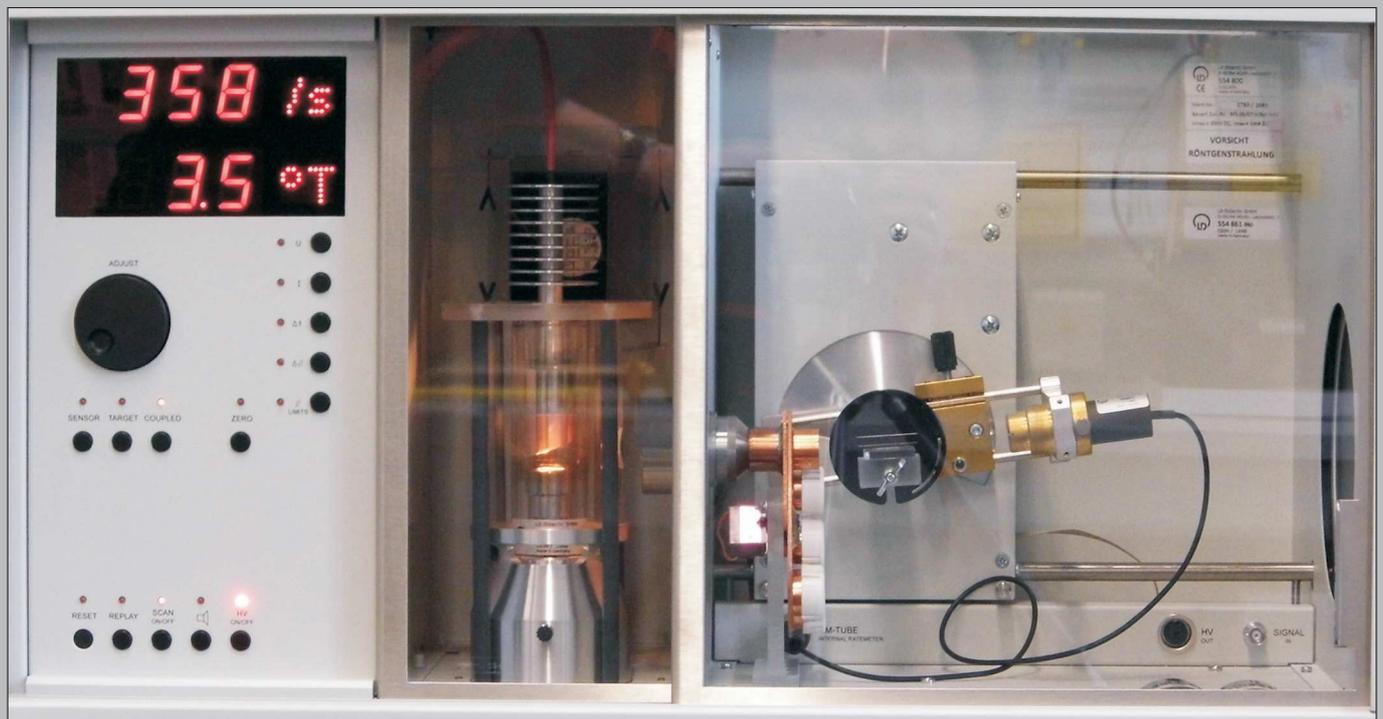


# Strahlenschutz

## Naturwissenschaftliche und gesetzliche Grundlage

3. Auflage



Philipp • Berger • Wolf



# Strahlenschutz

für das Physikalische Praktikum

3. überarbeitete Auflage

Dipl.-Phys. Norbert Philipp  
Dipl.-Ing. (FH) Ingo Berger  
Dr. rer. nat. Bodo Wolf

Mit Unterstützung von Shadi Sykora, M. Eng. • Alexander Böhm, M. Sc. • Jörg Nitschke, M. Sc.

**B-TU**

Brandenburgische  
Technische Universität  
Cottbus - Senftenberg  
*Standort: Senftenberg*

Universitätsplatz 1  
01968 Senftenberg

3. überarbeitete Auflage  
2022

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Physikalische Grundlagen</b> .....	5
1.1 Aufbau des Atomkerns .....	5
1.2 Arten und Eigenschaften ionisierender Strahlung .....	6
1.3 Radioaktivität .....	9
1.4 Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie .....	11
1.4.1 Wechselwirkung geladener Strahlungsteilchen mit Materie .....	11
1.4.2 Wechselwirkung ungeladener Strahlungsteilchen mit Materie .....	12
<b>2. Dosisgrößen und Dosiseinheiten</b> .....	16
2.1 Energiedosis .....	16
2.2 Organdosis .....	16
2.3 Effektive Dosis .....	18
2.4 Dosismessgrößen .....	19
2.5 Dosisleistung .....	19
<b>3. Strahlenschäden und Strahlenrisiken</b> .....	20
3.1 Strahlenwirkung .....	20
3.2 Strahlenschäden .....	20
3.1.1 Deterministisch Strahlenschäden .....	21
3.1.2 Stochastische Strahlenschäden .....	22
3.3 Natürliche und zivilisationsbedingte Strahlenexposition des Menschen .....	22
3.3.1 Natürliche Strahlenexposition .....	22
3.3.2 Zivilisatorische Strahlenexposition .....	25
<b>4. Allgemeine Rechtsgrundlagen des Strahlenschutzes</b> .....	27
4.1 Gesetzliche Vorschriften .....	27
4.1.1 Expositionssituationen .....	28
4.1.2 Durchsetzung des Strahlenschutzrechts .....	28
4.1.3 Kommunikationswege im Strahlenschutz .....	29
4.2 Dosisgrenzwerte .....	30
4.2.1 Expositionskategorien .....	30
4.2.2 Strahlenschutzbereiche .....	31
4.3 Verhaltensweisen für den fachgerechten Umgang mit Strahlenquellen .....	32
<b>5. Berechnungen und Tabellen</b> .....	34
<b>6. Literaturhinweise</b> .....	36



# 1. Physikalische Grundlagen des Strahlenschutzes

## 1.1 Aufbau des Atomkerns

Jede Materie (*belebt oder unbelebt*) besteht aus Atomen. Diese bestehen aus **Atomkernen** und **Atomhüllen**. Diese beiden Teile des Atoms setzen sich wiederum aus insgesamt drei Teilen zusammen. In der Atomhülle befinden sich die **Elektronen**, den Atomkern bilden die **Protonen** und die **Neutronen** (*Oberbegriff für beide: „Nukleon“*).

Die im Periodensystem der Elemente zusammengefassten Atome der unterschiedlichen chemischen Elemente sind ausnahmslos Kombinationen dieser Teilchen und unterscheiden sich lediglich darin, aus wie vielen sie sich davon zusammensetzen.

### Quarks

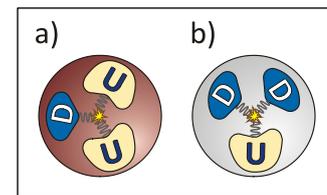
Mittlerweile weiß man, dass auch die Nukleonen (*Protonen und Neutronen*) ihrerseits aus noch kleineren Teilchen bestehen (*Up- und Down-Quarks*).

Das **Up-Quark** hat eine Ladung von  $+\frac{2}{3}$  und das **Down-Quark** von  $-\frac{1}{3}$ . Ein Proton besteht aus zwei Up- (*U*) und einem Down-Quark (*D*). Das ergibt eine Ladung von

$$+\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +\frac{3}{3} = \underline{+1}.$$

Ein Neutron besteht aus zwei Down- (*D*) und einem Up-Quark (*U*). Das ergibt eine Ladung von

$$-\frac{1}{3} - \frac{1}{3} + \frac{2}{3} = \frac{0}{3} = \underline{0}.$$

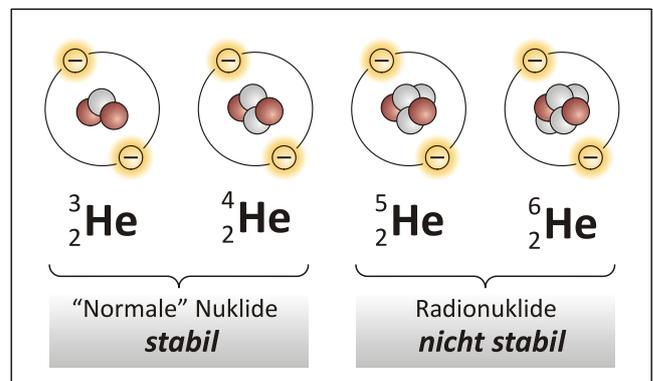


**Bild 1-1:** a) Proton  
b) Neutron

Stichwort: *Quark (Physik)*

Das einfachste Atom ist das Wasserstoffatom. Sein Kern besteht aus nur einem Proton, und ist damit der einzige Kern, der kein einziges Neutron aufweist. Seine Hülle besteht aus einem Elektron. Das Wasserstoffatom ist insgesamt elektrisch neutral, da die positive Ladung des Protons die negative Ladung des Elektrons ausgleicht, dabei wirkt eine elektrostatische Anziehungskraft zwischen den Ladungen. Diese Eigenschaft geht allerdings verloren, sobald das eine (*oder mehrere*) Elektron aus der Hülle entfernt wird. Das Atom wird dann als „*ionisiert*“ bezeichnet und das verbleibende Restatom als „*Ion*“. Wasserstoff ist zwar das häufigste Element im Universum, aber nicht das einzige. Das nächstschwerere Element ist Helium. Der Kern besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Er wird von zwei Elektronen umkreist und bildet mit diesen gemeinsam das neutrale Heliumatom.

Chemisch gesehen verhalten sich die vier im **Bild: 1-2** dargestellten Heliumunterarten nahezu gleich. Da es nicht möglich ist, sie auf chemischen Wege zu unterscheiden oder gar zu trennen, stehen sie im Periodensystem der Elemente an der gleichen Stelle. Aus dem griechischen Begriff für „*gleich*“ (*isos*) und „*Ort*“ (*topos*) wurde für Kerne, die die gleiche Kernladungszahl aber verschiedene Massenzahlen aufweisen der Begriff „*Isotop*“ eingeführt. Die Massenzahl besteht also aus der Summe der Protonen und der Neutronen.



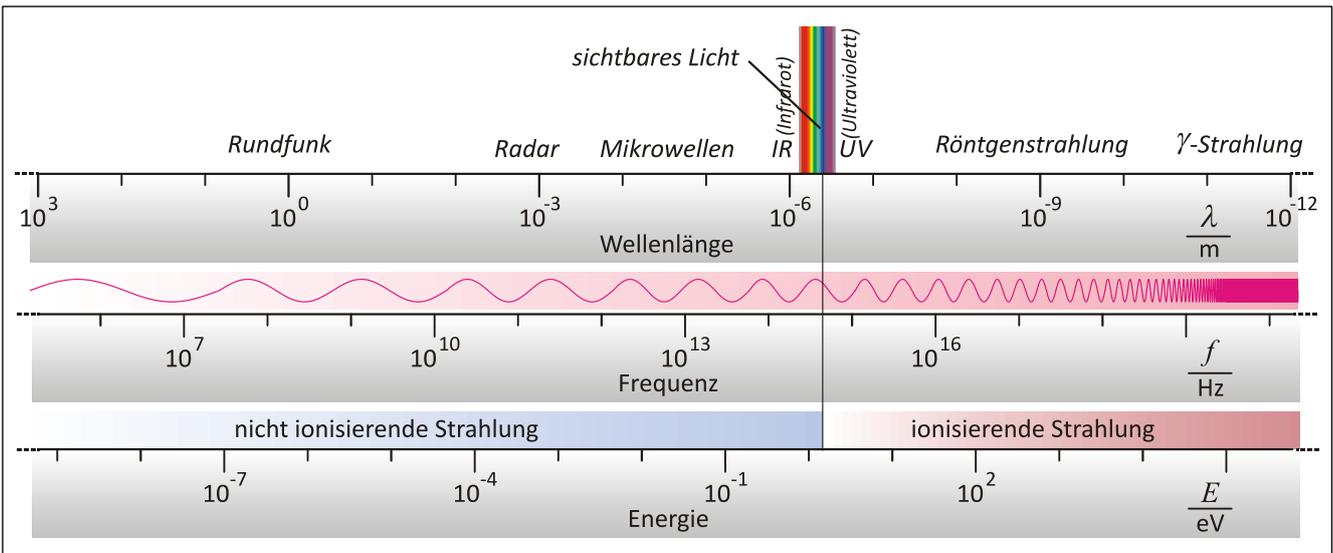
**Bild 1-2:** Varianten des Heliums

### 1.2. Arten und Eigenschaften ionisierender Strahlung

Nicht nur sichtbares Licht besteht aus Photonen, sondern auch Mikro-, Radio oder Radarwellen bzw. Röntgen-, Gamma oder UV-Strahlung.

Da bei der Ionisation das Elektron gegen die Anziehung des Atomkerns weggehoben werden muss, brauchen die Photonen eine gewisse Mindestenergie. Wird diese unterschritten ist das Photon nicht ionisierend.

Zum Beispiel sind Gamma-Photonen ionisierend, die Photonen der Mikrowellen aber nicht. Die Grenze zwischen ionisierender und nicht ionisierender Strahlung liegt bei einer Wellenlänge von  $\lambda=480\text{ nm}$  und einer Frequenz von  $f=6,25\cdot 10^{14}\text{ Hz}$ . Die Photonenenergie beträgt hier  $E=2,58\text{ eV}$ .



**Bild 1-3:** Ionisationsschema der Wellenlängen, Frequenzen und Energien von Photonen

Radioaktive Kerne zerfallen aus einem energetisch instabilen in einen energetisch stabilen Zustand. Der instabile Atomkern ist nach dem Zerfall energieärmer als zu vor. Er strahlt beim Zerfall Energie an die Umgebung ab. In welcher Form dies geschieht, hängt von der Art des Kerns ab.

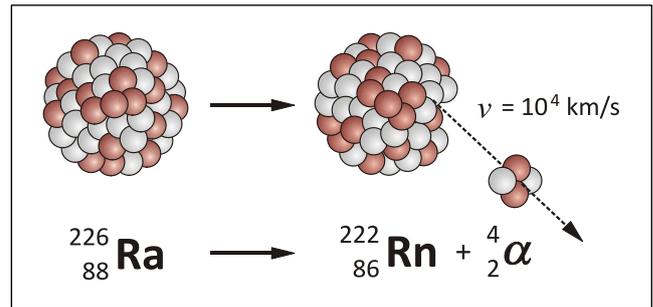
Die hauptsächlichlichen Strahlungsarten sind:

- Alpha-Strahlung ( $\alpha$ )  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \frac{4}{2}\alpha$
- Beta-minus-Strahlung ( $\beta^-$ )  ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^0_{-1}\beta$
- Beta-plus-Strahlung ( $\beta^+$ )  ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^0_{+1}\beta$
- Elektroneneinfang ( $\varepsilon$ )  ${}^{205}_{82}\text{Pb} + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^{205}_{81}\text{Tl} + {}^0_0\gamma$
- Gamma-Strahlung ( $\gamma$ )  ${}^{137m}_{56}\text{Ba} \rightarrow {}^{137}_{56}\text{Tl} + {}^0_0\gamma$
- Neutronen-Strahlung ( $n$ )  ${}^{252}_{98}\text{Cf} \rightarrow {}^{142}_{56}\text{Ba} + {}^{106}_{42}\text{Mo} + 4\frac{1}{0}n$

#### 1.2.1 $\alpha$ -Strahlung

Ein  $\alpha$ -Zerfall findet statt, indem das zerfallende Atom ein Fragment seines Kerns ausstößt, welches die beim Zerfall frei werdende Energie durch seine Bewegungsenergie davonträgt. Dieses besteht aus einem Paket von zwei Protonen und zwei Neutronen und ist identisch mit dem Kern des  ${}^4\text{He}$ -Atoms. Diese sogenannten  $\alpha$ -Teilchen sind aufgrund der beiden Protonen, die sie enthalten zweifach positiv geladen.

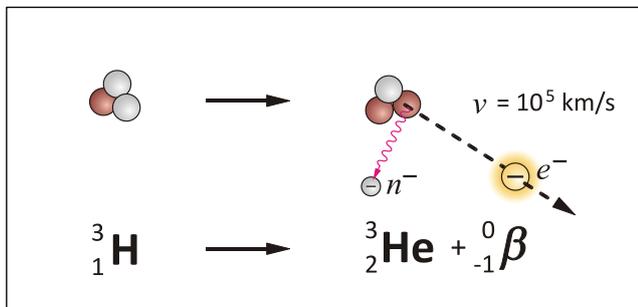
Die zwei Protonen und zwei Neutronen, aus denen das davonfliegende  $\alpha$ -Teilchen besteht, entstammen dem zerfallenden Kern und fehlen dort. Seine Massenzahl ist also um vier seine Kernladungszahl um zwei geringer als die des ursprünglichen Kerns. Das ist deshalb bedeutsam, weil durch die Kernladungszahl festgelegt wird, um welches Element es sich handelt. Im gezeigten Beispiel handelt es sich vor dem Zerfall um Radium (*Erdalkalimetall*) und nach dem Zerfall wurde es zum Radon-Atom (*Edelegas*).



**Bild 1-4:** Zerfall von Radium

### 1.2.2 $\beta^-$ -Strahlung

Diese Strahlung entsteht, indem sich eines der Neutronen im Kern in ein Proton umwandelt. Dabei entstehen zwei Teilchen, ein Elektron ( $e^-$ ) und ein Antineutrino, die den Kern verlassen und die beim Zerfall freigesetzte Energie in Form von Bewegungsenergie davontragen.



**Bild 1-5:** Umwandlung von Tritium zu Helium ( $^3_2\text{He}$ ) durch  $\beta^-$ -Zerfall

Das Elektron, das durch den  $\beta^-$ -Zerfall entsteht, wird als „Beta-minus-Teilchen“ bezeichnet. Es ist mit den Elektronen, die sich in den Hüllen der Atome befinden, physikalisch identisch (*sehr klein, leicht und mit einer negativen Ladung behaftet*). Die Ladungszahl ist -1 und die Massenzahl 0. Das Antineutrino kann für den Strahlenschutz vollkommen außer Acht gelassen werden, weil es mit der Materie (*menschliches Gewebe*) praktisch nicht wechselwirkt.

