

# Radioaktivität – Entstehung, Messung und Wirkung

*Durch den Reaktorunfall in Tschernobyl sind nahezu alle Bevölkerungsschichten sensibilisiert worden. Zum einen wird das „Für und Gegen“ die Kernenergie wieder heftig diskutiert. Zum anderen häufen sich Fragen über Entstehung und Wirkung der Radioaktivität, wobei ein natürliches Interesse daran besteht, die Gefährdung durch radioaktive Strahlung so niedrig wie möglich zu halten. Dem Großteil der Bevölkerung wurde in den vergangenen Wochen der Zugang zu dieser Problematik durch die Verwendung verschiedener Größen und deren Einheiten zusätzlich erschwert. Hinzu kam die Festlegung erheblich differierender Richtwerte für die Strahlenbelastung durch Bund und Länder, unterhalb derer die Gefährdung durch radioaktive Strahlung als nicht gegeben angesehen wurde. Der angesprochene Komplex soll in diesem Beitrag ausführlich erläutert werden.*

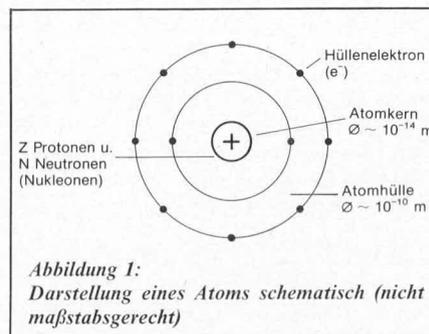
## Einführung

Die dargestellte Thematik ist äußerst vielschichtig. Daher werden die wichtigsten Grundlagen — soweit diese für das Verständnis notwendig sind — skizziert. Die nachfolgend angeführte Gliederung vermittelt einen ersten Eindruck.

1. Aufbau der Materie
2. Radioaktiver Zerfall
  - 2.1 Zerfallsgesetz
  - 2.2 Natürliche Radioaktivität
  - 2.3 Künstliche Radioaktivität
3. Wechselwirkung von Kernstrahlung mit Materie
  - 3.1 Wechselwirkung geladener Teilchenstrahlung mit Materie
  - 3.2 Wechselwirkung ungeladener Teilchenstrahlung mit Materie
  - 3.3 Wechselwirkung von Quantenstrahlung mit Materie
  - 3.4 Zusammenfassung
4. Strahlendosimetrie
  - 4.1 Ionendosis
  - 4.2 Energiedosis
  - 4.3 Äquivalentdosis
  - 4.4 Dosisraten
5. Umweltbedingte Strahlenbelastung
  - 5.1 Natürliche Strahlenbelastung
  - 5.2 Zivilisatorische Strahlenbelastung
6. Biologische Strahlenwirkung
  - 6.1 Grundlagen
  - 6.2 Somatische Strahlungsschädigung
  - 6.3 Genetische Strahlungsschädigung
7. Strahlenschutz
  - 7.1 Prinzipielle Vorsorge
  - 7.2 Rechtliche Grundlagen
  - 7.3 Grenzwerte
8. Strahlenbelastung nach Tschernobyl
  - 8.1 Strahlungskomponenten
  - 8.2 Einzelwerte

## 1. Aufbau der Materie

Jede Materie ist aus Atomen aufgebaut, die ihrerseits aus Atomhüllen und Atomkernen bestehen (Abb. 1). Die Atomkerne enthalten nahezu die gesamte Masse der Atome und haben einen Durchmesser von der Größenordnung  $10^{-14}$  m. Dagegen liegt der Durchmesser der sehr leichten Atomhüllen, in denen sich die Elektronen bewegen, in der Größenordnung von  $10^{-10}$  m, so daß die Atomhüllen den größten Teil der Atomvolumina einnehmen. Die Kerndurchmesser betragen daher nur etwa 1/10000 der Atomdurchmesser. Der überwiegende Teil der Atome ist leerer Raum. Daraus resultiert die relativ gute Durchlässig-



sigkeit (Transparenz) der Materie für kleine Teilchen (Partikel).

Zur Veranschaulichung dieses Bildes nehme der Atomkern die Größe eines Stecknadelkopfes (1 mm Durchmesser) ein. Dann wird der Durchmesser des Atoms ungefähr 30 m. Feste Körper, in denen sich die Atome berühren, würden also in Abständen von 30 m kleine Materieanhäufungen der Größe von Stecknadelköpfen enthalten, zwischen denen sich die Elektronen der Hülle bewegen, wobei die Masse der Elektronen praktisch zu vernachlässigen ist. Alles weitere ist leerer Raum. Bei festen Körpern ist also nur ein sehr geringer Bruchteil ( $10^{-14}$ ) ihres Volumens von Materie erfüllt. Da bei flüssigen und gasförmigen Körpern die Abstände zwischen den Atomen noch größer sind, ist dementsprechend die Materiedichte noch geringer. Materie besteht also überwiegend aus leerem Raum. Diese Leere im Bereich der Atome ist nur mit derjenigen des Weltalls vergleichbar.

Die Elektronen bewegen sich dabei auf verschiedenen Bahnen um den Kern, ähnlich wie es die Planeten um die Sonne tun. Da die Elektronen negativ geladen sind und andererseits der Atomkern positiv geladen ist, werden die Elektronen durch die anziehende Coulombkraft auf diesen Bahnen gehalten.

Kerne bestehen aus einfach positiv geladenen Protonen (Anzahl Z) und neutralen Neutronen (Anzahl N), deren Massen in etwa übereinstimmen. Diese Kernbausteine werden durch die Kernkraft zusammengehalten und heißen Nukleonen. Da sich Ladungen gleichen Vorzeichens abstoßen, muß die anziehende Kernkraft deutlich größer sein als die abstoßende Coulombkraft der Protonen.

In einem neutralen Atom stimmt die Anzahl der einfach negativ geladenen Hüllenelektronen mit der Anzahl der Protonen des Kerns (Kernladungszahl Z) überein. Durch die Kernladungszahl Z und damit durch die Zahl

von Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Fellmann  
Dekan des Fachbereichs  
Naturwissenschaftliche Technik  
und Strahlenschutzbeauftragter  
der Fachhochschule Ostfriesland  
2970 Emden

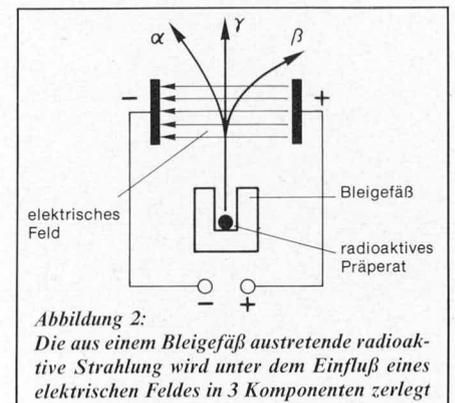
der Elektronen eines Neutralatoms wird ein chemisches Element charakterisiert (z. B.  $Z = 1$ : Wasserstoff,  $Z = 53$ : Jod,  $Z = 55$ : Cäsium). Die Summe aus Protonenzahl Z und Neutronenzahl N heißt Massenzahl A. Es gilt also  $A = N + Z$ .

Kerne mit gleicher Kernladungszahl Z, aber verschiedener Neutronenzahl N, sind chemisch nicht unterscheidbar und heißen Isotope. Die Massenzahl A ist bei Isotopen entweder links oben oder aber als Zahl hinter dem chemischen Symbol getrennt durch einen Gedankenstrich angegeben. So bedeutet z. B.  $^{137}\text{Cs}$  bzw. Cs-137 das Cäsium-Isotop mit 55 Protonen und 82 Neutronen.

Innerhalb eines Elements gibt es stabile, nicht radioaktive und instabile, radioaktive Isotope. So ist z. B. das Cäsium Isotop Cäsium-133 (Cs-133) stabil, während das Cäsium Isotop Cäsium-137 sowohl Beta- als auch Gamma-Strahlung emittiert und somit radioaktiv ist. Radioaktive Isotope heißen auch Radionuklide.

## 2. Radioaktiver Zerfall

Radioaktivität ist keineswegs ein Phänomen der Neuzeit und damit keine Erfindung moderner Technik und Wissenschaft. Vielmehr gibt es radioaktive Strahlen seit dem Schöpfungstermin des Weltalls. Entdeckt wurde die Radioaktivität 1896 durch den französischen Physiker Becquerel, der Untersuchungen an Uransalzen durchführte, die die Eigenschaft haben, permanent unsichtbare Strahlung auszusenden. Man lernte schnell, daß die emittierte Strahlung aus drei Komponenten besteht, die sich in elektromagnetischen Feldern verschieden verhalten (Abb. 2). Alpha- und Beta-Strahlung werden in einem elektrischen Feld in verschiedene Richtungen abge-



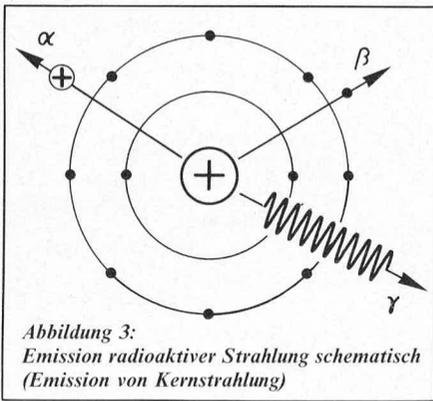


Abbildung 3:  
Emission radioaktiver Strahlung schematisch  
(Emission von Kernstrahlung)

lenkt, während Gamma-Strahlung unbeeinflusst bleibt. Die genannten Strahlungskomponenten werden in jedem Falle aus den Kernen emittiert, weshalb man auch von Kernstrahlung spricht (Abb. 3).

### 2.1 Zerfallsgesetz

Radioaktive Strahlenquellen bestehen aus Substanzen, die sich durch Kernprozesse spontan — d. h. ohne äußere Einwirkung — durch Emission von Strahlung umwandeln. Am häufigsten tritt bei radioaktiven Umwandlungen (Zerfällen) Alpha-, Beta- und Gammastrahlung auf. Bei der Alpha-Strahlung handelt es sich um Heliumkerne, die zweifach positiv geladen sind und die Massenzahl  $A = 4$  besitzen. Die Beta-Strahlung besteht aus schnell bewegten Elektronen, die einfach negativ geladen sind und deren Masse etwa  $1/2000$  der Masse eines Protons ist. Bei der Gamma-Strahlung handelt es sich um elektromagnetische Wellenstrahlung, die keine elektrische Ladung trägt und daher in elektrischen oder magnetischen Feldern nicht abgelenkt wird (Abb. 2).

In vielen Fällen verhält sich die Gamma-Strahlung wie eine Teilchen-Strahlung. Daher spricht man auch von Gammaquanten ( $\gamma$ -Quanten). Der Teilchencharakter der elektromagnetischen Wellenstrahlung (Quanten) tritt um so mehr in Erscheinung, je kleiner die Wellenlänge (je höher die Frequenz) der Wellenstrahlung ist. Daher wird bei der Röntgen- und Gamma-Strahlung im weiteren der Teilchencharakter im wesentlichen zu berücksichtigen sein.

Wenn ein Atomkern ein Alpha-Teilchen emittiert, vermindert sich seine Massenzahl  $A$  um 4 und seine positive Ladung um 2 Elementarladungen, so daß die Kernladungszahl  $Z$  um 2 erniedrigt wird. Es entsteht ein neuer Kern, der zu einem anderen chemischen Element gehört als der Ausgangskern. Die Emission eines Beta-Teilchens führt zwar zu keiner Änderung der Massenzahl  $A$ , wohl aber zur Erhöhung der Kernladungszahl  $Z$  um 1. Auch hier entsteht ein Kern eines anderen chemischen Elements verglichen mit dem Ausgangskern. Bei der Emission von Gamma-Strahlung wird weder die Massenzahl noch die Ladung des Ausgangskerns geändert. Bei der Emission aller Strahlungskomponenten ändert sich daher der Charakter des Ausgangsatomkerns ganz wesentlich. Diesen Vorgang nennt man radioaktiven Zerfall. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß beim radioaktiven Zerfall aus Atomkernen überschüssige Energie abgegeben wird.

