

**Grundlagen über
Atomaufbau, Radioaktivität, Strahlenarten,
Dosis, Abschirmung**

**Winfried Koelzer
Informationskreis KernEnergie
Robert-Koch-Platz 4
10115 Berlin**

Januar 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Chemische Elemente, Atome und Atomkerne	1
1.1	Chemische Elemente.....	1
1.2	Aufbau der Atome	1
1.3	Aufbau der Atomkerne	3
2	Strahlenarten	4
2.1	Alphastrahlen.....	5
2.2	Betastrahlen	5
2.3	Gammastrahlen.....	7
2.4	Elektroneneinfang.....	8
3	Energie von Teilchen und Quanten	9
3.1	Energieeinheit Elektronvolt	9
3.2	Energie der Teilchenstrahlen	9
3.2.1	Energie von Alphateilchen.....	9
3.2.2	Energie von Betateilchen	10
3.2.3	Energie von Neutronen.....	12
3.3	Energie und Wellenlänge der Gammastrahlen	13
3.4	Energie und Wellenlänge bei Röntgenstrahlen.....	14
4	Wechselwirkungen von Strahlung mit Materie	15
4.1	Wechselwirkungen von Alphateilchen mit Materie.....	15
4.2	Wechselwirkungen von Betateilchen mit Materie	16
4.3	Wechselwirkungen von Neutronen mit Materie.....	17
4.4	Wechselwirkungen von Gammastrahlen mit Materie	19
4.4.1	Photoeffekt.....	19
4.4.2	Comptoneffekt	19
4.4.3	Paarbildung	20
5	Aktivität und Dosis	21
5.1	Aktivität.....	21
5.2	Halbwertszeit.....	21
5.3	Energiedosis	23
5.4	Organdosis	23
5.5	Effektive Dosis	24
5.6	Folgedosis	24
6	Abschirmung und weitere Maßnahmen zur Dosisreduzierung	25
6.1	Abschirmung der Strahlung.....	25
6.1.1	Abschirmung von Alphastrahlen.....	25
6.1.2	Abschirmung von Betastrahlen	26
6.1.3	Abschirmung von Gammastrahlen.....	27
6.1.4	Abschirmung von Neutronenstrahlen	29
6.2	Aufenthaltszeitbegrenzung.....	30
6.3	Abstand	30

1 Chemische Elemente, Atome und Atomkerne

1.1 Chemische Elemente

Man kennt zur Zeit 115 chemische Elemente. Davon kommen 91 in der Natur vor, die übrigen sind ausschließlich künstlich erzeugt worden. Die kleinsten Teilchen der chemischen Elemente werden Atome genannt. Die kleinsten Teilchen des Wasserstoffs, Kohlenstoffs oder Urans, die noch die charakteristischen Eigenschaften dieser Elemente besitzen, nennt man also Wasserstoffatome, Kohlenstoffatome bzw. Uranatome. Der Durchmesser der Atome beträgt etwa 10^{-7} mm. Erst 10 Millionen Atome aneinandergereiht ergeben etwa 1 mm. Die Atome sind also für das menschliche Auge unsichtbar. Um dennoch eine Vorstellung über den inneren Aufbau zu erhalten, hat man Modelle entwickelt. Nach einem im wesentlichen von Rutherford und Bohr zu Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelten Modell besteht das Atom aus einem sehr kleinen Kern, in dem fast die gesamte Masse vereinigt ist, und einer Hülle.

Der Kern baut sich aus elektrisch positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen auf. Sie werden auch als Kernteilchen oder Nukleonen bezeichnet. Die Atome eines jeden Elements haben in ihren Kernen jeweils eine charakteristische Anzahl von Protonen. Jedes Element wird also durch die Protonenzahl eindeutig bestimmt. Bis zum Element Calcium (20 Protonen) stimmt die Protonenzahl etwa mit der Neutronenzahl überein, von da ab überwiegt die Anzahl der Neutronen.

In der Atomhülle befinden sich in der Regel ebensoviel negativ geladene Elektronen wie im Kern Protonen vorhanden sind. Da das Elektron eine negative Elementarladung und das Proton eine positive Elementarladung trägt, gleichen sich die Ladungen aus. Das Atom ist dann nach außen elektrisch neutral. Verliert ein Atom ein Elektron aus seiner Hülle, überwiegen die positiven Ladungen im Kern (positives Ion). Nimmt ein Atom ein weiteres Elektron in seine Hülle auf, überwiegen die negativen Ladungen (negatives Ion).

1.2 Aufbau der Atome

Die in einem Kern vorhandenen Protonen müssten sich eigentlich aufgrund ihrer positiven Ladungen gegenseitig abstoßen. Da aber stabile Atomkerne mit z. T. recht vielen Protonen existieren, kann daraus geschlossen werden, dass es andere Kräfte geben muss, die die Kernteilchen aneinander binden. Diese anziehenden Kernkräfte sind stärker als die im Kern wirkenden abstoßenden elektrischen Kräfte.

In der Atomhülle befinden sich negativ geladene Elektronen. Elektronen und Protonen müssten sich aufgrund ihrer unterschiedlichen elektrischen Ladungen anziehen, die Hüllelektronen also auf den Kern fallen. Da das aber nicht eintritt, ist anzunehmen, dass auch hier Kräfte wirksam sind, die dafür sorgen, dass Kern und Hülle nicht aufeinander fallen.

Um ein Elektron aus der Atomhülle abzutrennen, benötigt man Energie. Dabei zeigt sich, dass für die einzelnen Elektronen einer Hülle unterschiedlich viel Energie aufgewendet werden muss. Die Elektronen sind also unterschiedlich fest an den Kern gebunden bzw. sie besitzen gegenüber dem Atomkern unterschiedliche Energie. Diese Energiewerte der Elektronen unterscheiden sich aber nicht kontinuierlich, sondern stufenartig voneinander. Um diese Tatsache im Modell zu veranschaulichen, weist man den einzelnen Elektronen bestimmte Bahnen bzw. Schalen zu, die um den Kern angeordnet sind (Abb. 1.1). Elektronen mit geringerer Energie und damit festerer Bindung an den Kern werden auf kernnahen Bahnen oder Schalen gezeichnet, Elektronen mit größerer Energie und damit weniger fester Bindung an den Kern auf kernferneren Bahnen oder Schalen. Diese Bahnen oder Schalen existieren nicht wirklich. Es sind lediglich Hilfsvorstellungen zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Energiestufen. Das Größenverhältnis von Atomhülle zu Atomkern ist bemerkenswert. Der Durchmesser der Hülle beträgt etwa 10^{-10} m, der Durchmesser des Kerns etwa 10^{-14} m. Der Kern ist also etwa 10 000 mal kleiner als die Hülle. Zur Veranschaulichung dieses Verhältnisses kann man das Atom in Gedanken auf das 10^{12} fache vergrößern. Die Hülle hätte dann einen Durchmesser von 100 m, der Kern wäre aber nur 1 cm groß (Abb. 1.2).

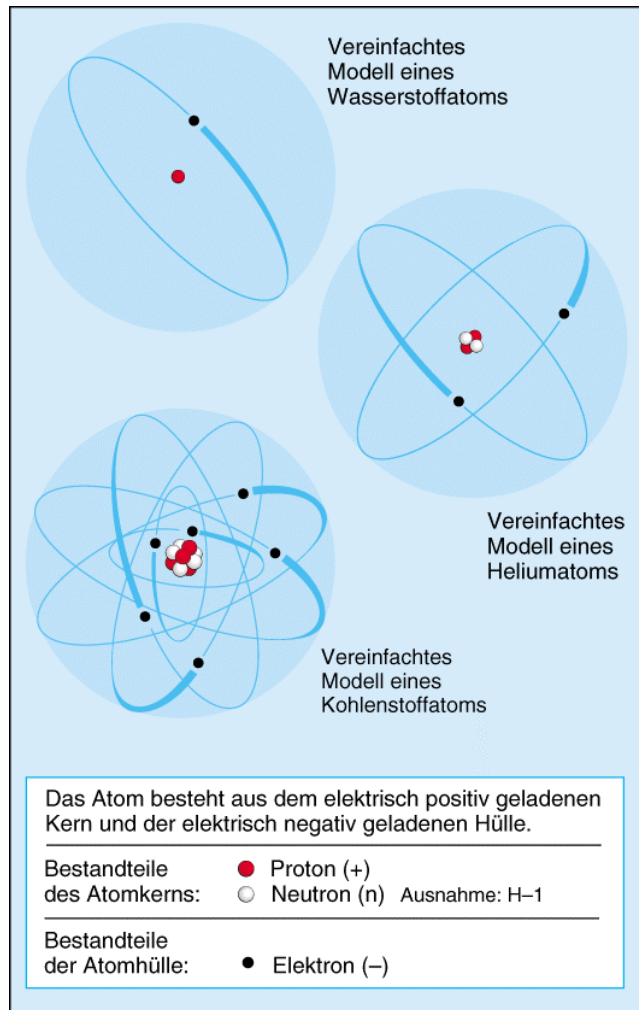


Abb. 1.1: Atome in Modelldarstellung

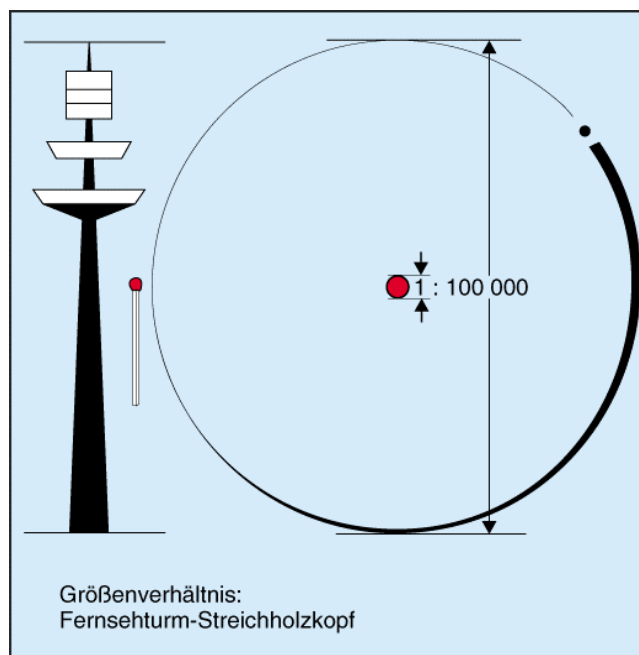


Abb. 1.2: Größenverhältnisse Wasserstoff-Atom

Proton und Neutron haben fast die gleiche Masse. Die Masse des Elektrons beträgt aber nur 1/1836 der Masse des Protons. Das ist ein so geringer Betrag, dass man ihn bei Betrachtung der Atommassen vernachlässigen kann. Praktisch ist die gesamte Masse eines Atoms in seinem Kern vereinigt (Tab. 1-1).

Elementarteilchen	Masse (Ruhemasse)		Ladung	
	in kg	in Elektronenmassen	in Coulomb	in Elementarladungen
Elektron	$9,10938 \cdot 10^{-31}$	1	$- 1,6022 \cdot 10^{-19}$	-1
Proton	$1,67262 \cdot 10^{-27}$	1836,15	$1,6022 \cdot 10^{-19}$	+1
Neutron	$1,67493 \cdot 10^{-27}$	1838,68	0	0

Tab. 1-1: Masse und elektrische Ladung der drei wichtigsten Elementarteilchen

1.3 Aufbau der Atomkerne

Die Anzahl der positiven Elementarladungen im Kern ist gleich der Anzahl der Hüllelektronen eines neutralen Atoms. Die Masse eines Atomkerns setzt sich aus der Masse der Protonen und der ein wenig größeren Masse der Neutronen zusammen (Abb. 1.3).

Aufbau der Atomkerne im Modell

<p>${}^4_2\text{He}$</p> <p>Kern eines Heliumatoms</p>	<p>${}^{12}_6\text{C}$</p> <p>Kern eines Kohlenstoffatoms</p>	<p>${}^{235}_{92}\text{U}$</p> <p>Kern eines Uranatoms</p>
<p>Massenzahl: Gesamtzahl der Protonen und Neutronen</p> <p>Kernladungszahl: Anzahl der Protonen</p>		

Abb. 1.3: Atomkerne im Modell

Die Massen von Proton und Neutron liegen im Bereich von 10^{-27} kg. Da das Rechnen mit so kleinen Werten ungünstig ist, gibt man zur Beschreibung der Masse eines Atomkerns lediglich an, wie viel Protonen und Neutronen er enthält. Das ist seine Massenzahl.

Neben der Masse ist die elektrische Ladung die zweite wichtige Eigenschaft des Atomkerns. Jedes Proton besitzt eine positive Ladungsmenge, die Elementarladung genannt wird. Die Anzahl der Protonen ist also gleich der Anzahl der Elementarladungen. Das wird durch die Kernladungszahl beschrieben. Sie entspricht der Ordnungszahl der chemischen Elemente.

Zur Kennzeichnung des Kernaufbaus wird die Massenzahl (Anzahl der Protonen und Neutronen) oben links, die Kernladungszahl (Anzahl der Protonen) unten links neben das chemische Symbol gesetzt (Tab. 1-2). Eine Atomart, die durch Protonenzahl und Neutronenzahl charakterisiert ist, wird als Nuklid bezeichnet.

Kern eines Heliumatoms	Kern eines Kohlenstoffatoms	Kern eines Uranatoms
${}^4_2\text{He}$	${}^{12}_6\text{C}$	${}^{235}_{92}\text{U}$
Massenzahl: 4 Kernladungszahl: 2	Massenzahl: 12 Kernladungszahl: 6	Massenzahl: 235 Kernladungszahl: 92

Tab. 1-2: Kennzeichnung des Kernaufbaus

Die Atome eines Elements können bei gleicher Protonenzahl eine unterschiedliche Neutronenzahl besitzen. Atome mit gleicher Kernladungszahl (Ordnungszahl), aber mit unterschiedlicher Massenzahl, bezeichnet man als Isotope. Sie unterscheiden sich nicht in ihren chemischen, wohl aber in ihren kernphysikalischen Eigenschaften.

Vom Element Wasserstoff gibt es drei Isotope (Abb. 1.4). Ein Wassermolekül, das z. B. die Wasserstoffisotope H-1 und H-3 (T) enthält, wird deshalb HTO abgekürzt. Enthält das Molekül nur das Isotop H-2, kürzt man es D₂O ab.

Da die Kernladungszahl für jedes Element festliegt, die Massenzahl aber verschieden sein kann, wird bei einer abgekürzten Schreibweise lediglich die Massenzahl rechts neben den Namen oder das Symbol des betreffenden Elements geschrieben, z. B.: H-3, He-4, C-12, U-235, U-238.