Die Anzahl der Nukleonen im Kern (*Massenzahl*)

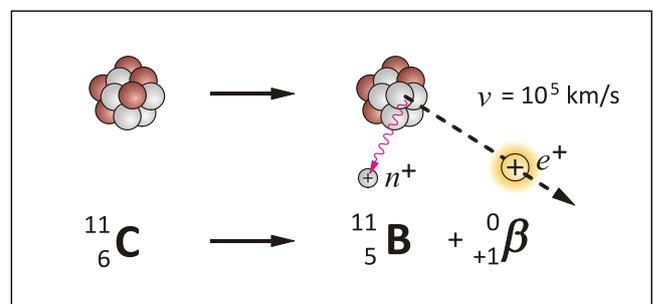
wird beim  $\beta^-$ -Zerfall nicht verändert, wohl aber die Kernladungszahl. Sie ist durch die Anzahl der Protonen gegeben und erhöht sich durch den Zerfall um eins, die Neutronenanzahl verringert sich um eins.

### 1.2.3 $\beta^+$ -Strahlung

Diese Strahlung entsteht, indem sich eines der Protonen im Kern in ein Neutron umwandelt. Dabei läuft der umgekehrte Prozess ab wie beim  $\beta^-$ -Zerfall. Bei diesem Vorgang entsteht ein Positron ( $e^+$ ) und ein Neutrino die den Kern verlassen und die beim Zerfall freigesetzte Energie in Form von Bewegungsenergie davontragen.

Das Positron, das durch den  $\beta^+$ -Zerfall entsteht, wird als „Beta-plus-Teilchen“ bezeichnet und hat die gleiche Masse wie das Elektronen. Es ist positiv geladen und somit ist auch die Ladungszahl +1 und die Massenzahl 0.

Es ist jedoch nicht einfach eine Art „positives Elektron“, sondern – anders als zum Beispiel Proton, Neutron oder Elektron – nicht Materie, sondern Antimaterie. Dieser Unterschied äußert sich in ei-



**Bild 1-6:** Umwandlung von Kohlenstoff zu Bor ( $^{11}_5\text{B}$ ) durch  $\beta^+$ -Zerfall

ner ungewöhnlichen Wechselwirkung mit herkömmlicher Materie, der sowohl für die Anwendung als auch für den Strahlenschutz bedeutsam ist.

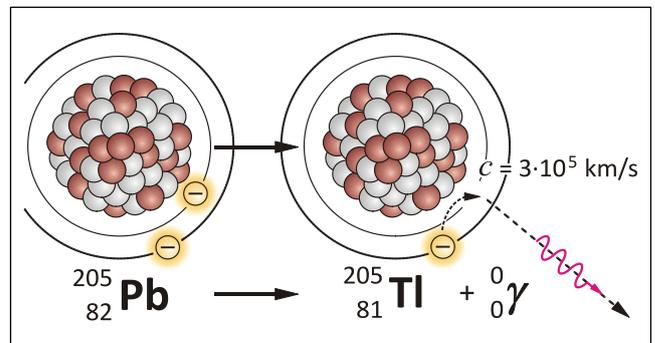
Das Neutrino kann ebenso wie das Antineutrino für den Strahlenschutz vollkommen außer Acht gelassen werden, weil es ebenfalls mit der Materie (*menschliches Gewebe*) praktisch nicht wechselwirkt.

Die Anzahl der Nukleonen im Kern (*Massenzahl*) wird beim  $\beta^+$ -Zerfall nicht verändert, wohl aber die Kernladungszahl. Sie ist durch die Anzahl der Protonen gegeben und nimmt durch den Zerfall um eins ab, die Neutronenanzahl erhöht sich allerdings um eins.

**1.2.4 Elektroneneinfang**

$\alpha$ -,  $\beta^-$ - und  $\beta^+$ -Zerfälle sind Prozesse, die ausschließlich im Kern ablaufen und an denen die Elektronenhülle nicht beteiligt ist. Dies ist beim Elektroneneinfang (*K-Einfang oder  $\epsilon$ -Zerfall*) nicht so. Der Elektroneneinfang ist ein zur  $\beta^+$ -Umwandlung konkurrierender Prozess, der bevorzugt bei großen, schweren Kernen stattfindet und in zwei Stufen abläuft:

- 1.) Es wird ein kernnahes Elektron (*zumeist aus der K-Schale*) durch den Kern absorbiert. Eines der Protonen vereinigt sich mit diesem Elektron zu einem Neutron und gibt ein Neutrino ab.
- 2.) Auf der K-Schale ist nun ein Platz frei. Diese Plätze auf der kernnächsten Bahn ist für die Elektronen energetisch sehr attraktiv. Deshalb rückt eines der Elektronen der äußeren Bahnen auf den freien Platz in der K-Schale nach. Dabei gibt das Elektron die Energie in Form von  $\gamma$ -Strahlung ab. Diese Strahlung ist wie Licht eine elektromagnetische Welle, aber etwa tausendmal energiereicher, sehr durchdringend und optisch nicht sichtbar.

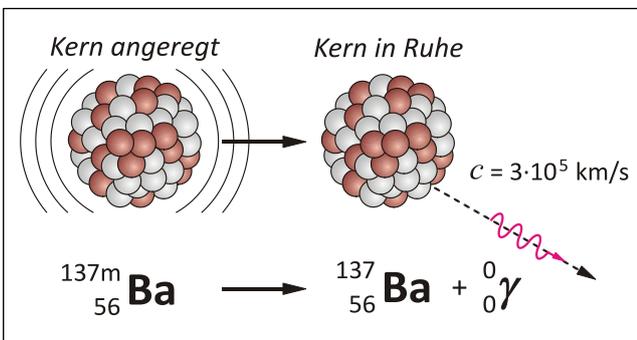


**Bild 1-7:** Beispiel für K-Einfang

Analog zu den  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen bezeichnet man die beim Elektroneneinfang freigesetzte Energieportion als „*Gammaquant*“. Es besitzt weder Ladung noch Masse.

**1.2.5  $\gamma$ -Strahlung**

Alle bisher genannten Fälle greifen in die Struktur des Kerns ein. Beim  $\alpha$ -Zerfall verlässt ein Bruchstück den Kern, bei den beiden  $\beta$ -Zerfällen wandelt sich ein Kernbaustein in einen anderen um und beim Elektroneneinfang passiert unter Mitwirkung eines Hüllenelektrons genau das Gleiche.



**Bild 1-7:** Beispiel für  $\gamma$ -Strahlung

Alle diese Zerfälle laufen ab, weil der Endzustand für den Kern energetisch günstiger ist als der Anfangszustand. Das bedeutet aber nicht, dass durch den Zerfall immer sofort dieser stabile Endzustand erreicht wird. Man betrachtet beispielsweise den  $\alpha$ -Zerfall, bei dem ein Fragment ( $\alpha$ -Teilchen) aus dem Kern entfernt wird. (*Dieser Kern ähnelt dann einem Haufen Kohle, aus dem vier Briketts entnommen wurden. In der Regel wird danach ein Teil des verbleibenden Haufens nachrutschen, bis die Anordnung des Haufens wieder energetisch günstig*

*ist. Beim Nachrutschen wird Energie (in Form von Schall) frei.*) Auch der Kern ist nach verschiedenen Zerfällen im Regelfall nicht im energetischen Grundzustand. Seine Bausteine müssen sich nach dem Zerfall neu anordnen. Dabei geben sie Energie in Form von  $\gamma$ -Strahlung ab.

Das  $\gamma$ -Photon hat wie alle Photonen eine Ladungs- und Massenzahl von Null. Anders als im Fall des Elektroneneinfangs stammt diesmal die Energie nicht aus der Elektronenhülle, sondern aus dem Kern.

**1.2.6 Neutronen-Strahlung durch spontane Spaltung**

Für einige Kerne kann es energetisch günstig sein, einen Teil ihrer selbst abzustößen. Am Beispiel des  $\alpha$ -Zerfalls ist das Ergebnis ein  $\alpha$ -Teilchen und der viel größere Restkern.

Fast der gleiche Prozess findet bei der Spontanen Spaltung statt. Allerdings gibt es hier mehrere Bruchstücke. Neben den zwei Kernfragmenten werden ein oder mehrere Neutronen aus dem Ursprungskern freigesetzt.

Das Neutron hat die Massenzahl 1 und die Ladungszahl 0.

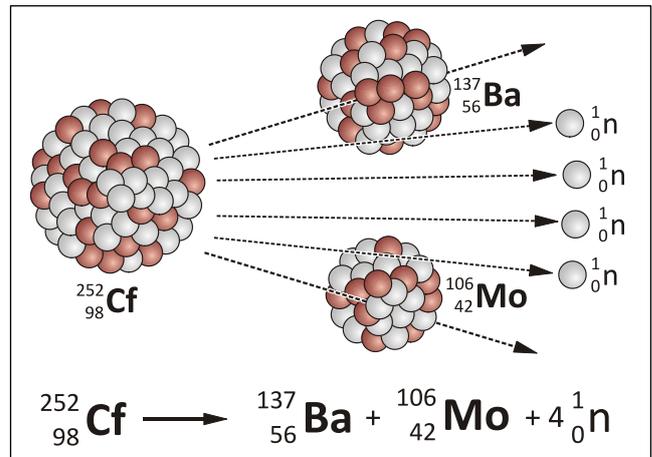


Bild 1-9: Beispiel für spontane Spaltung

**1.3 Radioaktivität**

Die physikalische Messgröße für die Radioaktivität einer Substanz ist die **Aktivität A**. Ihre Maßeinheit ist das Becquerel (Bq). Ein Becquerel bedeutet, dass sich im zeitlichen Mittel pro Sekunde in dieser radioaktiven Substanz 1 Atomkern umwandelt. Die Definition der Maßeinheit Bq lautet also:

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

$$1 \text{ Umwandlung pro s}$$

Zu der früher üblichen (*allerdings nicht SI-gerechten*) Maßeinheit Curie (Ci) besteht die Umrechnungsbeziehung:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq.}$$

Das Becquerel ist eine sehr kleine Maßeinheit. Kontrollpräparate für Strahlenmessgeräte haben eine Aktivität in der Größenordnung von einigen 10 oder 100kBq. Die Aktivitäten der in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung verwendeten Quellen betragen ca. 100 bis 1500 GBq. In der nuklearmedizinischen Diagnostik wird vorzugsweise mit Aktivitäten im MBq-Bereich umgegangen.

Die instabilen Atomkerne wandeln sich nach und nach in stabile um, so dass die Aktivität einer radioaktiven Substanz im Laufe der Zeit abnimmt. Die Abnahme der Aktivität wird durch die Gleichung

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \tag{1.1}$$

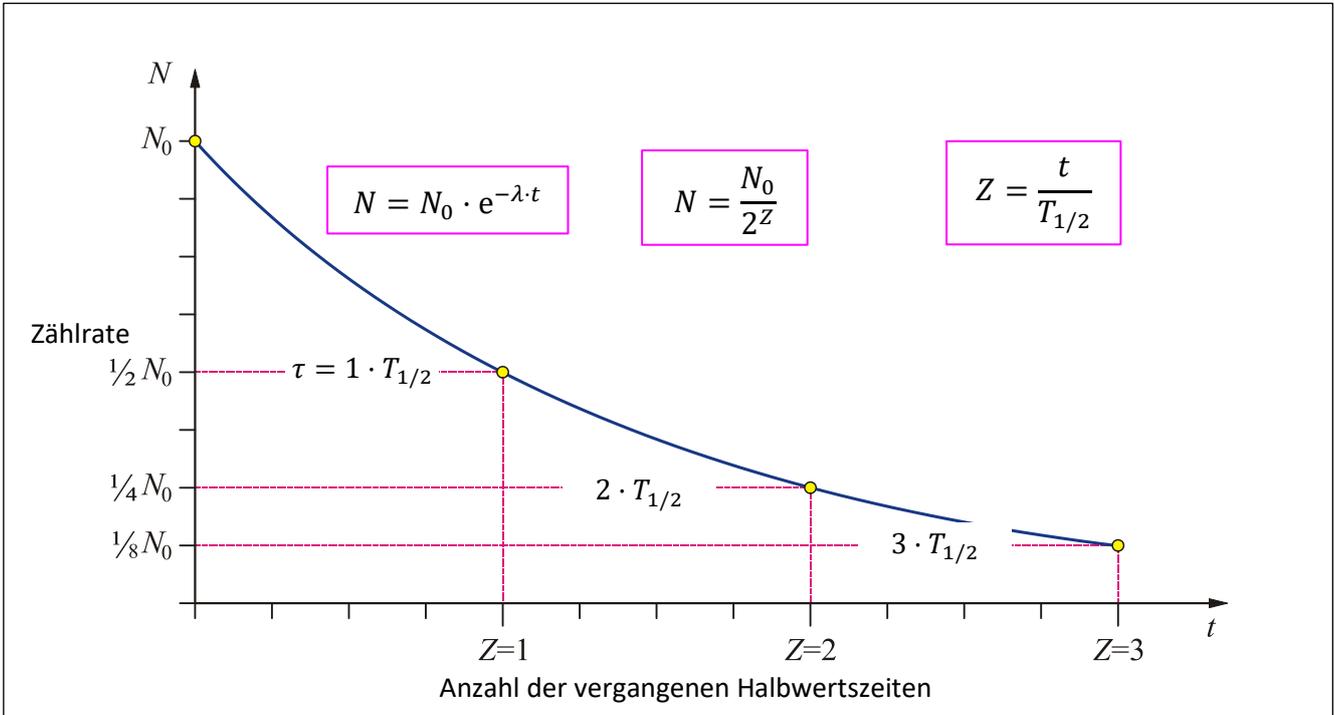
beschrieben. Dabei ist  $A_0$  die Anfangsaktivität,  $A$  die Aktivität nach Ablauf einer Zeit  $t$  und  $\lambda$  der Zerfallskonstante. Letztere gibt den sich umwandelnden Bruchteil der vorhandenen Atomkerne pro Zeiteinheit an. Die Abnahme der Aktivität kann sehr anschaulich durch die **Halbwertszeit**  $\tau$  oder  $T_{1/2}$  beschrieben werden. Es ist die Zeitspanne, die verstreichen muss, bis sich die Hälfte der ehemals vorhandenen instabilen Atomkerne umgewandelt hat. Die Aktivität sinkt also nach Ablauf einer Halbwertszeit auf die Hälfte, nach zwei Halbwertszeiten auf ein Viertel, nach drei Halbwertszeiten auf ein Achtel usw. Die Zerfallskonstante  $\lambda$  und die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  sind durch die folgende Beziehung verknüpft.

$$T_{1/2} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln 2 \tag{1.2}$$

Für die Kernanzahl  $N$  kann die Beziehung der Aktivität  $A$  nach Gleichung (1) analog übertragen werden. So gilt:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \tag{1.3}$$

Dabei ist  $N_0$  die Kernanzahl zum Zeitpunkt  $t=0$ ,  $N$  die Kernanzahl nach Ablauf der Zeit  $t$  und  $\lambda$  die Zerfallskonstante.



**Bild 1-10:** typischer Verlauf der Zerfallskurve

Dieser Zusammenhang beschreibt wie viele Kerne zu jeder Zeit vorhanden sind, aber noch nicht, wie groß die Aktivität jeweils sein wird. Diese Größe ist für den Strahlenschutz die wichtigere. Die Zerfallskonstante  $\lambda$  kann als Proportionalitätsfaktor zwischen der Aktivität  $A$  und der Kernanzahl  $N$  betrachtet werden. So gilt:

$$A = \lambda \cdot N \tag{1.4}$$

Bei der Umwandlung der Atomkerne wird Energie frei, die meist in Form **ionisierender Strahlen** abgegeben wird. Nuklide, die Strahlen aussenden, heißen Radionuklide. Die Halbwertszeiten sind abhängig vom Radionuklid. Sie können mehrere Milliarden Jahre oder auch nur Sekundenbruchteile betragen. Die folgende Tabelle zeigt einige Beispiele

<i>Radionuklid</i>	Ra-226	Am-241	Cs-137	Sr-90	I-131	C-11	Ba-137m
<i>Halbwertszeit</i>	1602 a	432,6 a	30,2 a	28 a	8 d	20 min	2,55 min

**Tabelle 1:** Auswahl einiger radioaktiver Elemente mit ihrer Halbwertszeit

### 1.4 Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie

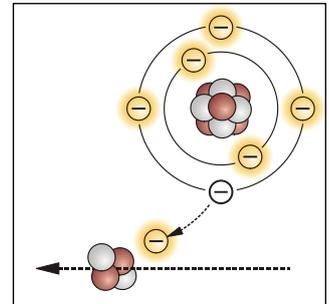
#### 1.4.1 Wechselwirkung geladener Strahlungsteilchen mit Materie

Zu den geladenen Strahlungsteilchen gehören  $\alpha$ - ,  $\beta^-$ - und  $\beta^+$ -Teichen. Da sie ein elektrisches Feld besitzen, kann es zu anziehenden oder abstoßenden Kräften auf andere Ladungen kommen.

##### a) Wechselwirkung des $\alpha$ -Teilchens mit Materie

Ein  $\alpha$ -Teilchen ist auf Grund seines Aufbaus zweifach positiv geladen. Passt dieses Teilchen ein Atom (*weiter entfernt als die äußeren Elektronen des Zielatoms*), wird eine starke Anziehungskraft auf die Hüllenelektronen ausgeübt. Ist diese stärker als die Bindungskraft eines Elektrons an seinen Kern, wird das Elektron vom Zielatom gelöst und folgt dem  $\alpha$ -Teilchen (siehe **Bild 1-11**).