Die Stärke einer radioaktiven Quelle wird durch ihre radiologische Aktivität oder auch Aktivität gekennzeichnet. Unter der Aktivität  $A$  eines Radionuklids versteht man den Quotienten aus der Zahl der Zerfallsakte  $dn$  und der Zeit  $dt$ , in der diese Zerfallsakte erfolgen:

$$A = - \frac{dn}{dt}$$

Als Einheit für die Aktivität ist heute das

Bequerel (Bq) festgelegt. Ein Bq ist ein Zerfallsakt pro Sekunde. Die früher gebräuchliche und heute nicht mehr zulässige Aktivitätseinheit Curie (Ci) liegt vor, wenn bei der betreffenden Substanz  $3,7 \cdot 10^{10}$  Zerfallsakte je Sekunde erfolgen. Es gilt also  $1 \text{ Ci} = 37 \cdot \text{GBq} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$ . Dies entspricht etwa der Aktivität von 1 g Radium, das die ersten stärkeren radioaktiven Quellen lieferte. In der Praxis verwendet man radioaktive Quellen, deren Aktivitäten zwischen  $10^4$  und  $10^{15}$  Bq liegen.

Die experimentelle Erfahrung zeigt, daß die Strahlungsabgabe einer bestimmten Ausgangssubstanz radioaktiver Nuklide mit fortlaufender Zeit abnimmt. Diese Abnahme verläuft für verschiedene Nuklide unterschiedlich schnell.

Die Anzahl  $n$  der Kerne, aus denen eine radioaktive Substanz besteht, nimmt durch den Zerfall während der Zeit  $t$  um den Betrag  $dn$  ab. Dabei findet man, daß die relative Abnahme

$\frac{dn}{n} / dt$  konstant ist:

$$\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt} = -\lambda,$$

wobei  $\lambda$  Zerfallskonstante genannt wird. Dies ist das Zerfallsgesetz in differentieller Form.

Die Zerfallskonstanten  $\lambda$  sind für unterschiedliche radioaktive Substanzen (Isotope) verschieden. Aus obiger Gleichung folgt durch Integration:

$$n = n_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{Zerfallsgesetz in integraler Form})$$

Diese Gleichung besagt, daß die Zahl  $n$  der radioaktiven Kerne von der Anfangszahl  $n_0$  zu Beginn der Beobachtung exponentiell abnimmt. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 4a für zwei radioaktive Isotope mit verschiedenen Zerfallskonstanten dargestellt. In Abb. 4b ist eine halblogarithmische Darstellung gewählt, die für die Praxis handlicher ist. Gegenüber der Darstellung in Abb. 4a sind in Abb. 4b auch kleinere Aktivitäten viel genauer ablesbar.

$n$  ist die zur Zeit  $t$  mit  $t > 0$  noch vorhandene Zahl unzerfallener Kerne, wobei zum Zeitpunkt  $t = 0$  (Beobachtungsbeginn)  $n_0$  unzerfallene Kerne vorliegen.

In der Praxis wird die Charakterisierung radioaktiver Nuklide vielfach durch die sogenannte Halbwertszeit  $T_{1/2}$  vorgezogen. Unter der Halbwertszeit versteht man die Zeit, in der die Hälfte einer zum Zeitpunkt  $t = 0$  (Beobachtungsbeginn) vorliegende Zahl radioaktiver Kerne zerfallen ist. Für den Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit  $T_{1/2}$  und der Zerfallskonstanten  $\lambda$  gilt

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{oder} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Sowohl die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  als auch die Zerfallskonstante  $\lambda$  sind für jede Radionuklidart ganz charakteristische und von der Vorgeschichte unabhängige Konstanten, die die Nuklide eindeutig kennzeichnen. Die Halbwertszeit und die Zerfallskonstante sind durch äußere Maßnahmen, wie z. B. extreme Drücke oder hohe Temperaturen, nicht einflußbar. Die Halbwertszeiten radioaktiver Nuklide reichen von etwa  $10^{-8}$  s bis zu  $10^{18}$  a.

Es kann nicht vorher gesagt werden, welche Kerne in einer vorgegebenen Zeit zerfallen. Zulässig ist lediglich die Aussage, daß innerhalb der Halbwertszeit die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Kerne zerfällt. Es ist unmöglich, den radioaktiven Zerfall eines einzelnen Kerns gesetzmäßig zu erfassen und

den Zeitpunkt seines Zerfalls vorauszusagen. Die radioaktiven Umwandlungen gehorchen den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der Statistik. Nach Ablauf von 10 Halbwertszeiten beträgt die Aktivität einer vorgegebenen Nuklidsorte noch etwa  $1/1000$  der Anfangsaktivität. Für das Isotop Co-60 ist dieser Sachverhalt aus Abb. 4b gut zu entnehmen — im Gegensatz zur Darstellung gemäß Abb. 4a.

### 2.2 Natürliche Radioaktivität

Bei der Elementsynthese — beginnend etwa vor 15 Mrd. Jahren — ist eine große Anzahl radioaktiver Kerne entstanden. Dies trifft auch zu auf die Entstehung der Elemente dieser Erde. Die dabei entstandenen radioaktiven Isotope haben nur in den wenigsten Fällen wegen ihrer langen Halbwertszeit bis heute überlebt (primordiale Kerne). Diese primordialen radioaktiven Kerne sind relativ schwere Kerne. Dazu gehören Kalium-40 bzw. K-40 ( $e^-$ ,  $e^+$ ;  $1,2 \cdot 10^9$  a), Rubidium-87 ( $e^-$ ;  $4,9 \cdot 10^{10}$  a), Samarium-147 ( $\alpha$ ;  $10^{11}$  a) und Rhenium-187 ( $e^-$ ;  $5 \cdot 10^{10}$  a). In Klammern sind die Zerfallsart ( $e^-$ ,  $e^+$  oder  $\alpha$ -Zerfall) und die Halbwertszeit angegeben.

Die schwersten dieser primordialen radioaktiven Nuklide sind Thorium-232 (Th-232), Uran-235 (U-235) und Uran-238 (U-238). Die drei zuletzt genannten Nuklide bilden jeweils die Muttersubstanz einer ganzen Zerfallsreihe, bei der die Folgeprodukte ebenfalls radioaktiv sind und durch abwechselnde Alpha- oder Beta-Zerfälle weiter umgewandelt werden, bis nach 10 bis 15 solcher Zerfallsakte jeweils als Endprodukt ein stabiles Bleisotop entsteht. Entsprechend den drei genannten langlebigen Muttersubstanzen, deren Halbwertszeiten in der oben genannten Reihenfolge  $1,4 \cdot 10^{10}$  a,  $7 \cdot 10^8$  a und  $4,5 \cdot 10^9$  a betragen, gibt es heute drei natürliche Zerfallsreihen. Außer diesen primären Radionukliden entstehen unter der Einwirkung der energiereichen Höhenstrahlung sekundäre natürliche radioaktive Nuklide. Die wichtigsten Vertreter sind C-14 (Kohlenstoff-14) und H-3 (Wasserstoff-3). C-14 besitzt eine Halbwertszeit von 5730 a, während diejenige von H-3 etwa 12,4 a beträgt. Beide Nuklide sind Beta-Strahler. Diese Nuklide wären längst zerfallen, wenn sie nicht permanent nachproduziert würden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß alle natürlich vorkommenden radioaktiven Nuklide Alpha-, Beta- oder Gamma-Strahlung emittieren. Dementsprechend sind diese Strahlungskomponenten auch von entsprechender Bedeutung.

### 2.3 Künstliche Radioaktivität

Durch Kernumwandlungen lassen sich zahlreiche in der Natur nicht vorkommende Radionuklide herstellen. Heute kennt man etwa 60 natürliche Radionuklide, dagegen aber über 1500 künstlich erzeugte radioaktive Nuklide. Die künstlich erzeugten radioaktiven Nuklide werden meistens durch Bestrahlung mit Neutronen im Kernreaktor gewonnen. Dabei werden stabile Isotope durch den Einfall von Neutronen zu instabilen radioaktiven Isotopen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, radioaktive Spaltprodukte aus den Brennelementen des Reaktors abzutrennen. Diese Spaltprodukte sind überwiegend Beta- und Gamma-Strahler. In Sonderfällen setzt man auch Beschleuniger ein, um radioaktive Nuklide zu erzeugen. Hier ist die Ausbeute jedoch entsprechend niedriger, so daß die so hergestellten radioaktiven Nuklide sehr teuer sind.

Die künstlich erzeugten radioaktiven Nuklide sind meistens Beta- ( $e^-$ ,  $e^+$ ), Alpha- und Gamma-Strahler. In Einzelfällen sind durch geeignete Prozeßabläufe auch Nuklide herstellbar, die Neutronen abstrahlen und somit

als Neutronenquelle dienen. Für die weiteren Betrachtungen ist es daher zweckmäßig, die verschiedenen radioaktiven Strahlungskomponenten wie folgt einzuteilen:

1. Partikel mit Masse und mit Ladung
2. Partikel mit Masse und ohne Ladung
3. Partikel ohne Masse und ohne Ladung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß alle Strahlungspartikel Energieträger sind. In diesem Sinne kann energiereiche Strahlung auch als Transport von elementaren Energieträgern betrachtet werden, wobei jeder Energieträger ein Energiequant- bzw. eine Energieportion transportiert. Für die elektrisch geladene und neutrale Teilchenstrahlung ist die Strahlungsenergie durch die kinetische Energie (Bewegungsenergie) der Strahlungsteilchen gegeben. Die Größe der Energie eines Quants ist gleich dem Produkt aus  $h \cdot \nu$ , wobei  $h$  die Plancksche Konstante und  $\nu$  die Frequenz der Strahlung ist. Je kurzwelliger (höherfrequent) die Strahlung ist, desto größer ist damit die Energie der diese Strahlung repräsentierenden Quants.

Wie diese Partikel in Materie ihre Energie verlieren und welche Prozesse dabei im Vordergrund stehen, wird nachfolgend genauer betrachtet.

### 3. Wechselwirkung von Kernstrahlung mit Materie

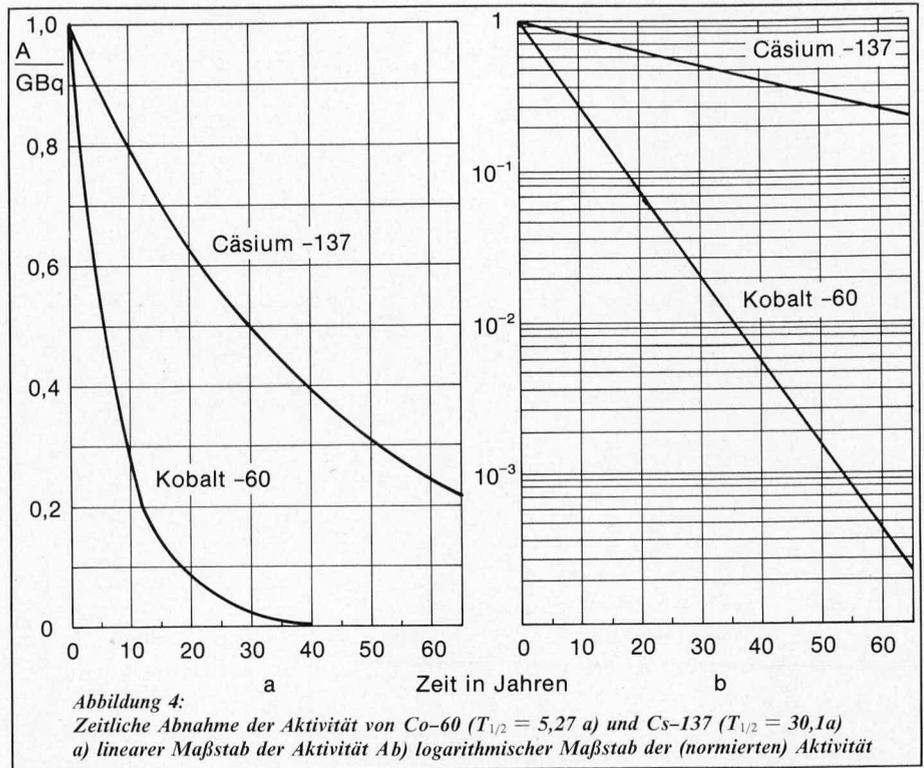
Kernstrahlung ist in der Regel schädlich, andererseits jedoch in vielen Fällen nützlich. Für die Menschen ist sie unmittelbar wie z. B. Licht nicht wahrnehmbar. Daher bedurfte es der Erfindung bzw. Entwicklung von Strahlungsdetektoren (Nachweisgeräte), in deren Materie die Kernstrahlung wenigstens einen Teil ihrer Energie abgibt. Dadurch wird Kernstrahlung meßbar. Für die Auswahl geeigneter Detektoren und für das Verständnis der biologischen Wirkung radioaktiver Strahlung sind die nachfolgenden Ausführungen von grundlegender Bedeutung.