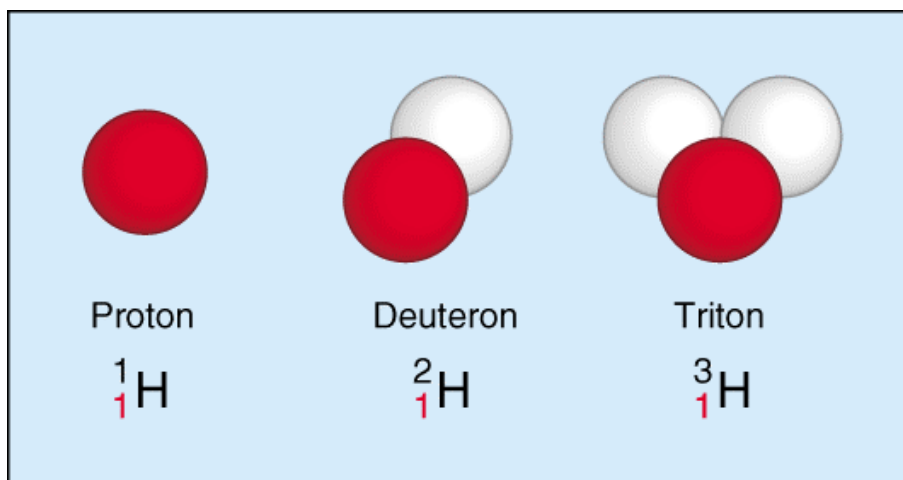


Abb. 1.4: Die Kerne der Wasserstoffisotope (Modelldarstellung)

2 Strahlenarten

Bestimmte Nuklide haben die Eigenschaft, sich von selbst, ohne äußere Einwirkung, umzuwandeln. Dabei wird Strahlung ausgesandt. Diese Eigenschaft bezeichnet man als Radioaktivität. Die Kerne radioaktiver Atome heißen Radionuklide. Von den bisher bekannten etwa 2 800 verschiedenen Nukliden sind nur 264 stabil, alle anderen zerfallen spontan. Bei in der Natur vorkommenden Radionukliden spricht man von natürlicher Radioaktivität, bei den durch künstliche Kernumwandlung erzeugten Radionukliden von künstlicher Radioaktivität.

2.1 Alphastrahlen

Die beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Heliumkerne (zwei Protonen, zwei Neutronen) werden Alphastrahlen genannt (Abb. 2.1). Die Geschwindigkeit der austretenden Alphateilchen liegt zwischen etwa 15 000 km/s und 20 000 km/s.

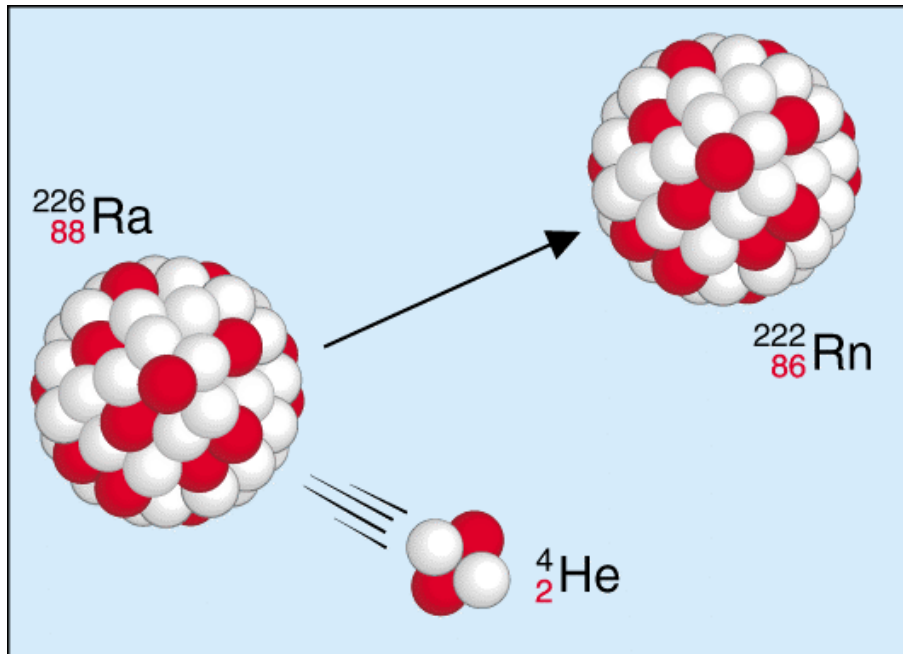


Abb. 2.1: Modell zur Entstehung von Alphastrahlen

Beispiel: Der Kern des Radium-226 hat 88 Protonen und 138 Neutronen. Seine Kernladungszahl beträgt demnach 88, seine Massenzahl 226. Der Kern ist nicht stabil, da die Kernkräfte die abstoßenden Kräfte der Protonen untereinander nicht vollständig aufheben können. Der Kern hat deshalb das Bestreben, in einen stabileren Zustand überzugehen. Der Kern schleudert einen Heliumkern heraus, wodurch die Kernladungszahl um 2, die Massezahl um 4 sinkt. Es entsteht das neue Element Radon (Rn). Dieser Vorgang wird durch die folgende Kernreaktionsgleichung beschrieben.



In der Gleichung wird links vom Reaktionspfeil der Kernaufbau des Ausgangsatoms, rechts davon das Ergebnis des Zerfalls geschrieben. Dabei müssen auf beiden Seiten die Summe der Kernladungszahlen ($86 + 2 = 88$) und die Summe der Massezahl ($222 + 4 = 226$) übereinstimmen. Das beim Zerfall entstandene Radon-222 ist ebenfalls radioaktiv und zerfällt weiter. Das entstandene Radon gibt zwei Hüllelektronen an die Umgebung ab. Die ausgesandten Alphateilchen nehmen aus der Umgebung zwei Elektronen auf, wodurch Heliumatome entstehen.

2.2 Betastrahlen

Beim Betazerfall wird aus dem Kern eines Radionuklids ein Elektron abgegeben. Seine Geschwindigkeit kann zwischen Null und nahezu Lichtgeschwindigkeit liegen. Diese Elektronen bilden dann Betastrahlen (Abb. 2.2).

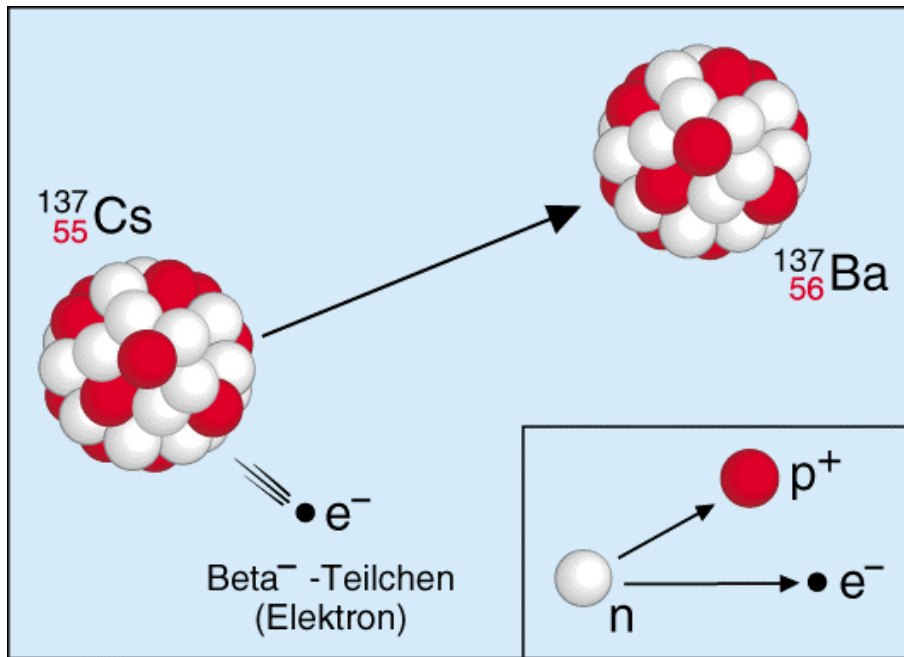


Abb. 2.2: Modell zur Entstehung der Beta⁻-Strahlen

Cäsium-137 wandelt sich unter Aussenden eines Elektrons in Barium-137 um. Da jedes Elektron eine negative Elementarladung trägt, werden die Strahlen auch als Beta⁻-Strahlen bezeichnet. Da nach dem Aussenden eines Betateilchens der Kern ein Proton mehr besitzt, muss auch die Kernladungszahl des neu entstandenen Elements um eins höher liegen. Die Zahl der Kernteilchen hat sich jedoch insgesamt nicht verändert, wodurch die ursprüngliche Massenzahl erhalten bleibt.

Beispiel eines Beta⁻-Zerfalls: $^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow ^{137}_{56}\text{Ba} + ^0_{-1}\text{e}$

Bei natürlichen und künstlich hergestellten Radionukliden tritt eine Strahlung auf, bei der Teilchen von der Masse eines Elektrons aber mit einer positiven Ladung ausgeschleudert werden. Es sind Positronen. Die Strahlung wird deshalb Positronenstrahlung genannt (Abb. 2.3).

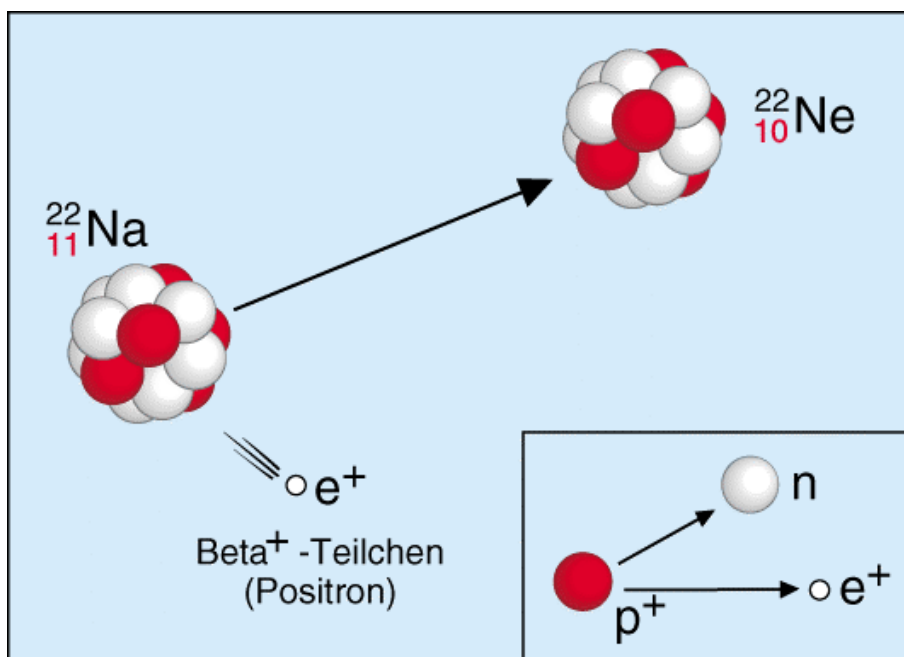


Abb. 2.3: Modell zur Entstehung der Beta⁺-Strahlen

Beispiel eines Beta⁺-Zerfalls: ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^0_{+1}\text{e}$

Natrium-22 wandelt sich unter Aussenden eines Positrons in Neon-22 um. Beim Beta⁺-Zerfall nimmt die Kernladungszahl um eine Einheit ab, während sich die Massenzahl nicht verändert.

Beim Betazerfall wird außerdem ein weiteres Teilchen ausgesandt, das keine Ruhemasse und keine elektrische Ladung besitzt. Bei der Umwandlung eines Neutrons entsteht ein Antineutrino, bei der Umwandlung eines Protons ein Neutrino. Neutrinos und Antineutrinos besitzen ein großes Durchdringungsvermögen und sind deshalb schwer nachzuweisen. (Bei den Kernreaktionsgleichungen werden hier aus Gründen der Vereinfachung Neutrino oder Antineutrino nicht mit angegeben.)

2.3 Gammastrahlen

Bei den Kernumwandlungen kann eine energiereiche Wellenstrahlung vorkommen. Sie hat die gleiche Natur wie das sichtbare Licht, sie ist nur energiereicher als dieses (kürzere Wellenlänge) und heißt Gammastrahlung. Abgesehen von der Art des Entstehens ist sie praktisch identisch mit der Röntgenstrahlung. Die Gammastrahlung wird - wie auch das sichtbare Licht - in einzelnen „Portionen“ (Quanten, Photonen) abgegeben (Abb. 2.4).

Die Gammaquanten bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit. Gammastrahlen treten häufig begleitend bei einem Alpha- oder Betazerfall auf. Der Atomkern gibt noch vorhandene überschüssige Energie in Form eines oder mehrerer Gammaquanten ab und geht dabei von einem höheren (angeregten) zu einem niedrigeren Energieniveau über. Durch den Gammazerfall ändert sich also der Energieinhalt des Kerns, nicht jedoch dessen Kernladungs- und Massenzahl. Ein angeregter (m: metastabiler) Bariumkern gibt ein Gammaquant ab und geht dadurch in einen niedrigeren und gleichzeitig stabilen Energiezustand über.

Beispiel für Emission von Gammastrahlung: ${}^{137\text{m}}_{56}\text{Ba} \rightarrow {}^{137}_{56}\text{Ba} + \gamma$

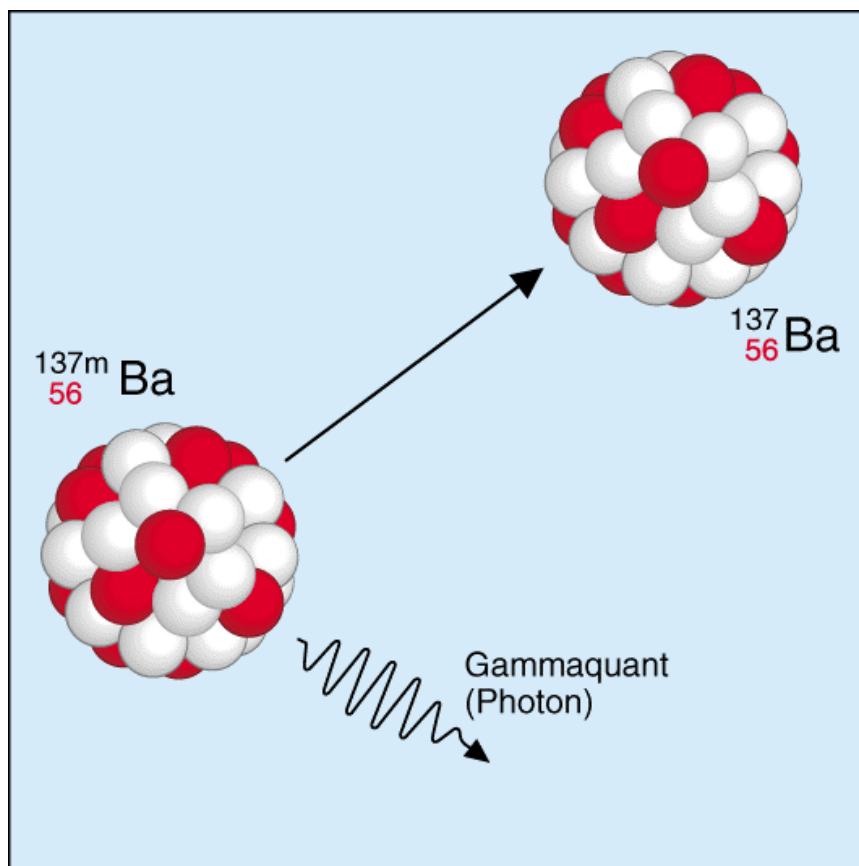


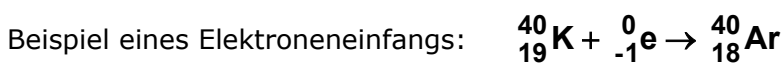
Abb. 2.4: Abgabe eines Gammaquants aus einem Atomkern

Die als Teilchen aufgefassten Gammaquanten besitzen keine Ruhemasse und keine elektrische Ladung. Gammaquanten treten außer bei Kernumwandlungen auch noch bei anderen Reaktionen zwischen Elementarteilchen auf.

2.4 Elektroneneinfang

Bei natürlichen und künstlich erzeugten Radionukliden kann noch eine weitere Umwandlungsart auftreten, der sogenannte Elektroneneinfang. Der Kern eines neutronenarmen Atoms fängt meist aus der innersten Schale der Elektronenhülle (der K-Schale, daher auch der Name K-Einfang) ein Elektron ein, wodurch sich ein Proton in ein Neutron umwandelt (Abb. 2.5).