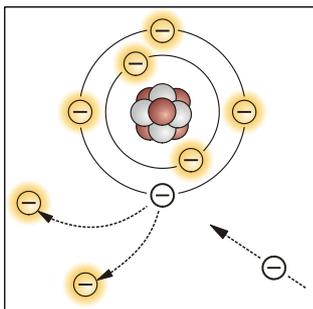
Das Entfernen eines oder mehrerer Elektronen aus der Atomhülle heißt „*Ionisation*“, das zurückbleibende Restatom wird nun als „*Ion*“ bezeichnet.



**Bild 1-11:** herauslösen des Außenelektrons

##### b) Wechselwirkung des $\beta^-$ -Teilchens mit Materie

Ein  $\beta^-$ -Teilchen ist negativ geladen (*im Raum frei bewegtes Elektron*). Da gleiche Polarität vorliegt, ist es in der Lage, auf die Hüllenelektronen eines Atoms eine abstoßende Kraft auszuüben (siehe **Bild 1-12**). Da beide Elektronen im herkömmlichen Sinn sich nicht berühren können, wird es dennoch zu Wechselwirkungen (*Stöße*) beim Vorbeifliegen kommen.



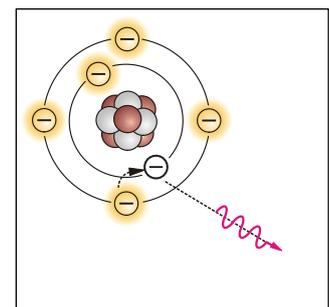
**Bild 1-12:** herauslösen des Außenelektrons

Das Ergebnis ist eine Ionisation des Zielatoms (*wie beim  $\alpha$ -Teilchen*). Diesmal allerdings nicht durch das „*Wegschleppen*“ eines Hüllenelektrons, sondern durch dessen Stoß mit dem  $\beta^-$ -Teilchen.

Die inneren Hüllenelektronen sind erheblich stärker an den Kern gebunden und lassen sich nur schwerer herauslösen. Daher muss sich die Geschwindigkeit der anfliegenden  $\beta^-$ -Teilchen vergrößern, um eine Ionisation des Zielatoms zu bewirken (**Bild 1-13**).

Auf der inneren Schale ist nun der Platz des herausgelösten Elektrons frei und das Außenelektron wird „*energetisch Nachrutschen*“. Dabei wird die Energie in Form einer elektromagnetischen Welle abgegeben, die als „*diskrete*“ oder „*charakteristische Röntgenstrahlung*“ bezeichnet wird.

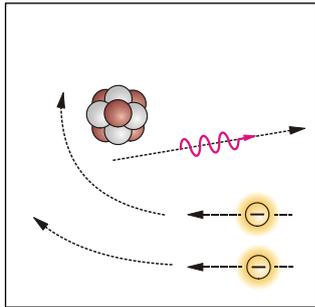
Physikalisch ist die Röntgenstrahlung der  $\gamma$ -Strahlung sehr ähnlich. Bei beiden handelt es sich um eine elektromagnetische Welle, deren Energie deutlich über dem des sichtbaren Lichtes liegt. Ein Röntgenphoton hat etwa die tausendfache, ein  $\gamma$ -Photonen die millionenfache Energie eines sichtbaren Lichtphotons.



**Bild 1-13:** energetisches Nachrutschen

Die Energien der charakteristischen Röntgenphotonen sind Energiedifferenzen, die zwischen einem Elektron auf der unteren und einem Elektron auf der nächsthöheren Schale auftreten (*auf der innersten Schalen am höchsten*). Diese Energiedifferenzen können nach außen hin so klein werden, dass die bei Elektronenübergängen beteiligten Photonen oftmals im sichtbaren Bereich liegen.

Einfliegende Elektronen wechselwirken nicht nur mit der Atomhülle, sondern auch mit dem Kern. Durch die Lage und die Anzahl der Protonen weist der Atomkern ein starkes elektrisches Feld auf.



**Bild 1-14:** Ablenkung von beschleunigten Elektronen

Dadurch werden Anziehungskräfte nicht nur auf die gebundenen, sondern auch auf die einfliegenden Elektronen ausgeübt. Diese werden in jedem Fall beschleunigt, wobei dies im physikalischen Sinn sowohl eine Abbremsung als auch eine Ablenkung bzw. die Kombination aus beiden umfasst.

Beschleunigte Ladungen strahlen elektromagnetische Wellen ab. Das gilt nicht nur für Elektronen, die sich im metallischen Leiter bewegen, sondern auch für  $\beta$ -Teilchen, die im Kernfeld ausgelenkt wurden. Auch hier wird eine elektromagnetische Welle erzeugt, die als sogenannte „kontinuierliche Röntgenstrahlung“ oder „Bremsstrahlung“ in Erscheinung tritt. Je dichter das Elektron den Kern passiert, umso stärker wird es abgebremst. (siehe **Bild 1-14**). Die stärkste Ablenkung und die höchste Energieabgabe werden bei sehr kleinen Distanzen erreicht. Diese Energiedifferenz steckt jetzt im Röntgenphoton. Ist hingegen die Distanz relativ groß, wird das Elektron nur schwach abgelenkt. Somit ist die Energieabgabe auch sehr schwach. Das erzeugte Photon kann auch so energiearm sein, dass es sich hier nicht mehr um Röntgenstrahlung handelt, sondern um UV-Strahlung, sichtbares Licht oder Infrarot-Strahlung. Die Erzeugung von Bremsstrahlung wird in Röntgenröhren technisch angewendet (*medizinische Diagnostik oder Werkstoffprüfung*). Außerdem tritt die Bremsstrahlung in mehreren Anwendungen als Ursache von „Störstrahlung“ in Erscheinung. Zum Beispiel bei Elektronenstrahlröhren (*Bildröhren*) müssen Elektronen beschleunigt werden. Beim anschließenden Abbremsen tritt nebenbei Röntgenstrahlung auf.

Ist hingegen die Distanz relativ groß, wird das Elektron nur schwach abgelenkt. Somit ist die Energieabgabe auch sehr schwach. Das erzeugte Photon kann auch so energiearm sein, dass es sich hier nicht mehr um Röntgenstrahlung handelt, sondern um UV-Strahlung, sichtbares Licht oder Infrarot-Strahlung. Die Erzeugung von Bremsstrahlung wird in Röntgenröhren technisch angewendet (*medizinische Diagnostik oder Werkstoffprüfung*). Außerdem tritt die Bremsstrahlung in mehreren Anwendungen als Ursache von „Störstrahlung“ in Erscheinung. Zum Beispiel bei Elektronenstrahlröhren (*Bildröhren*) müssen Elektronen beschleunigt werden. Beim anschließenden Abbremsen tritt nebenbei Röntgenstrahlung auf.

**c) Wechselwirkung des  $\beta^+$ -Teilchens mit Materie**

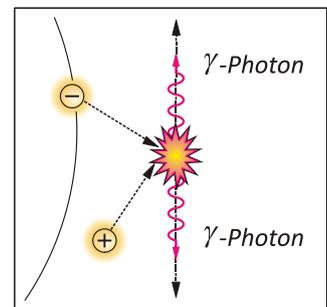
Das  $\beta^+$ -Teilchen (*Positron*) unterscheidet sich in der Art seiner Wechselwirkung mit Materie gänzlich von allen anderen Strahlungsteilchen. Ursache dafür ist, dass das Positron keine normale Materie, sondern Antimaterie ist.

Das Positron wird mit dem ersten Elektron, auf das es trifft (*ein Hüllenelektron eines Nachbaratoms*) sehr heftig wechselwirken. Beide Teilchen vernichten sich gegenseitig (siehe **Bild 1-15**).

Hierbei werden zwei Gammaphotonen erzeugt, deren Energie durch die Einsteinsche Beziehung zwischen Masse und Energie festgelegt ist. Beide Photonen haben jeweils die Energie

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

wobei  $m$  die Masse des Elektrons ist.



**Bild 1-15:** Paarvernichtung

**1.4.2 Wechselwirkung ungeladener Strahlungsteilchen mit Materie**

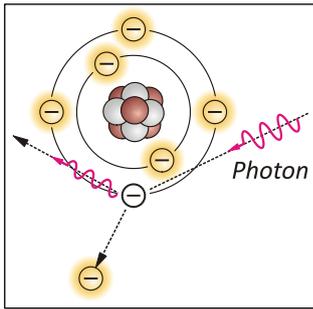
**a) Wechselwirkung von Photonen mit Materie**

Photonen können durch folgende drei Vorgänge entstehen:

- bei  $\gamma$ -Emission des Kerns im Nachgang eines  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfalls
- als charakteristische Röntgenstrahlung beim „energetischen Nachrutschen“ von Hüllenelektronen auf eine innere Schale
- als Bremsstrahlung bei der Wechselwirkung von schnellen Elektronen mit dem Kernpotenzial

Diese werden als ladungs- bzw. masselose Partikel aufgefasst. Die Energie dieser Photonen ist ausreichend, um einzelne Hüllenelektronen herauszulösen, also das Zielatom zu ionisieren. Dadurch findet auch keine Wechselwirkung mittels elektromagnetischer Kraft mit den Zielatomen statt.

**Comptoneffekt**



**Bild 1-16:** Compton-effekt

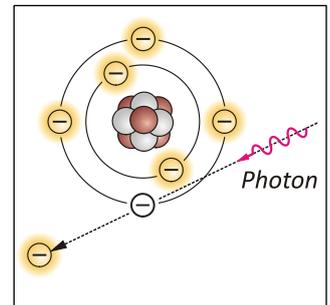
Beim Comptoneffekt (*Arthur Compton, Nobelpreis 1927*) findet ein Stoß zwischen dem einfallenden Photon und einem Hüllenelektron statt. Dabei gibt das Photon einen Teil seiner Energie an das Hüllenelektron ab, so dass das Zielatom ionisiert wird (*siehe Bild 1-16*).

Das nun energieärmere Photon setzt seinen Weg mit gleichbleibender Geschwindigkeit und veränderter Richtung fort.

Photonen unterschiedlicher Energie unterscheiden sich nicht in ihrer Geschwindigkeit (*bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit*), sondern in ihrer Wellenlänge. Im Falle des sichtbaren Lichtes sind blaue Photonen energiereicher als rote Photonen.

**Photoeffekt**

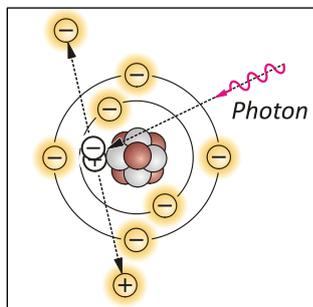
Der Photoeffekt (*Albert Einstein, Nobelpreis 1921*) ist ein Sonderfall des Comptoneffektes. Dieser Effekt liegt vor, wenn das Photon seine Energie komplett an das Hüllenelektron abgibt (*siehe Bild 1-17*). Das Photon hört in diesem Moment auf zu existieren. Es bleibt nur das Hüllenelektron übrig, welches infolge der Bewegungsenergie, die es beim Stoß erhielt, den Atomkern ohne Schwierigkeiten verlassen kann. Das Zielatom ist nun ebenfalls ein Ion.



**Bild 1-17:** Photoeffekt

**Paarbildung**

Der Paarbildungseffekt stellt den Umkehrprozess der Paarvernichtung dar. Er kann stattfinden, wenn ein Photon den Kern des Zielatoms in nur geringer Entfernung passiert. Das Photon ist ein durch den Raum bewegtes elektromagnetisches Feld, welches selbst weder Masse noch Ladung trägt.



**Bild 1-18:** Paarbildung

Fliegt ein Photon mit genügender Energie dicht am Kern vorbei, so entstehen zwei elektrische Felder, die mit einander Wechselwirken können. Diese Wechselwirkungen führen dazu, dass das Photon verschwindet. An dessen Stelle entstehen zwei Teilchen, ein Elektron und ein Positron, die sich in entgegengesetzter Richtung davonbewegen. Diese zwei Teilchen erzeugen dann jeweils eine Elektronenmasse.

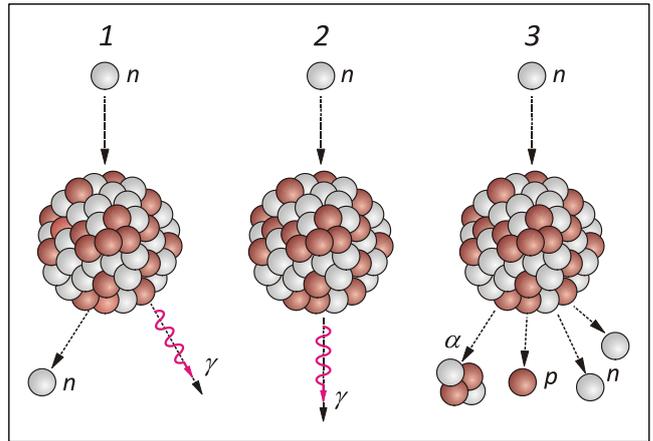
**b) Wechselwirkung von Neutronen mit Materie**

Bei den bisher betrachteten Prozessen war die Elektronenhülle der hauptsächliche Wechselwirkungspartner der unterschiedlichen Strahlungen. Die Wechselwirkung von Neutronen mit Materie erfolgt jedoch in erster Linie durch Kollisionen mit Atomkernen. Die Wahrscheinlichkeit für eine Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen ist äußerst gering.

Beim Aufprall eines Neutrons auf den Kern wird das Neutron zu einem Teil des Kerns und überträgt dabei die mitgeführte Bewegungsenergie. Der Kern ist jetzt im angeregten Zustand. Es werden dabei drei Fälle unterschieden.

**Fall 1: Neutronenstoß**

Der angeregte Kern kehrt in den energiearmen Grundzustand zurück. Dazu wird neben einem Gammaphoton genau ein Neutron abgegeben. Dieses Neutron ist energieärmer (*also langsamer*) als das zuvor vom Kern aufgenommene Neutron und besitzt auch dabei eine andere Flugrichtung. Die Bestandteile des Kerns bleiben unverändert. Stabile Kerne bleiben stabil, aktive bleiben aktiv.



**Bild 1-19:** Drei Fälle von Wechselwirkungen von Neutronen mit Materie

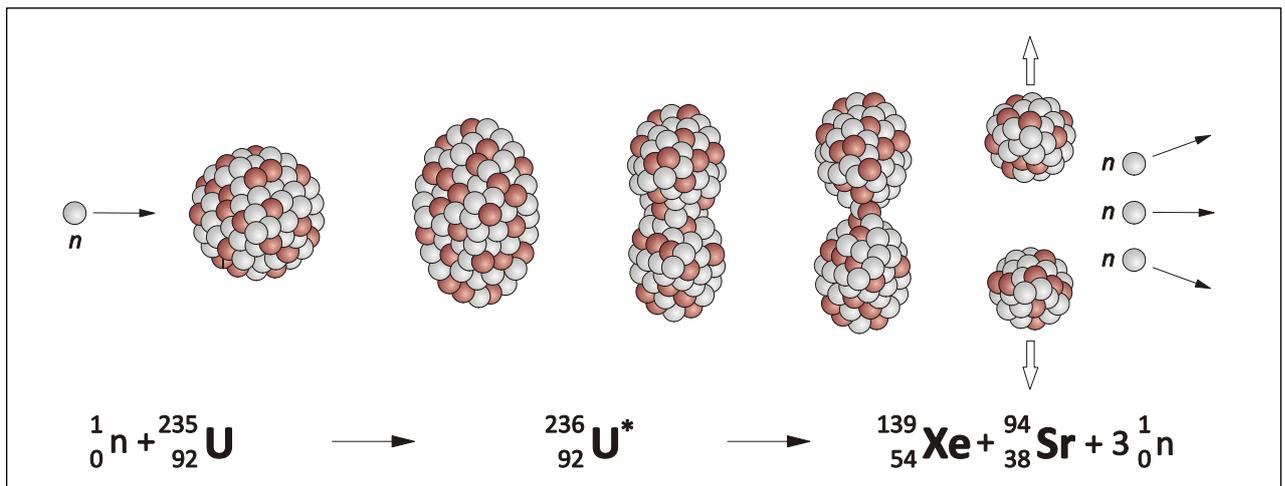
**Fall 2: Neutroneneinfang**

Der angeregte Zustand des Kerns wird durch die ausschließliche Aussendung eines  $\gamma$ -Photons aufgehoben. Das Neutron verbleibt im Kern. Die Massenzahl des Kerns erhöht sich damit. Der Kern gehört zwar noch zum gleichen Element, ist aber ein anderes Isotop. Durch einen Neutroneneinfang kann selbst ein stabiler Kern radioaktiv werden.

**Fall 3: Austauschreaktion**

Der Kern kann durch die Neutronenanregung Protonen oder Neutronen abgeben. Sowohl der Neutronenstoß als auch die Austauschreaktion sind Vorgänge, bei denen die Bruchstücke, die den Kern verlassen im Vergleich zu ihm sehr klein sind.

Ein Sonderfall der Austauschreaktion ist die **Kernspaltung**. In dessen Verlauf teilt das aufgenommene Neutron den Kern in zwei ungefähr gleich große Bruchstücke und setzt eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen frei. Dadurch kann eine Kettenreaktion ausgelöst werden, die ohne weitere Maßnahmen zu einer schlagartigen Energiefreisetzung führt. Ist dies nicht erwünscht, müssen die entstehenden Neutronen absorbiert werden. Zum Beispiel in einem Kernreaktor erfüllen Steuerstäbe als Neutronenabsorber diese Funktion.