#### 3.1 Wechselwirkung geladener Teilchenstrahlung mit Materie

Die wichtigsten Vertreter dieses Strahlungstyps sind die Alpha- und Beta-Strahlung. Wie schon erwähnt, besteht die Alphastrahlung aus Helium-Kernen ( $\text{He}^{++}$ ), während die Beta-Strahlung ( $e^-$ ) aus schnellen und damit energiereichen Elektronen besteht. Da die Masse der Betateilchen etwa nur 1/8000 derjenigen der Alphateilchen beträgt, besitzen bei gleicher Energie Betateilchen eine erheblich größere Geschwindigkeit als Alphateilchen. Zu diesem Strahlungstyp gehören auch Protonen (Kernbausteine) und Positronen (positiv geladene Elektronen;  $e^+$ ).

Beim Alphazerfall wird aus dem Kern ein Teilchen emittiert, das nur aus Kernbausteinen (Protonen und Neutronen) besteht. Bei der Emission eines Elektrons ( $e^-$ ) oder eines Positrons ( $e^+$ ) werden jedoch Teilchen emittiert, die primär im Kern nicht vorhanden sind. Den  $e^-$ -Zerfall kann man sich so vorstellen, daß im Kern ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umgewandelt wird. Während das Proton im Kern verbleibt, wird das kernfremde Teilchen Elektron emittiert. Entsprechend wird beim  $e^+$ -Zerfall im Kern ein Proton in ein Neutron und ein Positron umgewandelt, wobei das kernfremde Positron ebenfalls den Kern verläßt.  $e^-$ -Zerfall und  $e^+$ -Zerfall werden häufig auch unter dem Begriff Beta-Zerfall ( $\beta$ -Zerfall) zusammengefaßt, so daß man unter  $\beta$ -Strahlung dann auch sowohl  $e^-$ -Strahlung als auch  $e^+$ -Strahlung versteht.

In Abb. 5 sind die möglichen Wechselwirkungsprozesse von Beta-Strahlung ( $e^-$ - und  $e^+$ -Strahlung) mit Materie dargestellt. Bei der Anregung (Abb. 5a) werden durch das schnell-



le Betateilchen Hüllenelektronen in höhere Energiezustände gehoben, wobei letztere aber im Atomverband verbleiben. Nach etwa  $10^{-8} \text{ s}$  verlassen die Hüllenelektronen den höheren Energiezustand unter Emission von Wellenstrahlung im sichtbaren oder ultravioletten Bereich und kehren in den Grundzustand zurück. Die Rückkehr in den Grundzustand kann auch strahlungslos unter Erwärmung des Absorbermaterials erfolgen. In jedem Falle gehen diese Energiebeiträge dem Betateilchen verloren, so daß es abgebremst wird. Bei der Ionisierung (Abb. 5b) werden durch das vorbeifliegende Betateilchen Hüllenelektronen aus dem Atomverband freigesetzt. Nach jedem Ionisierungsakt liegen ein einfach geladenes negatives Elektron und ein einfach

positiv geladener Atomrumpf — ein positives Ion — vor. Ein solches Ladungsträgerpaar heißt Ionenpaar.

Im Mittel werden zur Erzeugung eines Ionenpaares in Gasen 33 eV (Elektron-Volt) benötigt. 1 Elektronvolt (1 eV) ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es die Spannung von 1 Volt durchfällt. Ein Elektron mit der Energie von 1 MeV erzeugt also längs seiner Teilchenbahn bis zu 30 000 Ionenpaare.

Außerdem können schnelle Betateilchen im starken elektrischen Feld des Kernes gebremst werden (Abb. 5c). Dadurch wird ein sogenanntes Bremsstrahlungsquant abgestrahlt. Die Energie des schnellen Betateilchens reduziert sich dabei um diejenige des Bremsquants. Die Wechselwirkungsprozesse

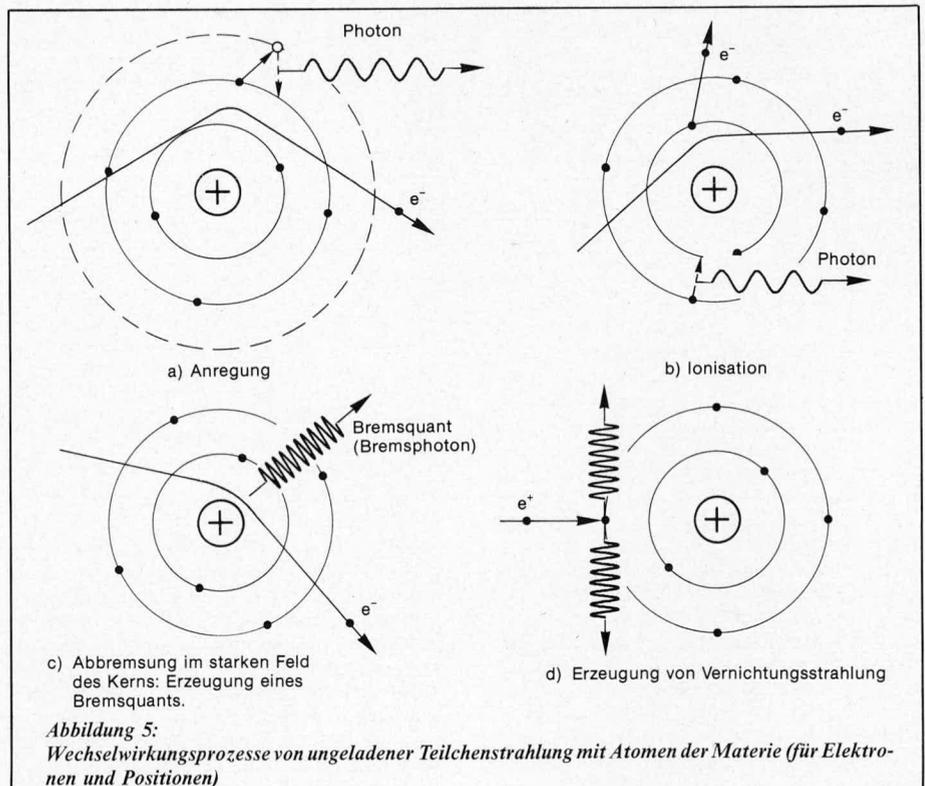
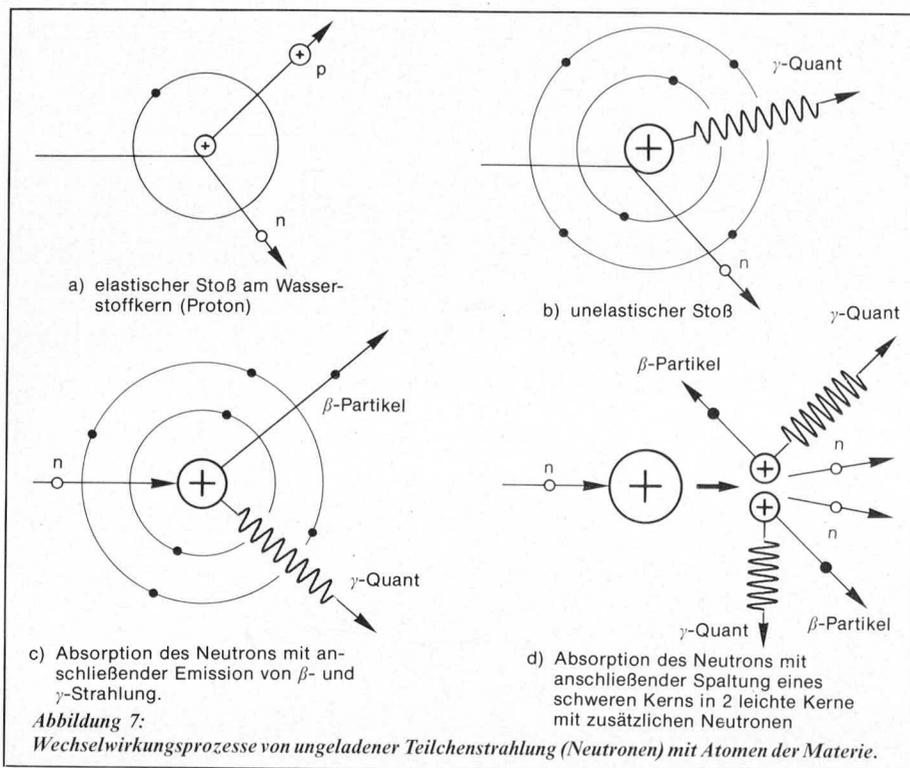


Abbildung 5: Wechselwirkungsprozesse von ungeladener Teilchenstrahlung mit Atomen der Materie (für Elektronen und Positronen)



von Bremsquanten mit Materie werden später besprochen. Dieser Prozeß der Entstehung von Bremsstrahlung wird in der Röntgenröhre zur Erzeugung von Röntgenstrahlung technisch angewandt. Von Bedeutung sind die Bremsstrahlungsverluste nur für leichte Teilchen ( $e^-$  und  $e^+$ -Strahlung), nicht dagegen für schwere Teilchen (Alpha- und Protonenstrahlung).

Bei der Positronenstrahlung tritt noch ein Sonderfall auf (Abb. 5d). Sobald Positronen wie Elektronen durch Anregungs- und Ionisierungsakte sowie durch Bremsstrahlungsverluste abgebremst und zur Ruhe gekommen sind, reagieren sie am Ende ihrer Bahn stets mit einem Elektron der Materie, wobei die beiden Teilchenmassen vernichtet werden. Dabei entstehen zwei Gammaquanten mit der Gesamtenergie von etwa 1 MeV. Die so entstehende Strahlung heißt Vernichtungsstrahlung. Ein Elektron-Positron-Paar wird vernichtet und in Energie umgewandelt. Auf das Wechselwirkungsverhalten dieser Strahlung wird ebenfalls später näher eingegangen.

Da energiereiche geladene Teilchenstrahlung direkt dazu in der Lage ist, längs ihrer Bahnen Ladungsträgerpaare (Ionenpaare) zu erzeugen, wird sie auch als direkt ionisierende Strahlung bezeichnet.