Der in der Atomhülle freigewordene Platz wird von einem äußeren Elektron wieder aufgefüllt. Dabei entsteht eine charakteristische Röntgenstrahlung.



Das in der Natur vorkommende Isotop Kalium-40 wandelt sich zum Teil unter Elektroneneinfang in das Isotop Argon-40 um. Auch beim Elektroneneinfang nimmt die Kernladungszahl um eine Einheit ab, während die Massenzahl unverändert bleibt. Der Elektroneneinfang führt also zu dem gleichen Ergebnis wie die Abgabe eines Positrons.

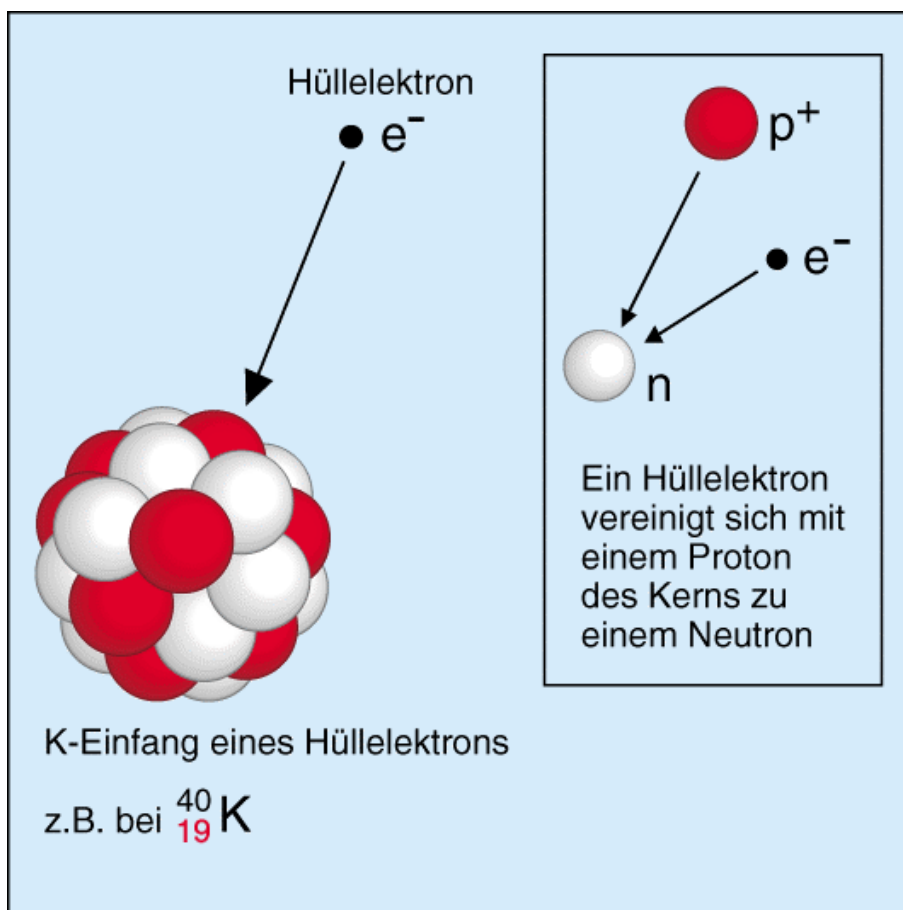


Abb. 2.5: K-Einfang im Modell

3 Energie von Teilchen und Quanten

3.1 Energieeinheit Elektronvolt

Zum Messen von Energien werden die Einheiten Newtonmeter (Nm), Joule (J) und Wattsekunde (Ws) verwendet. Dabei gilt: $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$. Bei Kernumwandlungen treten sehr viel kleinere Energiewerte auf. Deshalb ist zusätzlich die Einheit Elektronvolt (eV) festgelegt worden.

Definition: 1 eV ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es beim freien Durchlaufen einer Spannung von 1 V beschleunigt wird (Abb. 3.1).

Vielfache von 1 eV:	1 Kiloelektronvolt (keV)	= 10^3 eV
	1 Megaelektronvolt (MeV)	= 10^6 eV
	1 Gigaelektronvolt (GeV)	= 10^9 eV

Beispiele: Die Bewegungsenergie von Gasatomen und Gasmolekülen ist von der Temperatur des Gases abhängig. Bei Zimmertemperatur beträgt sie etwa 0,04 eV (Bewegungsenergie). Energiebeiträge dieser Größenordnung (einige 0,01 eV) werden als thermische Energie bezeichnet. Thermische Neutronen, die bei der Spaltung der Kerne von Uran-235 eine Rolle spielen, haben eine Energie von etwa 0,0253 eV. Das entspricht einer mittleren Geschwindigkeit des einzelnen Neutrons von etwa $2200 \text{ m/s} = 7920 \text{ km/h}$. Freie Elektronen in einem Metalldraht führen Schwirrbewegungen aus. Ihre mittlere Geschwindigkeit liegt bei rund 10^5 m/s .

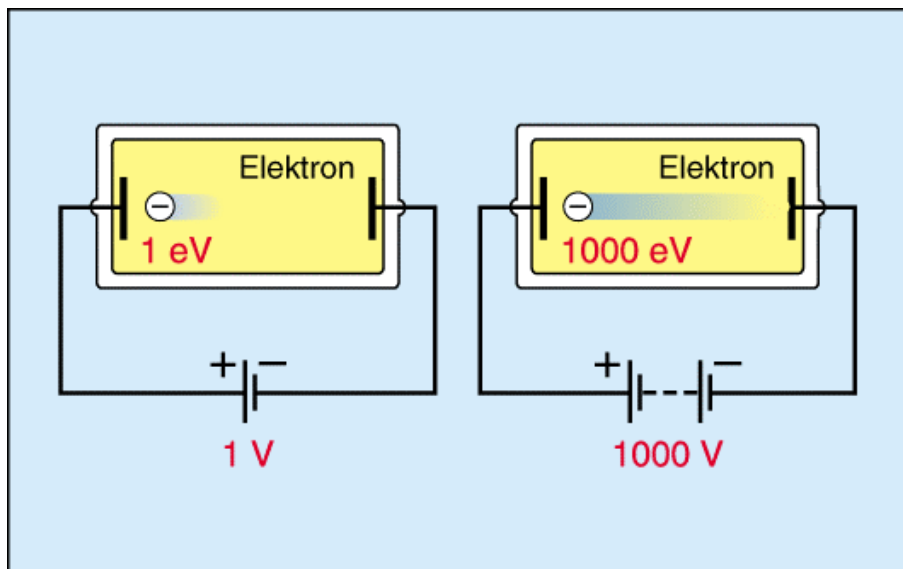


Abb. 3.1: Veranschaulichung der Energieeinheit Elektronvolt

3.2 Energie der Teilchenstrahlen

Der Zerfall eines radioaktiven Atomkerns kann durch eine Kernreaktionsgleichung oder mit einem Umwandlungsschema beschrieben werden. Beim Umwandlungsschema geben die waagerechten Linien die Energieniveaus an. Senkrechte Linien bedeuten Energieänderungen, Verschiebungen nach links eine Verringerung an positiver Kernladung, Verschiebungen nach rechts eine Zunahme an positiver Kernladung. Der Buchstabe m ist die Abkürzung für das Wort metastabil (bedingt stabil, unvollkommen stabil).

3.2.1 Energie von Alphateilchen

Die von einem Atomkern ausgesandten Alphateilchen besitzen alle dieselbe Energie oder beim Zerfall in mehrerer Gruppen unterschiedliche Energien. Die Alphateilchen einer Gruppe haben aber immer dieselbe Energie. Beispiele für einen Gruppenzerfall (Abb. 3.2):

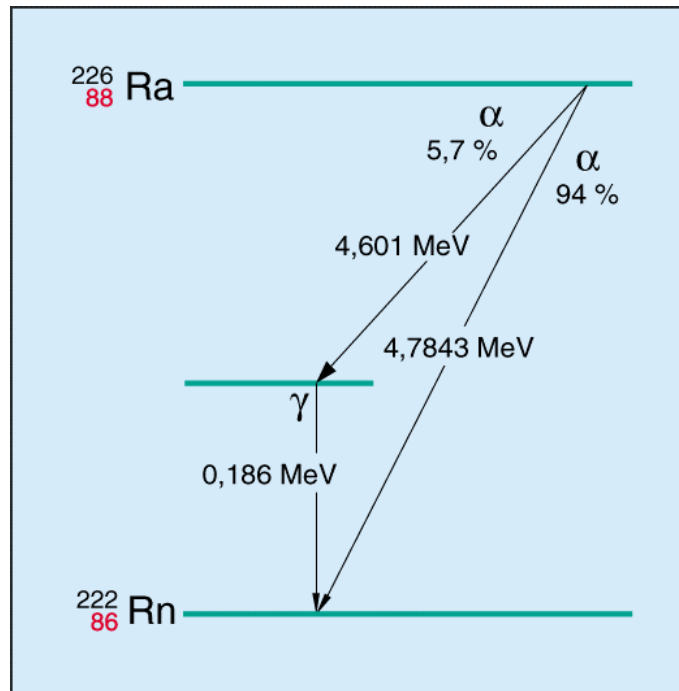


Abb. 3.2: Umwandlungsschema für Ra-226

Hat das Alphateilchen die Maximalenergie erhalten, ist der Kern in den Grundzustand übergegangen. Ist die Energie des Alphateilchens kleiner, befindet sich der Kern noch in einem angeregten Zustand. Die restliche Energie des angeregten Kerns wird in Form eines Gammaquants abgegeben. Beispiele für die Energie von Alphateilchen einiger Radionuklide sind in Tab. 3-1 angegeben.

Radionuklid	Energie der Alphateilchen in MeV
Rn-222	5,48952;
Ra-226	4,7843; 4,601;
U-238	4,198;
Pu-239	5,157; 5,144;

Tab. 3-1: Energien von Alphateilchen (Die Punkte hinter den Energiewerten weisen auf weitere Alphateilchen hin, die mit geringerer Häufigkeit auftreten.)

3.2.2 Energie von Betateilchen

Die beim Betazerfall auftretenden Elektronen oder Positronen besitzen alle unterschiedliche Energien. Sie können zwischen Null und einem Maximalwert liegen, wobei die größte Häufigkeit für jedes Radionuklid bei einem bestimmten Energiewert liegt (Abb. 3.3). Die mittlere Energie \bar{E} der Betateilchen ergibt sich zu:

$$\bar{E} \approx \frac{1}{3} \cdot \bar{E}_{\max} .$$

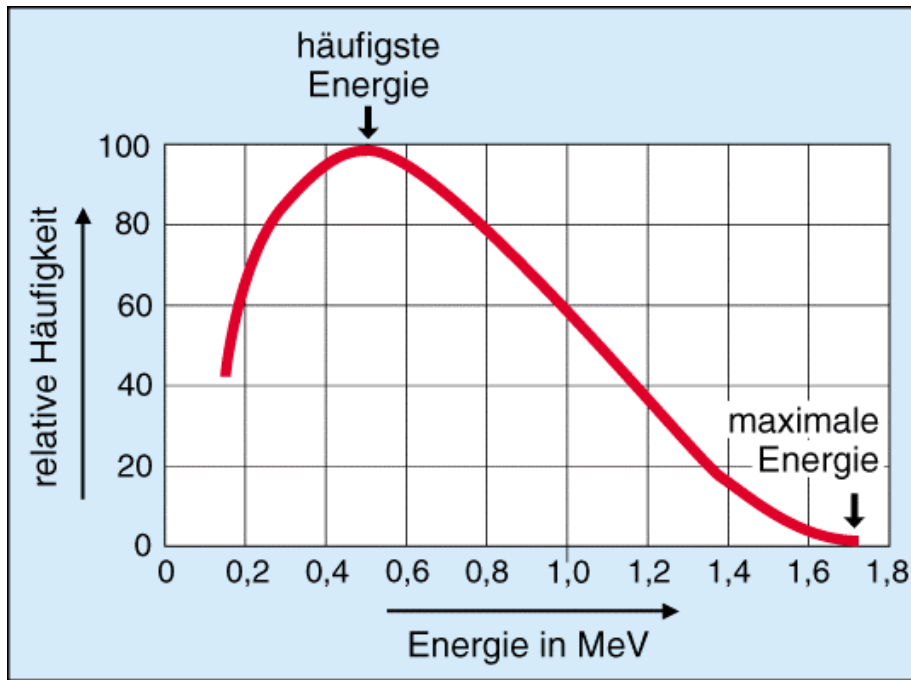


Abb. 3.3: Energieverteilung beim Beta⁻-Zerfall des P-32

Die kontinuierliche Energieverteilung rührt daher, dass beim Betazerfall außer dem Elektron ein Antineutrino bzw. außer dem Positron ein Neutrino entsteht. Die frei werdende Zerfallsenergie verteilt sich dann nach Zufall in beliebigen Bruchteilen der Maximalenergie auf die beiden Elementarteilchen. Neutrinos und Antineutrinos besitzen keine Ruhemasse und nach heutigem Erkenntnis keine Ladung. Da sie ein außerordentlich hohes Durchdringungsvermögen haben, lassen sie sich nur schwer nachweisen.

Wird durch Elektron und Antineutrino bzw. Positron und Neutrino nicht die gesamte Zerfallsenergie verbraucht, entstehen zusätzlich noch ein Gammaquant oder mehrere Gammaquanten (Abb. 3.4). In Kernreaktionsgleichungen, Umwandlungsschemata und Tabellen wird nur die Maximalenergie angegeben (Tab. 3-2).

Radionuklid	Maximalenergie von Beta ⁻ -Teilchen in MeV
H-3	0,018
Co-60	0,3; 1,5
Pb-210	0,02; 0,06
Bi-214	1,5; 3,3;

Tab. 3-2: Maximale Betaenergie einiger Radionuklide

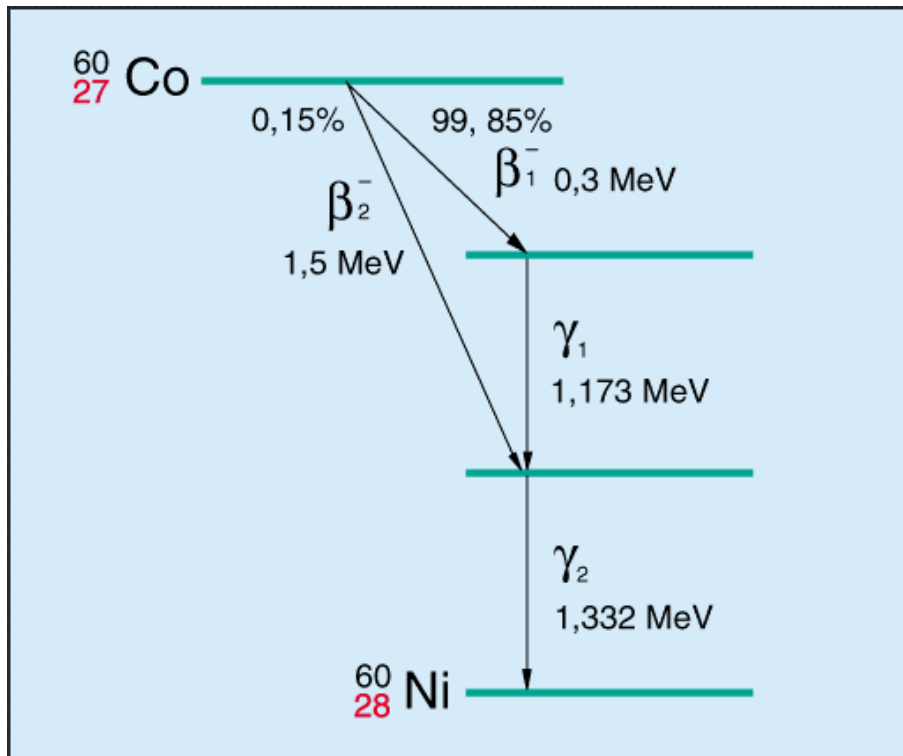


Abb. 3.4: Umwandlungsschema für Co-60

3.2.3 Energie von Neutronen

Abhängig von der Entstehungsart haben die bei Kernprozessen erzeugten Neutronen eine einheitliche Energie oder ihre Energie liegt zwischen Null und einem Höchstwert (kontinuierliche Energieverteilung). Bei der Freisetzung von Neutronen mit Hilfe von Gammaquanten (Kernphotoeffekt) entstehen Neutronen, die alle eine einheitliche Geschwindigkeit und damit auch gleich viel Bewegungsenergie besitzen.

