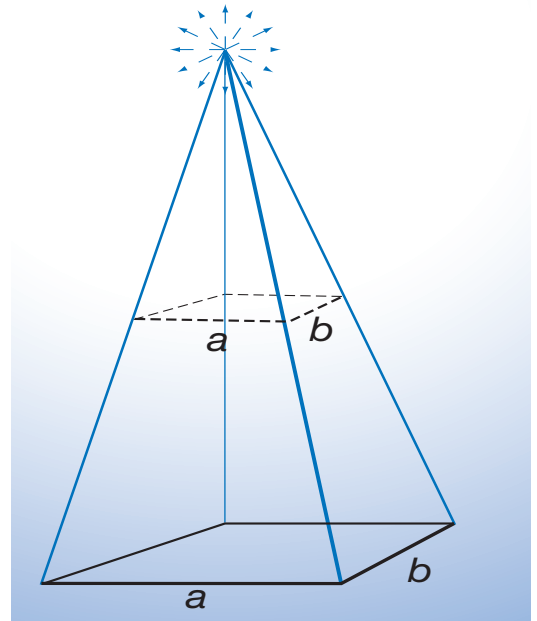


Abbildung 202: Die Breite des Strahlenkegels steigt proportional zum Abstand von der Strahlenquelle.

Natürliche Strahlenexposition

Die natürliche Strahlenexposition des Menschen beträgt etwa 2,3 mSv pro Jahr.

Hiervon entfallen auf die kosmische Strahlung etwa 0,3 mSv, auf terrestrische Strahlung aus dem Erdboden und aus Baumaterialien etwa 0,5 mSv, auf Nahrungsaufnahme vor allem durch

⁴⁰Kalium etwa 0,4 mSv und auf Inhalation vor allem von Radon etwa 1,1 mSv.

Diese Werte sind Mittelwerte für Deutschland. Es gibt Gegenden, z. B. im Iran oder in Indien, in denen die terrestrische Strahlung um ein Vielfaches höher ist, weil der Sand hohe Thorium-Konzentrationen aufweist.

In 4000 Metern Höhe beträgt die Höhenstrahlung etwa 2 mSv pro Jahr.

Unter besonderen Bedingungen kann auch die Strahlenexposition durch Nahrungsaufnahme und durch Radoninhalation auf ein Mehrfaches der oben genannten Werte steigen.

Medizinische Strahlenexposition

Medizinische Maßnahmen belasten den Durchschnittsbürger mit etwa 0,5 mSv pro Jahr, während derzeit durch kerntechnische Anlagen, Tschernobyl, Fukushima und die Folgen der Atomwaffenversuche in den 1960er-Jahren eine jährliche Belastung von nur noch knapp 0,05 mSv vorhanden ist.

Der Durchschnittswert aufgrund medizinischer Maßnahmen muss insofern relativiert werden, als er hauptsächlich ältere Menschen betrifft, bei denen das genetische Risiko keine Rolle mehr spielt und die auch häufig in so weit fortgeschrittenem Lebensalter sind, dass sie z. B. eine strahleninduzierte Leukämie nicht mehr erleben.

Als Faustregel kann man davon ausgehen, dass bei der Röntgendurchleuchtung im Strahlenfeld eine Dosis von etwa 10 mSv pro Minute appliziert wird. Die Höhe der Gesamtbelastung richtet sich nach der Durchleuchtungsdauer und der Größe des Strahlenfeldes.

Bei einer normalen Thoraxaufnahme ohne Durchleuchtung entsteht im Strahlenkegel eine Belastung von ca. 0,2 mSv, eine Gonadendosis von weniger als 0,01 mSv und eine effektive Äquivalentdosis von knapp 0,1 mSv.

Gesundheitliche Risiken

Bei kerntechnischen Unfällen oder im Atomkrieg sind nach einer kurzfristigen Ganzkörperbelastung von mehr als 0,5 Sv = 500 mSv die Symptome einer akuten Strahlenkrankheit zu erwarten wie z. B. blutige Durchfälle, Erbrechen, Zusammenbruch der körpereigenen Abwehr und Infektion mit an sich harmlosen Erregern. Bei einer Dosis bis 2 Sv = 2000 mSv ist das Überleben wahrscheinlich, bei einer Belastung bis 6 Sv = 6000 mSv möglich, bei höheren Dosen unwahrscheinlich. Diese Erfahrungswerte wurden in Hiroshima gewonnen und in Tschernobyl bestätigt.

Das **genetische Risiko** hängt nicht von der effektiven Äquivalentdosis ab, sondern nur von der Gonadendosis, lässt sich aber aufgrund einer schlechten Datenlage nur ungenau quantifizieren.

Darüber hinaus ist das **teratogene Risiko** zu bedenken, das Risiko von Missbildungen bei Strahlenexposition während der Schwangerschaft. Art und Ausmaß der Schäden hängen hier vor allem vom Zeitpunkt ab, zu dem der Embryo der Bestrahlung ausgesetzt wird.

Nach derzeitigem Forschungsstand gibt es **keine Schwelle, unterhalb derer radioaktive Strahlung unschädlich** wäre, zumal es eine große Anzahl kryptogener Erkrankungen gibt, vor allem im Bereich der Onkologie, bei deren Genese die natürliche Strahlenexposition von immerhin 2,3 mSv eine Rolle spielen könnte.

Es gibt Schätzungen, nach denen bei einer zusätzlichen effektiven Äquivalentdosis von 10 mSv bei einer Million Menschen im Laufe der Jahre etwa 130 zusätzliche Krebserkrankungen zu erwarten sind.

Wie schwer der Nachweis der Kausalität zu führen ist, ergibt sich daraus, dass von dieser Million Menschen im Laufe der Jahre ohnehin mehr als 200 000 an einem Tumor versterben werden.