
6. Radioaktive Strahlung

6.1 Strahlenarten

Allgemeines über Strahlen

Strahlung ist Bestandteil des täglichen Lebens.

Beispiele:

1. Lichtstrahlen
2. Sonnenstrahlung
3. Röntgenstrahlen
4. Radioaktive Strahlen.

Unter Strahlung versteht man den gerichteten Durchgang von Energie durch den Raum.

Huygens (1629 - 1695) hielt die Strahlung für ein Wellen-, Newton für ein Korpuskelphänomen. Heutige Ansicht: Die Strahlung ist ein Quantenphänomen, das außerhalb der normalen Erfahrungswelt liegt (Dualismus Welle - Teilchen). Die Photonen sind die masselosen Quanten des elektromagnetischen Feldes.

Die Quantentheorie wurde entscheidend von Max Planck (1858 - 1947) entwickelt. Seine Kernaussage: Energie kann nur in Vielfachen einer kleinsten Portion abgegeben oder aufgenommen werden, und ist ein Vielfaches der zugehörigen Wellenlänge:

$$E = h \cdot f$$

(h: Plancksches Wirkungsquantum).

Bereiche der elektromagnetischen Strahlen vgl. Folie!

Für elektromagnetische Wellen gilt die Gleichung

$$c = \lambda \cdot f$$

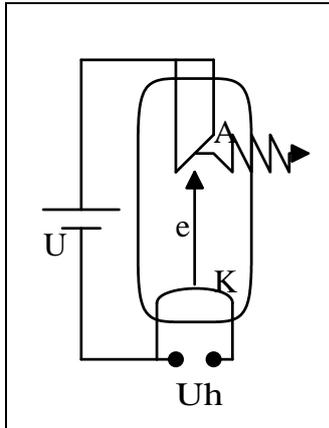
(c: Ausbreitungsgeschwindigkeit, λ : Wellenlänge, f: Frequenz).

Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen entstehen, wenn schnell bewegte Elektronen auf ein Hindernis treffen. Sie wurden 1895 von W. C. Röntgen (1845 - 1923) entdeckt.

Prinzip: In Glühkathodenröhren werden thermisch von der Kathode abgelöste Elektronen durch hohe Spannung (bis 500 kV) zur Anode hin stark

beschleunigt, so dass sie dort mit großer kinetischer Energie auftreffen (vgl. Skizze).



Dabei kann es zu verschiedenen Vorgängen kommen:

1. Die Elektronen verlieren ihre Energie beim Eindringen in die Anode und erwärmen diese. Dies gilt für 99 % aller Elektronen.
2. Die Elektronen werden beim Durchgang durch einzelne Atome des Anodenmaterials ganz oder teilweise abgebremst und geben ihre Energie als Röntgenbremsstrahlung ab.
3. Die Elektronen bringen die Atome des Anodenmaterials in einen angeregten Zustand. Die angeregten Atome gehen unter Aussendung einer für das Anodenmaterial charakteristischen Strahlung, die zu einem Linienspektrum führt, wieder in den Grundzustand über.

Der Nachweis der Röntgenstrahlung ergibt sich aus ihren Eigenschaften:

1. Röntgenstrahlen besitzen ein erhebliches, allerdings materialabhängiges Durchdringungsvermögen für alle Materie. Daraus ergeben sich etwa die bekannten Anwendung in der Medizin, der Materialprüfung u. ä.
2. Röntgenstrahlen vermögen viele Stoffe zu Fluoreszenz bzw. Phosphoreszenz anzuregen.
3. Röntgenstrahlen schwärzen fotografische Platten.
4. Röntgenstrahlen ionisieren Gase.
5. Röntgenstrahlen zeigen Interferenzen bei der Reflexion und beim Durchgang durch Kristalle.

In der Computertomographie wird die Abschwächung von Röntgenstrahlen im Körper gemessen. Dazu tastet ein dünnes Strahlenbündel schrittweise die zu untersuchende Partie ab und gibt die durchgelassene Strahlung an einen Rechner, der daraus Schnittbilder mit der genauen Lage von Organen, Krankheitsherden usw. berechnet.

Setzt man Röntgenstrahlen elektrischen oder magnetischen Feldern aus, so werden sie dadurch nicht beeinflusst; Röntgenstrahlen sind also keine Ströme geladener Teilchen.

Radioaktivität

Keine drei Jahre nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung fand Henri Antoine Becquerel (frz. Physiker, 1852 - 1908, NP 1903), dass Uransalze eine unsichtbare Strahlung aussenden, die die Eigenschaft hat, dass sie durch ein schwarzes, lichtundurchlässiges Papier hindurch eine fotografische Platte schwärzen kann. Außerdem ionisieren sie die Luft und entladen einen Kondensator. Auf Becquerel geht auch der Name Radioaktivität für diese Erscheinung zurück.