Neutronen, die durch eine (α, n) -Reaktion erzeugt werden, besitzen unterschiedliche Geschwindigkeiten, d. h. unterschiedlich viel Bewegungsenergie. Beispiel für eine solche Neutronenquelle ist die sogenannte Pu-Be-Quelle. In dieser Quelle liefert der Zerfall des Plutoniums das Alphateilchen für die Kernreaktion.

Die stärksten kommerziellen Neutronenquellen stellen heute die Kernreaktoren dar. In ihnen verwendet man in der Regel U-235 als spaltbares Material. Bei der Spaltung eines jeden Kerns entstehen zwei mittelschwere Spaltproduktkerne sowie zwei bis drei Neutronen. Diese Spaltneutronen haben unterschiedliche Geschwindigkeiten (Energien), wobei der Wert von etwa 0,7 MeV am häufigsten auftritt (Abb. 3.5).

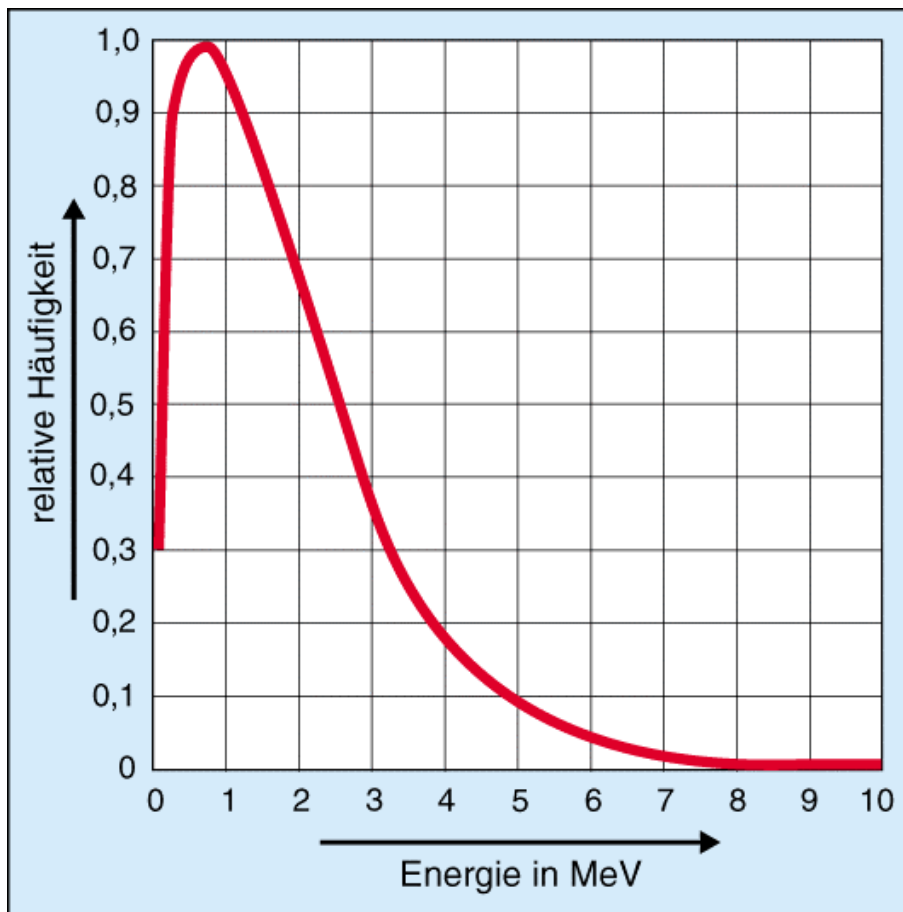


Abb. 3.5: Energieverteilung der Neutronen, die bei Spaltung von U-235 durch thermische Neutronen entstehen

Zur Charakterisierung der Neutronen nach ihrer Geschwindigkeit und damit ihrer Energie wird die Einteilung nach Tab. 3-3 verwendet. Die angegebenen Energiebeträge stellen Richtwerte dar, die Übergänge sind fließend.

Bezeichnung	Energie
langsame (thermische) Neutronen	< 10 eV
mittelschnelle (epithermische oder intermediäre) Neutronen	10 eV bis 0,1 MeV
schnelle Neutronen	> 0,1 MeV

Tab. 3-3: Einteilung der Neutronen nach ihrer kinetischen Energie

3.3 Energie und Wellenlänge der Gammastrahlen

Alphateilchen, Betateilchen, Protonen und Neutronen, die bei Kernumwandlungen ausgeschleudert werden, ergeben eine Teilchenstrahlung. Gammaquanten bilden eine elektromagnetische Wellenstrahlung, die dieselbe Natur hat wie z. B. Rundfunkwellen, das sichtbare Licht oder Röntgenstrahlen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen beträgt im Vakuum $c_0 = 299\,792,458 \text{ km/s} \approx 300\,000 \text{ km/s}$. Sie ist unabhängig von der Energie der einzelnen Photonen. Die Energie eines einzelnen Quants ist nur von seiner Wellenlänge bzw. seiner Frequenz abhängig.

Gammaquanten werden u. a. nach einem Alpha- oder Betazerfall aus einem Kern emittiert, wenn dieser noch überschüssige Energie besitzt (Tab. 3-4). Das kann in einer oder in mehreren Stufen geschehen. Die Quanten jeder einzelnen Stufe haben alle dieselbe Energie. Die Anzahl der ausgesandten Quanten kann also größer sein als die Anzahl der umgewandelten Atomkerne.

Radionuklide	Umwandlungsart	Energie der häufigsten Gammaquanten in MeV
Be-7	K-Einfang	0,478
N-16	Beta-Minus	6,129; 7,115
Na-22	Beta-Plus	1,275
Ba-137m	Gamma	0,662
U-235	Alpha	0,186

Tab. 3-4: Gammaquanten einiger Radionuklide

3.4 Energie und Wellenlänge bei Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen werden mit Hilfe von Röntgenröhren erzeugt (Abb. 3.6). In einer luftleeren Glasröhre stehen sich Katode und Anode gegenüber. Aus der glühenden Katode treten Elektronen aus (Glühemission), die durch eine hohe Spannung (bis 400 kV) zwischen Katode und Anode beschleunigt werden. Treffen sie auf die Wolframanode, entsteht Röntgenstrahlung. Dabei wird nur 1 % der Bewegungsenergie in Röntgenstrahlung, aber 99 % in Wärme umgewandelt.

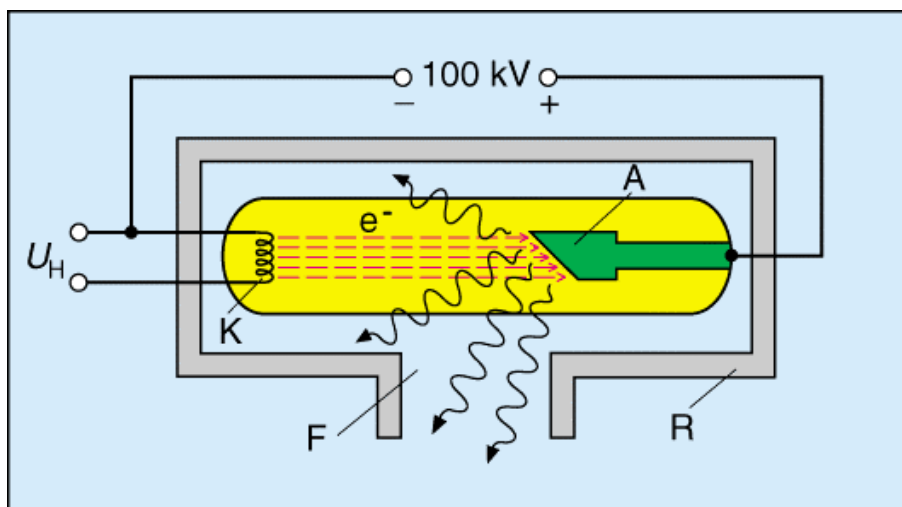


Abb. 3.6: Vereinfachte Schnittzeichnung einer Röntgenröhre (U_H : Heizspannung, K: Katode, A: Anode, R: Röhrenabschirmung, F: Strahlenaustrittsfenster)

In einer Röntgenröhre entsteht überwiegend Röntgenbremsstrahlung. Ihre Entstehung kann man sich im Modell folgendermaßen vorstellen: Ein beschleunigtes Elektron dringt in ein Atom des Anodenmaterials ein und wird dabei ganz oder teilweise abgebremst. Die verlorengangene Bewegungsenergie wird in Form eines Röntgenquants abgegeben.

Diese Quanten bilden die Röntgenbremsstrahlung mit kontinuierlicher Energieverteilung (Abb. 3.7). Je höher die Beschleunigungsspannung ist, desto mehr Röntgenquanten werden erzeugt und desto energiereichere bzw. härtere Quanten (Quanten mit kürzerer Wellenlänge) entstehen. Außer der Bremsstrahlung wird noch eine vom Anodenmaterial abhängige charakteristische Röntgenstrahlung erzeugt. Sie besitzt ein Linienspektrum, das das kontinuierliche Bremsstrahlungsspektrum überlagert.

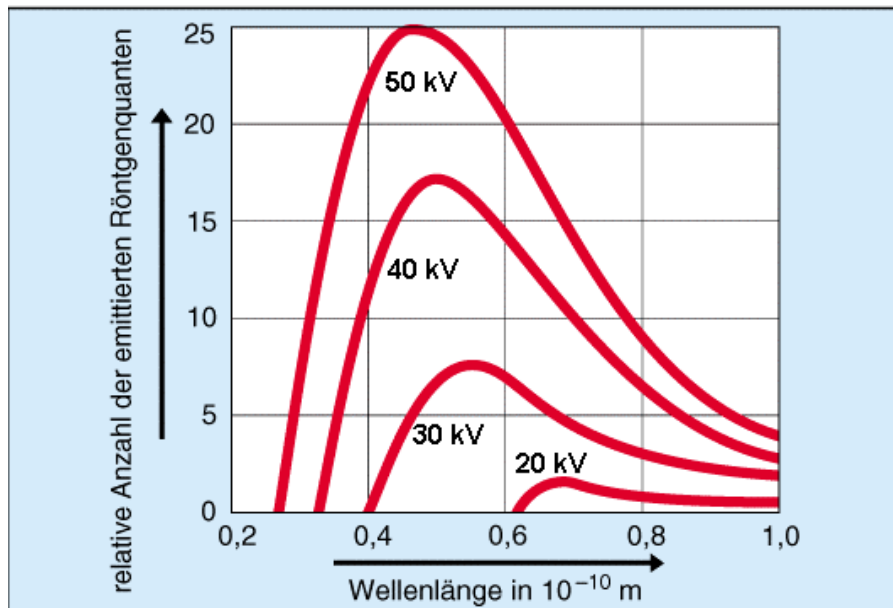


Abb. 3.7: Röntgenbremsspektren bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen

4 Wechselwirkungen von Strahlung mit Materie

Beim Auftreffen auf Materie wirken Strahlungsteilchen und Gammaquanten auf Hüllen oder Kerne der Atome ein und rufen an ihnen Veränderungen hervor. Dabei finden stets auch Rückwirkungen auf die Teilchen oder Quanten statt (z. B. Verringerung ihrer Energie, Änderung der Bewegungsrichtung). Man spricht deshalb allgemein von Wechselwirkungen der Strahlung mit Materie. Welche Wechselwirkungen stattfinden, ist von der Art der Strahlung, der Energie der Strahlungsteilchen bzw. Quanten und der Art des Wechselwirkungsmaterials abhängig. Häufig treten verschiedene Wechselwirkungen gleichzeitig auf, wobei meist eine überwiegt.

4.1 Wechselwirkungen von Alphateilchen mit Materie

Alphateilchen verlieren ihre Energie im wesentlichen dadurch, dass sie Atome oder Moleküle der durchstrahlten Materie ionisieren oder anregen. Bei der Ionisierung eines Atoms wird ein Elektron aus seiner Hülle abgetrennt. Für diese Abtrennarbeit ist ein bestimmter Energiebetrag erforderlich. Wird dem Elektron mehr Energie zugeführt, als für die Abtrennung erforderlich ist, erhält das abgelöste Elektron die überschüssige Energie in Form von Bewegungsenergie. Sie kann so groß sein, dass das Elektron nun seinerseits ein weiteres Atom ionisiert (Sekundäriodisation).

Durch die Abtrennung eines Elektrons aus der Atomhülle entsteht ein positives Ion. Das abgelöste Elektron kann sich an ein neutrales Atom anlagern, so dass sich ein negatives Ion bildet. Beide Ionen ergeben dann ein Ionenpaar.

Die Alphateilchen geben ihre Energie längs der Flugbahn nicht gleichmäßig ab, so dass die Anzahl der erzeugten Ionenpaare pro Weglänge auch nicht gleich ist. Die in Abb. 4.1 dargestellte Kurve steigt mit wachsender Weglänge erst langsam, dann schnell an, um am Ende steil abzufallen. Es bedeutet, dass die größte Anzahl der Ionenpaare pro Weglänge erst dann erzeugt wird, wenn das Alphateilchen bereits einen großen Teil seiner Bewegungsenergie verloren hat. Dieser Sachverhalt lässt sich vereinfacht dadurch erklären, dass sich langsame Teilchen längere Zeit in der Nähe der Atomhüllen aufhalten und verstärkt Ionisationen hervorrufen können.

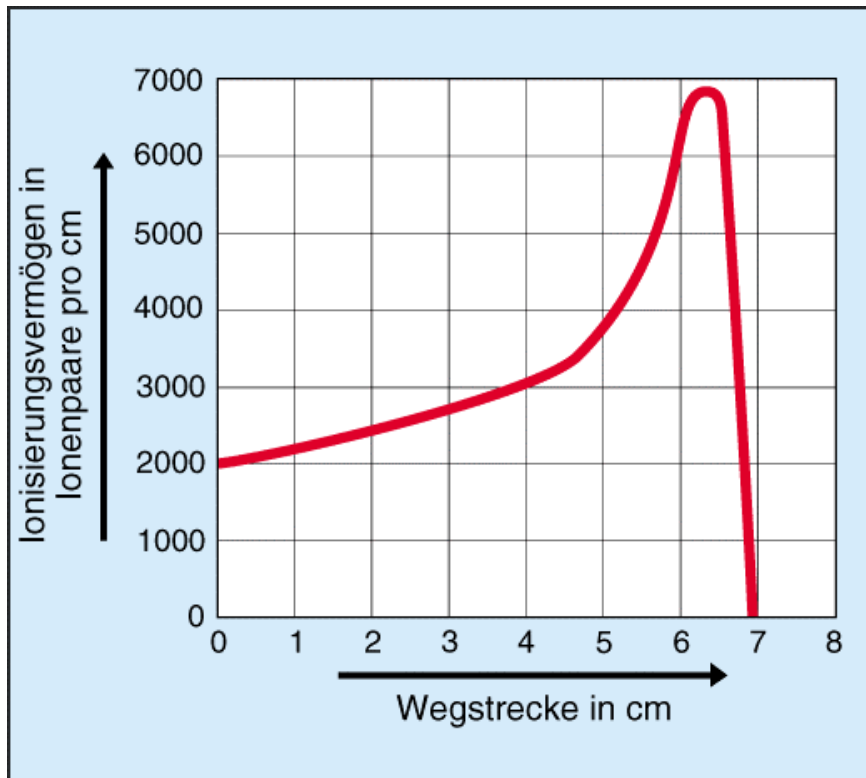


Abb. 4.1: Ionenbildung längs der Bahn eines Alphateilchens in Luft

Bei der Anregung eines Atoms wird ein Hüllelektron vom Kern weiter entfernt und damit auf ein höheres Energieniveau gehoben. Beim Zurückspringen auf das Ausgangsniveau wird die zugeführte Energie in Form eines Strahlungsquants (Photons) oder mehrerer Strahlungsquanten abgegeben. Bei einer Ionisation oder Anregung gibt ein Alphateilchen Energie ab und wird dadurch langsamer. In Luft unter Normalbedingungen ist es nach 4 bis 7 cm auf thermische Geschwindigkeiten abgebremst. Es kann dann an Atomhüllen keine Veränderungen mehr herbeiführen und ist deshalb für Organismen ungefährlich. Ein abgebremstes Alphateilchen nimmt zwei freie Elektronen auf und wandelt sich dadurch in ein Heliumatom um.