**Bild 1-20:** Kernspaltung von Uran-235

	$\alpha$ -Strahlung	$\beta$ -Strahlung	$\gamma$ -Strahlung	Röntgenstrahlung	Neutronenstrahlung
<i>Teilchenart</i>	He-Kern	Elektronen, Positronen	Photonen	Photonen	Neutronen
<i>Quellen</i>	<i>Radionuklide:</i> Pu-239, Ra-226, Rn-222, Am-241, Po-210, U-235	<i>Radionuklide:</i> H-3, C-14, Sr-90, Cs-137, Tl-204, Co-60 I-131	<i>Radionuklide:</i> Am-241, Co-60, I131, Tc-99m, Ba-133, Ba-137m, Cs-137	Röntgenröhre	- Kernspaltung ( <i>Reaktor</i> ) - Spontanspaltung (Cf-252) - Neutronenquellen (AmBe)
<i>Größenordnung der Energie</i>	einige MeV	keV ... MeV	keV ... MeV	um 100 keV ( <i>med. Anwendungen</i> )	$\mu$ eV ... GeV
<i>Energieverteilung</i>	diskret	kontinuierlich	diskret	kontinuierlich und diskret	kontinuierlich oder diskret
<i>Wechselwirkungen</i>	- Ionisation - Anregung	- Ionisation - Anregung - Photonenstrahlung	- Streuung - Comptoneffekt - Photoeffekt - Paarbildung	- Streuung - Comptoneffekt - Photoeffekt - Paarbildung	- Streuung - Kernreaktion - Kernspaltung
<i>Reichweite</i>	für $E=5$ MeV - in Luft: 3,5 cm - in Wasser: 40 $\mu$ m	für $E=1$ MeV - in Luft: 4 m - in Wasser: 5 mm	theoretisch unbegrenzt	theoretisch unbegrenzt	nicht definiert
<i>Halbwertschicht</i>	für Strahlenschutz bedeutungslos	für $E=1$ MeV - Luft: 0,5 mm - Al: 0,2 mm	für $E=1$ MeV - Luft: 85 m - Wasser: 10 cm - Blei: 1 cm	für $E=100$ keV Filterung 3 mm Al: - Wasser: 10 cm - Blei: 0,06 cm	Zehntelwertsschicht für $E=4$ MeV - Paraffin: 20 cm - Beton: 40 cm
<i>Gefährdung</i>	- von außen: vernachlässigbar  - von innen: bei Inkorporation	- von außen: Hautexposition  - von innen: bei Inkorporation	- von außen: Ganz- oder Teilkörperexposition  - von innen: bei Inkorporation	- von außen: Ganz- oder Teilkörperexposition  - von innen: keine Inkorporation möglich	- von außen: Ganz- oder Teilkörperexposition  - von innen: bei Inkorporation
<i>Schutzmaßnahmen</i>	bei Strahlung von außen 10 cm Abstand nicht unterschreiten  Inkorporation vermeiden	bei Strahlung von außen Abschirmung mit Stoffen niedriger Ordnungszahl (1...2 cm Al, PVC)  Inkorporation vermeiden	bei Strahlung von außen Abschirmung mit Stoffen hoher Dichte und hoher Ordnungszahl ( <i>einige cm Pb; Fe einige dm Beton</i> )  Inkorporation vermeiden	Abschirmung mit Stoffen hoher Dichte und hoher Ordnungszahl ( <i>bei Energien um 100 keV Pb-Gummi, Pb-Glas mit ca. 1 mm Pb-Gleichwert</i> )	bei Strahlung von außen Abschirmung mit wasserstoffhaltigen Stoffen, zusätzlich Abschirmung der $\gamma$ -Strahlung  Inkorporation vermeiden

**Tabelle 1-1:** Eigenschaften ionisierender Strahlung

## 2. Dosisgrößen und Dosiseinheiten

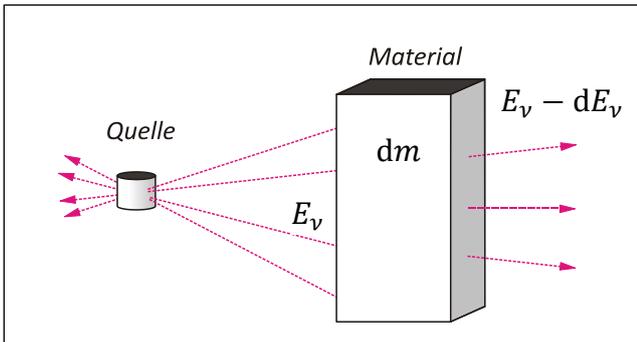
### 2.1 Energiedosis

Die Einwirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper wird als Strahlenexposition bezeichnet.

Die ionisierende Strahlung trägt Energie mit sich. Im Falle der Teilchenstrahlung ist es die Bewegungsenergie des jeweiligen Strahlungsteilchens ( $\alpha$ -,  $\beta^-$ -Teilchen u. a.) im Falle der Photonenstrahlung (z.B. Röntgen-,  $\gamma$ -Strahlung) steckt sie im elektromagnetischen Feld des Strahlungsquants.

Die **Energiedosis  $D$**  ist eine fundamentale Dosisgröße und ist für alle Strahlenarten und alle Stoffe definiert.

Die von einer Strahlenquelle ausgehende Strahlungsenergie  $E_v$  trifft auf ein Massenelement  $dm$ , wobei der Anteil  $dE_v$  absorbiert wird.



$$D = \frac{dE_v}{dm} \tag{2.1}$$

Die Einheit der Energiedosis im SI ist das „Gray“.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

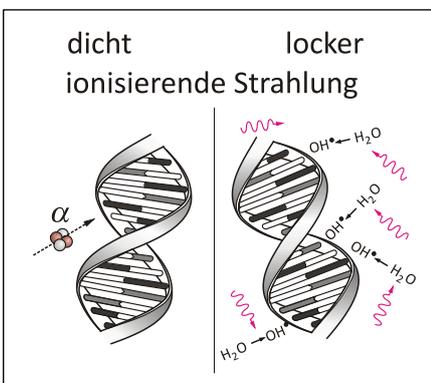
In der Praxis werden vorwiegend die Einheiten mGy bzw.  $\mu\text{Gy}$  verwendet.

**Bild 2-1:** Wirkprinzip

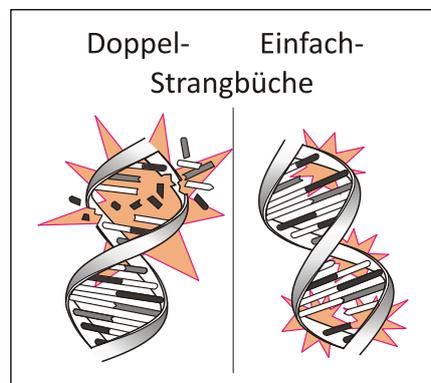
Die Energiedosis  $D$  ist eine Punktgröße. In jedem Punkt eines Strahlenfeldes kann es einen anderen Wert für die Energiedosis geben. Zur Bestimmung der Energiedosis ist es jedoch erforderlich, die absorbierte Energie pro Massenelement zu ermitteln. Das Massenelement  $dm$  muss so groß gewählt werden, dass sich die statistischen Prozesse in  $dm$  ausmitteln. Wie bereits erwähnt ist die Energiedosis für jeden beliebigen Stoff definiert. Wichtige Bezugssubstanzen sind jedoch Luft, Wasser und weiches Gewebe. Die Energiedosis ist eine integrierende Größe, die also mit zunehmender Zeit anwächst.

### 2.2 Organdosis

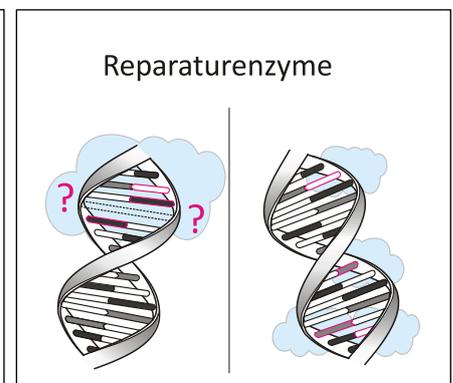
Die Energiedosis allein ist für eine adäquate Beschreibung der Strahlenexposition eines lebendigen Systems nicht ausreichend. Hierbei müssen vor allem die unterschiedlichen Strahlungsarten (*dicht- oder lockerionisierend*) gemäß ihrer biologischen Wirksamkeit unterschiedlich gewichtet werden.



**Bild2-2a:** Einwirkung unterschiedlicher Strahlungsarten



**Bild2-2b:** Folgen auf die Erbinformation



**Bild2-2c:** Reparaturmechanismen

Dicht- bzw. lockerionisierende Strahlungsarten haben unterschiedliche Auswirkungen auf die DNA-Stränge im Zellkern einer Zelle und somit auch auf die Erbinformation. Zu den dichtionisierenden Strahlungsarten gehören z.B.  $\alpha$ -Teilchen ( $E=(2...8)\text{MeV}$ ), zu den lockerionisierenden Strahlungsarten z. B. die Röntgenstrahlung ( $E=(1...200)\text{keV}$ ).

Während die dichtionisierende Strahlung Einfach-bzw. Doppelstrangbrüche in der DNA verursachen, spaltet die lockerionisierende Strahlung Wassermoleküle auf ( $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{OH}^+ + \text{H}_2$ ) und diese wiederum verursachen durch biochemische Bindungen mit den Basenpaaren Einzelstrangbrüche.

In einem gesunden Immunsystem werden diese Einzelstrangbrüche durch Enzyme repariert, in dem die fehlende DNA-Stelle durch die entsprechenden Basenbausteine (**A**denin und **T**hymine sowie **G**uanin und **C**ytosin A–T; T–A; G–C; C–G) rekonstruiert werden.

Treten Einzelstrangbrüche während der Zellteilungsphase (*Mitose*) z. B. durch länger anhaltende Strahlungseinwirkung auf, führt das zwangsläufig zum Doppelstrangbruch. Eine Reparatur ist dann nicht mehr möglich. Doppelstrangbrüche führen besten falls zum Zelltod (*Apoptose*). Im schlimmsten Fall kann dies Krebs hervorrufen.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Strahlungsarten werden **Strahlungswichtungsfaktoren**  $w_R$  eingesetzt. Sie hängen von der Strahlungsart (*in manchen Fällen auch von der Energie*) ab und sind ein Maß für die relative Wirksamkeit der verschiedenen Quellen auf das biologische Gewebe. Je höher  $w_R$  für eine Strahlungsart ist, umso höher ist die biologische Wirksamkeit dieser Strahlungsart.

Werden  $w_R$  für zwei Strahlungsarten verglichen, so erhält man die relative Schadenswirkung, die beide Strahlungsarten auslösen werden, wenn sie dabei die gleiche Energiedosis liefern. (*Eine bestimmte, feste Energiedosis durch  $\alpha$ -Strahlung wird beispielsweise auf ein Zielorgan die zwanzigfache biologische Wirkung ausüben wie die gleiche Energiedosis durch die  $\gamma$ -Strahlung. Somit ist auch der Strahlungswichtungsfaktor für die  $\alpha$ -Strahlung zwanzigmal höher anzusetzen als der der  $\gamma$ -Strahlung.*)

Die **Organdosis**  $H_{T,R}$  ist das Produkt aus der Energiedosis  $D$  und dem Strahlungswichtungsfaktor  $w_R$ . Sie dient dazu, die Wirkung einer Strahlenquelle auf ein Gewebe bewerten zu können (*Die Indizes  $T$  und  $R$  stehen für  $T$ issue=Gewebe und  $R$ adiation = Strahlungsart*).

Strahlungsarten und Energiebereich		$w_R$
Photonen ( $\gamma$ , Röntgen)	alle Energien	1
Elektronen ( $\beta^-$ , $\beta^+$ ) und Myonen	alle Energien	1
Neutronen	< 10 keV	5
	10 keV ... 100 keV	10
	> 100 keV ... 2 MeV	20
	> 2 MeV ... 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Photonen, außer Rückstoßphotonen	> 2 MeV	5
$\alpha$ - Teilchen, Spaltfragmente, schwere Kern		20

**Tabelle 2-1:** Strahlungswichtungsfaktoren

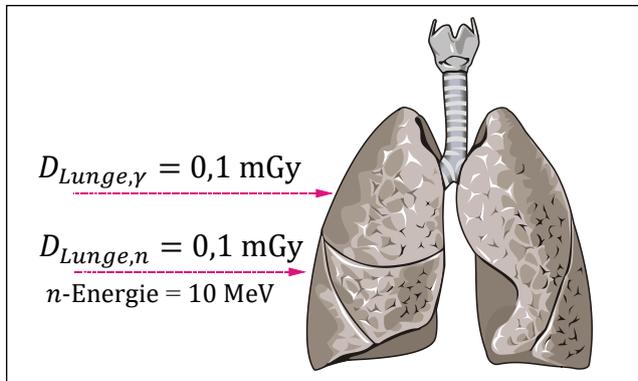
$$H_{T,R} = D_{T,R} \cdot w_R$$

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1} \tag{2.2}$$

Die Organdosis wird in der seit 1981 in Deutschland gültigen Einheit Sv „Sievert“ gemessen. Im Strahlenschutz werden die Einheiten mSv bzw.  $\mu\text{Sv}$  häufig verwendet.

**Beispielrechnung einer Organdosis**

Ein Organ (*Lunge*) ist zweier Strahlenquellen ( $\gamma$ - und Neutronenquelle) ausgesetzt worden. Die Energiedosis beträgt 0,1 mGy. Die Energie der Neutronenquelle ist 10 MeV, die der  $\gamma$ -Strahlenquelle ist beliebig.



Um die Organdosis zu bestimmen, werden die einzelnen Teilorgandosen berechnet:

- durch die  $\gamma$ -Strahlenquelle:  

$$H_{Lunge,\gamma} = D_{Lunge,\gamma} \cdot w_\gamma$$

$$= 0,1 \text{ mGy} \cdot 1 = \underline{0,1 \text{ mSv}}$$

- durch die Neutronenquelle:  

$$H_{Lunge,n} = D_{Lunge,n} \cdot w_n$$

$$= 0,1 \text{ mGy} \cdot 10 = \underline{1,0 \text{ mSv}}$$

Die Gesamtorgandosis (*Lunge*) beträgt also:

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

$$H_{Lunge} = \underline{1,1 \text{ mSv}}$$

**2.3 Effektive Dosis**

Als Strahlenexposition bezeichnet man die Einwirkung von Strahlung auf den menschlichen Körper. Dabei wird zwischen innerer und äußerer Strahlenexposition unterschieden, welche sich auf die Art der Schutzmaßnahmen auswirken kann. Im Fall einer äußeren Exposition kann die Person ihren Abstand zur Strahlenquelle erhöhen bzw. eine Abschirmung zwischen sich und der Strahlenquelle bringen. Während bei einer inneren Exposition (z.B. bei *Inhalation von radioaktivem Staub*) beides unmöglich ist.

Der Unterschied zwischen Ganz- und Teilkörperexposition wird bedeutsam, sobald sich mehrere Organe im Strahlengang befinden. Da verschiedene Organe unterschiedliche Strahlungsempfindlichkeiten aufweisen, wird auch eine bestimmte Organdosis unterschiedliche Auswirkungen haben. Aus diesem Grund wurde analog zum Strahlungswichtungsfaktor  $w_R$  der **Gewebewichtungsfaktor**  $w_T$  eingeführt.

Gewebe oder Organe	$w_T$
1. Gonaden	0,20
2. Knochenmark (rot), Dickdarm, Lunge, Magen	je 0,12
3. Blase, Brust, Leber, Speiseröhre, Schilddrüse	je 0,05
4. Haut, Knochenoberfläche	je 0,01
5. andere Organe	0,05
Gesamtkörper	1,00

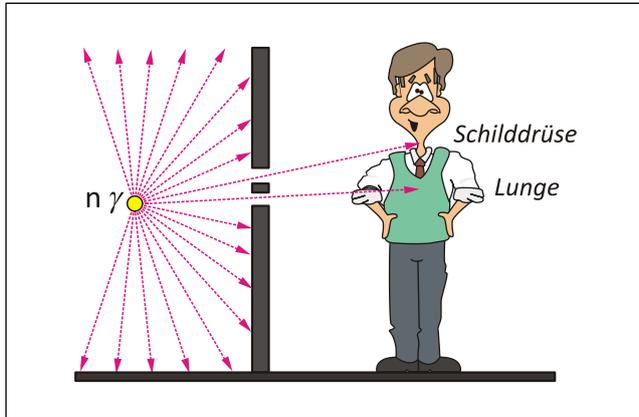
**Tabelle 2-2:** Gewebewichtungsfaktoren

Die **effektive Dosis**  $E$  ist die Summe der gewichteten Organdosen des Körpers  $H_T$  durch äußere oder innere Strahlenexposition und dem Produkt mit dem zugehörigen Gewebewichtungsfaktor  $w_T$ . Die Einheit der effektiven Dosis ist das Sievert Sv.

$$E = \sum_T H_T \cdot w_T \tag{2.3}$$

**Beispielrechnung einer effektiven Dosis**

Bezugnehmend auf das vorhergehende Beispiel werden nun zwei Organe (*Lunge und Schilddrüse*) einer Testperson zweier Strahlenquellen ( $\gamma$ - und Neutronenquelle) ausgesetzt. Die Organdosis ist bei beiden gleich und beträgt jeweils 1,1 mSv.