Versuch: Bringt man ein radioaktives Präparat in die Nähe eines aufgeladenen Elektroskops, so entlädt sich dieses rasch.

Erklärung: Offenbar ionisiert das radioaktive Präparat die Luft, und die Ionen gelangen zum Teil auf die jeweils entgegengesetzt geladenen Platten.

Bei der sofort einsetzenden weltweiten Untersuchung dieser Phänomene ergaben sich folgende zunächst merkwürdige Eigenschaften:

1. Die Aussendung radioaktiver Strahlen kann durch äußere Einwirkungen weder verstärkt noch verringert werden (Unabhängigkeit von Druck- und Temperaturänderungen). Daraus schloss man, dass es sich hierbei nicht um chemische Vorgänge handelte.
2. Ein radioaktives Präparat ist immer etwas wärmer als die Umgebung und gibt daher ständig Wärme ab. Ein Radiumpräparat der Masse 1 g gibt z. B. stündlich die Wärmemenge $Q = 575 \text{ J}$ ab.
3. Radioaktive Strahlung zeigt kein einheitliches Verhalten. Mit geeigneten Nachweisgeräten, deren Aufbau und Funktionsweise weiter unten besprochen wird, lässt sich zeigen, dass starke Magnetfelder die radioaktive Strahlung teilweise ablenken können.

Genauere Untersuchungen ergaben folgendes:

1. Bei den sog. Alphateilchen handelt es sich um Heliumkerne. Sie besitzen zwei positive Elementarladungen und haben die Massenzahl 4. Sie haben eine sehr kurze Reichweite in Luft, aber ein hohes spezifisches Ionisationsvermögen.
2. Bei den Betateilchen handelt es sich um schnell bewegte Elektronen. Sie besitzen eine negative Elementarladung und haben eine sehr kleine Ruhemasse. Sie haben eine größere Reichweite, aber geringere Ionisierungsfähigkeit als α -Strahlen.
3. Die Gammastrahlen sind elektromagnetische Wellenstrahlen im Gefolge der Prozesse beim α - und β -Zerfall. Sie transportieren keine elektrische Ladung und werden deshalb im Magnetfeld nicht abgelenkt.

Ein Atomkern, der Teilchen emittiert, muss sich selbst verändern. Kernvorgänge werden ähnlich wie chemische Reaktionen in Form von Gleichungen geschrieben; dabei schreibt man links unter den Kern die Kernladungszahl Z , links über den Kern die Massenzahl A . (Aus drucktechnischen Gründen erscheinen A und Z nicht über-, sondern nebeneinander!)

Vorgänge bei einem Alpha-Zerfall:

Beispiel: $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He} + \text{W}$.

Allgemein: $^A_Z\text{X} \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + ^4_2\text{He} + \text{W}$.

Beim Alphazerfall verringert sich die Massenzahl A um 4 und die Kernladungszahl Z um 2. Der Tochterkern wandert im Periodensystem um zwei Stellen nach links.

Vorgänge bei einem Beta-Zerfall:

Beispiel: $^{214}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{214}_{83}\text{Bi} + ^{-1}_0\text{e} + \text{W}$.

Allgemein: $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+1}\text{Y} + ^{-1}_0\text{e} + \text{W}$.

Beim Betazerfall wird ein Elektron emittiert, nachdem sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umgewandelt hat. Der Tochterkern wandert im Periodensystem um eine Stelle nach rechts.

Die Gammastrahlung tritt nicht isoliert auf, sondern ist eine bei Alpha- und Beta-Prozessen häufige Begleiterscheinung; sie bringt also keine Kernumwandlung im eben geschilderten Sinn mit sich.

Häufig sind die bei radioaktiven Prozessen entstehenden Tochterkerne ihrerseits wieder radioaktiv. Es lassen sich daher zu den in der Natur vorkommenden radioaktiven Elementen komplette "Ahnentafeln" erstellen, die man "natürliche Zerfallsreihen" nennt. Man kennt heute insgesamt 4 Zerfallsreihen, von denen eine aus dem künstlich hergestellten Neptunium (erst 1935 entdeckt) hervorgeht. Die drei schon länger bekannten Familien haben folgende "Stammväter" und stabilen Endprodukte:

$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$, $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$.