4.2 Wechselwirkungen von Betateilchen mit Materie

Treffen Betateilchen auf Materie, treten Ionisation, Anregung, Streuung und Erzeugung von Bremsstrahlung auf. Ionisation und Erzeugung von Bremsstrahlung sind die wichtigsten Prozesse. Bei einer Ionisierung ist die Anzahl der pro Weglänge erzeugten Ionenpaare 100 bis 1 000mal kleiner als bei Alphateilchen (Tab. 4-1). Betastrahlung gehört deshalb zu einer locker ionisierenden Strahlung im Gegensatz zu Alphastrahlung, die dicht ionisiert.

Energie der Teilchen in MeV	Ionenpaare / cm	
	bei Alphateilchen	bei Betateilchen
1	60 000	50
10	16 000	45

Tab. 4-1: Erzeugung von Ionenpaaren pro Weglänge

Ein Betateilchen muss also eine längere Strecke zurücklegen, um seine Energie durch Ionisationen abzugeben. Die Reichweite von Betastrahlen ist deshalb größer als die von Alphastrahlen. Da Betateilchen aber eine kontinuierliche Energieverteilung besitzen, kann keine einheitliche

Reichweite angegeben werden. Sie liegt in Luft zwischen einigen Zentimetern bis zu einigen Metern.

Betateilchen können auch dadurch an Bewegungsenergie verlieren, dass sie im elektrischen Feld eines Atoms abgebremst werden. Die dabei verlorene Energie wird in Form eines Photons abgegeben (Röntgenbremsstrahlung).

4.3 Wechselwirkungen von Neutronen mit Materie

Neutronen besitzen keine elektrische Ladung. Sie sind elektrisch neutral und können deshalb auf die Atomhüllen des Wechselwirkungsmaterials nicht einwirken. Aus diesem Grund finden direkte Ionisationen und Anregungen nicht statt. Die Wechselwirkungen der Neutronen mit Materie beruhen auf Zusammenstößen mit den Atomkernen. Die dabei auftretenden Vorgänge sind von der Energie der Neutronen abhängig.

Da viele Neutronenquellen Neutronen mit einer kontinuierlichen Energieverteilung emittieren, werden meist mehrere Wechselwirkungsprozesse gleichzeitig auftreten. Elastische Zusammenstöße finden im Energiebereich 10 keV bis 1 MeV statt. Die Summe der Bewegungsenergien der Stoßpartner vor und nach dem Stoß ist dann gleich.

Zu unelastischen Zusammenstößen kommt es vorwiegend im Energiebereich zwischen 1 MeV und 10 MeV. Dabei ist die Summe der Bewegungsenergien vor und nach dem Stoß nicht gleich. Das Neutron hat den Atomkern angeregt, der die Anregungsenergie in Form eines Gammaquants wieder abgibt.

Ein Neutron kann seine Bewegungsenergie am besten auf dann einen Kern übertragen, wenn Kern und Neutron dieselbe Masse haben. Beim Kern eines Wasserstoffatoms ist eine Energieübertragung zu fast 100 % möglich.

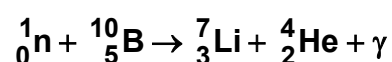
Der von einem Neutron angestoßene Kern, der nun selbst Bewegungsenergie besitzt, wird Rückstoßkern genannt. Seine Bewegungsenergie kann so groß sein, dass er sich aus dem Atom- oder Molekülverband löst und andere Atome in seiner Umgebung ionisiert oder anregt.

Neutronen können von Atomkernen des Wechselwirkungsmaterials eingefangen werden, wodurch meist instabile Kerne entstehen. Sie wandeln sich wieder in stabile Kerne um, indem sie geladene Teilchen und oft gleichzeitig Gammaquanten aussenden.

Die Wahrscheinlichkeit für einen Neutroneneinfang ist von der Bewegungsenergie der Neutronen abhängig. Der Wirkungsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Kernreaktion eintritt. Seine Einheit ist 1 barn = 10^{-28} m^2 . Das ist etwa die Querschnittsfläche eines Atomkerns.

Der Wirkungsquerschnitt ist meist desto größer, je langsamer die Neutronen sind. Das Neutron kann dann längere Zeit in Kernnähe verweilen, wodurch die Wahrscheinlichkeit für eine Einfangreaktion größer wird. Daneben gibt es noch den Resonanzeinfang, bei dem Neutronen ganz bestimmter Energie bevorzugt eingefangen werden (Abb. 4.2).

Eine für die Reaktorregelung und den Strahlenschutz wichtige Kernreaktion ist der Neutroneneinfang durch Bor (Abb. 4.3).



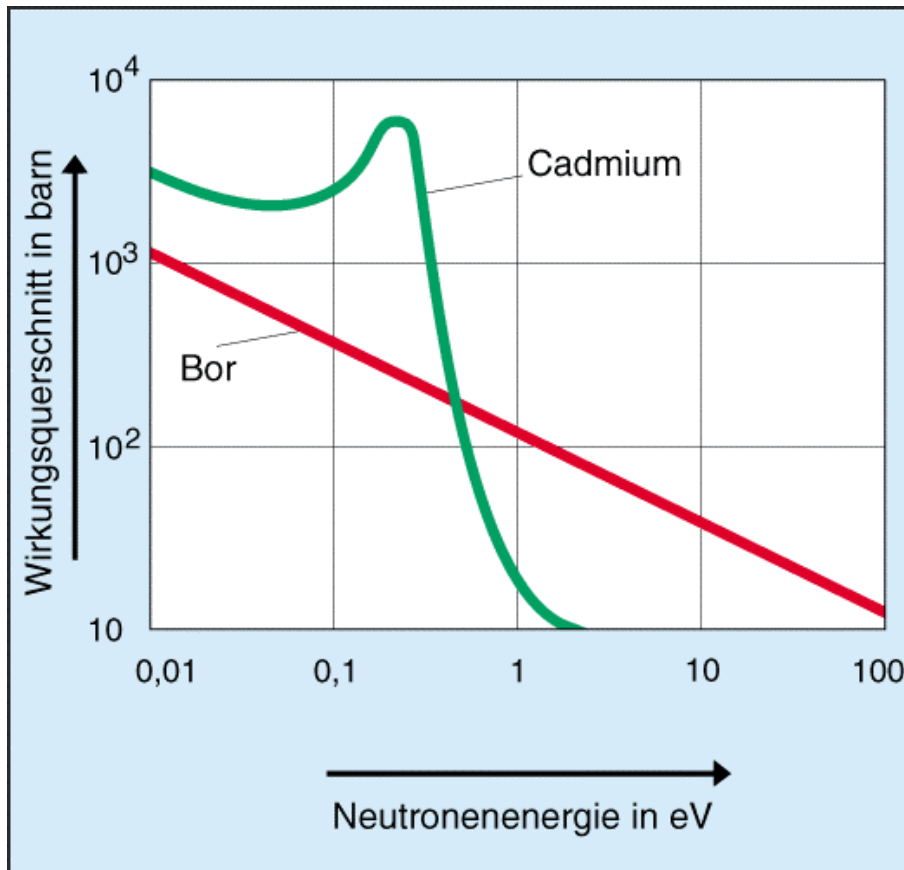


Abb. 4.2: Wahrscheinlichkeit für den Neutroneneinfang in Abhängigkeit von der Energie

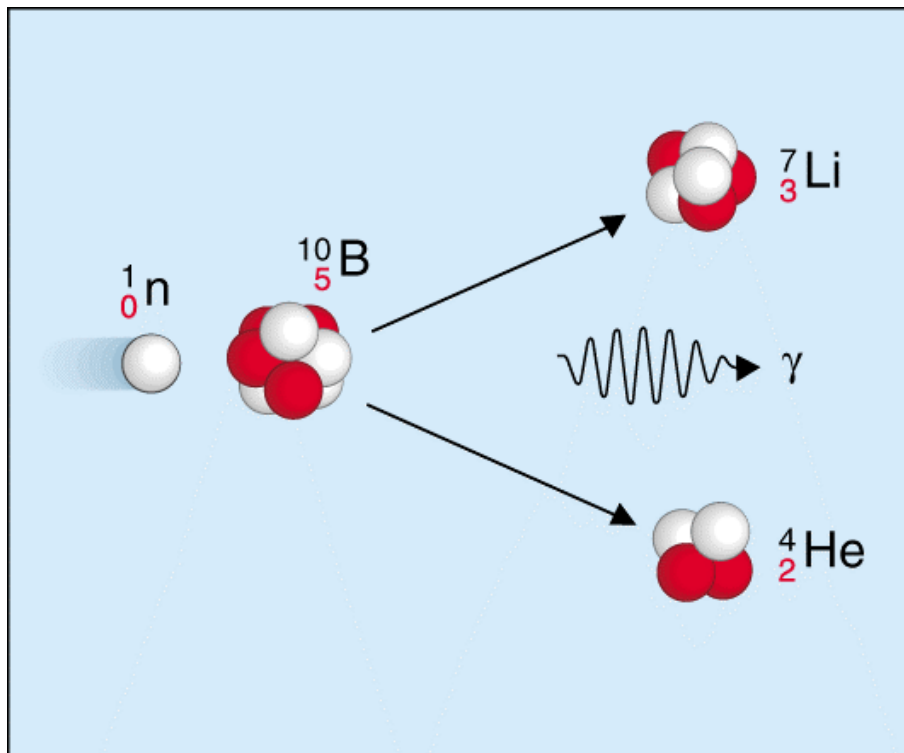


Abb. 4.3: Kernreaktion beim Neutroneneinfang mittels Bor in den Regelstäben eines Reaktors (Modelldarstellung)

4.4 Wechselwirkungen von Gammastrahlen mit Materie

Durchdringt Gammastrahlung Materie, finden eine Reihe von Wechselwirkungsprozessen mit den Hüllelektronen und den Atomkernen statt. Die Energien der Gammaquanten, die von natürlichen und künstlichen Radionukliden bzw. bei Wechselwirkungsprozessen emittiert werden, liegen im Bereich von 0,003 MeV und etwa 17 MeV. Abhängig von der Quantenenergie treten im wesentlichen drei Wechselwirkungsprozesse auf: der Photoeffekt, der Comptoneffekt und der Paarbildungseffekt. Diese drei Effekte überlagern sich im Wechselwirkungsmaterial, wobei in einzelnen Energiebereichen einer der Prozesse überwiegt.

4.4.1 Photoeffekt

Beim Photoeffekt, der vorherrschend bei kleinen Quantenenergien und großen Kernladungszahlen des Absorbermaterials auftritt, kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen den Quanten und den Elektronen der Atomhüllen. Die Energie eines von der Hülle aufgenommenen Quants dient zur Abspaltung eines Elektrons (oder mehrerer Elektronen). Überschüssige Energie erhält das abgetrennte Elektron als Bewegungsenergie. Der Photoeffekt führt also zu einer Ionisation (Abb. 4.4). Beim Photoeffekt verschwindet das Gammaquant. Das frei werdende Elektron wird Photoelektron genannt. Es gibt seine Energie durch Anregung oder Ionisation an die Atome der Umgebung ab (Sekundärstrahlung).

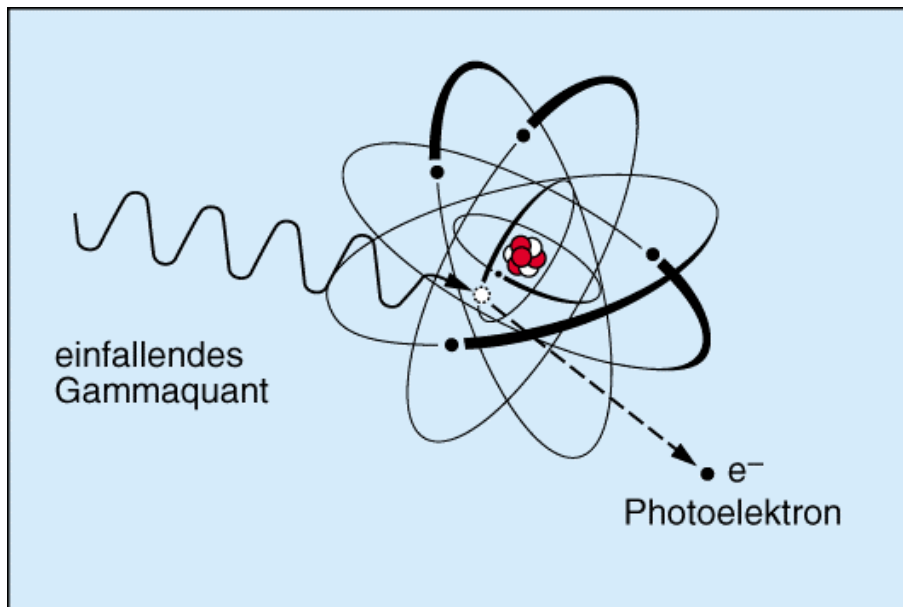


Abb. 4.4: Photoeffekt (Modelldarstellung)

Der Photoeffekt findet bevorzugt an Elektronen der kernnahen Schalen (überwiegend der K-Schale) statt. Das Atom besitzt dann an dieser Stelle eine Lücke, in die ein Elektron aus einer weiter außen liegenden Schale springt. Die dabei frei werdende Energie wird als Röntgenquant emittiert.

4.4.2 Comptoneffekt

Gammaquanten mittlerer Energie rufen im Wechselwirkungsmaterial vorwiegend den Comptoneffekt hervor. Dabei überträgt das Quant einen Teil seiner Energie auf ein in der äußeren Schale der Atomhülle sitzendes Elektron, das dadurch vom Atom abgetrennt wird (Comptonelektron). Das Quant besitzt nach der Einwirkung auf das Elektron eine verringerte Energie (größere Wellenlänge) und bewegt sich mit veränderter Flugrichtung weiter (Abb. 4.5).

Das Atom, an dem die Comptonstreuung stattgefunden hat, verliert ein Elektron seiner Hülle und wird dadurch ionisiert. Das gestreute Gammaquant kann weitere Comptoneffekte hervorrufen, bis seine Energie so niedrig geworden ist, dass es durch einen Photoeffekt ganz aufge-

zehrt wird. Das Comptonelektron kann im Wechselwirkungsmaterial zu Ionisationen und Anregungen führen.