Um die Effektive Dosis bestimmen zu können, werden die einzelnen Teildosen für jedes bestrahlte Organ berechnet:

- Schilddrüse:  

$$E_{\text{Schilddrüse}} = H_{\text{Schilddrüse}} \cdot w_{\text{Schilddrüse}}$$

$$= 1,1 \text{ mSv} \cdot 0,05 = \underline{0,055 \text{ mSv}}$$
- Lunge:  

$$E_{\text{Lunge}} = H_{\text{Lunge}} \cdot w_{\text{Lunge}}$$

$$= 1,1 \text{ mSv} \cdot 0,12 = \underline{0,132 \text{ mSv}}$$

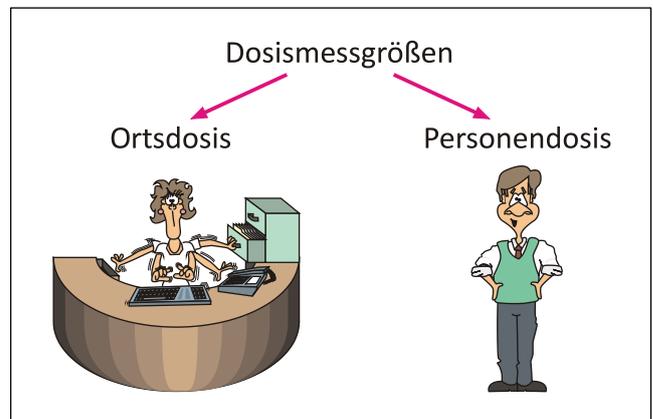
Die effektive Dosis beträgt also:  $E = 0,055 \text{ mSv} + 0,132 \text{ mSv} = \underline{0,187 \text{ mSv}} = \underline{187 \mu\text{Sv}}$

**2.4 Dosismessgrößen**

Eine exakte Berechnung von Organ- und Effektivdosis (*Körperdosis*) ist nicht möglich, da die Energiedosis in menschlichen Organen experimentell nicht ermittelt werden kann. Um die Strahlenexposition einer Person dennoch einschätzen zu können, behilft man sich mit der Bestimmung der Orts- bzw. Personendosis. Diese sind operative Größen und zählen zu den Dosismessgrößen.

Die **Ortsdosis** (*Äquivalentdosis*) wird gemessen, um einen bestimmten Ort hinsichtlich seiner Strahlung beurteilen zu können. In der Praxis werden die Messungen frei in Luft durchgeführt, obwohl der menschliche Körper das Strahlenfeld aufgrund seiner Absorptions- und Streueigenschaften beeinflusst.

Die **Personendosis** ist die an einer für die Strahlenexposition repräsentativen Stelle der Körperoberfläche gemessenen Dosis. Dies ist für die Bestimmung der effektiven Dosis in der Regel die Vorderseite des Rumpfes, für die Handdosis ein Finger einer Hand und für die Augendosis eine Stelle an der Stirn.



**Bild 2-5:** Dosismessgrößen

**2.5 Dosisleistung**

Die Dosisleistung  $\dot{H}$  ist die Zunahme der Dosis pro Zeiteinheit. Im Strahlenschutz wird oftmals die Ortsdosisleistung gemessen. Allgemein gilt:

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \tag{2.4}$$

Im Strahlenschutz werden die Einheiten mSv/h bzw.  $\mu\text{Sv/h}$  häufig verwendet.

### 3. Strahlenschäden und Strahlenrisiken

#### 3.1 Strahlenwirkung

In lebenden Zellen wird durch Ionisation und Anregung von Atomen eine Kette von Ereignissen ausgelöst, die zu Störungen der normalen Lebensfunktion der Zellen führen können (*siehe 2.2 Organdosis*). Am Anfang dieser Ereigniskette kann es zu einer Änderung der chemischen Reaktionsbereitschaft der Atome und Moleküle kommen, die zum Zerfall von Molekülen (*Radiolyse*) führen. Die entstehenden Radiolyseprodukte, vorwiegend Radikale, sind außerordentlich reaktionsfähig. Sie können sowohl untereinander als auch mit Molekülen in ihrer Umgebung reagieren und diese in Struktur und Eigenschaften verändern. Diese primären Ereignisse können sich auf alle Organe des Körpers auswirken.

Hierbei können auf **molekularer Ebene** Veränderungen (*Enzyme, Membranbestandteile und DNA*) auftreten, die wiederum zu Veränderungen der zellulären Stoffwechselprozesse führen. Dadurch können auf **zellulärer Ebene** Störungen (*Zellteilung, Veränderungen von Zellformen und -größe oder Zelltod*) verursacht werden.

Auf **Organebene** manifestieren sich solche zellulären Veränderungen als Strukturveränderungen, Funktionsstörungen und in der Entstehung bösartiger bzw. gutartiger Geschwülste.

Da radikale Radiolyseprodukte auch in normalen Stoffwechselprozessen und durch andere physikalische bzw. chemische Noxen (*u.a. durch zahlreiche Medikamente*) entstehen, können diese Ereignisketten nicht spezifisch auf Einwirkungen ionisierender Strahlung zurückgeführt werden.

Seit der Entstehung des Lebens auf der Erde hat sich jeder Organismus mit den Noxen seiner Umwelt auseinandergesetzt. Im Laufe der Evolution haben sich deshalb auf allen oben erwähnten Organisationsebenen außerordentlich effiziente Schutz- und Reparaturmechanismen entwickelt. Solche Schutz- und Reparaturmechanismen sind z.B.:

- auf **molekularer Ebene**:  
Enzyme zum Abbau von Radikalen und Peroxiden, DNA-Reparaturenzyme
- auf **zellulärer Ebene**:  
Selektion geschädigter Zellen bei der Zellteilung, zelluläre Immunprozesse
- auf **Organebene**:  
hohe Teilungsfähigkeit der meisten Gewebestrukturen zum Ausgleich von Zellverlusten

Besonders bei enger räumlicher und zeitlicher Folge von schadensauslösenden Ereignissen besteht immer die Gefahr, dass die Reparaturkapazität nicht ausreicht, um alle Schäden fehlerfrei zu reparieren. Infolge unzureichend oder falsch reparierter Schadstellen können klinisch diagnostizierbare Schäden auftreten.

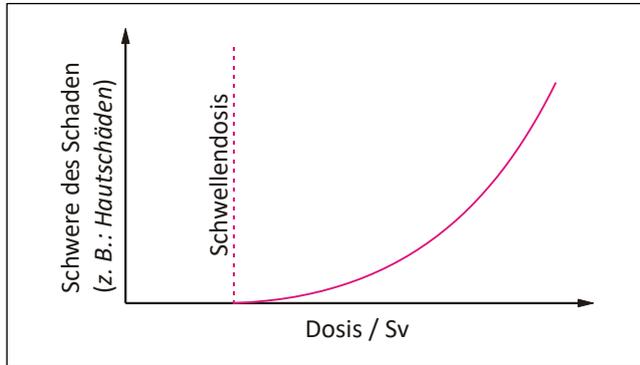
#### 3.2 Strahlenschäden

Strahlenschäden im medizinischen Sinne sind Befunde, die durch ärztliche Untersuchung an strahlenexponierten Personen festgestellt wurden und die in ursächlichem Zusammenhang mit der Strahlenexposition stehen. Diese Krankheiten wurden bei Beobachtungen größerer Personengruppen festgestellt. Ihre Inzidenz wird durch eine Strahlenexposition bestimmter Größe deutlich beeinflusst, d.h. bestimmte Krankheiten treten in strahlenexponierten Gruppen häufiger auf als in nichtexponierten Kontrollgruppen.

Man unterscheidet **deterministische** (*nichtstochastische*) und **stochastische** Strahlenschäden.

**3.2.1 Deterministische Strahlenschäden**

Deterministische oder nichtstochastische Strahlenschäden werden als Schäden bezeichnet, deren Schweregrad mit zunehmender Strahlendosis steigt und die erst oberhalb einer bestimmten Schwellendosis klinisch nachweisbar werden.



Deterministische Strahlenschäden können als zeitnahe Schäden (*Bestrahlung innerhalb von Stunden, Tagen oder Wochen*) oder als Spätschäden (*nach Monaten und Jahren*) auftreten.

Eine wesentliche Ursache deterministischer Strahlenschäden ist der Zelltod. Unter Zelltod wird hier der Verlust der Proliferationsfähigkeit der Zelle verstanden, ohne dass dabei unbedingt der Verlust der metabolischen und funktionellen Fähigkeiten der Zelle eingeschlossen ist. Die Dosis, die zum Verlust der Proliferationsfähigkeit beiträgt, ist gewöhnlich

**Bild 3-1:** Deterministische Strahlenschäden

viel geringer als die, die zum Verlust der Funktionsfähigkeit führt. Stark proliferierende Gewebe sind deshalb strahlenempfindlicher als wenig oder nicht proliferierende Gewebe.

Klinisch nachweisbar wird ein deterministischer Strahlenschaden erst, wenn ein wesentlicher Zellverlust in den betroffenen Organen und Geweben eintritt. Die Größe des Zellverlustes hängt von der Strahlendosis ab:

- je höher die Dosis, desto mehr Zellen sterben ab;
- je größer der Zellverlust, desto schwerer der Schaden.

Da Organe und Gewebe über eine erhebliche Regenerations- und Funktionsreserve verfügen, können solche multizellulären Effekte erst oberhalb bestimmter Schwellendosen nachgewiesen werden. Die Schwellendosis ist definiert als die Dosis, die erforderlich ist, um bei 1 ... 5% der bestrahlten Person einen bestimmten Effekt hervorzurufen. Die Größe der Schwellendosis ist vom Organ oder Gewebe, von der Art des betrachteten Schadens, dem bestrahlten Volumen und von der Dosisleistung abhängig.

Expositionsart	Art des Strahlenschaden	Akute Schwellendosis in Gy
Ganzkörperexposition	Schädigung des Knochenmarks mit klinisch signifikanter Herabsetzung der Blutbildung	0,5
	Akute Strahlenkrankheit	1 ... 1,5
Teilkörperexposition	Epilation der Haut (nach ca. 3 Wochen)	- vorübergehend >3 - bleibend >10
	Erythem	3 ... 5
	Feuchte Epitheliolyse	10 ... 20
	Gewebezerfall / Geschürbildung	50
	Bleibende Sterilität	- männlich 3,5 ... 6 - weiblich 2,5 ... 6
	Linsentrübung (nach Jahren)	1 ... 2

**Tabelle 3.1:** Art der Strahlenschäden (nach ICRP 60, 1991 und UNSCEAR 1993, SSK 2007)

Eine Form des deterministischen Strahlenschadens ist die akute Strahlenkrankheit. Ist der gesamte Körper oder zumindest große Teile (z.B. der Rumpf) einer akuten Bestrahlung über 1,5 Gy ausgesetzt worden, können anfänglich Übelkeit, Erbrechen, Fieber und Durchfälle, später Blutungen und Infekte auftreten. Ohne medizinische Behandlung bzw. ab einer Dosis von etwa 2,5 Gy führt dieser Strahlenschaden unweigerlich zum Tod.

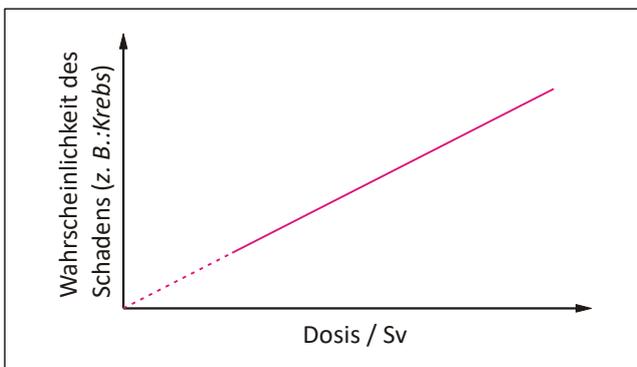
Die akute Strahlenkrankheit wurde bei Opfern der Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki, bei Strahlentherapiepatienten und nach Strahlenunfällen z.B. bei AKW-Arbeitern und Feuerwehrleuten in Tschernobyl bzw. Fukushima, beobachtet.

Bei Bestrahlung kleinerer Körperabschnitte, z.B. der Hände, werden im allgemeinen nur lokale Reaktionen beobachtet. Sie können von vorübergehenden Haarausfall und Hautrötung bis zu tiefreichender Gewebeerstörung, die aufgrund ihrer schlechten Heilungstendenz zur Amputation des betreffenden Gliedes führen kann, reichen.

Deterministische Strahlenwirkungen werden nicht nur nach akuter Exposition mit hohen Dosen beobachtet, auch die Akkumulation vieler kleiner Dosen kann zu klinisch nachweisbaren Schäden führen. Beispiele dafür sind die Linsentrübung (*Strahlenkatarakt*) und krankhafte Veränderungen der Haut (*Röntgenhaut*).

### 3.2.2 Stochastische Strahlenschäden

Als stochastische Strahlenschäden bezeichnet man Schäden, bei denen die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens mit zunehmender Strahlenbelastung zunimmt, deren Schweregrad jedoch nicht dosisabhängig ist. Stochastische Strahlenschäden sind Einzeleffekte.



**Bild 3-2:** Stochastische Strahlenschäden

Veränderungen des Informationsgehaltes der DNA-Mutationen bei erhaltener Lebens- und Teilungsfähigkeit der Zelle können Ursache einer Krebserkrankung der bestrahlten Person (*somatischer stochastischer Strahlenschaden*) oder einer Erbkrankheit bei Nachkommen des Bestrahlten (*genetischer stochastischer Strahlenschaden*) sein.

Ionisierende Strahlen erzeugen grundsätzlich keine neuartigen oder strahlenspezifischen Krebsleiden oder Erbkrankheiten. Es ist (*zum heutigen Zeitpunkt*) nicht möglich, im Einzelfall zu erkennen, ob ein Krebsleiden oder eine Erbkrankheit strahleninduziert oder anderweitig bedingt ist.

Organe und Gewebe unterscheiden sich auch hinsichtlich stochastischer Strahlenschäden in ihrer Strahlensensibilität. Viele Studien an strahlenexponierten Gruppen haben gezeigt, dass die Häufigkeit von Krankheiten mit steigender Dosis zunimmt. Es ist folglich zu erwarten, dass durch eine bestimmte Strahlenexposition Krebsleiden nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit induziert werden. Die Abhängigkeit dieser Wahrscheinlichkeit ist jedoch nur für höhere Dosen bekannt.

## 3.3. Natürliche und zivilisationsbedingte Strahlungsexposition des Menschen

Die Entwicklung der Menschheit ging stets unter der Einwirkung zahlreicher Umwelteinflüsse vonstatten. Dazu gehört auch die ionisierende Strahlung. Quellen dieser Strahlen sind der Kosmos (*kosmische Strahlen*) und die Erde selbst (*terrestrische Strahlen*). Neben diesen natürlichen Komponenten gibt es weiterhin eine vom Menschen geschaffene zivilisatorische Strahlungsexposition.

### 3.3.1 Natürliche Strahlenexposition

Etwa die Hälfte der durchschnittlichen Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland stammt aus natürlichen Quellen (*Stand Juli 2020*). Dazu gehören:

- die **kosmische Strahlung** ( $\gamma$ -Strahlung) 0,3 ... 2,0 mSv/a bestehend aus Teilchenstrahlung und energetischer Photonenstrahlung aus dem Weltall

- die **kosmogene Radionuklide** ( $\gamma$ -Strahlung) 0,5 ... 4,3 mSv/a  
Vorhanden in der Erdatmosphäre und durch kosmische Strahlung neu gebildete Radionuklide
- die **terrestrische Strahlung** ( $\alpha$ -Strahlung) 1,0 ... >20 mSv/a  
Hervorgerufen durch natürliche Radionuklide, die mit der Erdmaterie entstanden sind (z.B.: Thorium, Uran und deren Tochternuklide)
- der **menschlicher Körper** ( $\alpha, \beta, \gamma$ -Strahlung) 0,3 ... 0,4 mSv/a  
Radionuklide, die durch Inhalation und Nahrungsmittelaufnahme in den Körper gelangt sind.

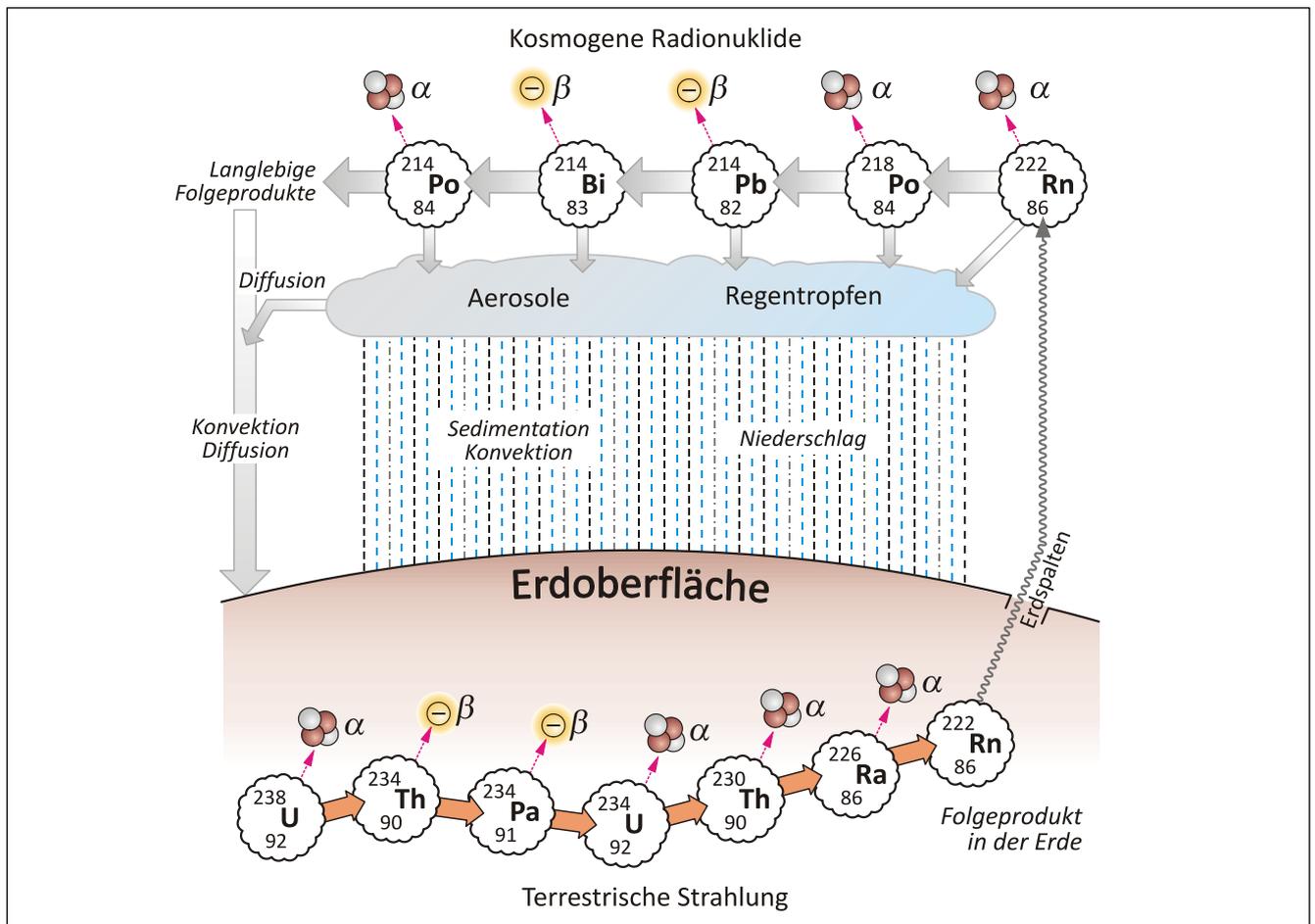
Die resultierende Summe der effektiven Dosis für eine Einzelperson liegt im Jahresmittel bei **2,1 mSv**. Dieser Wert unterliegt gewissen zeitlichen und regionalen Schwankungen (1 ... 6 mSv).