In Abb. 6 ist das Ergebnis der bisherigen Betrachtungen noch einmal in einer Absorbersubstanz aufgezeigt. Geladene Teilchenstrahlung wird längs ihrer Bahn abgebremst, wobei auf der Flugbahn eine Ionenpaarspur entsteht. Die Ionisierungsdichte nimmt mit abnehmender Teilchengeschwindigkeit zu. Bei gleicher Energie haben die schweren Teilchen (Alpha-Teilchen) eine kleinere Fluggeschwindigkeit und wegen der damit verbundenen größeren Ionisierungsdichte wesentlich kürzere Flugbahnen bzw. Reichweiten in Materie als die schneller fliegenden leichten Teilchen (Beta-Teilchen) von gleicher Energie. Dies wird in Abb. 6 dadurch zum Ausdruck gebracht, daß die Zahl der Ionenpaare gegen Ende der Flugbahn immer dichter wird. Da bei Alphastrahlung die Bremsstrahlung und damit massive Ablenkung aus der ursprünglichen Bahnrichtung keine Rolle spielt, verlaufen die Alpha-Teilchen gradlinig, während diejenigen der Beta-Teilchen krummlinig sind. Außerdem ist

erkennbar, daß die Ionisierungsdichte bei Beta-Teilchen in der Anfangsphase geringer ist und erst zum Bahnenende hin dichter wird.

### 3.2 Wechselwirkung ungeladener Teilchenstrahlung mit Materie

Zu den wichtigsten Partikeln dieses Strahlungstyps gehören die Neutronen. Diese werden vorzugsweise in Kernreaktoren und anderen Neutronenquellen erzeugt. Neutronen sind primär im Kern vorhanden.

Die Wechselwirkungsprozesse von ungeladener Neutronenstrahlung sind in Abb. 7 dargestellt. Neutronen können im Gegensatz zu geladener Teilchenstrahlung nur mit Kernen reagieren, wobei elastische und unelastische Stöße sowie Absorption auftreten.

Bei elastischen Stößen übernimmt der getroffene Atomkern einen Teil der Neutronenenergie, wobei das Neutron aus seiner Bahn abgelenkt wird (Abb. 7a). Der angestoßene Atomkern verliert seine Energie wie bereits oben besprochen durch Ionisierung und Anregung. Je größer die Masse der Absorberkerne ist, desto geringer ist der Energieverlust eines Neutrons bei einem solchen Stoß. Während bei Wasserstoffkernen, die aus Protonen bestehen, bei einem Stoß im Extremfall die gesamte Energie eines Neutrons übernommen wird, verliert ein Neutron bei einem Stoß mit einem schweren Kern — z. B. bei einem Bleikern — nur knapp 1% seiner Energie. Deshalb sind bei Materialien mit großer Kernladungszahl  $Z$  wesentlich mehr Stöße und größere Flugstrecken erforderlich, bis die Neutronenenergie auf einen bestimmten Bruchteil der Anfangsenergie reduziert worden ist, so daß der Abschirmungseffekt gegen Neutronenstrahlung am besten mit Materialien erreicht wird, deren Kernmasse niedrig ist (Abb. 7a).

Wenn Neutronen unelastische Stöße mit Kernen ausführen (Abb. 7b), verlieren sie einen Teil ihrer Energie, die zur Anregung der Atomkerne verbraucht wird, so daß der Energieverlust insbesondere bei schweren Kernen hier größer ist als bei elastischen Stößen. Der angeregte Kern geht anschließend unmittelbar unter Emission von Gammaquanten in den Grundzustand über. Die Wechselwirkung von  $\gamma$ -Strahlung mit Materie wird unter 3.3 besprochen.

Einer der wichtigsten Wechselwirkungsprozesse von Neutronen mit Materie liegt dann vor, wenn die Neutronen absorbiert werden. Dadurch werden Neutronen in Kernen zusätzlich angelagert. Bei diesem Absorptionsprozeß entstehen in der Regel angeregte Atomkerne (radioaktive Nuklide), die anschließend durch Emission von Gammaquanten, Beta-Strahlung oder beider Strahlungskomponenten in den Grundzustand übergehen. Die Beta-Strahlung wird wie bereits besprochen in Materie abgebremst, während zu den Wechselwirkungsprozessen der Gammastrahlung noch nachfolgend Näheres ausgeführt wird. Neutronenstrahlung wird also erst über eine Kernumwandlung nachweisbar, und zwar über Beta- bzw. Gamma-Strahlung. Deshalb spricht man bei Neutronenstrahlung auch von indirekt ionisierender Strahlung. Der entsprechende Wechselwirkungsprozeß ist in Abb. 7c schematisch dargestellt. Schließlich gibt es bei Neutronenstrahlung noch die Möglichkeit der Absorption mit anschließender Kernspaltung. Dieser Prozeß spielt eine wichtige Rolle bei der Kernenergiegewinnung und wird hier nicht weiter besprochen (Abb. 7d).

### 3.3 Wechselwirkung von Quantenstrahlung mit Materie

Hier handelt es sich um elektromagnetische Wellenstrahlung ( $\gamma$ -Strahlung), die sich ähnlich wie Lichtstrahlung verhält, jedoch wesentlich höhere Energien trägt. Die Röntgenstrahlung gehört ebenfalls zu diesem Strahlungstyp, liegt jedoch energetisch gesehen unterhalb der Gamma-Strahlung.

Die möglichen Wechselwirkungsprozesse von Quantenstrahlung mit Materie sind in Abb. 8 dargestellt. Gammaquanten können ihre gesamte Energie auf Elektronen der Hülle übertragen, die dadurch aus dem Atomverband abgelöst werden und die Gesamtenergie des Gammaquants abzüglich ihrer eigenen Bindungsenergie an den Atomverband übernehmen. Dieser Prozeß heißt Fotoeffekt. Bei diesem Prozeß ist die Wechselwirkung von Quantenstrahlung mit Materie auf diejenige von schnellen Elektronen zurückgeführt. Eine schematische Darstellung dieses Prozesses zeigt Abb. 8a.

Eine andere Möglichkeit des Energieverlusts von Gammaquanten in Materie besteht darin, daß die Gammaquanten nur einen Teil ihrer Energie an sogenannte quasifreie Elektronen — das sind die äußersten Elektronen eines Atoms — abgeben. Der Rest der Energie bleibt als Quant erhalten (Abb. 8b). Dieser Effekt heißt Comptoneffekt und die dabei freigesetzten Elektronen Comptonelektronen. Die Energie der Elektronen wird wie bisher besprochen an Materie abgegeben. Das resultierende Comptonquant mit geringerer Energie kann seinerseits seine Energie entweder wieder durch Fotoeffekt ganz oder durch einen weiteren Comptoneffekt teilweise an die Materie abgeben. Es besteht allerdings auch die Möglichkeit, daß es aus der Materie entweicht. Da die Wahrscheinlichkeit für Fotoeffekt mit abnehmender Energie der Gammaquanten zunimmt, ist dementsprechend die Chance groß, daß ein Comptonquant seinerseits Fotoeffekt macht und dadurch eliminiert wird. Die Foto- und Comptonelektronen verlieren ihre Energie in Materie durch die Wechselwirkungsprozesse, die schon oben beschrieben wurden, d. h. es werden letztlich entsprechend der Energie der Quanten Ionenpaare erzeugt.

Gammaquanten mit Energien oberhalb von etwa 1,02 MeV können ihre Gesamtenergie durch den Paar-Bildungseffekt verlieren. Dabei entsteht ein Elektronpositronpaar (Abb. 8c). Die 1,02 MeV überschreitende

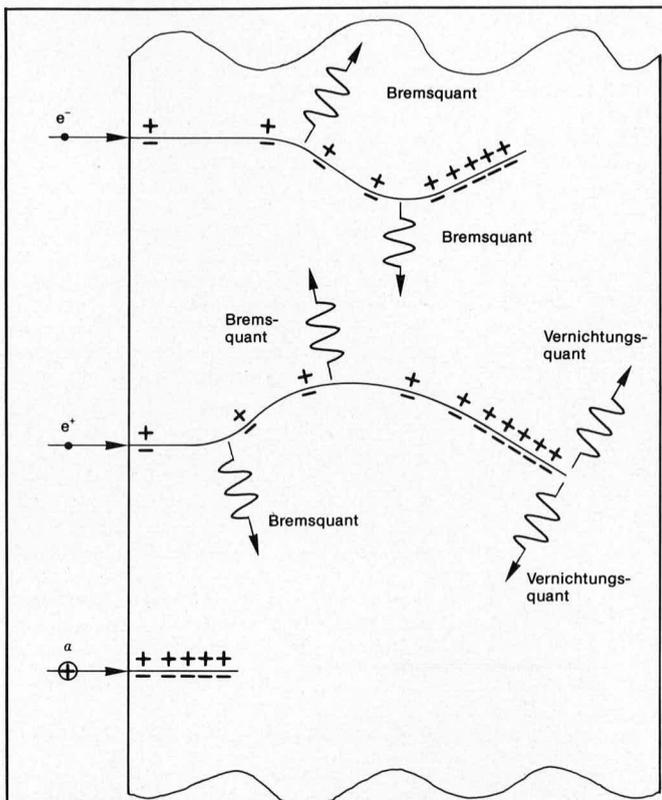


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wechselwirkung direkt ionisierender geladener Teilchenstrahlung in Absorbermaterie. ( $\pm \triangleq$  Ionenpaar)

Quantenenergie wird von Elektron und Positron als Bewegungsenergie übernommen. Diese beiden Teilchen verlieren ihre Energie durch die bereits besprochenen Wechselwirkungsprozesse. Das Gammaquant wird also in ein Elektronpositronpaar umgewandelt. Dieser Effekt der Erzeugung eines Elektron-Positron-Paars aus einem  $\gamma$ -Quant ist die Umkehrung des unter 3.1 (Abb. 5d) besprochenen Effekts der Vernichtung eines Elektron-Positron-Paars zugunsten der Erzeugung von zwei  $\gamma$ -Quanten.

Auch die Gammastrahlung gehört zur Gruppe der indirekt ionisierenden Strahlung, da die meßbaren Ionenpaare nicht direkt von Gammaquanten, sondern erst durch von den Gammaquanten sekundär erzeugten schnellen Foto- und Comptonelektronen erzeugt werden.

Im Prinzip kann bei Gammaquanten noch gemäß Abb. 8d der sogenannte Kernfotoeffekt auftreten, bei dem ein oder mehrere Neukleonen (Neutronen, Protonen, Alpha-Teilchen) aus einem Kern herausgeschlagen werden. Der resultierende Restkern ist im Regelfall radioaktiv. Dieser Prozeß wird erst merkbar bei relativ großen Gammaenergien oberhalb von etwa 10 MeV. Da Gammaenergien dieser Größenordnung nur in Sonderfällen auftreten (große Beschleuniger), wird dieser Effekt hier nicht weiterverfolgt.

Die in Abb. 8 dargestellten Wechselwirkungsprozesse hängen von mehreren Parametern ab, und zwar im wesentlichen von der Energie der Quanten und der Art der bestrahlten Materie. Bei niedrigen Energien herrscht der Fotoeffekt vor. Dieser nimmt mit zunehmender Quantenenergie ab. Der Com-

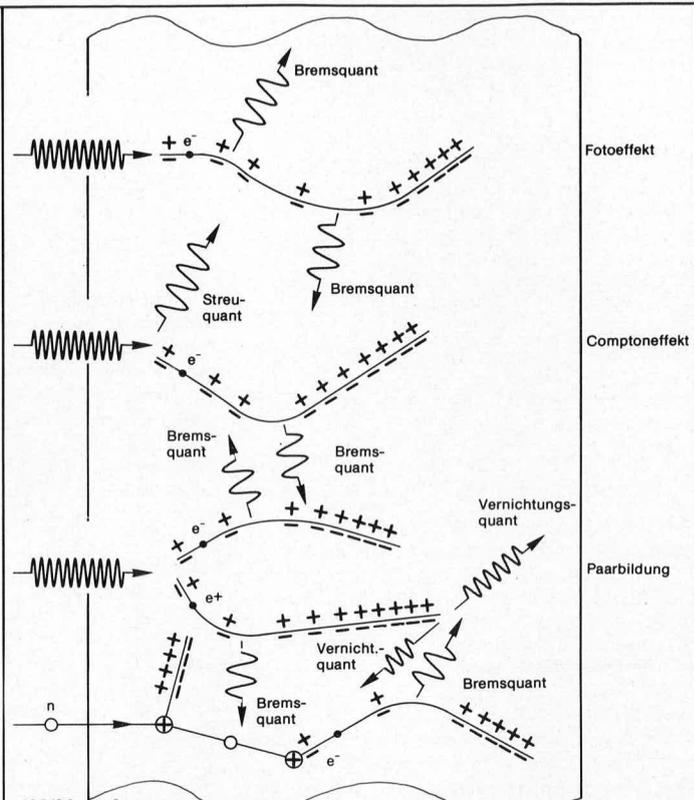


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Wechselwirkung indirekt ionisierender Strahlung (Gamma- und Neutronenstrahlung) in Absorbermaterie ( $\pm \triangleq$  Ionenpaar)

toneffekt überwiegt im Energiebereich um 1 MeV, während der Paarbildungseffekt erst bei Energien ab 1,02 MeV einsetzt, aber erst oberhalb von 5 MeV merkbar wird.