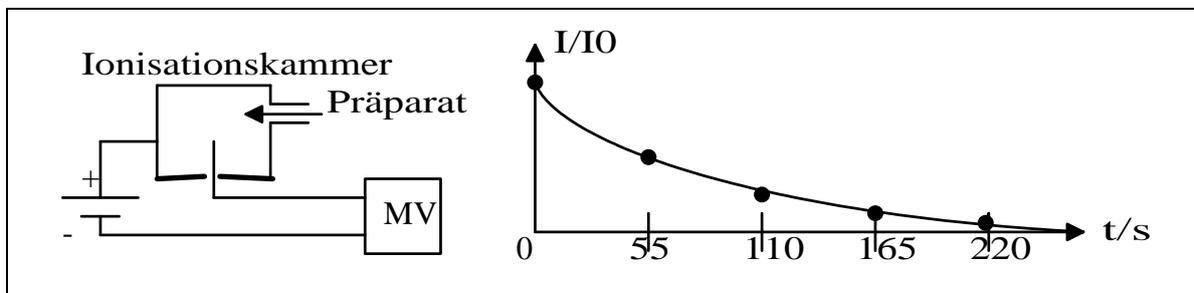
6.2 Halbwertszeiten

Das Zerfallsgesetz

Im allgemeinen ist es nicht möglich, den Zerfall eines Elements getrennt vom Zerfall der radioaktiven Folgeprodukte zu beobachten. Dies gelingt aber recht gut bei Verwendung des radioaktiven Gases Thoriumemanation ($^{220}_{86}\text{Rn}$), da dieses und sein Folgeprodukt ($^{216}_{84}\text{Po}$) sehr kurzlebig sind und praktisch unmittelbar aufeinander folgend zerfallen.

Versuch:

Thoriumemanation wird aus einem Gefäß, in dem sich eine Thoriumverbindung befindet, in eine Ionisationskammer gepumpt, deren Elektroden eine Spannung von ca. 1 kV gegeneinander haben. Ein Messverstärker in der Zuleitung zeigt den durch Ionisierung von Luftmolekülen hervorgerufenen Strom an.



Ergebnis: Nach jeweils ca. 55 s ist der Ionisationsstrom auf die Hälfte des 55 s vorher angezeigten Wertes abgesunken.

Auswertung: Der Verlauf der Kurve lässt eine Abnahme der Stromstärke nach einem Exponentialgesetz vermuten. Für die Abhängigkeit des Ionisationsstromes von der Zeit kann man also ansetzen:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Letztendlich folgt daraus für die Zahl N der unzerfallenen Teilchen

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

Die Konstante λ heißt Zerfallskonstante; sie wird in s^{-1} angegeben.

Anmerkungen:

1. Die oben angegebene Funktion für den zeitlichen Verlauf des radioaktiven Zerfalls ist eine stetige, beliebig oft differenzierbare Funktion. In Wirklichkeit zerfällt aber stets ein ganzer Kern, so dass die exakte Zerfallsfunktion ein Treppenfunktion mit Treppenhöhe 1 sein müsste. Da aber in sehr kurzer Zeit sehr viele Kerne zerfallen, ist auf den Zerfallsvorgang die Statistik anzuwenden. Die Zerfallsgleichung beschreibt also den zeitlichen Verlauf des Zerfalls sehr vieler Teilchen, ohne auf den Einzelprozeß einzugehen.
2. Die Zerfallswahrscheinlichkeit für einen bestimmten Kern im nächsten Augenblick ist stets genau so groß wie für alle übrigen Kerne. Man kann dies so ausdrücken: "Atome altern nicht."

Beim radioaktiven Zerfall sind von der ursprünglich vorhandenen Zahl N_0 von Kernen nach der Zeit t etwa $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ Kerne nicht zerfallen.

Kennzeichnende Größen beim radioaktiven Zerfall

Solange die Statistik auf den radioaktiven Zerfall anwendbar ist, kann ein Ende des Zerfalls nicht angegeben werden. Es ist aber möglich und üblich, als Maß für die Zerfallsgeschwindigkeit eines Elements die sog. Halbwertszeit T , also die Zeit, während der die Hälfte der anfangs vorhandenen Substanz zerfällt, anzugeben.

Zwischen der Zerfallskonstanten λ und der Halbwertszeit T besteht ein einfacher Zusammenhang:

$$N(T) = \frac{N_0}{2} \cdot e^{-\lambda \cdot T} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot T} .$$

Beiderseitiges Logarithmieren liefert

$$\ln \frac{1}{2} = \ln 1 - \ln 2 = -\ln 2 = -\lambda \cdot T \text{ bzw.}$$

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

Anmerkungen:

1. Halbwertszeiten reichen von ca. 10^{-10} s bis zu 10^{10} a.
2. Werden radioaktive Stoffe z. B. mit der Nahrung inkorporiert, so werden sie nach mehr oder weniger kurzer Zeit teilweise wieder ausgeschieden; es verbleiben im Körper daher weniger Atome als nach der Zerfallskurve anzutreffen sein sollten. Die biologische Halbwertszeit ist daher kürzer als die physikalische Halbwertszeit.

Unter der Aktivität A eines Präparats versteht man die zeitliche Änderung der Zahl der unzerfallenen Kerne, die Zerfallsgeschwindigkeit. Für sie gilt:

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

Die Einheit der Aktivität ist $1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Bq}$ (Becquerel).

Die Halbwertszeit T gibt die Zeitspanne an, nach der etwa die Hälfte der Kerne zerfallen ist. Es ist $\lambda = (\ln 2)/T$.