**Orts- und Höhenabhängigkeit aufgrund kosmischer Strahlung**

Betrachtet man die externe Strahlenexposition beim Aufenthalt im Freien, zeigt sich, dass im flachen Norden Deutschlands im Schnitt eine geringere Strahlenexposition herrscht, als im südlichen Bergland (*Höhenabhängigkeit*).

**Terrestrische Strahlung aufgrund geologischer Gegebenheiten**

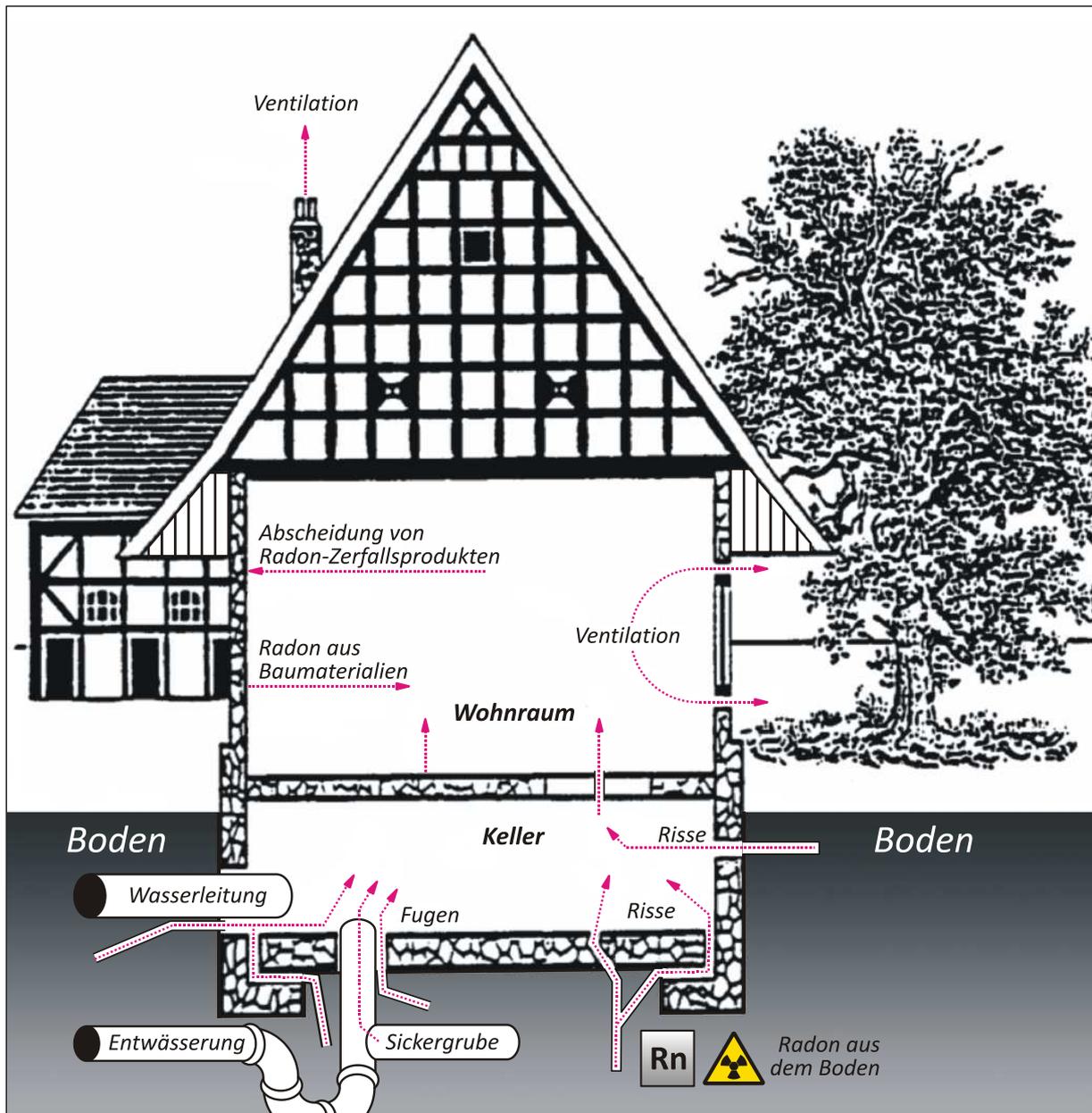
Primordiale Radionuklide sind Elemente in der Erdmaterie, die bei der Entstehung der Erde gebildet wurden. Zahlreiche radioaktive Elemente aus dieser Zeit sind inzwischen abgeklungen, d.h. sie sind in stabile Elemente zerfallen. Es gibt jedoch Elemente mit Halbwertszeiten im Bereich des geschätzten Erdzeitalters, die auf Grund dieser langen Halbwertszeiten noch vorhanden sind.



**Bild 3-3:** Prinzip der natürlichen Strahlungsexposition

Diese radioaktiven Elemente und deren Zerfallsprodukte, die ebenfalls radioaktiv sein können, sind im Gestein bzw. im Boden in unterschiedlicher Konzentration noch immer vorhanden. Durch den Zerfall wird ionisierende Strahlung (*terrestrische Strahlung*) emittiert. Den größten Betrag der Strahlenexposition liefern heutzutage radioaktive Isotope wie Kalium, Uran, Radium und Thorium.

Ein Ausgangsnuklid einer noch immer existierenden Zerfallsreihe ist das Uranisotop U-238 (**Bild 3-3**). Ein Tochternuklid dieser Zerfallsreihe ist das Radonisotop Rn-222. Radon ist nicht nur ein Edelgas sondern auch ein  $\alpha$ -Strahler. Wenn dieses Isotop entsteht, sucht es sich durch Erdspalten seinen Weg und gelangt so an die Erdoberfläche und in die Atemluft. Über die Atmung wird so ein Teil der kurzlebigen, ebenfalls radioaktiven Folgeprodukte in der Lunge abgelagert. Dies führt zu einer Strahlenexposition der Lunge. Vergleicht man den Anteil der daraus resultierenden Strahlenexposition mit denen aus Quellen anderer natürlicher Ursachen, so hat das Radonisotop den bei weitem größten Anteil an der natürlichen Strahlenexposition. Aus diesem Grund gibt es in Deutschland ein flächendeckendes Messnetz, das die Radonkonzentration im Freien überwacht (*Radonkarte für Deutschland, Bundesamt für Strahlenschutz*).



**Bild 3-4:** Radonwege in Gebäuden

In Gebieten, in denen auf Grund der Geologischen Gegebenheiten eine erhöhte mittlere Radonkonzentration resultiert, könnten vor allem in Gebäuden eventuell besondere Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung notwendig werden (**Bild 3-4**).

Oftmals reicht eine gute Lüftung der Kellerräume aus um die Radonkonzentration in geschlossenen Räumen zu senken und damit einen effektiven Strahlenschutz zu gewährleisten.

Verschiedene Rohstoffe enthalten ebenfalls natürliche Radionuklide, die zur Strahlenexposition beitragen. Dazu gehören z. B. Stein- und Braunkohle, Düngemittel oder auch Granit bzw. andere Gesteine, die beispielsweise als Baumaterial genutzt werden.

Da bisher Grenzwerte für die natürliche Strahlenexposition der Bevölkerung nicht gesetzlich vorgegeben sind, orientiert man sich auf Grundlage von Empfehlungen der Europäischen Union nach Richtlinien der Strahlenschutzkommission. Dabei wird von einem Richtwert von **250 Bq·m<sup>-3</sup>** ausgegangen (*nach WHO 2009 für bestehende Gebäude*). Bei Strahlenexpositionen in Häusern oberhalb dieses Wertes sind diese in Abhängigkeit von der Radonkonzentration zu sanieren (*Belüftung, Abdichtung*).

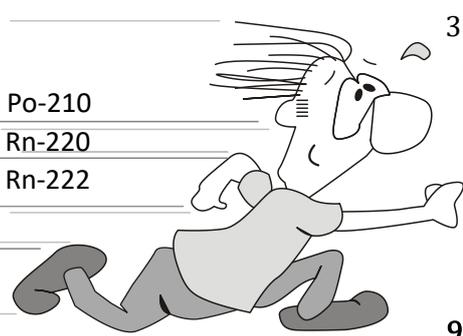
**Strahlenexposition über Nahrungsmittel**

Neben der Inhalation vom Radonisotop Rn-222 und dem Zerfall dieses Nuklids in unserem Körper in andere radioaktive Folgeelemente gelangen radioaktive Nuklide auch auf anderem natürlichen Weg über verschiedene Nahrungsketten in unseren Körper.

So gibt es Lebensmittel, die z. B. einen besonders hohen Anteil am Isotop K-40 (*Bananen*) aufweisen.

Die **Tabelle 3-2** zeigt die Aktivitäten verschiedener Nuklide in einem Standardmenschen (*männlich, 70 kg, 20-30 Jahre alt*). Es handelt sich um Werte, die einen Gleichgewichtszustand der im Körper vorhandenen Aktivitäten natürlicher radioaktiver Stoffe darstellen. In einem Standardmenschen resultieren ca. 130 radioaktive Zerfälle pro Kilogramm Körpergewicht als Folge von Zufuhr und Ausscheidung radioaktiver Stoffe.

Radionuklid	Aktivität in Bq
K-40	4500
C-14	3800
Rb-87	650
Pb-210, Bi-210, Po-210	60
Tochternuklide Rn-220	30
Tochternuklide Rn-222	15
H-3	25
Be-7	25
Sonstige	7
<b>Summe</b>	<b>9112</b> <b>(130 Bq/kg)</b>



**Tabelle 3-2:** Radionuklide in einem Standardmenschen

**3.3.2 Zivilisatorische Strahlenexposition**

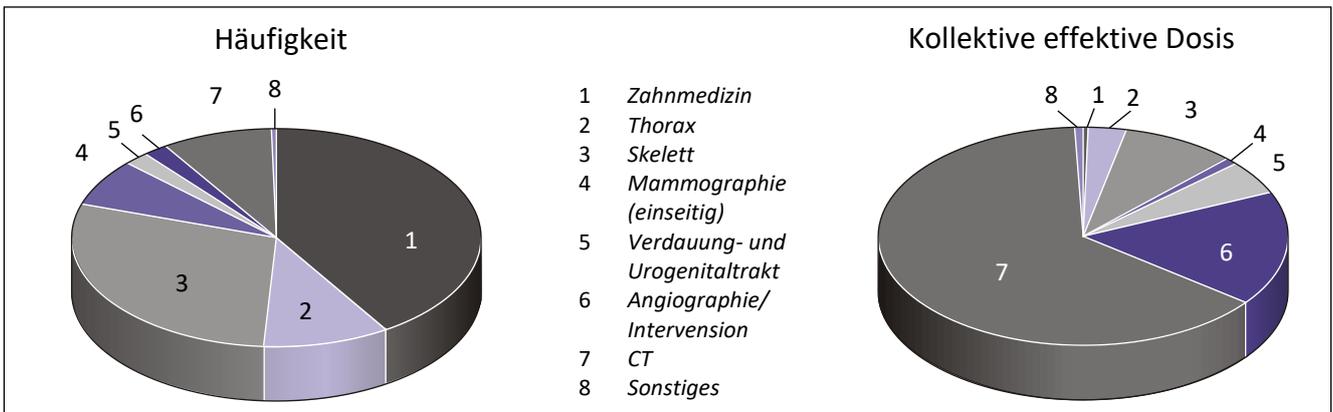
Zusätzlich zur natürlichen Strahlenexposition erhält die Bevölkerung in Deutschland im Durchschnitt weitere **2 mSv/a** effektive Dosis durch zivilisatorisch genutzte Quellen ionisierender Strahlung.

Die Anwendung dieser Quellen ist in der Medizin und in Naturwissenschaft bzw. Technik inzwischen unverzichtbar. Mit der Entdeckung und Erforschung der Röntgenstrahlung bzw. der Radioaktivität (*um 1900*) nahmen die Anwendungsmöglichkeiten stetig zu. Anfang der 30er Jahre des 20. Jahrhunderts galt Radium noch als Heilmittel und fand deshalb seinen Weg in viele Bereiche des Alltags (*Seife, Zahnpasta, Butter, Schokolade sogar Trinkwasser*).

Heute weiß man um die biologisch schädliche Wirkung ionisierender Strahlung. Die Anwendung dieser Strahlung muss einen hinreichenden Nutzen zum Vergleich zur negativen Wirkung aufweisen.

Betrachtet man die Zusammensetzung der zivilisationsbedingten Strahlenexposition genauer, zeigt sich, dass sie fast ausschließlich durch die Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe in der Medizin bedingt ist. Allein die mittlere effektive Dosis durch medizinische Anwendung der Röntgenstrahlung beträgt **1,7 mSv/a**.

Ein Vergleich der verschiedenen Anwendungen von Röntgenstrahlung in der Medizin und die daraus resultierende Dosis ist im **Bild 3-5** dargestellt. Der größte Anteil der Strahlenexposition durch Röntgenmaßnahmen kommt durch den Einsatz von computertomographischen Verfahren (CT).



**Bild 4-5:** Medizinische Strahlenexposition durch Röntgenstrahlung (BMU Jahresbericht 2014)

Die hohe diagnostische Aussagekraft einer CT-Aufnahme steht damit immer der vergleichsweise großen Strahlenexposition für den Patienten gegenüber. Der Arzt muss abwägen, ob diese Exposition im Einzelnen gerechtfertigt ist.

Im Gegensatz zu beruflich strahlenexponierten Personen gelten für Patienten keine Grenzwerte der Strahlenexposition (*aber dennoch Einhaltung diagnostischer Referenzwerte*). Der Gesetzgeber unterscheidet, ob jemand aufgrund der beruflichen Tätigkeit eine zusätzliche Strahlenexposition erhalten könnte oder nicht. Das daraus resultierende Risiko sollte aber so gering wie möglich gehalten werden. Beruflich strahlenexponierte Personen werden auf der Grundlage gesetzlicher Vorschriften dosimetrisch überwacht. So kann sichergestellt werden, dass die vorgeschriebenen Grenzwerte nicht überschritten werden.

Hierfür gibt es in Deutschland vier unterschiedliche Messstellen:

- das Materialprüfungsamt NRW in Dortmund,
- das Helmholtz-Zentrum München,
- die Strahlenschutzmessstelle der Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz in Berlin
- die Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz Ausbildung des Landes Mecklenburg-Vorpommern.

Im Jahr 2014 zeigte die Verteilung der Jahrespersonendosen aller Personen aus der dosimetrischen Überwachung, dass 85% eine Dosis von  $< 1 \text{ mSv}$  erhalten hatten.

In vernachlässigbarem Maße tragen industrielle Tätigkeiten, der Kraftwerksunfall in Tschernobyl und Fukushima, oberirdische Kernwaffentests, Flugreisen, aber auch fossile Energieträger (*Kohle, Erdöl bzw. Erdgas*) sowie Kernkraftwerke zur Erhöhung der zivilisatorischen Strahlungsexposition bei.

**Hinweis:** Insgesamt beträgt die Summe der mittleren effektiven Jahresdosis für eine Individualperson in Deutschland aus natürlicher und zivilisatorischer Strahlenexposition **4,1 mSv**.

## 4. Allgemeine Rechtsgrundlagen des Strahlenschutzes

Ionisierende Strahlung hat zwei wesentliche Eigenschaften. Sie ist **allgegenwärtig** und **bionegativ**. Daraus erwächst die Verpflichtung des Gesetzgebers, Strahlenschutz zu betreiben. Er lässt sich hierbei von folgenden Strahlenschutzgrundsätzen leiten:

### Rechtfertigung (§6 StrlSchG)

Jede Anwendung ionisierender Strahlung muss gerechtfertigt sein. Dazu stellt der Gesetzgeber in Anlage 1 der StrlSchV eine Tabelle bereit, in der alle Tätigkeiten aufgelistet sind, die im Sinne der Verordnung als ungerechtfertigt gelten. Jede Tätigkeit dieser Liste ist nicht genehmigungsfähig.

### Dosisbegrenzung (§9 StrlSchG)

Der Gesetzgeber legt Werte für verschiedene Körperdosen („Grenzwerte“) fest, die durch die Anwendung ionisierender Strahlung nicht überschritten werden dürfen. Für verschiedene Personengruppen gibt es unterschiedliche Grenzwerte.

### Dosisreduzierung und Dosisvermeidung (§8 StrlSchG)

Jede Strahlenwirkung auf den Menschen ist so gering wie möglich zu halten – selbst dann, wenn die einschlägigen Grenzwerte bereits unterschritten sind.