Für alle Wechselwirkungsprozesse von Quantenstrahlung mit Materie gilt, daß diese mit wachsender Kernladungszahl  $Z$  des Absorbermaterials zunehmen. Die Wahrscheinlichkeit für Fotoeffekt ist proportional zu  $Z^5$ , die für Comptoneffekt proportional zu  $Z$  und diejenige für Paarbildung proportional zu  $Z^2$ . Daher wird für die Abschirmung von Quantenstrahlung vorzugsweise Blei verwendet.

In Abb. 9 sind die besprochenen Wechselwirkungsprozesse für nicht direkt ionisierende Strahlung (Gammastrahlung und Neutronenstrahlung) noch einmal in einer Absorbersubstanz aufgezeigt. Für die Gammastrahlung ist zunächst der Fotoeffekt dargestellt. Das Gammaquant gibt seine gesamte Energie an ein Elektron ab und verschwindet, während das Elektron durch Ionisationsverluste Ionenpaare erzeugt und im Absorbermaterial verbleibt. Außerdem ist der Fall dargestellt, daß das Gammaquant einen Teil seiner Energie an ein Comptonelektron abgibt, das ebenfalls durch Ionisationsverluste im Absorbermaterial verbleibt, während das Streuquant mit geringerer Energie aus dem Absorbermaterial entweichen kann. Schließlich ist noch die Paarbildung skizziert. Das  $\gamma$ -Quant wird eliminiert, wobei gleichzeitig ein Elektron-Positron-Paar erzeugt wird. Elektron und Positron verlieren ihre Energie durch Ionisation und kommen zur Ruhe. Das zur Ruhe gekommene Positron reagiert mit einem Elektron, wobei zwei Vernichtungsquanten erzeugt werden, die ihrerseits wieder durch Foto- und Compton-Effekt mit der Materie in Wechselwirkung treten.

Für Neutronen ist skizziert, daß das schnelle Neutron zunächst einen elastischen Stoß mit einem Kern — z. B. mit dem Kern eines Wasserstoffatoms — vollführt hat und dabei einen Teil seiner Energie auf diesen übertragen hat. Das Proton (Wasserstoffkern) kommt ebenfalls durch Ionisation zur Ruhe,

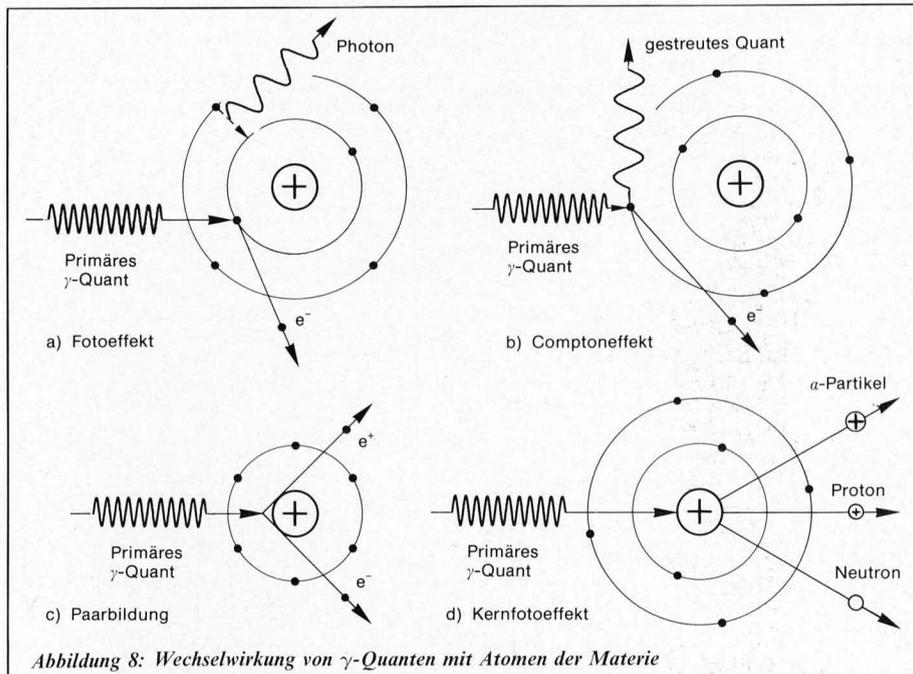


Abbildung 8: Wechselwirkung von  $\gamma$ -Quanten mit Atomen der Materie

während das Neutron im weiteren von einem Kern eingefangen wurde und diesen aktiviert hat, so daß ein schnelles Elektron emittiert wurde. Dieses kommt durch Ionisation zu Ruhe.

### 3.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß sowohl bei der direkt als auch bei der indirekt ionisierenden Strahlung letztlich immer eine Vielzahl von Ionenpaaren in der Absorbersubstanz erzeugt wird, wobei die Zahl der erzeugten Ionenpaare proportional zur Energie der jeweiligen Strahlungskomponente ist. Einerseits wird die so erzeugte Ladung für Meßzwecke (Detektortechnik) benutzt und zum anderen stellt diese Ladung auf engstem Raum ein wesentliches Gefährdungspotential im Hinblick auf die biologische Wirkung der Strahlung dar.

## 4. Strahlendosimetrie

Die Angabe der Aktivität einer Quelle läßt lediglich eine Aussage darüber zu, wieviele Zerfälle radioaktiver Kerne in einer bestimmten Zeit erfolgen. Die zahlenmäßige Erfassung der Wirkung der Strahlung ist mit der Aktivität und deren Einheit nicht möglich. Dazu wird der Begriff der Dosis eingeführt. Bei der Definition der Strahlendosis macht man von den Strahlenwirkungen Gebrauch, die unter 3. bereits ausführlich besprochen wurden. Als besonders geeignet haben sich zwei Wirkungen erwiesen. Entsprechend erhält man zwei verschiedene Dosisbegriffe.

### 4.1 Ionendosis

Bei der Ionendosis macht man von der ionisierenden Wirkung der Strahlung Gebrauch. Als Bezugsmaterie benutzt man trockene Luft von 0°C bei einem Druck von 1013 hPa. Die Ionisierung der bestrahlten Luft dient als meßbare Strahlenwirkung. Die im Luftvolumen erzeugten Ionenpaare werden gemessen und zur zahlenmäßigen Beschreibung der für ihre Entstehung verantwortlichen Strahlung benutzt. Die auf diese Weise gemessene physikalische Größe heißt Ionendosis, für die folgende Definition gilt:

Unter der Ionendosis  $J$  einer ionisierenden Strahlung versteht man den Quotienten aus der Ladung der von der Strahlung durch Ionisation in trockener Luft von 0°C und 1013 hPa erzeugten Ionen eines Vorzeichens und der Masse der durchstrahlten Substanz:

$$J = \frac{dQ}{dm}$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich als Einheit der Ionendosis Coulomb durch Kilogramm ( $C \cdot kg^{-1}$ ).

Für die nicht mehr zulässige Einheit Röntgen (R) der Ionendosis gilt folgende Umrechnung:

$$1 R = 258 \mu C \cdot kg^{-1} = 258 \cdot 10^{-6} C \cdot kg^{-1} \text{ oder } 1 C \cdot kg^{-1} = 3875,97 R$$

### 4.2 Energiedosis

Die Definition der Energiedosis beruht auf der Energieabsorption, die beim Durchgang von Strahlung durch Materie erfolgt. Die von Radionukliden ausgehende Strahlung stellt einen Energiestrom dar. Bei der Wechselwirkung von Strahlung mit Materie gibt Strahlung diese Energie an die Materie ab. Daher ist es sinnvoll, die absorbierte Energie in der Materie für die Wirkung dieser Strahlung zu verwenden. Auf diese Weise entsteht der Begriff der Energiedosis:

Unter der Energiedosis einer ionisierenden Strahlung versteht man den Quotienten aus der von der bestrahlten Substanz absorbierten Energie und der Substanzmasse:

$$D = dW/dm.$$

Für die Einheit der Energiedosis gilt Joule durch Kilogramm ( $J/kg$ ).

$$1 J/kg = 1 \frac{Ws}{kg} = 1 \text{ Gray (1 Gy)}.$$

Die früher benutzte Einheit 1 Rad (rd) für die Energiedosis wird wie folgt in die Energiedosisseinheit Gray umgerechnet:

$$1 rd = 1 cGy = 10^{-2} J \cdot kg^{-1} \text{ bzw.}$$

$$1 Gy = 100 rd.$$

Rad steht für radiation absorbed dosis.

Auch bei gleicher Energiedosis können ionisierende Strahlen verschieden starke biologische Schädigungen im Körpergewebe hervorrufen. Die Schädigung durch ionisierende Strahlung ist im allgemeinen um so größer, je größer die Ionisierungsdichte —das ist der Energieverlust der Strahlung je Weglänge— längs der Bahn der Strahlung durch die Materie ist. Diese Größe hängt von der Ladung, der Energie und der Art der Strahlungspartikel ab.

### 4.3 Äquivalentdosis

Die unterschiedliche biologische Wirkung verschiedener radioaktiver Strahlungsarten wird durch einen Bewertungsfaktor  $q$  berücksichtigt. Dieser Qualitätsfaktor  $q$  ist eine reine Zahl. In Tab. 1 sind für die wichtigsten Strahlungstypen die Bewertungsfaktoren  $q$  und die Ionisierungsdichten  $dW/dx$  in der Einheit  $keV/\mu m$  angegeben.

Strahlungsart	$q$	$dW/dx$ $keV/\mu m$
Röntgen- u. Gammastrahlung, Betastrahlung, (Elektronen und Positronen)	1	3,5
Protonen; Energie > 2 MeV	2	53
Neutronen; Energie > 10 keV	10	7–53
Alpha-Strahlung; Rückstoßkerne, Spaltprodukte	20	53–200

**Tabelle 1: Bewertungsfaktoren  $q$  und Energieverlust je Weglänge für einige Strahlungsarten**

Mit Hilfe der Bewertungsfaktoren  $q$  läßt sich eine physikalische Dosis angeben, die einer biologischen Wirkung äquivalent ist. Dies ist für Ganzkörperbestrahlung die sogenannte Äquivalentdosis  $D_q = D \cdot q$ . Die Äquivalentdosis besitzt die gleiche Einheit wie die Energiedosis, da der Bewertungsfaktor  $q$  eine Zahl ist. Um Verwechslungen zwischen der Energiedosis und der Äquivalentdosis zu vermeiden, wurde früher für die Äquivalentdosis die Einheit REM (rem) eingeführt. Dabei gilt  $1 rem = 10^{-2} J/kg = 10^{-2} Gy$ . Die Bezeichnung REM ist ein Kunstwort, das aus „radiation equivalent man“ gebildet worden ist. Seit dem 1. Januar 1986 wird die Äquivalentdosis in

Größe	gültige Einheit	nicht mehr zulässige Einheit	Umrechnung
Aktivität	Becquerel (Bq) $1 Bq = 1 s^{-1}$	Curie (Ci)	$1 Ci = 3,7 \cdot 10^{10} Bq$ $1 Bq = 2,7 \cdot 10^{-11} Ci$
Ionendosis	Coulomb durch Kilogramm (C/kg)	Röntgen (R)	$1 R = 2,58 \cdot 10^{-4} C/kg$ $1 C/kg = 3876 R$
Energiedosis	Joule durch Kilogramm (J/kg) bzw. Gray (Gy) $1 Gy = J/kg$	Rad (rd)	$1 rd = 0,01 Gy$ $1 Gy = 100 rd$
Äquivalentdosis	Sievert (Sv) $1 Sv = 1 J/kg$	Rem (rem)	$1 rem = 0,01 Sv$ $1 Sv = 100 rem$
Ionendosisleistung	Ampere durch Kilogramm (A/kg)	Röntgen durch Sekunde (R/s)	$1 R/s = 2,58 \cdot 10^{-4} A/kg$
Energiedosisleistung	Gray durch Sekunde (Gy/s)	Rad durch Sekunde (rd/s)	$1 rd/s = 0,01 Gy/s$ $1 Gy/s = 100 rd/s$
Äquivalentdosisleistung	Sievert durch Sekunde (Sv/s)	Rem durch Sekunde (rem/s)	$1 rem/s = 0,01 Sv/s$ $1 Sv/s = 100 rem/s$

**Tabelle 2: Physikalische Größen und deren Einheiten in der Radiologie**

Sievert (Sv) gemessen, wobei die Umrechnung  $1 Sv = 100 rem$  gilt.