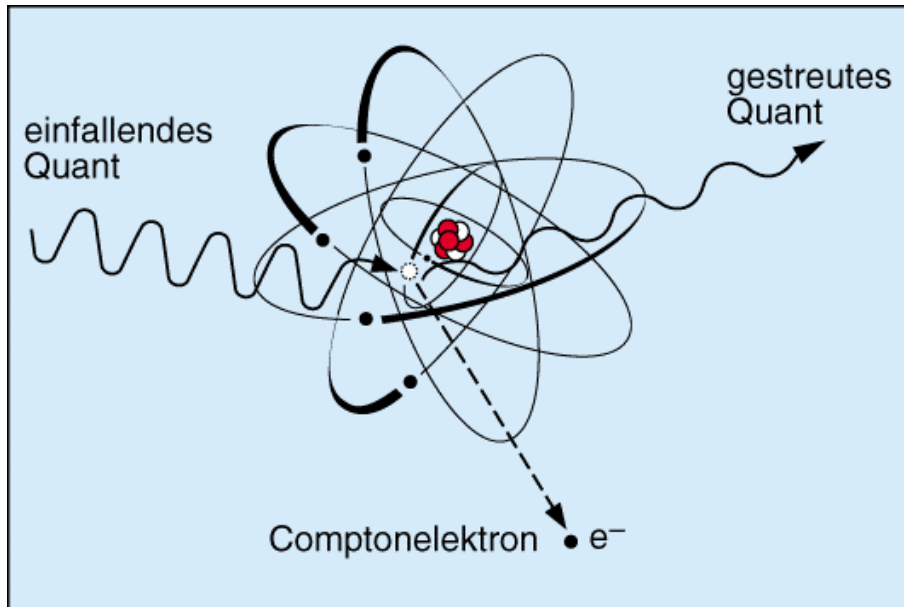


Abb. 4.5: Comptoneffekt (Modelldarstellung)

4.4.3 Paarbildung

Bei höherer Quantenenergie überwiegt im Wechselwirkungsmaterial der Paarbildungseffekt. Dabei wird das Quant im elektrischen Feld eines Atomkerns vernichtet und in ein Elektron und ein Positron umgewandelt (Abb. 4.6). Ein Quant muss mindestens eine Energie von 1,022 MeV besitzen, um die beiden Teilchen erzeugen zu können. Überschüssige Quantenenergie übernehmen Elektron und Positron als Bewegungsenergie. Bei einer Energie $E > 2,044$ MeV können auch zwei Teilchenpaare erzeugt werden. Der Paarbildungseffekt spielt vor allem bei Elementen mit hoher Ordnungszahl eine Rolle.

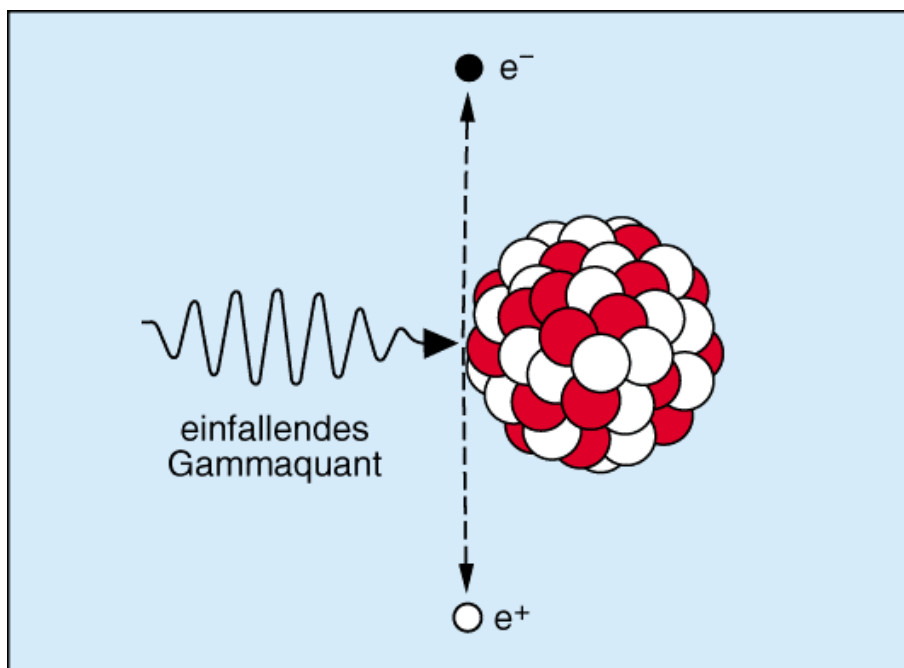


Abb. 4.6: Paarbildung (Modelldarstellung)

Das beim Paarbildungseffekt entstandene Positron hat eine relativ geringe Lebensdauer. Nach der Übertragung der Bewegungsenergie auf das Wechselwirkungsmaterial vereinigt es sich mit einem Elektron und zerstrahlt dabei in zwei Gammaquanten von je 0,511 MeV. Dieser Vorgang stellt die Umwandlung von Materie in Energie dar (Abb. 4.7).

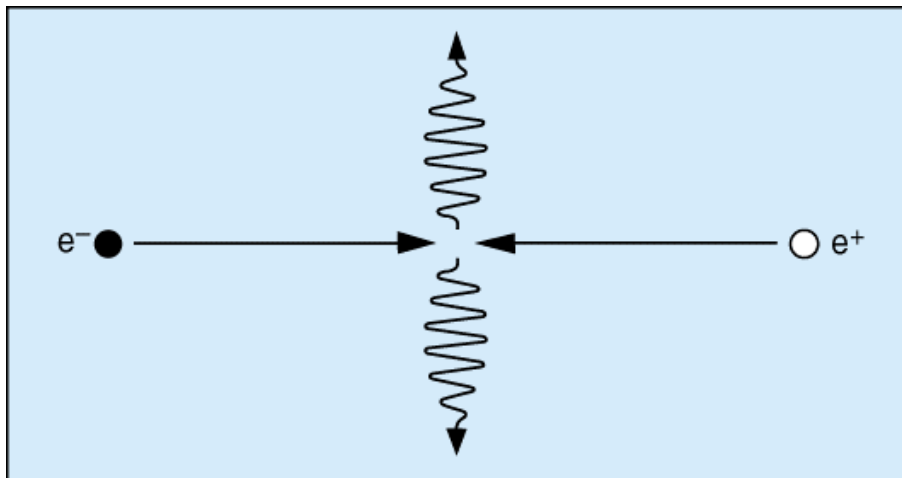


Abb. 4.7: Elektron und Positron vereinigen sich und zerstrahlen. Es entstehen zwei Gammaquanten.

5 Aktivität und Dosis

5.1 Aktivität

Die Aktivität gibt die Anzahl der Kernumwandlungen pro Zeit an.

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl der Kernumwandlungen}}{\text{Zeit}} ; A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Die Einheit der Aktivität ist $1/s = s^{-1}$ (reziproke Sekunde). Als besonderer Einheitenname für die Aktivität wurde das Becquerel (Bq) eingeführt.

$$1 \text{ Bq} = 1 \cdot s^{-1}$$

Die Zahlenangabe in Becquerel gibt also die Anzahl der Kernumwandlungen pro Sekunde an. Bei 10 Kernumwandlungen pro Sekunde ergibt sich eine Aktivität von 10 Bq, bei 1000 Kernumwandlungen pro Sekunde eine Aktivität von 1000 Bq = 1 kBq.

Viele Radionuklide bilden nach ihrer Umwandlung Tochterkerne, die wiederum radioaktiv sind. So wandelt sich z. B. Ra-226 in das radioaktive Edelgas Rn-222 um. Aktivitätsangaben für ein Radionuklid – in diesem Fall Ra-226 – beziehen sich aber immer auf die Ausgangssubstanz, nicht auf die angesammelten Folgeprodukte. Eine Angabe über die Aktivität kann sich allerdings auch auf die Gesamtheit der vorhandenen Radionuklide (Gesamtaktivität) oder auf ein einzelnes Radionuklid beziehen. Dieses muss immer mit angegeben werden.

5.2 Halbwertszeit

Bei einem einzelnen radioaktiven Atomkern kann man nicht vorhersagen, zu welchem Zeitpunkt er zerfallen wird. Er kann in der nächsten Sekunde oder aber erst in Tausenden von Jahren zerfallen. Bei einer großen Anzahl von Atomen lässt sich aber eine Wahrscheinlichkeitsaussage über den Ablauf des Zerfalls machen. Die Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Anzahl von Atomkernen zerfallen ist, wird Halbwertszeit ($T_{1/2}$) genannt. Sie ist für jedes Radio-

nuklid eine charakteristische Größe. Die Halbwertszeiten liegen zwischen Milliarden Jahren und Sekundenbruchteilen (Tab. 5-1).

Element	Halbwertszeit	Zerfallsart
Uran-238	$4,468 \cdot 10^9$ a	Alpha
Kalium-40	$1,28 \cdot 10^9$ a	Beta-Minus, K-Einfang
Plutonium-239	$2,411 \cdot 10^4$ a	Alpha
Cäsium-137	30,17 a	Beta-Minus
Iod-131	8,02 d	Beta-Minus
Thorium-231	25,5 h	Beta-Minus
Radon-220	55,6 s	Alpha
Polonium-214	$1,64 \cdot 10^{-4}$ s	Alpha

Tab. 5-1: Halbwertszeiten einiger Radionuklide

Es zerfällt zum Beispiel von einer Menge Wasserstoff-3 (Tritium) in ca. 12,3 Jahren die Hälfte der Atome, nach weiteren 12,3 Jahren ist von dem Rest wiederum die Hälfte zerfallen usw. (Abb. 5.1).

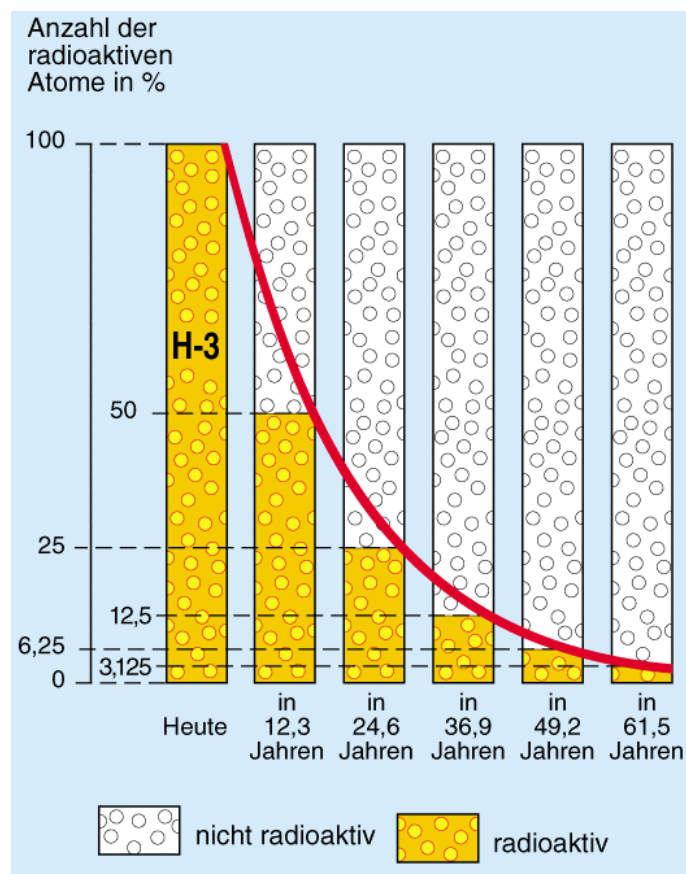


Abb. 5.1: Zerfall des Wasserstoff-3 (Tritium)

5.3 Energiedosis

Die von einem Stoff aufgenommene Energie wird als Maß für die physikalische Strahlenwirkung verwendet. Die Energiedosis einer ionisierenden Strahlung gibt die pro Masse eines durchstrahlten Stoffes absorbierte Energie an.

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

Der Quotient 1 J/1 kg ist die Einheit der Energiedosis, der Einheitenname ist das Gray (Gy).

5.4 Organdosis

Mit der Energiedosis allein kann die biologische Strahlenwirkung nicht beurteilt werden. Es zeigt sich nämlich, dass bei gleichen Energiedosen, aber unterschiedlichen Strahlenarten, die hervorgerufenen Effekte unterschiedlich sein können. Wird z. B. von zwei gleichen biologischen Objekten das eine mit Alphastrahlen, das andere mit Betastrahlen bestrahlt und nehmen beide Objekte gleich viel Energie auf, so sind die durch die Alphastrahlen hervorgerufenen biologischen Strahlenwirkungen etwa 20mal größer. Die größere biologische Wirkung von Alphastrahlen kann durch die größere Anzahl erzeugter Ionen oder Anregungen pro Weglänge erklärt werden. Eine dichtere Ionisierung in einem kleinen Bereich ist viel schädlicher als eine gleich große Anzahl von Ionisationen, die auf einen größeren Bereich verteilt sind.

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen biologischen Wirkung der verschiedenen Strahlenarten wurde der Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R eingeführt (Tab. 5-2). Das Produkt aus der über das Gewebe oder Organ T gemittelten Energiedosis $D_{T,R}$, die durch die Strahlung R erzeugt wird, und dem Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R ist die Organdosis $H_{T,R}$. Besteht die Strahlung aus Arten und Energien mit unterschiedlichen Werten von w_R , so werden die einzelnen Beiträge addiert. Für die Organdosis H_T für das Gewebe oder Organ T gilt dann:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Strahlenart und Energiebereich	Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R
Photonen, alle Energien	1
Elektronen, Myonen, alle Energien	1
Neutronen	
< 10 keV	5
10 keV bis 100 keV	10
> 100 keV bis 2 MeV	20
> 2 MeV bis 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protonen, außer Rückstoßprotonen, Energie >2 MeV	5
Alphateilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne	20

Tab. 5-2: Strahlungs-Wichtungsfaktoren

Als Einheitenname für die Organdosis ist das Sievert (Sv) festgelegt worden. Die so definierte Organdosis und deren Angabe in der Einheit Sievert darf aufgrund der Herleitung der Strahlungs-Wichtungsfaktoren streng genommen nur für Personen und nur für Strahlendosen bis in den Bereich von 1 Sv verwendet werden. Die Energiedosis mit ihrer Einheit Gray kann dagegen für jeden Dosisbereich, jedes Lebewesen und jeden Stoff genutzt werden.

5.5 Effektive Dosis

Da die Strahlenempfindlichkeit einzelner Organe bzw. Gewebe z. T. erhebliche Unterschiede aufweist, liefern die jeweiligen Organdosen unterschiedliche Beiträge zum strahlenbedingten Gesamtrisiko, also der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Krebs oder Leukämie. Zur Berechnung der effektiven Dosis E , die ein Maß für das gesamte Strahlenrisiko darstellt, wurden deshalb von der Internationalen Strahlenschutzkommission im Jahr 1991 für verschiedene Organe und Gewebe Wichtungsfaktoren w_T eingeführt (Tab. 5-3.).

Die effektive Dosis E ist die Summe der mit dem zugehörigen Gewebe-Wichtungsfaktor w_T multiplizierten Organdosen H_T . Dabei ist über alle in Tab. 5.3 aufgeführte Organe und Gewebe zu summieren. Die Einheit der effektiven Dosis ist ebenfalls das Sievert (Einheitenzeichen: Sv).

$$E = \sum_T w_T H_T .$$

Gewebe oder Organe	Gewebe- Wichtungsfaktoren w_T
Gonaden	0,20
Dickdarm	0,12
Knochenmark (rot)	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,05
Brust	0,05
Leber	0,05
Schilddrüse	0,05
Speiseröhre	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
andere Organe, Gewebe *	0,05
* Für Berechnungszwecke setzen sich „andere Organe oder Gewebe“ wie folgt zusammen: Bauchspeicheldrüse, Dünndarm, Gebärmutter, Gehirn, Milz, Muskel, Nebennieren, Niere und Thymusdrüse.	