Die Aktivität A einer radioaktiven Substanz ist der Quotient aus der Anzahl der in einer kleinen Zeitspanne $\Delta t \ll T$ stattfindenden Zerfälle und dieser Zeitspanne Δt . Die Aktivität A ist proportional der noch nicht zerfallenen Anzahl von Atomen und nimmt wie diese exponentiell ab:

$$A(t) = \lambda \cdot N(t). \text{ Die Einheit der Aktivität ist } 1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}.$$

Zur Bestimmung des Alters organischer (kohlenstoffhaltiger) Substanzen eignet sich die sog. C-14-Methode:

In der Atmosphäre wird unter dem Einfluss der konstanten kosmischen Strahlung laufend das radioaktive Kohlenstoffisotop C-14 ($T = 5730$ a) gebildet, das sich mit dem Luftsauerstoff zu radioaktivem Kohlendioxid

verbindet. In der Luft hat sich längst ein konstantes Häufigkeitsverhältnis zwischen C-14 und C-12 (ca. $1,5 \cdot 10^{-12}$) eingestellt. Durch die Assimilation wird C-14 von den Pflanzen bzw. durch pflanzliche Nahrung von den Tieren aufgenommen. Solange ein Tier oder eine Pflanze lebt, steht deren Kohlenstoffgehalt dauernd in Kontakt mit dem Kohlenstoff der Atmosphäre und hat somit die gleiche C-14-Konzentration wie dieser. Stirbt der Organismus ab, so sinkt der C-14-Gehalt nach dem Zerfallsgesetz.

Aus dem Anteil des radioaktiven Kohlenstoffs C-14 am Kohlenstoff der organischen Probe kann man dann auf das Alter der Probe (= Sterbedatum) schließen (Beispiel: Grabtuch von Turin).

6.3 Wechselwirkung der Strahlungsarten mit Materie

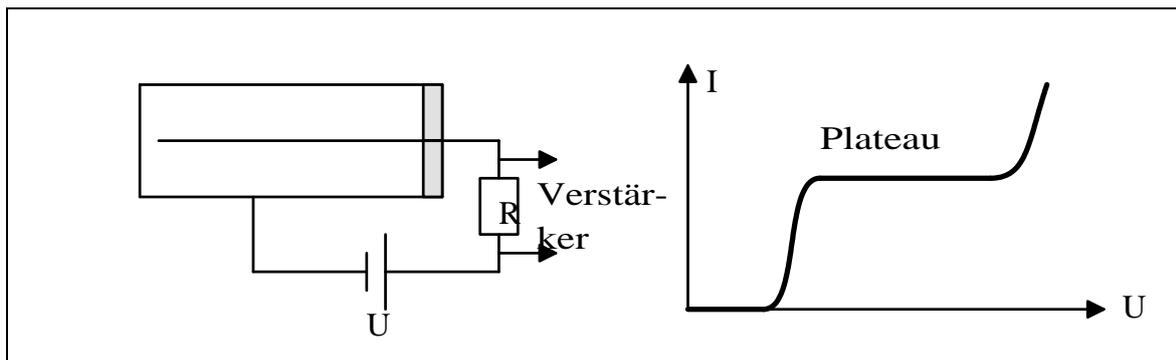
Radioaktive Strahlung kann im allgemeinen nicht direkt beobachtet werden. Man macht sich daher ihre Wechselwirkung mit Materie zunutze und verstärkt diese, um sie dann einem Anzeigergerät zuzuführen.

Wechselwirkungen in diesem Sinne sind Ionisation der Luft, Schwärzung fotografischer Platten und Szintillationen (Lichtblitze, die von entsprechend präparierten Oberflächen beim Beschuss mit Teilchen ausgesandt werden).

Die nachfolgend besprochenen Nachweisgeräte für hochenergetische Strahlen beruhen auf der Ionisationswirkung derartiger Strahlung und bedingen dadurch ihren Aufbau.

Das Geiger-Müller-Zählrohr

Skizze:



Das Geiger-Müller-Zählrohr (H. Geiger (1882 - 1945), W. Müller (geb. 1902)) ist im Prinzip eine besonders empfindliche Ionisationskammer, die auf einer Art innerer Verstärkung schwacher primärer Ionisationsprozesse beruht. Das Zählrohr besteht aus einem gasgefüllten Rohr ($p = 100 \text{ hPa}$), in dessen Achse ein Draht als Anode (Spannung gegen das Gehäuse etwa 500 Volt) gespannt ist. Durch das extrem dünne Einlassfenster können schnelle geladene Teilchen ins Innere gelangen und dort Gasatome ionisieren. Es kommt zu einer lawinenartig anwachsenden Gasentladung. Die Elektronen wandern wegen ihrer kleinen Masse schnell zum Draht und neutralisieren ihn kurzzeitig, während die trägen positiven Ionen eine positive Raumladung um den Draht bilden, die in etwa 10^{-4} s zur negativ geladenen Zählrohrwand wandert. Das Gebiet unmittelbar um den Draht wird dadurch kurzzeitig feldfrei, so dass das Zählrohr während dieser Zeit auf keine weiteren einfallenden Teilchen ansprechen kann (Totzeit des Zählrohrs). Der Stromstoß erzeugt an einem Vorwiderstand einen Spannungsstoß, der über einen Verstärker zur Registrierung der einfallenden Teilchen dient. Die einmal in Gang gekommene Entladung wird bei vielen Zählrohren durch im Rohr befindliche Alkoholdämpfe oder Halogengase wieder gelöscht: Die mehrato-