### 4.4 Dosisraten

Die Wirkung ionisierender Strahlung nimmt allgemein mit längerer Bestrahlungsdauer zu. Daher wird der Begriff der Dosisleistung oder auch Dosisrate eingeführt:

$$D = dD/dt.$$

Während die Dosis die Wirkung eines Strahlungsfeldes auf einen Absorber kennzeichnet, beschreibt die Dosisrate, wie schnell die Wirkung zustande kommt. Da verschiedene Dosisgrößen verwendet werden, unterscheidet man auch zwischen Ionendosisrate, Energiedosisrate und Äquivalentdosisrate.

Aus Gründen der Übersicht sind in Tab. 2 die aufgezeigten Physikalischen Größen und deren Einheiten in der Radiologie noch einmal zusammengestellt worden. Dabei wurde auch berücksichtigt, daß ältere, nicht mehr zulässige Einheiten noch vielfach benutzt werden, weil sich die derzeit gültigen Einheiten noch nicht überall durchgesetzt haben. Insbesondere wurde auch Wert darauf gelegt, die Umrechnung zwischen derzeit gültigen und nicht mehr zulässigen Einheiten festzuhalten.

## 5. Umweltbedingte Strahlenbelastung

Unter der Strahlenbelastung versteht man die Einwirkung energiereicher radioaktiver Strahlen auf lebende Organismen. Seit ihrer Existenz ist die Menschheit solcher Strahlenbelastung ausgesetzt. Diese Strahlenbelastung hat ihren Ursprung in der natürlichen Umwelt. In neuerer Zeit ist diese Belastung kritisch untersucht worden, da vor allem die Entwicklung und der Einsatz von Kernwaffen gezeigt hat, daß energiereiche Strahlung erhebliche Strahlenschäden verursachen kann. Außerdem haben der Bau von kerntechnischen Anlagen, die zunehmende Verwendung radioaktiver Stoffe mit energiereicher Strahlung in der medizinischen Diagnostik und Therapie sowie deren immer umfangreicherer Einsatz in Forschung und Technik dazu geführt, daß die Probleme der Strahlenbelastung und des Strahlenschutzes in weiten Kreisen der Bevölkerung an Interesse gewonnen haben. Die verschiedenen Arten der umweltbedingten Strahlenbelastung, die man in der Regel nicht vermeiden kann, sind in Tabelle 3 zusammengestellt und werden nachfolgend besprochen.

### 5.1 Natürliche Strahlenbelastung

Der natürlichen Strahlenbelastung sind die Menschen während ihres ganzen Lebens ausgesetzt. Ihr Wert ist von Ort zu Ort verschieden und setzt sich aus 3 Komponenten zusammen:

Kosmische Strahlung, terrestrische Strahlung und Eigenstrahlung des Körpers.

Die kosmische Strahlung stammt von der Sonne und weiter entfernten Sternsystemen. Sie nimmt mit wachsender Höhe zu, da ein Teil der Strahlung durch die Atmosphäre absorbiert wird. Für die Bundesrepublik Deutschland gilt, daß sich diese Belastung zwischen 0 und 1000 m Höhe bei 30 bis 40 mrem/Jahr bewegt. Erheblich stärkere Strahlenbelastungen treten in größeren Höhen auf. Typische Strahlenbelastungen für Flugzeugbesatzungen bei ca. 500 Flugstunden im Jahr sind 500 mrem/a.

Die terrestrische Strahlung stammt aus natürlichen radioaktiven Nukliden — die unter 2.2 genannten primordiale Kerne sowie deren Folgepunkte —, die in unterschiedlicher Konzentration im Mauerwerk von Gebäuden, in Gesteinen und in der Atmosphäre vorhanden sind. So ist heute bekannt, daß innerhalb von Häusern aus Ziegel- und Bimssteinen die Strahlenbelastung bis zu 50 % höher sein kann, als in Holzhäusern oder im Freien. Der Mittelwert der terrestrischen Strahlung in der Bundesrepublik Deutschland beträgt 50 mrem/a im Freien und 70 mrem/a innerhalb von Gebäuden. Es gibt jedoch Gebiete, in denen deutlich höhere Werte gemessen werden. Im Schwarzwald werden vereinzelt Werte bis zu 500 mrem/a gefunden. Noch höhere Werte findet man in Indien und Brasilien, nämlich 2000 bis 3000 mrem/a.

Die Eigenstrahlung des Körpers wird durch Radionuklide hervorgerufen, die mit der Nahrung, dem Trinkwasser und der Atmung in den menschlichen Körper gelangen (inkorporiert werden). Hierbei handelt es sich um extrem langlebige Radionuklide mit Halbwertszeiten von  $10^8$  bis  $10^{10}$  a. Dies können Nuklide sein, die nach dem Zerfall in ein stabiles Nuklid übergehen (z. B. Kalium-40) oder aber Nuklide, die nach dem Zerfall in Kerne übergeführt werden, die ihrerseits weiter zerfallen. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die Inhalation des radioaktiven Edelgases Radon mit seinen Folgeprodukten in der Luft. Dieses Nuklid wird in der Erdkruste von den Muttersubstanzen der natürlichen Zerfallsreihen (vgl. 2.2) freigesetzt und gelangt in die Luft. Von besonderer Bedeutung sind dabei die radioaktiven Radonisotope mit ihren radioaktiven Folgeprodukten, die ihrerseits wieder eine große biologische Wirkung haben (vgl. Tab. 1).

Einen Sonderfall nimmt hier das Kohlenstoffisotop C-14 ein, das in Bezug auf das Erdalter zwar relativ kurzlebig ist, da seine Halbwertszeit  $T_{1/2} = 5730$  Jahre beträgt, aber unter dem Einfluß der kosmischen Strahlung ständig in der Atmosphäre nachgebildet wird.

Diese Substanzen lagern sich in Organismen ab und verursachen so die Eigenstrahlung der Körper. Diese innere Strahlenbelastung ist für die einzelnen Organe erheblich verschieden, da die inkorporierten Radionuklide in den verschiedenen Körperteilen in unterschiedlicher Konzentration abgelagert werden (vgl. dazu auch die Ausführungen unter 8.). Die inkorporierten natürlichen Radionuklide führen im Mittel zu einer Strahlenbelastung von 20 mrem/a.

Die genannten Komponenten der natürlichen Radioaktivität führen in der Bundesrepublik Deutschland im Mittel insgesamt zu einer Strahlenbelastung von 110 mrem/a.

## 5.2 Zivilisatorische Strahlenbelastung

Zur zivilisatorischen Strahlenbelastung — bedingt durch den Einsatz und die Verwendung künstlicher Strahlenquellen in technischen Geräten und Anlagen — tragen ebenfalls mehrere Komponenten bei:

Medizinische Diagnostik und Therapie, Kernwaffenversuche, Alltagsbelastungen und kern-technische Anlagen.

Strahlung aus natürlichen Quellen	in mrem/a (0,01 mSv/a)
Kosmische Strahlung (0 – 1000 m Höhe)	30 – 50
Terrestrische Strahlung im Freien (4 h pro Tag)	5 – 10
Strahlung in Gebäuden (20 h pro Tag)	50 – 60
Strahlung durch inkorporierte Radionuklide	0 – 30
Mittelwert (natürlich)	110
<b>Zivilisatorische Strahlenbelastung</b>	
Medizin	10 – 50
Technische Geräte und Industrieprodukte	1 – 3
Strahlenbelastung im Flugzeug (bei 10000 m Flughöhe und 0 – 10 Flügen pro Jahr)	0 – 40
Kernwaffenversuche	4
Kerntechnik	< 1
Mittelwert (zivilisatorisch)	60
als Mittelwert in der Bundesrepublik Deutschland insgesamt wird angenommen	170 mrem/a
<b>Tabelle 3: Mittlere Strahlenbelastung durch Umweltradioaktivität (Hintergrundstrahlung)</b>	

Die künstliche Strahlenbelastung im medizinischen Bereich ist überwiegend auf die Verwendung von Röntgenstrahlung im diagnostischen Bereich zurückzuführen. Neben herkömmlichen Röntengeräten sind hier auch Computertomographen zu nennen. Auch der Einsatz von Radionukliden zu diagnostischen Zwecken (Nuklearmedizin) trägt zu dieser Belastung bei. Für jeden Bewohner der Bundesrepublik Deutschland ergibt sich daraus im Mittel eine Strahlenbelastung von 50 mrem/a. Durch die oberirdischen Kernwaffenversuche sind große Mengen radioaktiver Nuklide in die Atmosphäre gebracht worden, die sich inzwischen über die ganze Erde verteilt haben. Diese Belastung nimmt allmählich ab, da die atmosphärischen Kernwaffenversuche seit längerem eingestellt wurden. Die so verursachte Strahlenbelastung beträgt zur Zeit im Mittel 4 mrem/a.

Zur Strahlenbelastung im Alltag tragen technische Geräte, z. B. Fernsehempfänger, aber auch der Flugverkehr, bei. Für diese Strahlenbelastung ergibt sich im Mittel eine Belastung von 3 mrem/a, wobei Flugzeugbesatzungen erheblich größeren Belastungen ausgesetzt sind.

Da Kernkraftwerke mit der Abluft Radionuklide an die Umgebung abgeben, tritt für die Bevölkerung im Umkreis solcher Kernkraftwerke ebenfalls eine zusätzliche Strahlenbelastung auf, die im Umkreis von 3 km im Mittel kleiner als 0,1 mrem/a ist. Dabei sind Störfälle nicht berücksichtigt.

Die zivilisatorische Strahlenbelastung in der Bundesrepublik Deutschland besitzt im Mittel insgesamt einen Wert von 60 mrem/a.

Damit ergibt sich für die Bundesrepublik Deutschland der in Tab. 3 angegebene Mittelwert der Strahlenbelastung von 170 mrem/a, der durch Umweltradioaktivität verursacht wird. Extremwerte wurden dabei nicht berücksichtigt.

## 6. Biologische Strahlenwirkung

### 6.1 Grundlagen

Jeder lebende Organismus ist aus Zellen aufgebaut, die ihrerseits aus sehr komplizierten Atomverbindungen (Moleküle) zusammengesetzt sind. Je nach Körperbereich unterscheiden sich diese Zellen in ihrer Struktur und Funktion. Die Zellen eines Körpers unterliegen einer Vielzahl von Zellteilungen, wobei sich die Zellen jeweils identisch verdoppeln. Der Verlauf der Zellteilungen und die unterschiedliche Entwicklung der Zellen werden durch die im Zellkern enthaltenen Chromosomen bestimmt.