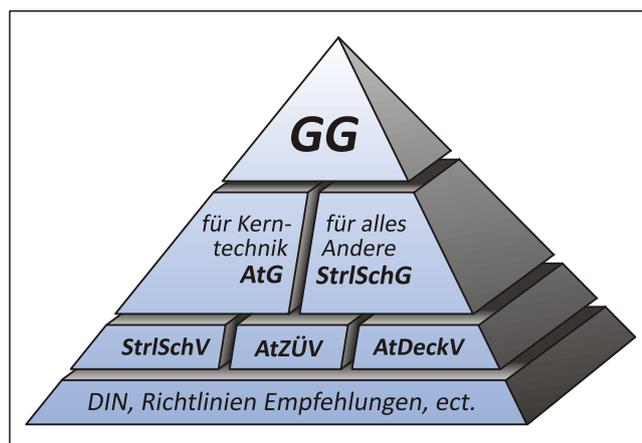
Dieses Vorgehen lehnt sich an das im internationalen Sprachgebrauch als **ALARA** bezeichnete Prinzip an („As low as reasonably achievable“ – „So niedrig wie vernünftigerweise erreichbar“).

Das bedeutet natürlich auch, dass alle unnötigen Strahlenexpositionen oder Kontaminationen von Mensch und Umwelt zu vermeiden sind. Die Betonung liegt hier auf dem Wort „unnötig“ – schon deshalb, weil es nicht möglich ist, alle Expositionen zu vermeiden (z. B. beim Röntgen oder beim Einatmen von radioaktivem Radon in der Luft).

### 4.1 Gesetzliche Vorschriften

Eine Übersicht über die Rechtsvorschriften gibt die **Normenpyramide** (siehe **Bild 4-1**). Je weiter oben ein Regelwerk in der Pyramide steht, umso weniger detailliert ist es und umso höher sind die Hürden, die für seine Änderung zu überwinden sind.

Das **Grundgesetz (GG)** bildet die Grundlage der Staats- und Rechtsordnung. Es definiert die Aufgaben der obersten Staatsorgane und die Grundrechte der Bürger. Im GG (Artikel 73 Abs. 1 Nr. 14) wurde im Zuge der Föderalismusreform festgelegt, dass dem Bund die alleinige Gesetzgebungshoheit hinsichtlich des Strahlenschutzes obliegt.



**Bild 4-1:** Normpyramide der gesetzlichen Vorschriftenordnung

Zwei nachgeordnete Gesetze sind das **Atomgesetz (AtG)** und das **Strahlenschutzgesetz (StrlSchG)**, die im Wesentlichen die kerntechnischen bzw. die nicht-kerntechnischen Anwendungen regeln.

An AtG und StrlSchG schließen sich mehrere Rechtsverordnungen an, z. B. die **Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)**, die **Atomrechtliche Zuverlässigkeitsüberprüfungsverordnung (AtZÜV)** und die **Atomrechtliche Deckungsvorsorgeverordnung (AtDeckV)**.

Die Normenpyramide wird mit den verschiedenen Normen, Richtlinien und Empfehlungen fortgesetzt. Im Gegensatz zu den Gesetzen und Verordnungen sind sie zwar für sich genommen nicht verbindlich, sie können aber Rechtsverbindlichkeit im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens für eine bestimmte Tätigkeit enthalten.

#### 4.1.1 Expositionssituationen

Art und Umfang der verschiedenen Strahlenschutzmaßnahmen richten sich nach den näheren Umständen, unter denen die zu schützende Person exponiert wurde. Um diese Umstände möglichst genau zu beschreiben, definiert der Gesetzgeber in §2 StrlSchG „*Expositionssituationen*“ und „*Expositionskategorien*“, derer es jeweils drei gibt:

##### Expositionssituationen

- Eine Expositionssituation gilt als „**geplant**“, falls sie durch Tätigkeiten entsteht.
- Im Gegensatz dazu ist eine „**bestehende**“ Exposition eine, die bereits vorlag, als die Notwendigkeit entstand Strahlenschutz zu betreiben.
- Zu den „**Notfall**expositionen“ zählen solche, die das Ergebnis eines Notfalls sind.

##### Expositionskategorie

- Die Exposition einer Person fällt in die Kategorie „**beruflich**“, wenn sie im Zuge der Ausbildung oder der Berufsausübung dieser Person erworben wurde. Das gilt entsprechend auch dann, wenn es sich um eine ehrenamtliche Tätigkeit handelt.
- In die Kategorie „**medizinisch**“ fallen außer den Expositionen von Patienten auch die von gesunden Probanden, von Betreuungs- und Begleitpersonen – es sei denn, letztere nehmen diese Aufgaben im Rahmen ihrer beruflichen Tätigkeit wahr. In diesem Fall ist es eine berufliche Exposition wie zuvor definiert.
- Alle Expositionen, die in keine der beiden vorherigen Kategorien fallen, sind als „**Exposition der Bevölkerung**“ einzustufen.

		Expositionssituation Wie wird exponiert?		
		geplant	bestehend	Notfall
Expositionskategorie Wer wird exponiert?	berufl.			
	med.			
	Bevölk.			

**Bild 4-2:** Expositionsmatrix

#### 4.1.2 Durchsetzung des Strahlenschutzrechts

Den Schutz vor ionisierender Strahlung stellt der Gesetzgeber dadurch sicher, dass der Umgang mit ihr in vielen Fällen an zahlreiche Bedingungen geknüpft ist. Der Umgang mit Strahlenquellen ist in der Regel nicht „*einfach so*“ möglich. Es muss eine *Genehmigung* (§§12ff. StrlSchG) oder wenigstens eine *Anzeige* (§§17 ff. StrlSchG) bei der Strahlenschutzbehörde vorliegen. Welches der beiden nötig ist, hängt in hohem Maße von der Strahlenquellenart sowie von der Art des Umgangs mit der Strahlung ab.

##### Genehmigung (§§12ff. StrlSchG)

Eine Genehmigung wird speziell dann notwendig, wenn der Umgang mit den Strahlungsquellen ein nennenswertes Gefährdungspotenzial hat. Der Gesetzgeber muss sicherstellen, dass die betreffenden Personen so gut wie vernünftigerweise erreichbar geschützt werden.

In solchen Fällen verlangt er, dass dieser Schutz nachgewiesen wird, bevor der Umgang beginnt. Das Rechtsmittel der Genehmigung leistet genau dies. Der Anwender muss den beabsichtigten Umgang mit den Strahlungsquellen beantragen und dabei alle Dokumente zur Verfügung stellen, die eine Einschätzung darüber erlauben, ob dem Strahlenschutz Genüge getan wird oder nicht.

Falls ja, muss eine Genehmigung erteilt werden. Falls nicht, muss dem Anwender mitgeteilt werden, woran er gescheitert ist, damit er die kritischen Punkte nachbessern kann. Erst, wenn die Genehmigung vorliegt, darf der Umgang erfolgen.

### Anzeige (§§17 ff. StrlSchG)

In manchen Fällen wird es möglich sein, dem Anwender einen Teil des Aufwandes abzunehmen, der für das Erwirken einer Genehmigung nötig wäre. Für ihn genügt es dann, den Umgang mit der Strahlenquelle „anzuzeigen“.

Anzeigen bedeutet, dass der Anwender vier Wochen vor dem geplanten Einsatz der Quelle der prüfenden Stelle seine Absicht, mit dem Gerät zu arbeiten, mitteilt. Verstreichen die vier Wochen, ohne dass gegen sein Vorhaben Einspruch erhoben wurde, so kann er die Quelle ab dem genannten Termin verwenden. Einer ausdrücklichen Zustimmung wie im Fall der Genehmigung bedarf es dazu nicht.

### Bauartzulassung

Wenn es sich bei der Strahlenquelle etwa um eine Röntgenanlage oder einen Beschleuniger handelt, hat der Hersteller solcher Anlagen die Möglichkeit, sehr weitreichend auf die Strahlungsdosen Einfluss zu nehmen, die von seinem Gerät maximal erzeugt werden. Dabei ist dieser Einfluss sehr viel umfassender, als das beispielsweise bei einem radioaktiven Stoff möglich wäre.

Der Hersteller eines solchen Gerätes kann nun versuchen, eine „Bauartzulassung“ zu erwirken, also den Nachweis zu führen, dass sein Gerät gewissen Strahlenschutzansprüchen genügt.

Gelingt ihm dieser Nachweis und erhält sein Gerät eine Bauartzulassung, so verändern sich die Anforderungen für den Anwender des Gerätes. In manchen Fällen (wie etwa dem in §19(1) StrlSchG aufgeführten) erlischt die Notwendigkeit für eine Genehmigung und es genügt, wenn stattdessen eine Anzeige erstattet wird.

### 4.1.3 Kommunikationswege im Strahlenschutz

Alle eingangs genannten Gesetze und Verordnungen gelten bundesweit. Angewandt und durchgesetzt werden sie jedoch nicht durch den Bund, sondern in dessen Auftrag durch die einzelnen Bundesländer. Sie legen in der Zuständigkeitsverordnung fest, welche ihrer Behörden für welche Aufgaben nach AtG, StrlSchV und anderen Vorschriften zuständig sind.

### Zuständige Behörden

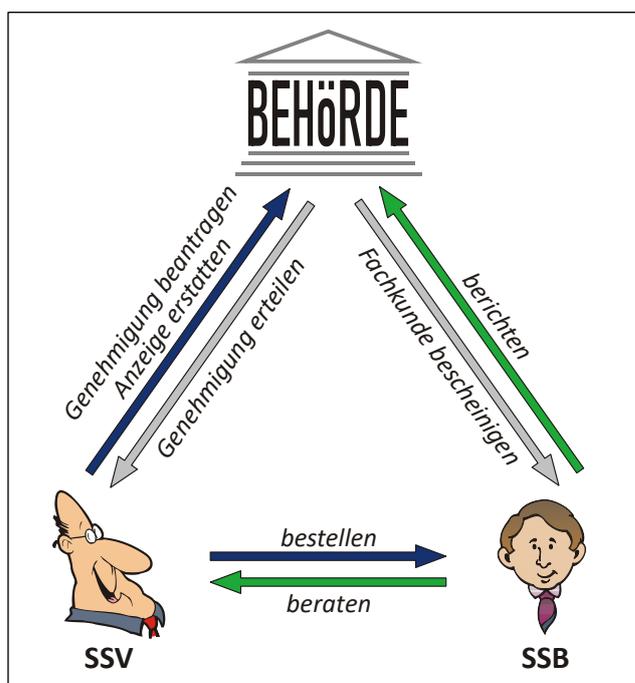
Die für den Strahlenschutz zuständige Behörde ist oftmals das Gewerbeaufsichtsamt. Es überwacht, dass die Betriebe, die im betreffenden Bundesland Umgang mit ionisierender Strahlung haben, dies auf gesetzeskonforme Weise tun.

Der Gesetzgeber stellt das dadurch sicher, dass er der Behörde auf betrieblicher Seite zwei Partner gegenüberstellt, die auf verschiedene Art und Weise zum Strahlenschutz beitragen. Einer dieser Partner ist der **Strahlenschutzverantwortliche (SSV)**.

### Strahlenschutzverantwortlicher (SSV)

In vielen Fällen ist der Umgang mit Strahlung nur erlaubt, wenn hierfür die Behörde eine Genehmigung erteilt hat oder bei ihr der Umgang angezeigt wurde. Der SSV ist derjenige, der eine solche Genehmigung benötigt oder eine Anzeige erstatten muss.

Normalerweise ist diese Person der Leiter eines Betriebes, also derjenige der die Entscheidungen fällt,



**Bild 4-3:** Kommunikationsdreieck zwischen Behörde, SSV und SSB

ob fortan mit Hilfe ionisierender Strahlung gearbeitet werden soll. Ab dem Zeitpunkt dieser Entscheidung ist die besagte Person SSV. Sie ist von nun an verantwortlich dafür, dass der Umgang mit ionisierender Strahlung gesetzeskonform erfolgt. Diese Person ist zwar für die Umsetzung des Strahlenschutzes verantwortlich, muss aber dafür nicht die praktischen Fähigkeiten haben. Die einzige Bedingung, die der SSV zu erfüllen hat, ist die polizeiliche Zuverlässigkeit. Wenn ein einwandfreies Führungszeugnis vorliegt, dann kann diese Person SSV sein und die entsprechenden Aufgaben wahrnehmen.

Normalerweise werden diese Aufgaben hauptsächlich administrativer Art sein. Die klassischen SSV-Aufgaben sind das Bereitstellen der für den Strahlenschutz nötigen Ressourcen (*Geld, Personal, ect.*). Jenseits dessen gehören zum praktischen Strahlenschutz aber auch Aufgaben, die ohne besondere fachliche Qualifikation nicht bearbeitet werden können.

Hierfür fordert der Gesetzgeber das Vorhandensein eines weiteren Funktionsträgers im Betrieb. Es ist der **Strahlenschutzbeauftragte (SSB)**.

### **Strahlenschutzbeauftragter (SSB)**

Der Strahlenschutzbeauftragte setzt den Strahlenschutz praktisch um. Der Gesetzgeber schreibt für ihn eine besondere berufliche Qualifikation vor, die als „*Fachkunde im Strahlenschutz*“ bezeichnet wird und sich aus drei Bestandteilen zusammensetzt:

- Berufsausbildung
- Berufserfahrung
- Absolvierter Strahlenschutzkurs.

Eine Person wird zum SSB, indem sie vom SSV dazu „*bestellt*“ wurde. Bestellen bedeutet, dass der SSV schriftlich festlegt, welche Person künftig SSB sein soll und im Bestellungsschreiben auflistet, für welche Aufgaben sie künftig verantwortlich sein wird. In aller Regel wird es (*außer in sehr kleinen Betrieben*) mehrere SSBs geben.

Wesentlich hierbei ist, dass die Fachkunde des SSBs zu seinem Aufgabengebiet passt. Der Umgang mit radioaktiven Stoffen erfordert zum Beispiel eine andere Fachkunde als der Umgang mit Röntgenanlagen. Falls der künftige SSB die erforderliche passende Fachkunde besitzt und polizeilich zuverlässig ist kann die Bestellung erfolgen und er kann seine Arbeit aufnehmen.

## **4.2 Dosisgrenzwerte**

### **4.2.1 Expositionskategorien**

Zu Beginn wurden mit Hilfe der Expositionskategorien die zu schützenden Personen in drei Gruppen eingeteilt, von denen jetzt zwei genauer betrachtet werden sollen

- Personen aus der Bevölkerung und
- Beruflich exponierte Personen.

#### **Grenzwerte für Personen aus der Bevölkerung**

Zum Schutz von Personen aus der Bevölkerung fordert der Gesetzgeber, dass die Exposition dieses Personenkreises durch Tätigkeiten bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten darf. Nach **Tabelle 4-1** beziehen sich die Dosisgrenzwerte auf ein Kalenderjahr. Das Kalenderjahr setzt sich hierbei aus **365 Tagen**, also **8760 Stunden** zusammen.

Die SSVs müssen sicherstellen, dass durch die von ihnen zu verantworteten Tätigkeiten keine Verletzung dieser Grenzwerte zustande kommt.

#### **Grenzwerte für beruflich exponierte Personen**

Wird im Arbeitsjahr mindestens einer der Grenzwerte für Personen aus der Bevölkerung überschritten, so gilt diese Person als beruflich exponiert. Auch für beruflich exponierte Personen gibt es Grenzwerte,

die einzuhalten sind. Das Arbeitsjahr (*im Gegensatz zum Kalenderjahr*) setzt sich hierbei aus **250 Arbeitstagen** mit jeweils **8 Stunden**, also insgesamt **2000 Stunden** zusammen.

Die SSVs müssen sicherstellen, dass durch die von ihnen zu verantwortende Tätigkeiten keine Verletzungen der Grenzwerte zustande kommt

Es ist zu betonen, dass die Personengruppen der an den zum Zwecke von Therapie oder Diagnostik Strahlung angewandt wird, in der obigen Auflistung nicht auftaucht. Ein Patient ist im Sinne des Strahlenschutzes keine Person aus der Bevölkerung. Das bedeutet insbesondere, dass es für ihn keine Grenzwerte gibt.

<i>Dosisgrenzwerte in mSv pro Kalenderjahr</i>				
<i>Körperdosis</i>	<i>Grenzwerte für Personen aus der Bevölkerung</i>	<i>Einstufungskriterien für beruflich strahlenexponierte Personen</i>		<i>Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen</i>
		<i>Kategorie B</i>	<i>Kategorie A</i>	
<i>Effektive Dosis</i>	1	1 ... 6	6 ... 20	20
<i>Haut, Hände, Unterarme, Füße, Knöchel</i>	50	50 ... 150	150 ... 500	500
<i>Augenlinse</i>	15	<i>(gibt nur Kategorie A) 15 ... 20</i>		20

**Tab. 4-1:** Einstufungskriterien und Dosisgrenzwerte

### **Berufskategorien A und B**

Die Gruppe der beruflich exponierten Personen wird vom Gesetzgeber weiter unterteilt. Je nachdem, wie groß die berufliche Exposition der Person ist, wird eine Person in die Berufskategorie A oder B eingestuft.

Für die effektive Dosis und die Organ-Äquivalentdosis der Haut legt der Gesetzgeber Einstufungswerte fest. Sie betragen für die effektive Dosis **6 mSv** und für die Organ-Äquivalentdosis der Haut **150 mSv**. Kann die entsprechende Dosis einer Person oberhalb diese Einstufungswerte liegen, so gehört sie in die Kategorie A, ansonsten in Kategorie B. Bezüglich der Organ-Äquivalentdosis der Augenlinse gibt es keinen Einstufungswert. Jede Person, die ihrer Augenlinsenexposition wegen als beruflich exponierte Person gilt, gehört in die Kategorie A.

Die Einstufungen in Kategorien ist kein Selbstzweck, sondern hat direkte arbeitspraktische Konsequenzen. Da Kategorie A-Personen ein höheres Expositionsrisiko haben, müssen vor Antritt im Strahlenbereich (*dann im jährlichen Turnus*) arbeitsmedizinisch untersucht werden (§77 StrlSchV). Bei Kategorie B-Personen gilt das nicht.