migen Dampfmoleküle übernehmen die Energie der Ionen und spalten sich; dabei wird soviel Energie verbraucht, dass keine weiteren Elektronen freigesetzt werden können.

Die Kennlinie eines Zählrohrs: Ein Zählrohr wird mit einer regelbaren Spannungsquelle verbunden; vor dem Zählrohrfenster wird ein radioaktives Präparat aufgestellt. Dann wird die Zählrohrspannung kontinuierlich gesteigert. Ergebnis: siehe Skizze oben!

Anmerkungen:

Unterhalb der Einsatzspannung U_e spricht der Zähler auf einfallende Teilchen nicht an; in einem schmalen Spannungsbereich darüber nimmt die Zählrate linear mit der Spannung zu (Proportionalbereich). Oberhalb davon ist die Zählrate in einem größeren Bereich von der Zählrohrspannung unabhängig (Plateau, Auslösebereich des Zählers); die Zählrate hängt hier praktisch nur von der Zahl der einfallenden Teilchen ab. Der Zähler unterscheidet in diesem Bereich auch nicht mehr die einfallenden Teilchen hinsichtlich ihres Ionisationsvermögens, ihrer Art oder ihrer Energie. Weiteres Steigern der Spannung führt zu spontanen, nicht mehr durch einfallende Strahlung bewirkten Entladungen: der Zähler ist dann nicht mehr brauchbar.

Die Nebelkammern

Mit dem diesem Gerät können die Bahnen radioaktiver Strahlung sichtbar gemacht werden. Die Nebelkammern machen sich ebenfalls die ionisierende Wirkung der radioaktiven Strahlen zunutze.

Zum Verständnis der Wirkungsweise sind aber noch folgende physikalischen Grundtatsachen zu beachten: Wird ein mit Wasserdampf gesättigter Raum abgekühlt, so wird der Dampf übersättigt. Nebelbildung tritt aber nur ein, wenn Staubpartikel o. ä. als Kondensationskeime vorhanden sind.

C. Wilson (1669 -1959) konnte zeigen, dass auch Gasionen bei bestimmten Bedingungen als Kondensationskeime wirken können.

Der Szintillationszähler

Die Teilchen der radioaktiven Strahlung verursachen beim Auftreffen auf geeignete Substanzen, z. B. Zinksulfid, Leuchterscheinungen; diese rühren daher, dass die ausgesandten Teilchen auf kürzestem Weg absorbiert werden. Die auf kleinstem Bereich frei werdende Energie genügt vollauf, um ein ZnS-Molekül so anzuregen, dass es einen Lichtblitz aussendet, den man im Dunkeln mit einer Lupe sehen kann. Mit dem Szintillationszähler können allerdings keine von Elektronen herrührenden Szintillationen beobachtet werden, da diese unterhalb der Wahrnehmungsfähigkeit des menschlichen Auges liegen.

Der Szintillationszähler ist der älteste Zähler. Er geriet allerdings fast wieder in Vergessenheit, da die Empfindlichkeit des Auges bei Ermüdung schnell abfällt und daher länger andauernde Experimente nicht durchgeführt bzw. ausgewertet werden können.

Die Szintillationsmethode wird in jüngster Zeit in einer neuen, objektiven Form wieder aufgegriffen: Die entstehenden Lichtblitze werden mit einem sog. Fotomultiplier (Sekundärelektronenvervielfacher) registriert. Dabei handelt es sich um ein Vakuumphotoelement, in dem neben einer empfindlichen Fotokathode mehrere zusätzliche Elektroden untergebracht sind. Die von einem Lichtblitz freigesetzten Fotoelektronen werden auf die erste zusätzliche Kathode beschleunigt und setzen dort neue Elektronen frei, die zur zweiten zusätzlichen Kathode fließen usw. Auf diese Weise erhält man schon im Innern des Vervielfachers eine etwa 10^7 -fache Verstärkung. Diese Szintillationszähler sind sehr empfindlich und können sogar einzelne Elektronen registrieren. Außerdem besitzen sie eine erheblich kleinere Totzeit als die Geiger-Müller-Zählrohre.