Tab. 5-3: Gewebe-Wichtungsfaktoren

5.6 Folgedosis

Die Bestrahlung des Gewebes oder von Organen durch inkorporierte radioaktive Stoffe ist von der Verweilzeit der Radionuklide im jeweiligen Gewebe oder Organ abhängig. Diese Verweilzeit ergibt sich aus dem Zusammenwirken des radioaktiven Zerfalls einerseits und dem Ausscheiden des Stoffes aus dem Körper auf Grund der Stoffwechselforgänge andererseits. Die Organ-Folgedosis $H_T(\tau)$ bei einer Inkorporation zum Zeitpunkt t_0 ist das Zeitintegral der Dosisleistung $\dot{H}_T(t)$ im Gewebe oder Organ T. Wird kein Integrationszeitraum τ angegeben, ist für Erwach-

sene ein Zeitraum von 50 Jahren und für Kinder ein Zeitraum vom jeweiligen Alter bis zum Alter von 70 Jahren zu Grunde zu legen.

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} H_T(t) dt .$$

6 Abschirmung und weitere Maßnahmen zur Dosisreduzierung

Für alle Anwendungen radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung ist darauf hinzuwirken, dass die Quellstärke auf einen optimalen Wert reduziert wird. Weitere Maßnahmen zur Reduzierung einer externen Strahlenexposition bestehen in:

- Abschirmung,
- Aufenthaltszeitbegrenzung,
- Abstand.

In der Strahlenschutzpraxis werden meist mehrere Schutzmaßnahmen gleichzeitig angewandt und dadurch die Schutzwirkung erhöht.

6.1 Abschirmung der Strahlung

Bei der Abschirmung ionisierender Strahlen finden Wechselwirkungen der Strahlungsteilchen und Energiequanten mit dem Abschirmmaterial statt. Dabei können Energie und Bewegungsrichtung der Teilchen und Quanten geändert werden, andere Strahlungsteilchen oder Quanten entstehen oder die Strahlung völlig verschwinden. Die Unterschiede in den Abschirmungswirkungen für verschiedene Strahlenarten zeigt die Abb. 6.1.

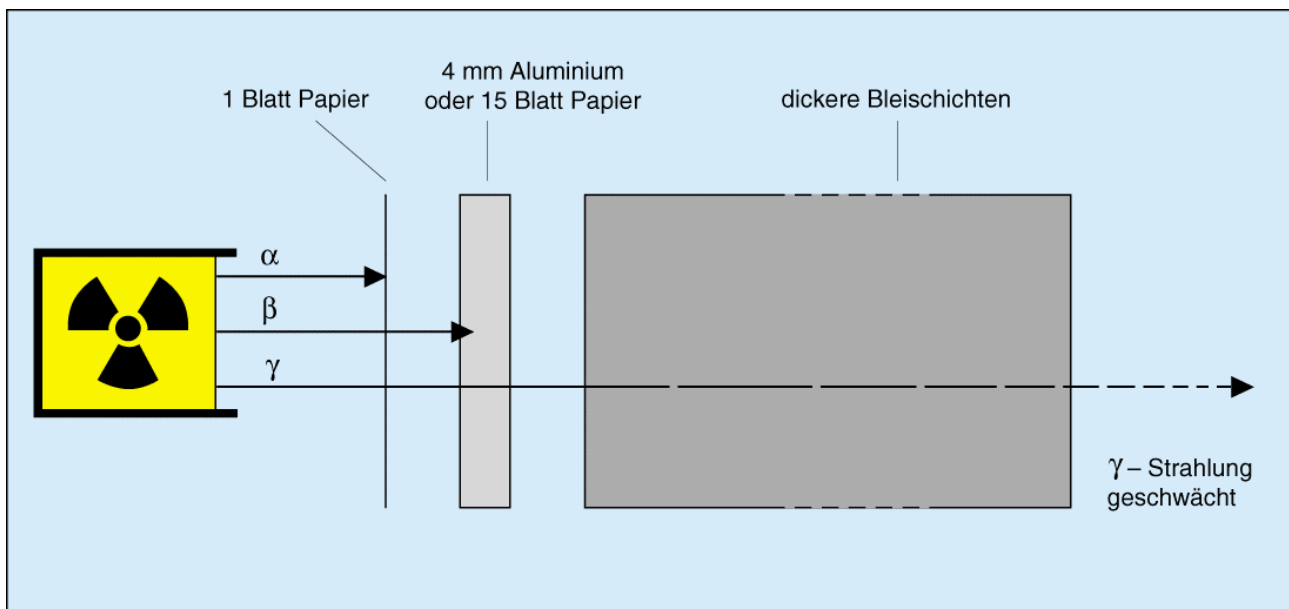


Abb. 6.1: Unterschiedliche Absorption von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung

6.1.1 Abschirmung von Alphastrahlen

Alphateilchen geben ihre Energie im wesentlichen dadurch ab, dass sie Atome oder Moleküle der durchstrahlten Materie ionisieren oder anregen. Da die Ionen in sehr großer Dichte erzeugt

werden, verlieren Alphateilchen ihre Energie auf sehr kurzer Strecke. In Luft beträgt die Reichweite deshalb nur wenige Zentimeter, im Gewebe weniger als 0,1 mm (Tab. 6-1).

Teilchen- energie in MeV	Reichweite in		
	Luft	Muskel- gewebe	Aluminium
1	0,3 cm	4 µm	2 µm
3	1,6 cm	16 µm	11 µm
4	2,5 cm	31 µm	16 µm
6	4,6 cm	56 µm	30 µm
8	7,4 cm	91 µm	48 µm
10	10,6 cm	130 µm	67 µm

Tab. 6-1: Reichweite von Alphateilchen verschiedener Energie in Luft, Muskelgewebe und Aluminium ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$)

Die geringe Reichweite von Alphateilchen in Luft (Abb. 6.2) bewirkt, dass in etwa 10 cm Entfernung von der Strahlenquelle keine Bestrahlung des Menschen durch Alphateilchen auftreten kann. Treffen Alphateilchen auf unbedeckte Körperteile des Menschen, werden sie bereits durch die oberen Hautschichten vollständig abgeschirmt.

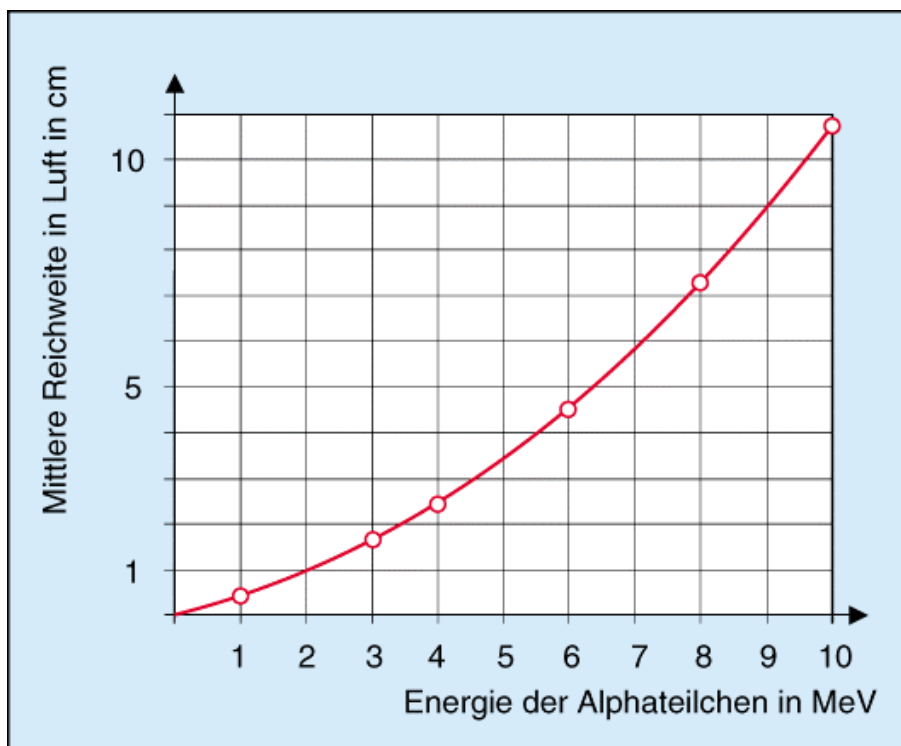


Abb. 6.2: Abhängigkeit der Reichweite von Alphateilchen in Luft von der Anfangsenergie

6.1.2 Abschirmung von Betastrahlen

Treffen Betateilchen auf Materie, verlieren sie ihre Energie durch Ionisationen, Anregung, Streuung und Erzeugung von Bremsstrahlung. Ionisation und Erzeugung von Bremsstrahlung

sind die wichtigsten Wechselwirkungsprozesse. Die Betateilchen treten im wesentlichen mit den Hüllelektronen der Atome in Wechselwirkung. Daraus folgt, dass sie ihre Energie auf desto kürzeren Strecken verlieren, je größer Dichte und Ordnungszahl des Abschirmmaterials sind. In der Praxis werden zur Abschirmung von Betastrahlen jedoch keine Materialien höherer Ordnungszahl verwendet, weil die Energie der auftretenden Bremsstrahlung mit der Ordnungszahl wächst. Die „härtere“ Bremsstrahlung müsste dann ihrerseits durch zusätzliche Materialschichten abgeschirmt werden. Zur optimalen Abschirmung von Betastrahlen wird eine Kombination zweier verschiedener Materialien verwendet. Der Strahlenquelle zugewandt ist ein Absorbermaterial niedriger Ordnungszahl, wobei die Materialdicke etwas größer gewählt wird als die Reichweite der Betastrahlen in diesem Material. Dadurch wird die Betastrahlung vollständig absorbiert, und es entsteht nur wenig Bremsstrahlung geringerer Energie. Ein zusätzliches Material hoher Ordnungszahl (z. B. Blei) schwächt dann die Bremsstrahlung. Es kann bei Strahlenquellen geringer Stärke entfallen (Abb. 6.3).

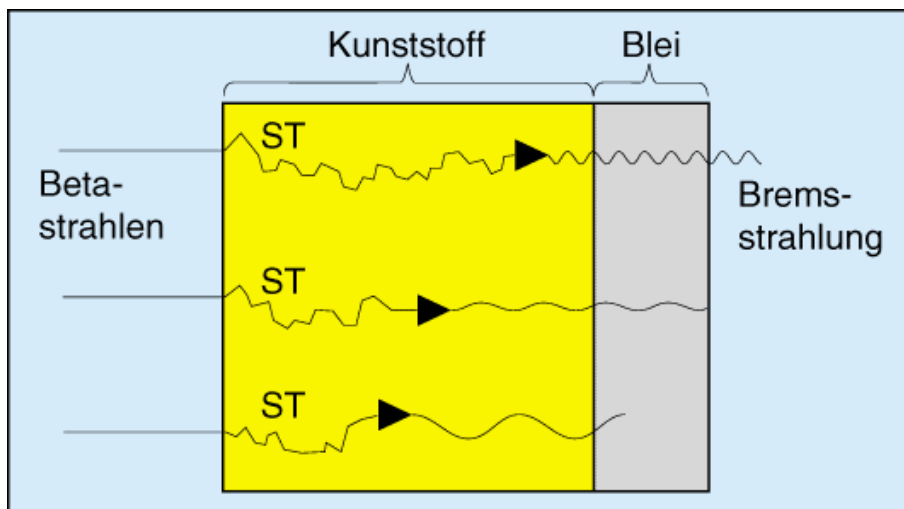


Abb. 6.3: Materialkombination für die optimale Abschirmung von Betastrahlen (ST: Streueffekte)

Die maximale Energie von Betateilchen, die die meisten Radionuklide aussenden, ist nicht größer als 1 MeV bis 2 MeV. Zur vollständigen Abschirmung sind also 4 mm Aluminium ausreichend (Tab. 6-2). Neben Aluminium werden auch Kunststoffe zur Abschirmung von Betastrahlen eingesetzt.

Teilchen- energie MeV	Reichweite in		
	Luft	Körper- gewebe	Aluminium
0,01	0,003 m	0,0025mm	0,009mm
0,1	0,10 m	0,16 mm	0,050mm
0,5	1,20 m	1,87 mm	0,60 mm
1,0	3,06 m	4,75 mm	1,52 mm
2	7,10 m	11,1 mm	4,08 mm
5	19,0 m	27,8 mm	9,9 mm
10	39,0 m	60,8 mm	19,2 mm
20	78 m	123 mm	39,0 mm

Tab. 6-2: Reichweite von Betateilchen verschiedener Energie in Luft, Körpergewebe und Aluminium

6.1.3 Abschirmung von Gammastrahlen

Für Gammastrahlung lässt sich keine maximale Reichweite angeben. Durch Absorbermaterialien erreicht man lediglich eine Schwächung der Strahlungsintensität auf einen bestimmten

Bruchteil. Dabei hängt die Stärke der Schwächung von der Energie der Strahlung und dem verwendeten Abschirmmaterial ab. Höhere Energie der Gammaquanten bedeutet ein größeres Durchdringungsvermögen, und eine höhere Ordnungszahl des Wechselwirkungsmaterials führt zu einer größeren Abschirmwirkung.

Zur Abschätzung der Materialdicken, die für die Strahlenabschirmung benötigt werden, hat man für die Strahlenschutzpraxis die Halbwertschicht und die Zehntelwertschicht definiert. Durch diese Schichten wird die Intensität der Strahlung auf die Hälfte bzw. ein Zehntel reduziert.

Die Dicken von Halbwertschicht und Zehntelwertschicht sind von der Energie der Gammaquanten und dem verwendeten Material abhängig. Dabei gilt in einem bestimmten Bereich, dass die Halbwertschicht um so dicker ist, je höher die Quantenenergie liegt. Umgekehrt ist die Dicke der Halbwertschicht ein Maß für die Energie und damit auch für die Durchdringungsfähigkeit der Strahlung.

Durch eine Halbwertschicht wird die Strahlungsintensität auf $(\frac{1}{2})^1 = \frac{1}{2}$, durch zwei Schichten auf $(\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$ und durch drei Schichten auf $(\frac{1}{2})^3 = \frac{1}{8}$ herabgesetzt. Bei 10 Halbwertschichten beträgt die Schwächung dann $(\frac{1}{2})^{10} = 1/1024 \approx 0,1 \%$ (Abb. 6.4).