Die Chromosomen bestehen aus Eiweißen und komplizierten nicht eiweißhaltigen Verbindungen, den sogenannten Nukleinsäuren (Kernsäuren), die die Träger der Erbinformation sind. Es gibt zwei Kernsäuren, nämlich die Desoxiribonukleinsäure (DNS) und die Ribonukleinsäure (RNS). Die DNS gehört zu den größten in der Natur vorkommenden Molekülen. Bevor eine Zellteilung einsetzt, müssen die Kernsäuren originalgetreu verdoppelt werden, da diese den genetischen Code zum Aufbau spezifischer Enzyme und lebenswichtiger Eiweiße enthalten. Ein Teil der DNS, eine sogenannte Funktionseinheit, die die Information für den Aufbau eines Enzyms enthält, ist ein Gen. Die Gene sind linear auf den Chromosomen angeordnet. Der Stoffwechsel einer Zelle erfolgt überwiegend in ihrem Zellplasma, wo mit Hilfe von winzigen Zellorganellen, den Ribosomen und der an der Matrix der DNS gebildeten RNS die Eiweißsynthese stattfindet. Da eine relative Konstanz der Arten nur durch die Konstanz spezifischer Enzyme und spezifischer Eiweiße gewährleistet ist, ist eine ungestörte Reduplikation der DNS, deren zwei identische Tochter-DNS-Moleküle bei der Zellteilung an die beiden Tochterzellen weitergegeben werden, notwendig.

Jeder Mensch verfügt in jedem Gramm seiner Körpermasse über etwa  $10^9$  Körperzellen, in denen der jeweilige Zellkern etwa eine Masse von  $3 \cdot 10^{-10}$  Gramm besitzt, wozu die Chromosomen wiederum nur mit ca. 2 % beitragen. Damit stellen die Chromosomen und erst recht die Gene zwar winzige aber empfindliche Ziele für die Strahlung dar. Da sie die Erbanlagen tragen, sind sie besonders gefährdet.

Aufschlußreich ist in diesem Zusammenhang ein Zahlenbeispiel, das von Prof. Dr. L. E. Feinendegen, dem Direktor des Instituts für Medizin der Kernforschungsanlage in Jülich, vorgerechnet wurde. Danach werden in einem Menschen, dessen Masse 70 kg beträgt, pro Minute etwa 70 Millionen Zellkerne von Strahlungspartikeln getroffen, die aus der natürlichen Umweltradioaktivität stammen. Diese Belastung bleibt fast immer ohne Folgen, da die Natur mit einem Reparaturvermögen reagiert. Diese Reparaturen dauern bei einfachen Chromosomenbrüchen kaum länger als 10 Minuten, während bei komplizierteren Fällen bis zu 2 Stunden vergehen können. Wird dagegen dieses Reparaturvermögen durch eine zu große Strahlenbelastung überfordert oder sogar ausgeschaltet, kommt es zu dauerhaften Schäden, die im Extremfall zum Tod führen.

Äquivalentdosis/rem (0,01 Sv)	Strahlenwirkung
0 – 30	Keine klinisch erkennbaren Wirkungen; Spätwirkungen können nicht ausgeschlossen werden.
30 – 100	Vorrübergehende leichte Veränderung des Blutbildes; Spätwirkungen können auftreten, allerdings ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten ernster Schäden für die Einzelperson sehr gering.
100 – 200	Typische Frühsymptome sind Übelkeit, Erbrechen, Durchfall und Müdigkeit; Das Blutbild wird verändert, wobei mit verstärkter Erholung zu rechnen ist. Eine Reduktion der Lebenserwartung durch Spätwirkungen von etwa 1 % ist anzunehmen.
200 – 600	Nach wenigen Stunden tritt Übelkeit, Erbrechen und Durchfall auf, wozu nach einer Woche Appetitverlust und allgemeines Unwohlsein hinzukommen. Nach 2 bis 6 Wochen treten die ersten Todesfälle auf. In 50 % der Fälle muß bei Äquivalentdosen von etwa 600 rem (LD 50) mit dem Tod gerechnet werden.
oberhalb 600	Bei diesen Äquivalentdosen bestehen nur sehr geringe Überlebenschancen. In nahezu 100 % der Fälle muß mit dem Tod gerechnet werden.

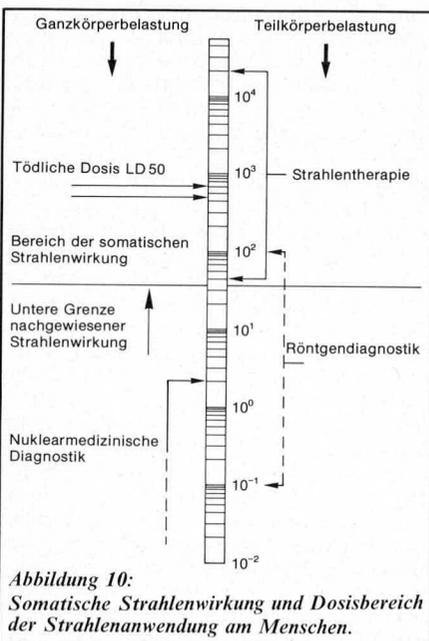
**Tabelle 4: Somatische Strahlenwirkungen nach kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung**

Die Wirkung der Strahlung verläuft über die besprochenen Wechselwirkungsprozesse mit Materie, wobei die Ionisierung im Vordergrund steht. Durch die Ionisierung können chemisch aktive Moleküle (Radikale) gebildet werden, die lebenswichtige Zellbereiche beeinflussen. Daneben können diese Zellbereiche auch direkt geschädigt werden. Dies führt dazu, daß entweder die Lebensfunktion einer Zelle stark beeinträchtigt wird oder aber eine Veränderung der Erbanlagen der Zelle resultiert, die bei der Teilung auf weitere Zellen übertragen wird. Solche Erbveränderungen sind dann besonders schwerwiegend, wenn sie in Keimzellen oder während des frühen Wachstums eines Organismus erfolgen. Während der Phase der Zellteilung sind Zellen besonders empfindlich gegen die Belastung durch radioaktive Strahlung, so daß Gewebe mit großer Zellteilungsrate besonders gefährdet ist (Knochenmark, Haut), während Zellen mit geringerer Zellteilungsrate (z. B. Nerven, Muskeln, Bindegewebe) wesentlich widerstandsfähiger sind.

Bei der Wirkung radioaktiver Strahlung unterscheidet man zwischen somatischen und genetischen Strahlenschäden. Beide Arten der Schädigung werden nachfolgend genauer untersucht.

### 6.2 Somatische Strahlungsschädigung

Unter somatischen Strahlenschäden versteht man eine Schädigung, die sich unmittelbar



**Abbildung 10:**  
Somatische Strahlenwirkung und Dosisbereich der Strahlenanwendung am Menschen.

auf die Gesundheit der betroffenen, bestrahlten Person auswirkt. Die somatischen Strahlenschäden bei kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung sind in Tab. 4 zusammengestellt. Bei Teilkörperbestrahlung des Körpers, insbesondere der Extremitäten, können dagegen ohne Schaden deutlich größere Dosen vertragen werden als bei Ganzkörperbestrahlung. Wegen der natürlichen Regenerationsfähigkeit der Organismen ruft eine Dosisbelastung, die gleichmäßig über längere Zeiträume verteilt zugeführt wird, deutlich geringere unmittelbare Wirkungen hervor als eine Dosis von gleicher Größe, die jedoch kurzzeitig aufgenommen wird. In jedem Falle können Spätfolgen, die erst nach Monaten oder Jahren auftreten, nicht ausgeschlossen werden. Diese Spätfolgen sind unabhängig von der Art der Bestrahlung und hängen nur von der insgesamt aufgenommenen Dosis ab.

In Abb. 10 wird noch einmal ein vereinfachter Überblick über die somatische Strahlenwirkung in anderer Form gegeben. Diese Angabe wird gleichzeitig verglichen mit dem Dosisbereich der Strahlenanwendung am Menschen. Man erkennt, daß nur bei der Röntgendiagnostik in Ausnahmefällen Organdosen erreicht werden, die zu somatischen Wirkungen geführt hätten, wenn sie als Ganzkörperdosen gegeben worden wären. Wegen der äußerst umfangreichen Erfahrung auf diesem Gebiet kann gesagt werden, daß seit Jahrzehnten die Röntgendiagnostik so vernünftig eingesetzt wurde, daß es zu keinen groben somatischen und genetischen Schäden gekommen ist. Auch das berechenbare Risiko für Spätfolgen nach röntgendiagnostischen Untersuchungen liegt sehr deutlich unterhalb aller anderen Gesundheitsrisiken.

In der Medizin erfolgt die Anwendung von radioaktiven Strahlen in der Regel bei sehr hohen Dosisleistungen und kurzen Anwendungszeiten. Bei der Röntgendiagnostik liegen die Dosisleistungen zum Beispiel um  $\dot{D} = 100 \text{ rem/s} = 1 \text{ Sv/s}$ , wobei die Anwendungszeiten ungefähr 0,1 s betragen. Bei Lungenaufnahmen ist zum Beispiel eine Strahlendosis von 0,1 bis 0,5 rem erforderlich. Magenaufnahmen erfordern Dosen von 1,5 bis 3 rem, während für Kieferaufnahmen 3 bis 5 rem notwendig sind. Dagegen werden in der Strahlentherapie Äquivalentdosen bis zu 20 000 rem eingesetzt, um krankhafte Organe zu bestrahlen.

Bei der Anwendung der beschriebenen Dosen handelt es sich um Teilkörper oder Organbestrahlungen. Für die Menschen sind bei Teilkörperbestrahlungen erheblich höhere Dosen verträglich als bei Ganzkörperbestrahlung.

Die untere Grenze für den Nachweis einer Strahlenwirkung (eine vorübergehende Veränderung im Blutbild) liegt bei einer kurzzeitig aufgenommenen Dosis von etwa 30 rem. Nach kurzzeitigen Einwirkungen im Dosisbereich von 100 bis 200 rem treten die in Tab. 4 beschriebenen ausheilbaren Krankheitsercheinungen auf. Nach der Aufnahme einer Kurzzeitdosis von etwa 600 rem (LD 50 in Abb. 10) muß mit dem Tode der Hälfte der bestrahlten Menschen nach einigen Wochen gerechnet werden.

### 6.3 Genetische Strahlungsschädigung

Unter genetischen Schäden versteht man Veränderungen des Erbgutes (Mutationen). Diese können bei der Bestrahlung der Fortpflanzungsorgane auftreten. Dementsprechend liegen hier Schäden vor, die sich auf den Gesundheitszustand von Folgegenerationen auswirken.

Daher hängen genetische Schäden größerer Bevölkerungsgruppen einmal von der Höhe der Keimdrüsenbestrahlung und zum anderen von der Wahrscheinlichkeit ab, mit der jeder Betroffene der Bevölkerungsgruppe unter Berücksichtigung seines Alters und seines Geschlechtes Nachkommen zu erwarten hat. Dieser Sachverhalt wird durch die genetisch signifikante Dosis einer größeren Bevölkerungsgruppe beschrieben, die als Äquivalentdosis in rem angegeben wird. Wie bei der somatischen Schädigung kann man auch für genetische Strahlungsschädigung keine untere Grenze einer Dosis angeben, unterhalb der eine Wirkung mit Sicherheit auszuschließen ist. Auch bei der genetischen Schädigung wird angenommen, daß die Wahrscheinlichkeit einer solchen Schädigung unabhängig von der zeitlichen Folge der Bestrahlungen proportional zur insgesamt aufgenommenen Dosis ist.