6.4 Absorption

Vor allem im Hinblick auf die biologische Wirkung der radioaktiven Strahlung und der daraus folgenden Maßnahmen zum Strahlenschutz ist die Kenntnis der Art der Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie ganz wesentlich. Grundsätzlich gilt, dass energiereiche Strahlung beim Durchgang durch Materie ihre Energie ganz oder teilweise an die durchstrahlte Materie abgibt und dabei selbst eine Schwächung erfährt, die bei genügend dicken Materieschichten dazu führen kann, dass die Strahlung hinter der Schicht überhaupt nicht mehr nachweisbar ist.

Bei dieser Wechselwirkung können die Korpuskeln oder Quanten der energiereichen Strahlung entweder mit den Elektronen der Atomhülle oder mit den Atomkernen in Wechselwirkung treten.

Im einzelnen lassen sich dabei folgende Wirkungen unterscheiden:

1. Mittelbare Absorption (allmähliche Abbremsung, Wärmeentwicklung)
2. elastische oder inelastische Streuung
3. echte Absorption (Wärmeentwicklung oder Sekundärstrahlung)
4. Ionisation.

Im folgenden werden einige charakteristische Experimente vorgestellt und durchgeführt.

Die Reichweite von Alpha-Strahlen

Die Reichweite von Alpha-Teilchen lässt sich aus Nebelkammeraufnahmen direkt bestimmen. Man erhält dabei für das verwendete Präparat typische Reichweiten von einigen Zentimetern. Dieses Ergebnis lässt sich leicht überprüfen:

Versuch: Ein Am-241-Präparat steht in variabler Entfernung vor einem Geiger-Müller-Zählrohr, das die einfallenden Teilchen registriert. Dazwischen werden verschiedene Absorber eingebracht.

Ergebnis: Bei einem bestimmten Abstand Präparat-Zählrohr sinkt die Zählrate - abhängig vom Absorber - abrupt ab.

Zusammenfassung: Alphateilchen haben eine für das verwendete Präparat typische Energie und Reichweite. In Luft beträgt die Reichweite auch für energiereiche Teilchen weniger als 10 cm, in fester Materie weniger als 0,1 mm.

Absorption von Beta-Strahlen

Versuch: Im Versuchsaufbau wie oben wird nun ein Sr-90-Präparat verwendet. Die Dicke des Absorbers (Aluminium) wird sukzessive gesteigert.

Ergebnis: Die Zählrate Z sinkt nach einem Exponentialgesetz ab:

$$Z(d) = Z_0 \cdot e^{\mu \cdot d}.$$

Dabei ist Z_0 die Zählrate ohne Absorbermaterial, d die Absorberdicke und μ der sog. Absorptionskoeffizient.

Unter der Halbwertsdicke D versteht man die Absorberdicke, die die Zählrate auf den halben Anfangswert absinken lässt.

Anmerkung: Nach einer gewissen Strecke werden Beta-Teilchen vollständig absorbiert; man nennt diese Strecke die Reichweite der Beta-Strahlen in dem entsprechenden Material.

Zusammenfassung: Die Reichweite von Beta-Teilchen aus radioaktiven Nukliden kann in Luft bis zu einigen Metern, in fester Materie bis zu einigen Millimetern und in Körpergewebe ein bis zwei Zentimeter betragen. Die Abschwächung von Beta- und Gammastrahlen erfolgt nach einem Exponentialgesetz. Eine Reichweite von Gammastrahlen in Materie kann man nicht angeben, wohl aber die Halbwertsdicke D .

Das Abstandsgesetz

Um sich vor radioaktiven Strahlen zu schützen, ist, insbesondere wegen der Gamma-Strahlen, ein möglichst großer Abstand von radioaktiven Präparaten zu halten.

Versuch: Bei einem Aufbau wie oben wird der Abstand zwischen einem Sr-90-Präparat und dem Zählrohr variiert. Für die Zählrate erhält man in Abhängigkeit vom Abstand folgenden Zusammenhang:

Ergebnis: Man erkennt, dass die Zählrate und damit die Strahlungsleistung umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes ist:

$$P(r) = \text{const.} \cdot \frac{1}{r^2}.$$

6.5 Biologische Strahlenwirkung

Becquerel, der Entdecker der radioaktiven Strahlung, trug 1901 ein nicht abgeschirmtes Radiumpräparat in der Westentasche. Nach zwei Wochen zeigte seine Haut Verbrennungserscheinungen mit einer schwer abheilenden Wunde. In der jüngeren Vergangenheit musste man leider lernen, dass die radioaktive Strahlung aber noch weit schlimmere Folgen haben kann (Tschernobyl!).

Die eigentliche Gefahr bei Strahlenschäden besteht in der ionisierenden Wirkung der radioaktiven Strahlen, wodurch menschliche Zellen in ihren Eigenschaften verändert werden oder gar absterben können. Ersteres kann zu einer Änderung des Erbgutes führen und damit Mutationen bei späteren Generationen bewirken. Die Heimtücke derartiger Mutationen liegt u.a. auch darin, dass sie rezessiv sein können, also nicht unbedingt schon in der nächsten Generation augenscheinlich werden.