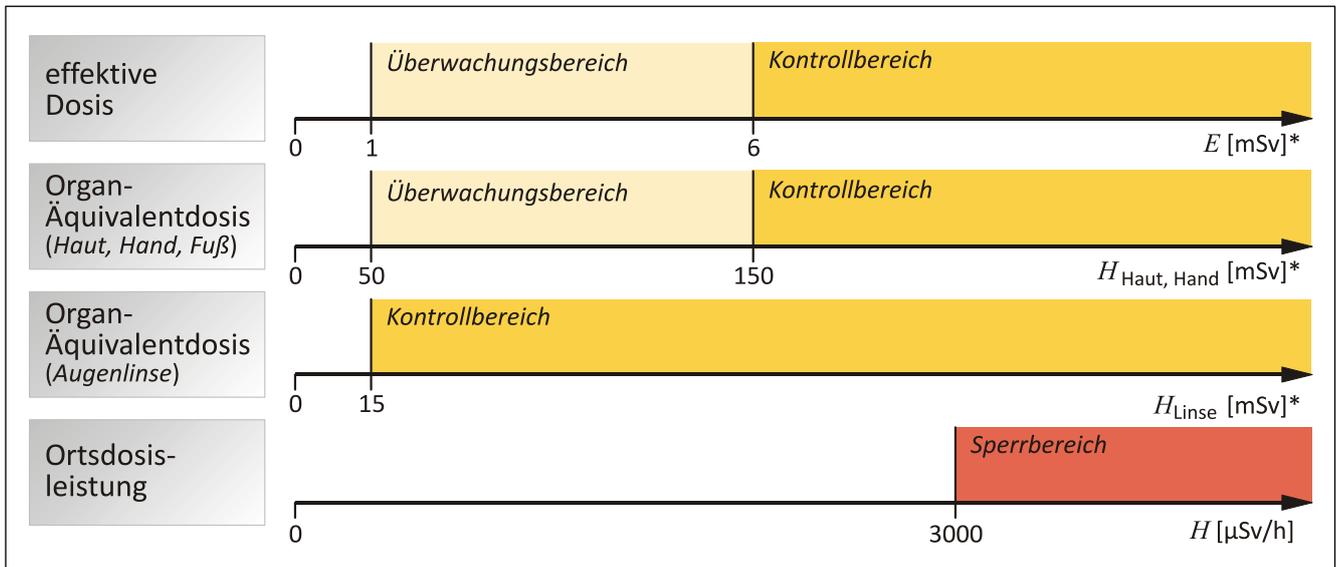
### **4.2.2 Strahlenschutzbereiche**

Der Gesetzgeber fordert die Einrichtung von „*Strahlenschutzbereichen*“ überall dort, wenn Grenzwerte für Personen aus der Bevölkerung beim Aufenthalt bzw. bei einer Tätigkeit überschritten werden können. Der Umgang der Schutzmaßnahmen hängt in aller Regel davon ab wie hoch die Expositionen schlimmstenfalls werden kann.

Aus diesem Grund gibt es in der Strahlenschutzverordnung drei Strahlenschutzbereiche

- Überwachungsbereich,
- Kontrollbereich,
- Sperrbereich.

Diese richten sich daran, wie hoch die Dosisleistung dort sein kann oder welche Körperdosen pro Arbeitsjahr bei den sich dort aufhaltenden Personen maximal möglich sind (§52 StrlSchV). Ein Arbeitsjahr hat 250 Arbeitstage mit jeweils 8 Stunden, also insgesamt 2000 Stunden.



**Bild 4-4:** Strahlenschutzbereiche

Die Einstufung der Räume ist keinesfalls eine rein abstrakte Angelegenheit. Sie folgt daraus,

- wer sich in den jeweiligen Bereichen aufhalten darf
- ob zuvor unterwiesen werden muss,
- ob Dosimetrie betrieben werden muss und
- ob der Raum gekennzeichnet werden muss.

### Zugangsbeschränkung

Zutritt zu den Strahlenschutzbereichen erhält eine Person entweder, wenn sie dort eine Funktion zu erfüllen hat, Besucher ist oder ihr der Zugang behördlich gestattet wurde.

### Dosimetripflicht

Grundsätzlich unterliegt jede Person in allen Strahlenschutzbereichen der Dosimetripflicht. Hiervon gibt es zwei mögliche Ausnahmen, und zwar

- für Patienten,
- für alle Personen, bei denen sichergestellt ist, dass sie die Grenzwerte für Personen aus der Bevölkerung nicht überschreiten können. Damit unter dieser Bedingung im Kontrollbereich auf die Dosimetrie verzichtet werden darf, muss die Behörde eine ausdrückliche Entpflichtung aussprechen. Im Überwachungsbereich ist es genau umgekehrt. Dort kann auf die Dosimetrie verzichtet werden, sofern die Behörde sie dort nicht ausdrücklich fordert.

## 4.3 Verhaltensweisen für den fachgerechten Umgang mit Strahlenquellen

Die Versuche **Ionisierende Strahlung** (A03a), **Compton-Effekt** (A03b), **Computertomographie** (A03c) **Schwächung von Röntgenstrahlung** (A04) und **Röntgenspektren** (A05) werden mit einer bauartzugelassenen Schulröntgenanlage durchgeführt. Es ist ein Vollschutzgerät, d. h. die Röntgenröhre ist in einem strahlungssicheren Gerät eingebaut.

Mehrere Sicherheitsschalter verhindern einen versehentlichen Strahlungsausstritt. Nur bei mutwilliger Manipulation bzw. Zerstörung des Gerätes kann ionisierende Röntgenstrahlung nach außen dringen. Das Gerät wird in regelmäßigen Abständen von einer staatlich anerkannten Strahlenschutzprüfstelle gemäß StrlSchV auf Dichtheit kontrolliert.

Im Versuch **Zählstatistik** (A06) wird mit einem umschlossenen radioaktiven Strahler (Ra-226) gearbeitet. Durch die Schutzummantelung wird ein Austritt der schädlichen ionisierenden Strahlung bei ordnungsgemäßer Handhabung verhindert.

Das Radium-Präparat wird durch das Laborpersonal erst unmittelbar vor der Messung aus dem Abschirmungsgefäß genommen und nach Versuchsende wieder in das Schutzgefäß zurückgegeben.

Achten Sie darauf, dass ein hinreichender Abstand ( $a > 50$  cm) zum Präparat eingehalten wird und jegliche Manipulation an der Strahlenquelle zu unterlassen ist.

In den Versuchen **Alpha- und Beta-Strahlung im elektrischen und magnetischen Feld** (A07) und **Charakterisierung von Alpha-Teilchen** (A08) sind die radioaktiven Strahler (Sr-90 und Am-241) umschlossen. Zusätzlich sind diese in Ablenkammern eingebaut, so dass ein unkontrollierter Austritt der schädlichen ionisierenden Strahlung bei ordnungsgemäßer Handhabung verhindert wird. Erst wenn in diesen Ablenkammern ein Vakuum erzeugt wird, entsteht eine gerichtete ionisierende Strahlung an der Austrittsöffnung.

Der Einbau bzw. der Wechsel der Präparate in die Versuchsaufbauten erfolgt durch das Laborpersonal. Achten Sie darauf, dass jegliche Manipulation der Ablenkammern bzw. der Strahlenquellen zu unterlassen sind.

Im Versuch **Gamma-Strahlen** (A11) wird mit dem bauartzugelassenen Amersham Cs-137/Ba-137m Isotopengenerator gearbeitet. Dieser wurde speziell für Schulversuche zur Demonstration des radioaktiven Zerfallsgesetzes entwickelt. Mit ihm lassen sich wiederholt auf einfache Art und Weise kleine Mengen (2 ml) einer kurzlebigen radioaktiven Lösung herstellen.

Der Isotopengenerator enthält als langlebige Muttersubstanz Cs-137 ( $A=370$  kBq,  $T_{1/2}=30,25$  a). Dieses Cäsiumisotop zerfällt unter Emission von  $\beta^-$ -Strahlung in das Bariumisotop Ba-137. Dieser Übergang erfolgt teils direkt in den stabilen Grundzustand (Ba-137 ca. 5%) und teils über den metastabilen Zustand (Ba-137m ca. 95%).

Das Isotop Ba-137m entsteht erst durch die Elution. Hierbei wird die Elutionslösung (*angesäuerte Kochsalzlösung*) durch den Isotopengenerator mit Hilfe einer Spritze gegeben und in einem kleinen Fläschchen aufgefangen. Ba-137m zerfällt mit einer Halbwertszeit von  $T_{1/2}=2,551$  min unter einer Emission von  $\gamma$ -Strahlung ( $E_\gamma=662$  keV) in den stabilen Grundzustand des Isotops Ba-137.

Vor der Durchführung der Elution sind Schutzhandschuhe zutragen und das Laborpersonal zu informieren. Achten Sie darauf, dass ein hinreichender Abstand ( $a > 50$  cm) zum Präparat (*Isotopengenerator bzw. Fläschchen mit Elutionslösung*) eingehalten wird und jegliche Manipulation an der Strahlenquelle zu unterlassen ist. Das Fläschchen bleibt nach Versuchende im Versuchsaufbau und der Inhalt wird von Laborpersonal fachkundig entsorgt.

Alle Präparate werden in regelmäßigen Abständen von einer staatlich anerkannten Strahlenschutzprüfstelle gemäß der gesetzlichen Bestimmungen auf Dichtheit kontrolliert.

Beim Arbeiten mit dem Röntgengerät sowie beim Umgang mit radioaktiven Substanzen gelten im Physikalischen Praktikum die allgemeinen Arbeitsschutzvorschriften. Essen und Trinken ist im gesamten Laborbereich verboten sowie ein übermäßiges auftragen von Kosmetika.

Im Falle einer **Schwangerschaft** darf die Betreffende weder mit dem Röntgengerät noch mit den ionisierenden Strahlenquellen arbeiten.

### 5. Berechnung und Tabellen

**Aufgabe 1:** Auf wie viel verringert sich die Aktivität  $A$  nach vier Halbwertszeiten  $T_{1/2}$ , wenn die Anfangsaktivität  $A_0 = 300 \text{ kBq}$  beträgt.

$$A_n = \frac{1}{2^n} \cdot A_0 = \frac{1}{2^4} \cdot 300 \text{ kBq} = \underline{18,75 \text{ kBq}}$$

**Aufgabe 2:** Die mittlere Dosisleistung am Arbeitsplatz beträgt  $\dot{H} = 50 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ . Wie lange darf sich ein Auszubildender dort aufhalten?

$$t_{max} = \frac{H_{GW}}{\dot{H}} = \frac{1 \text{ mSv}}{50 \text{ }\mu\text{Sv/h}} = \frac{1000 \text{ }\mu\text{Sv}}{50 \text{ }\mu\text{Sv}} \cdot 1 \text{ h} = \underline{20 \text{ h}} \text{ im Jahr}$$

**Aufgabe 3:** Wie groß ist die Dosisleistung, wenn eine Cs-137 Quelle mit einer Aktivität von  $A = 330 \text{ kBq}$  einen Abstand von  $a_1 = 0,5 \text{ cm}$ ,  $a_2 = 1,5 \text{ dm}$  bzw.  $a_3 = 3 \text{ m}$  hat.

$$\dot{H} = \Gamma_H \cdot \frac{A}{a^2}$$

$$\dot{H}_1 = \Gamma_H \cdot \frac{A}{a_1^2} = 88 \frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{GBq}} \cdot \frac{0,00033 \text{ GBq}}{(0,005)^2 \text{ m}^2} = \underline{1162,6 \text{ }\mu\text{Sv/h}}$$

$$\dot{H}_2 = \Gamma_H \cdot \frac{A}{a_2^2} = 88 \frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{GBq}} \cdot \frac{0,00033 \text{ GBq}}{(0,15)^2 \text{ m}^2} = \underline{1,2907 \text{ }\mu\text{Sv/h}}$$

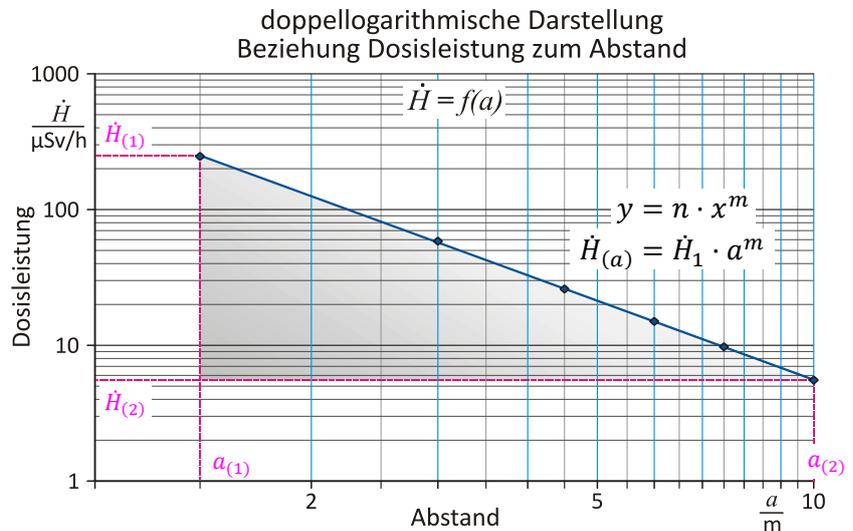
$$\dot{H}_3 = \Gamma_H \cdot \frac{A}{a_3^2} = 88 \frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{GBq}} \cdot \frac{0,00033 \text{ GBq}}{(3)^2 \text{ m}^2} = \underline{0,0032 \text{ }\mu\text{Sv/h}}$$

**Zum Vergleich:** Die resultierende Summe der effektiven Dosis für eine Einzelperson liegt im Jahresmittel in Deutschland bei 2,1 mSv. Dieser Wert unterliegt gewissen zeitlichen und regionalen Schwankungen (1 ... 6 mSv).

**Aufgabe 4:** Bestimmen Sie den Abstand  $a$  zu einer Strahlungsquelle, in dem nur noch eine Dosisleistung von  $\dot{H} = 7 \text{ }\mu\text{Sv/h}$  auftritt. Zu diesem Zweck sind die Dosisleistungen in unterschiedlichen Abständen ermittelt worden.

Wertetabelle

x-Achse	y-Achse
$a$ m	$\dot{H}$ $\mu\text{Sv/h}$
1,5	240
3,0	60
4,5	27
6,0	15
7,5	9,6
10	5,4



- Berechnung des Anstieges  $m$  der Funktion

$$m = \frac{\ln(\dot{H}_2) - \ln(\dot{H}_1)}{\ln(a_2) - \ln(a_1)} = \frac{\ln(5,4) - \ln(240)}{\ln(10) - \ln(1,5)} = \frac{3,79}{1,89} = \underline{-2}$$

- Berechnung von  $\dot{H}_1$  (Schnittpunkt der y-Achse bei 1)

$$\dot{H}_{(a)} = \dot{H}_1 \cdot a^m \quad 240 \mu\text{Sv/h} = \dot{H}_1 \cdot (1,5 \text{ m})^{-2} = \frac{\dot{H}_1}{2,25 \text{ m}^2}$$

$$\dot{H}_1 = 240 \mu\text{Sv/h} \cdot 2,25 \text{ m}^2 = \underline{540 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}}$$

- Funktionsgleichung

$$\dot{H} = 540 \frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{h}} \cdot a^{-2}$$

- Berechnung des Abstandes  $a$ , bei der eine Dosisleistung von  $\dot{H} = 7 \mu\text{Sv/h}$  auftritt

$$a = \sqrt{\frac{540 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}}{7 \mu\text{Sv/h}}} = \underline{8,8 \text{ m}}$$

Die Dosisleistung von  $\dot{H} = 7 \mu\text{Sv/h}$  tritt in einem Abstand von  $a = 8,8 \text{ m}$  auf.

Tabellarische Übersichten

Physikalische Größen	Formelzeichen	Einheiten		Beziehung zwischen den Einheiten
Aktivität	$A$	Bequerel	Bq	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$
Energiedosis	$D$	Gray	Gy	$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ $1 \text{ Gy} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Energiedosisleistung	$\dot{D}$	Gray pro Stunde	Gy/h	$1 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
		Gray pro Sekunde	Gy/s	$1 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
Ortsdosis	$H$	Sievert	Sv	$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ $1 \text{ Sv} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Ortsdosisleistung	$\dot{H}$	Sievert pro Stunde	Sv/h	$1 \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
		Sievert pro Sekunde	Sv/s	$1 \text{ Sv} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$

**Tabelle 5-1:** Umrechnungsbeziehungen

Radionuklid	Na-22	Co-60	Kr-85	I-131	Cs-137	Ra-226	Am-241
Gamma-Konstante ( $\Gamma_H$ in $\mu\text{S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{GBq}^{-1}$ )	322	351	0,4	59	88,0	225	6,59
Gamma-Energie ( $E_\gamma$ in MeV)	0,511 1,275	1,173 1,332	0,52	0,364	0,662	0,186	0,06
Halbwertszeit	2,6 a	5,3 a	10,8 a	8,0 d	30,2 a	1602 a	432,6 a

**Tabelle 5-2:** Gamma-Konstanten und –Energien bzw. Halbwertszeiten ausgewählter Nuklide

## 6. Literaturhinweise

- Auszüge aus dem Arbeitsmaterial vom Strahlenschutzlehrgang 2016 und 2021 der Fachgruppen S1.1, S1.2, S1.3, S2.1, S6.1 (Modul GG), Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz Ausbildung Mecklenburg-Vorpommern  
Dr. M. Bastian, Dr. S. Schlagner, Dipl.-Ing. R. Strilek
- Auszüge aus dem Arbeitsmaterial vom Röntgenstrahlenschutzlehrgang 2016 und 2021 der Fachgruppen R3, R4 (Modul RM), Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz Ausbildung Mecklenburg-Vorpommern  
Dipl.-Ing. R. Strilek, Dr. A. Pulvermüller
- Auszüge aus Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG), herausgegeben vom 27.06.2017, gültig ab 01.01.2019, letzte Aktualisierung 12.12.2019  
Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz