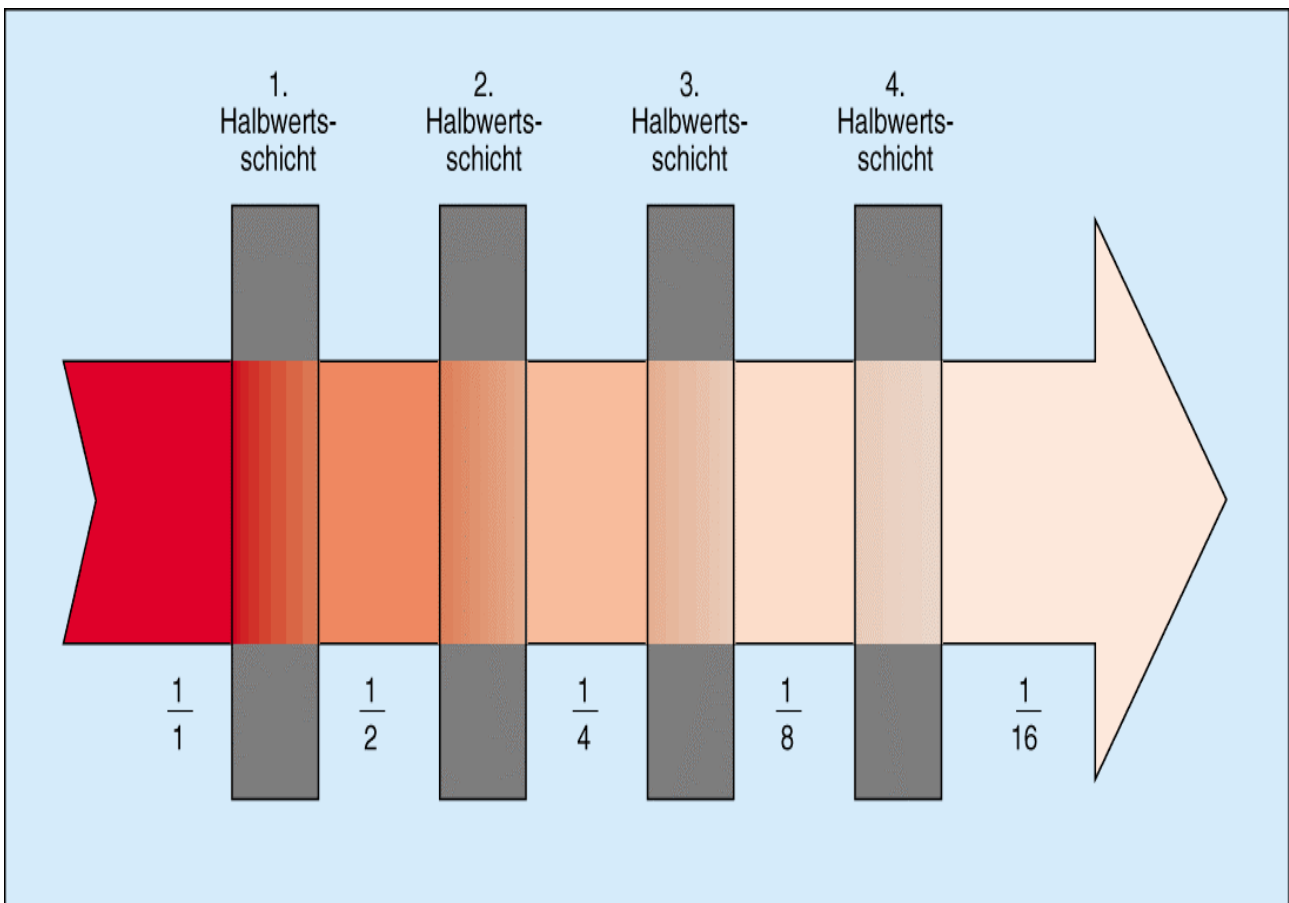


Abb. 6.4: Schematische Darstellung der Halbwertschicht (Streuung nicht berücksichtigt)

Material	Materieschichtdicke in cm bei einer Energie der Gammaquanten von					
	0,1 MeV	0,5 MeV	1 MeV	5 MeV	10 MeV	100 MeV
Wasser Halbwertschicht Zehntelwert- schicht	4,15 13,8	7,18 23,8	9,85 32,7	23,1 76,6	31,6 105	40,2 133
Beton Halbwertschicht Zehntelwert- schicht	1,75 5,81	3,41 11,4	4,66 15,5	10,3 34,0	12,9 43,0	12,5 40,6
Eisen Halbwertschicht Zehntelwert- schicht	0,257 0,855	1,06 3,54	1,47 4,91	2,82 9,40	3,02 10,0	2,10 6,96
Blei Halbwertschicht Zehntelwert- schicht	0,0118 0,0386	0,422 1,41	0,893 2,97	1,43 4,78	1,21 4,05	0,642 2,03

Tab. 6-3: Halbwert- und Zehntelwertschicht für Gammaquanten unterschiedlicher Energie

6.1.4 Abschirmung von Neutronenstrahlen

Die Absorption von Neutronen und damit die Abschirmung ist optimal bei geringen Neutronenenergien möglich. In einem ersten Schritt muss deshalb ihre Energie (Geschwindigkeit) herabgesetzt werden. Dazu eignen sich am besten wasserstoffhaltige Materialien (z. B. Polyäthylen, Paraffin, Wasser), da die Masse von Neutron und Wasserstoffkern (Proton) praktisch gleich groß ist und bei Stößen besonders hohe Energiebeträge übertragen werden können. In einem zweiten Schritt werden die thermischen Neutronen eingefangen. Dafür eignen sich z. B. Bor oder Cadmium. Eine 6,5 mm dicke Boralschicht (Aluminium + B_4C -Zusatz) schwächt den Fluss thermischer Neutronen um den Faktor 10^{10} .

Beim Einfang der Neutronen durch Bor oder Cadmium wird eine Sekundärstrahlung ausgesandt. Zur Abschirmung dieser Sekundärstrahlung müssen Materialien großer Ordnungszahl eingesetzt werden, damit die Gammastrahlung sicher absorbiert wird. Ein klassischer Neutronenschild besteht also aus drei Schichten (Abb. 6.5).

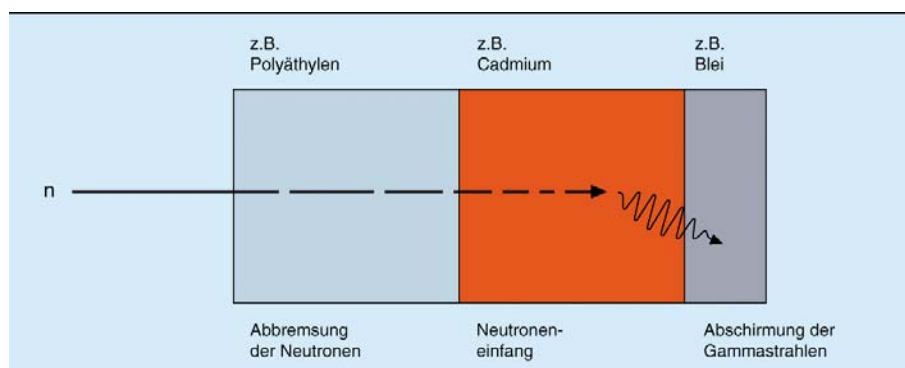


Abb. 6.5: Grundsätzlicher Aufbau eines Neutronenschildes

Statt eines relativ teuren, mehrschichtigen Neutronenschildes können auch dickere Betonwände eingesetzt werden. Es wird Spezialbeton mit bestimmten Zuschlägen verwendet, so dass Neutronenabbremmung, Neutroneneinfang und Gammaabschirmung sicher gewährleistet sind. In einem Kernkraftwerk übernimmt ein 2 m dicker Schild aus Spezialbeton diese Aufgabe.

6.2 Aufenthaltszeitbegrenzung

Die von einer Person empfangene Strahlendosis ist der Zeit proportional. Eine Verdoppelung oder Verzehnfachung der Bestrahlungszeit führt auch zur zwei- bzw. zehnfachen Strahlendosis (Abb. 6.6). Eine wichtige Strahlenschutzmaßnahme liegt also in der Verringerung der Bestrahlungszeit. Je stärker eine Strahlenquelle ist, desto größer wird die Bedeutung dieser Schutzmaßnahme.

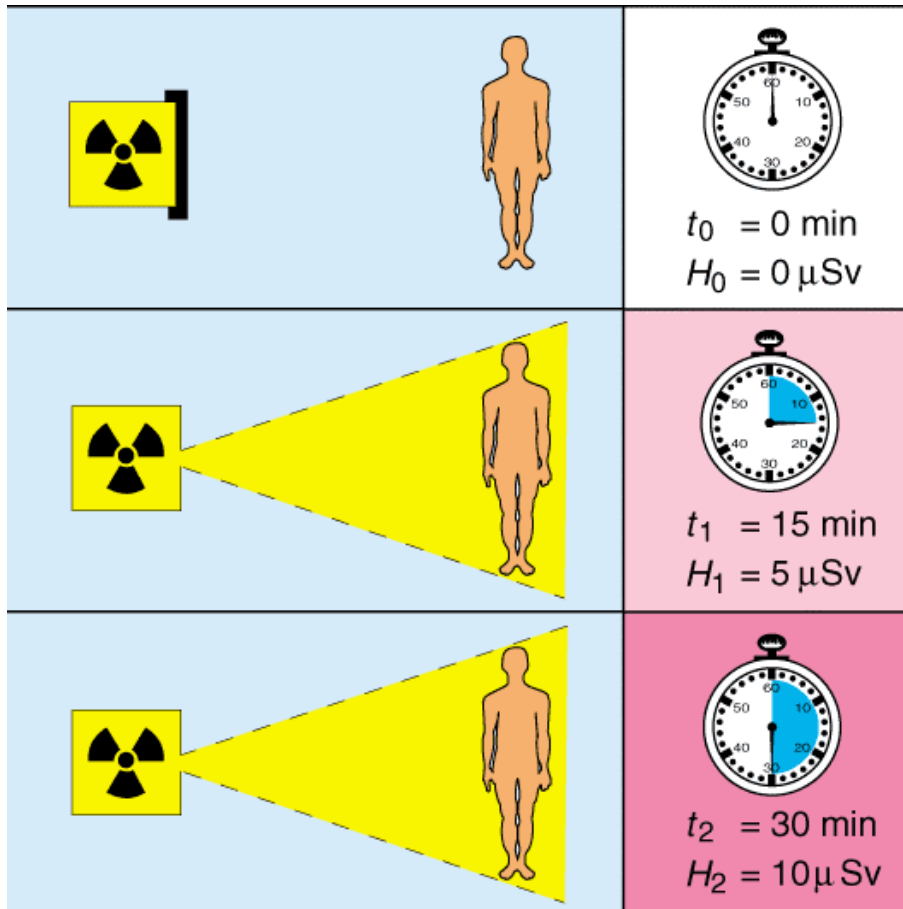


Abb. 6.6: Abhängigkeit der Dosis von der Bestrahlungszeit

6.3 Abstand

Ein weiterer Schutz gegen ionisierende Strahlung besteht darin, einen genügend großen Abstand zur Strahlenquelle einzuhalten. Wenn die Strahlenquelle punktförmig ist, sich im leeren Raum befindet und die Strahlen gleichmäßig nach allen Seiten aussendet (isotrope Strahlenquelle), gilt das quadratische Abstandsgesetz: Die Intensität der Strahlung nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab: Es bedeutet:

2fache Entfernung: $1/4$ der ursprünglichen Strahlungsintensität

3fache Entfernung: $1/9$ der ursprünglichen Strahlungsintensität

4fache Entfernung: $1/16$ der ursprünglichen Strahlungsintensität usw.

Dass die Intensität der Strahlung mit der Entfernung von der Strahlenquelle abnimmt, ist darin begründet, dass die Dichte der von einer Quelle divergierend nach allen Seiten ausgesandten Teilchen oder Gammaquanten mit der Entfernung von der Quelle immer mehr abnimmt. Unter

den angenommenen Bedingungen gilt dann: $I \sim 1 / r^2$ (siehe Abb. 6.7). In der Praxis kann eine Strahlenquelle als punktförmig angesehen werden, wenn der gewählte Abstand 5mal so groß ist wie die Ausdehnung der Quelle. Bei flächenförmigen Quellen nimmt die Intensität linear mit der Entfernung ab ($I \sim 1 / r$).

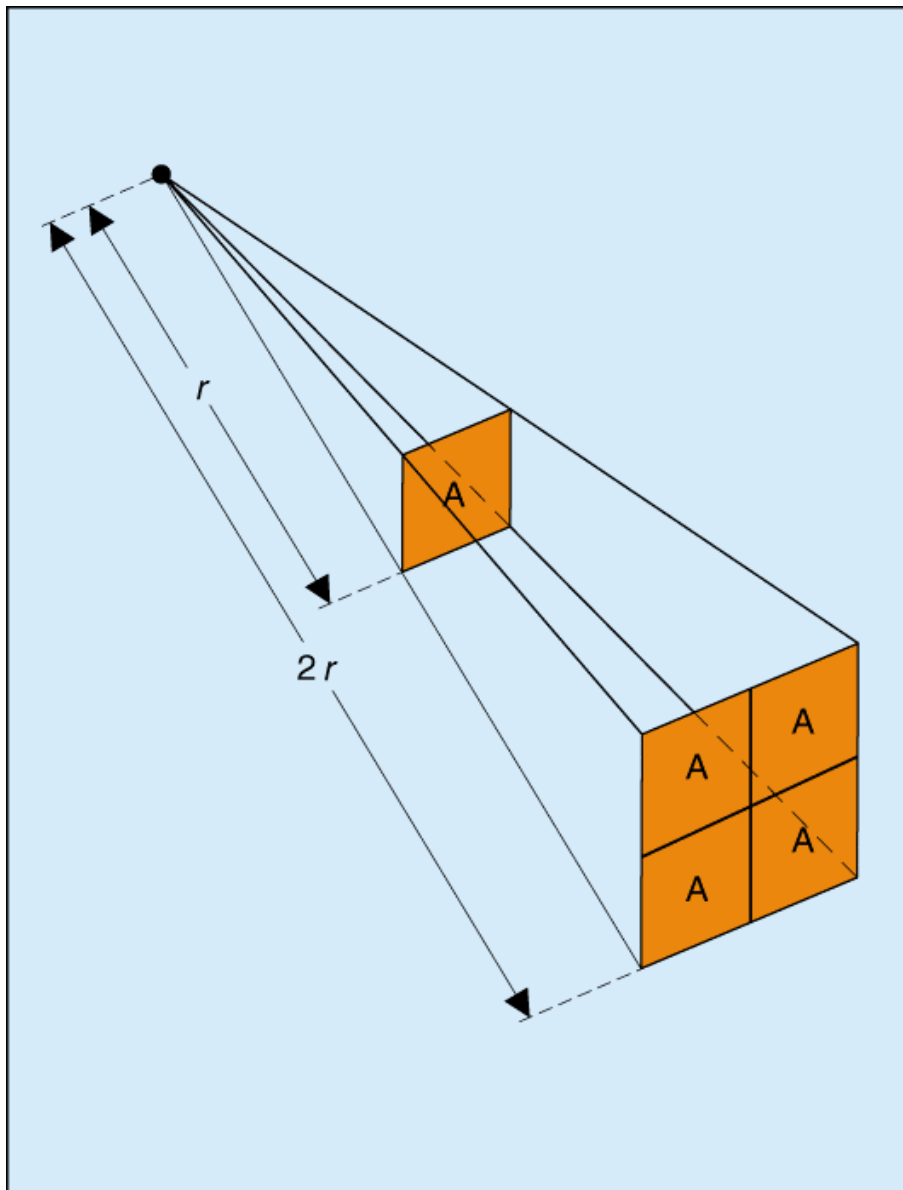


Abb. 6.7: Die Intensität ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands

Wird zum Beispiel eine geringe Menge radioaktiver Substanz, die in einer Kugel mit $d = 0,5$ cm eingeschlossen ist, mit den Fingern angefasst, so ist die Haut des Fingers 0,5 cm vom Mittelpunkt der Kugel entfernt. Packt man die Kugel dagegen mit einer Pinzette, so ist die Hand etwa 10 cm vom Kugelmittelpunkt entfernt. Durch die 20fache Entfernung beträgt die Strahlungsintensität $(1/20)^2 = 1/400$ des ursprünglichen Wertes.

Diese Zusammenstellung basiert auf der Broschüre „Radioaktivität und Strahlenschutz“, herausgegeben vom Informationskreis KernEnergie, Robert-Koch-Platz 4, 10115 Berlin. Diese Broschüre ist auch unter www.infokreis-kernenergie.de im Bereich „Download“ verfügbar.