Somatische Schäden sind körperliche Schäden, die zunächst häufig an Brust- und Schilddrüsen, der Lunge, am roten Knochenmark oder an den Knochen beobachtet werden.

Genetische Schäden betreffen die Keimdrüsen und damit die Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit und vertretbare Wirkungen bei den Nachkommen.

Zusammenfassung: Ursache der Strahlenschäden ist die Ionisation von Molekülen. Abwehrmechanismen verhindern, dass jede Bestrahlung schädlich ist.

6.6 Anwendung von Strahlung in der Diagnose und Therapie; Messgrößen in der Strahlenkunde; Strahlenschutz und Strahlenschutzmaßnahmen

Strahlendosimetrie

Zum Vergleich der Wirkungen radioaktiver Strahlen ist die Festlegung objektiver Messverfahren und Einheiten unerlässlich. Ausgehend von der ungenauen Bewertung der Hautrötung nach einer radioaktiven Bestrahlung machte man sich die ionisierende Wirkung radioaktiver Strahlung, aber auch die Energieabsorption beim Durchgang radioaktiver Strahlung durch Materie zunutze.

Im folgenden sind die wesentlichen Messgrößen der Dosimetrie zusammengestellt:

Die **Aktivität A** ist ein Maß für die Stärke eines radioaktiven Präparats:

Aktivität = Anzahl der Zerfallsakte/Zeitspanne; $A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$.

Die Aktivität wird in s^{-1} angegeben. Eine historische Einheit für die Aktivität ist 1 Curie (1 Ci), die Aktivität von 1 g Radium. Es gilt der Zusammenhang:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}.$$

Die **Ionendosis D_I** gibt an, wie viele Ionen eines Vorzeichens pro kg durchstrahlter Masse erzeugt werden.

Ionendosis = Ionenladung eines Vorzeichens/durchstrahlte Masse;

$$D_I = \frac{\Delta Q}{m}.$$

Die Ionendosis bezieht sich auf die Ionisation in trockener Luft bei 0 °C und 1013 mbar. Für die Einheit gilt:

$$1 \text{ C/kg} = 1 \text{ As/kg} = 3875,86 \text{ R (Röntgen) bzw. } 1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}.$$

Die **Dosisleistung P_D** gibt die Ionendosis pro Zeiteinheit an:

Dosisleistung = Ionendosis/Zeitspanne; $P_I = \frac{\Delta D_I}{\Delta t}$.

Für die Einheit folgt daraus: $1 \frac{\text{As}}{\text{kg}\cdot\text{s}} = 1 \frac{\text{A}}{\text{kg}}$.

Die **Energiedosis K** ist gleich dem Verhältnis der von dem durchstrahlten Stoff absorbierten Energie und seiner Masse:

Energiedosis = absorbierte Energie/durchstrahlte Masse; $K = \frac{\Delta W}{m}$.

Die Einheit der Energiedosis ist demnach

$$1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy}.$$

Durch Multiplikation der Energiedosis mit einem (empirisch gefundenen) Qualitätsfaktor q erhält man die sog. **Äquivalentdosis H**, mit der man der verschiedenen biologischen Wirksamkeit der einzelnen Strahlungsarten Rechnung trägt. Für Röntgen-, Gamma- und Betastrahlen gilt $q = 1$, für Alphateilchen sowie andere mehrfach geladene Teilchen $q = 20$.

Zur Unterscheidung von der messbaren Energiedosis D hat man der Äquivalentdosis H die Einheit

1 Sievert = 1 Sv = 1 J/kg = 100 rem

(rem = röntgen equivalent man) gegeben.

Unter der **Äquivalentdosisleistung** $\Delta H/Dt$ versteht man die in der Zeit Δt absorbierte Äquivalentdosis:

Äquivalentdosisleistung = Äquivalentdosis/Zeit; $\dot{H} = \frac{\Delta H}{\Delta t}$.

Die Einheit dafür ist 1 Sv/s; häufig wird die Äquivalentdosisleistung in Sv/h bzw. rem/h angegeben.

Die Bestrahlung eines Menschen führt fast immer zu einer gleichzeitigen Bestrahlung mehrerer Gewebe bzw. Organe, die allerdings nicht alle in gleichem Maße strahlengefährdet sind. Bei schwachen Ganzkörperbestrahlungen errechnet man unter Einbeziehung eines Gewichtungsfaktors W_G die effektive Äquivalentdosis.

Zusammenfassung: Die Energiedosis $D = W/m$ gibt die in Gewebe der Masse m absorbierte Strahlenenergie ΔW an (Einheit 1 Gy = 1 J/kg). Mit der Äquivalentdosis $H = q \cdot D$ vergleicht man die gesamte biologische Strahlenbelastung eines Gewebes durch Strahlung verschiedener Art (Einheit 1 Sv = 100 rem); q ist der von der Strahlenart abhängige Qualitätsfaktor.

Die effektive Äquivalentdosis ermöglicht eine Bewertung der gesamten Strahlengefährdung einzelner Personen bei schwachen Ganzkörperbestrahlungen.

Mittlere Strahlenbelastung des Menschen

Jeder Mensch ist einer natürlichen Strahlenbelastung ausgesetzt, die sich aus drei Komponenten zusammensetzt:

1. Die terrestrischen Strahlung (= 20 %) stammt aus radioaktiven Stoffen in der Erde (U-238, Ra-226, K-40).
2. Die kosmische Strahlung (= 15 %) kommt aus dem Weltraum und ist vor allem auf Bergen und im Flugzeug wirksam.
3. Die Eigenstrahlung des Körpers (=65 %) rührt von radioaktiven Nukliden im Körper her (K-40, Ra-226, Rn-222), vor allem vom gasförmigen Rn-222, das aus Wänden und Böden diffundiert und vom Menschen eingeatmet wird.

Zu dieser natürlichen Strahlenbelastung (pro Jahr etwa 1,5 - 2 mSv) kommt noch ein Anteil von ca. 1 mSv, den die Medizin liefert.

Die restlichen Strahlenbelastungen sind um mehr als einen Faktor 100 geringer, so z.B. die Belastung durch Kohle- und Kernkraftwerke.

Beruflich strahlenexponierte Personen dürfen in der Bundesrepublik eine Ganzkörperdosisleistung von 50 mSv/a nicht überschreiten.

Zusammenfassung: Ein Mensch ist im Jahr einer Strahlung von 2,5 bis 3,5 mSv (ca. 0,3 rem/a) an effektiver Äquivalentdosis ausgesetzt.

Strahlenschäden

Eine kurzzeitige Ganzkörperbestrahlung von über 7 Sv führt fast immer nach wenigen Tagen zum Tod. Andere Sofortschäden (Appetitlosigkeit, Haar- ausfall, Übelkeit) treten oberhalb eines Schwellenwerts auf, der je nach Gewebe und Zeitdauer bei 0,25 - 1 Sv liegt.

Stochastische Strahlenschäden (Leukämie, Krebs) sind besonders heimtückisch, da sie als Folge einmaliger hoher oder längerer schwacher Strahlenbelastung oft erst nach Jahren zum Vorschein kommen.

Neben diesen somatischen Schäden wirken sich die vorher bereits angesprochenen genetischen Schäden erst in späteren Generationen aus.

Zusammenfassung: Für nicht stochastische Schäden existiert eine Schwellendosis, nicht aber für stochastische Strahlenschäden. Zu den letzteren zählen Krebs, Leukämie und genetische Schäden.

Strahlenschutz

Aus den Eigenschaften der radioaktiven Strahlung (Ionisierung, Durchdringung, Absorption) ergeben sich die Maßnahmen zum Strahlenschutz von selbst:

1. Es ist auf ausreichenden Abstand von der Quelle zu achten, da die Strahlungsleistung umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands ist.
2. Bei Versuchen strebe man eine kurze Arbeitszeit an, da die Dosis proportional zur Zeit ist.
3. Dicke Materieschichten schirmen radioaktive Strahlen ab. Das beste Schutzmaterial ist Blei, für Neutronen Wasser.
4. Man vermeide die Inkorporation radioaktiver Stoffe.

Zusammenfassung: Die wichtigste Merkregel für den Strahlenschutz lautet: Abstand! Abschirmung! Kurzzeitig!

Strahlung in Diagnose und Therapie

In der Diagnostik mit radioaktiven Strahlen wird dem Patienten eine radioaktiv markierte Verbindung verabreicht, die sich in dem zu untersuchenden Organ für eine gewisse Zeit ansammelt. Deren γ -Strahlung wird mit einem geeigneten Detektor gemessen und dann ausgewertet. Diese Szintigraphie wird vor allem zur Untersuchung von Schilddrüse, Gehirn, Lunge, Leber, Milz, Nieren und des Skeletts eingesetzt.

In der Therapie werden vor allem Bestrahlungen mit Radioisotopen wie z. B. Co-60 oder Cä-137 zur Tiefentherapie von Tumoren durchgeführt. Da die Zellteilungsrate von Krebsgewebe in der Regel höher ist als die des durchstrahlten gesunden Gewebes, sind die Tumoren sehr strahlungsempfindlich.

Bei der Bestrahlung mit Beschleunigungsanlagen bedient man sich des Betatrons, eines Kreisbeschleunigers. Die darin fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Elektronen werden entweder direkt eingesetzt oder treffen auf eine Antikathode, wo sie ultraharte Röntgenstrahlung freisetzen.

Dieses Dokument wurde mit Win2PDF, erhaeltlich unter <http://www.win2pdf.com/ch>
Die unregistrierte Version von Win2PDF darf nur zu nicht-kommerziellen Zwecken und zur Evaluation eingesetzt werden.