Die Grenzen der strahlungsbedingten genetischen Schäden können unter folgenden pessimistischen Annahmen abgeschätzt werden: Zum einen gelte Linearität zwischen Dosis und Wirkung bis zu kleinsten Dosen, so daß auch die kleinste Strahlendosis einen gewissen Beitrag zu den im Kollektiv zu erwartenden genetischen Schäden liefert. Zum anderen wird mit keinem Erholungseffekt bei den Wirkungen kleiner Dosen gerechnet. Die sich aus dieser Überlegung ergebenden genetischen Strahlenschäden werden in der Realität mit Sicherheit unterschritten.

Dabei geht man von dem Konzept aus, daß die von jedem einzelnen Mitglied einer betrachteten Personengruppe empfangene Äquivalentdosis unabhängig von ihrer Höhe zu einer vom gesamten Kollektiv empfangenen Gruppenäquivalentdosis aufsummiert und in „man rem“ angegeben wird. Danach führt z. B. eine Äquivalentdosis von 1 rem, die im Mittel jedes Mitglied einer Personengruppe von 100 Mitgliedern empfangen hat zu der gleichen Gruppenäquivalentdosis von 100 man rem wie eine mittlere Äquivalentdosis von 0,1 mrem, die jedes Mitglied einer Personengruppe von 1 Millionen Mitgliedern empfangen hat.

Für eine genetisch signifikante Gruppenäquivalentdosis von  $10^6$  man rem ergibt sich dann, daß in der ersten Generation 30 bis 90 Kinder mit genetischen Schäden geboren werden könnten. Diese Zahl erhöht sich im Gleichgewicht nach mehreren Generationen auf 150 bis 450. Wegen der oben getroffenen pessimistischen Annahmen werden diese Zahlen mit Sicherheit unterschritten. Diese Zahlen sind zu vergleichen mit spontanen Mutationen, die auch ohne zusätzliche Strahlenbelastung auftreten. Diese spontane Rate liegt derzeit bei etwa 720 Geburten von Kindern mit genetischen Schäden im Jahr in einer Gruppe von  $10^6$  Personen.

So würde etwa eine mittlere genetisch signifikante Äquivalentdosis von 1 mrem pro Jahr in der Bundesrepublik Deutschland zu einer genetisch signifikanten Gruppenäquivalentdosis von  $6 \cdot 10^4$  man rem pro Jahr bezogen auf die Gesamtbevölkerung führen. Die Zahl der Geburten von Kindern mit strahlungsbedingten genetischen Schäden würde bei dieser Belastung auch nach Erreichen des Gleichgewichts mit Sicherheit unter 30 pro Jahr liegen. Dieser Beitrag macht weniger als 0,07 % der spontanen Rate aus.

Die gesetzlichen Strahlenschutzvorschriften gewährleisten, daß die zusätzliche mittlere genetische Strahlenbelastung der Bevölkerung, die durch den Umgang mit Strahlenquellen verursacht wird, erheblich kleiner bleibt als die durchschnittliche Dosischwankung der natürlichen Umweltstrahlung.

## 7. Strahlenschutz

### 7.1 Prinzipielle Vorsorge

Unzulässig hohe Strahlenbelastungen sind grundsätzlich zu vermeiden. Dazu sind die nachfolgend genannten Grundregeln einzuhalten:

Die eingesetzten Strahlenquellen sollen eine möglichst kleine Quellstärke besitzen. Außerdem muß die Aufenthaltsdauer im Strahlenfeld auf möglichst kurze Zeit beschränkt werden. Der wirksamste und preiswerteste Schutz vor unzulässiger Strahlenbelastung ist die Einhaltung möglichst großer Abstände von den Strahlenquellen. Schließlich ist noch die Verwendung von Abschirmwänden zu nennen, in denen die radioaktive Strahlung entsprechend den besprochenen Wechselwirkungsprozessen ihre Energie abgibt und damit abgeschirmt wird.

Wegen der zunehmenden Verwendung von radioaktiven Strahlenquellen sind in den meisten Ländern entsprechende Gesetze und Verordnungen zum Schutz gegen Gefahren durch ionisierende Strahlen erlassen worden. Die Strahlenschutzregelungen zielen darauf ab, einerseits Personen, die mit radioaktiven Strahlenquellen umgehen müssen, ausreichend gegen unmittelbare somatische Strahlenschäden zu schützen und andererseits eine bedenkliche Zunahme von genetischen Schäden (Schädigung des Erbgutes, Mutationen) in der Gesamtbevölkerung durch die Anwendung von Strahlenquellen zu vermeiden.

Da es weder den Nachweis der absoluten Ungefährlichkeit niedriger Dosen noch dessen Gegenteil gibt, befindet man sich bei der Bewertung radioaktiver Gefährdung in einem Dilemma. Es gibt allerdings zwei Bezugspunkte. Zum einen ist dies die natürliche Strahlenbelastung, der der Mensch seit Jahrtausenden ausgesetzt ist (vgl. 5.1 und Tab. 3). Zum anderen liegen hinreichend Erfahrungen im gezielten Umgang mit radioaktiver Strahlung — wie z. B. in der Nuklearmedizin und in der Kerntechnik — vor (vgl. 6. und Abb. 10). Zwischen den beiden Bezugspunkten liegt jedoch eine große Zone der Unsicherheit. Grundsätzlich sollte daher jede unnötige zusätzliche Strahlenbelastung vermieden werden. Dies ist auch das Ziel der gesetzlichen Regelungen und Bestimmungen.

### 7.2 Rechtliche Grundlagen

Das Atomrecht umfaßt alle Rechtsvorschriften, deren Inhalt das Ziel haben, Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie (Kernenergiegesetz) und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen (Strahlenschutzrecht) zu schützen. Die Entwicklung des Atomrechts geht aus Tab. 5 hervor, in der die wichtigsten Verordnungen und auch internationale Übereinkommen chronologisch aufgelistet sind.

Das Kernenergiegesetz ist in der Bundesrepublik Deutschland ein Sonderrechtsgebiet, das

1925	International Commission on Radiological Units and Measurements — ICRU —
1928	International X-ray and Radium Protection Commission (seit 1950: International Commission on Radiological — ICRP —)
1930	Röntngengesetz in Dänemark
1941	Verordnung zum Schutz gegen Schädigung durch Röntgenstrahlen und radioaktive Stoffe in nicht medizinischen Betrieben (in Kraft bis 1973)
1959	Atomgesetz vom 23. Dez. 1959 (BGBl. I S. 814) Pariser Übereinkommen vom 29. Juli 1960 über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie
1960	Erste Strahlenschutzverordnung (1. SSVO)
1962	Brüsseler Übereinkommen über die Haftung der Inhaber von Reaktorschiffen und Zusatzprotokoll (Brüsseler Reaktorschiffübereinkommen) vom 25. Mai 1962
1964	Veröffentlichung der OECD — Grundnormen für den Strahlenschutz (BGBl. II 1964, S. 857) — Ergänzung 1970 (BGBl. II S. 208)
1964	Zweite Strahlenschutzverordnung (2. SSVO). Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen in Schulen
1970	Bekanntmachung der geänderten Fassung der Grundnormen für den Strahlenschutz der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) vom 20. April 1970 (BGBl. II S. 208)
1973	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung — RÖV —) vom 1. März 1973 (BGBl. I S. 173)
1973	Gesetz zu den Übereinkommen Nr. 115 der Internationalen Arbeitsorganisation vom 22. Juni 1960 über den Schutz der Arbeitnehmer vor ionisierender Strahlung i. d. F. der Bekanntmachung vom 19. Nov. 1973 (BGBl. II S. 1593)
1975	Gesetz zu den Pariser und Brüsseler Atomhaftungsübereinkommen vom 8. Juli 1975 (BGBl. II S. 957)
1976	Richtlinie des Rates (der Europäischen Gemeinschaften) vom 1. Juni 1976 zur Festlegung der überarbeiteten Grundnormen für den Gesundheitsschutz der Bevölkerung und der Arbeitskräfte gegen die Gefahren ionisierender Strahlung (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 12. Juli 1976 Nr. L 187)
1976	Neue Strahlenschutzverordnung — StrlSchV — (ist anstelle der 1. und 2. SSVO am 1. April 1977 in Kraft getreten)
1980	Festsetzung von Grundnormen gemäß Artikel 30 des Euroatomvertrages (zuletzt Richtlinie des Rates vom 15. Juli 1980 zur Änderung der Richtlinien, mit denen die Grundnormen für den Gesundheitsschutz der Bevölkerung und der Arbeitskräfte gegen die Gefahren ionisierender Strahlungen festgelegt wurden). Jeder Mitgliedsstaat ist verpflichtet, die Einhaltung dieser Grundnormen sicherzustellen.
<b>Tabelle 5: Abriss über die Entwicklung des Atomrechts</b>	

alle Rechtsvorschriften für den Betrieb von Kernanlagen und die Verwendung von Kernbrennstoffen umfaßt. Die Hauptrechtsgrundlagen für die Regelung des Kernenergiegesetzes und Strahlenschutzrechts bildet in der Bundesrepublik Deutschland das Atomgesetz. Ein wesentliches Teilgebiet dieses Rechtes ist das Strahlenschutzrecht. Das Atomgesetz wurde am 23. Dezember 1959 beschlossen. Aufgrund von Ermächtigungen in diesem Gesetz wurden für die nähere Regelung des Strahlenschutzes in der Praxis spezielle Rechtsverordnungen erlassen. Das nationale Strahlenschutzrecht wird im wesentlichen durch die bundesrechtliche Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung — StrlSchV — vom 13. 10. 1976), zuletzt geändert durch Verordnung vom 22. 5. 1981, geregelt.

Diese Verordnung, die für jedermann gilt und im wesentlichen den Schutz von Mensch, Tier und Sachen vor ionisierender Strahlung von nicht natürlichen Quellen beinhaltet, ist das Ergebnis einer Entwicklung des Strahlenschutzrechtes seit dem Jahre 1960 (1. Strahlenschutzverordnung). Die Strahlenschutzverordnung bezieht sich auf radioaktive Stoffe einschließlich der Kernbrennstoffe sowie auf Anlagen zur Erzeugung von ionisierenden Strahlen (z. B. Kernreaktoren und Beschleuniger). Nicht eingeschlossen sind Röntgeneinrichtungen und Störstrahler, in denen die Elektronen auf höchstens 3 MeV beschleunigt werden können. Die Errichtung und der Be-

trieb dieser Anlagen ist durch die am 1. 3. 1973 in Kraft getretene Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlung (Röntgenverordnung) besonders geregelt.

### 7.3 Grenzwerte

Bei der Festlegung von höchst zulässigen Körperdosen gemäß Strahlenschutzverordnung und Röntgenverordnung wird unterschieden zwischen beruflich strahlenexponierten Personen und nichtberuflich strahlenexponierten Personen. Als beruflich strahlenexponierte Personen gelten nach der Definition der Strahlenschutzverordnung solche Personen, die im Kalenderjahr eine Ganzkörperdosis erhalten können, die 0,5 rem übersteigt. Für beruflich strahlenexponierte Personen gilt seit langem als höchst zulässige Jahresdosis der Wert von 5 rem bei Ganzkörperbestrahlung, die möglichst gleichmäßig über das Jahr zu verteilen ist.

Dieser Wert ist sowohl als oberster Grenzwert international als auch in der Röntgenverordnung festgelegt. Er wird als nach dem Stand von Wissenschaft und Technik als oberstes vertretbares Maß für eine Strahlenbelastung angesehen, die eine exponierte Person im Jahr erhalten darf, ohne einen Schaden davonzutragen, der oberhalb dem der übrigen zivilisatorischen und natürlichen Strahlenbelastung liegt. Die zulässigen Grenzwerte sind höher bei Teilkörperbestrahlung insbesondere der Extremitäten (Hände, Unterarme, Knöchel, einschließlich der dazugehörigen Haut). Hier beträgt der zulässige Grenzwert 60 rem pro

Jahr (60 rem/a), bei anderer Haut 30 rem/a, bei Knochen und der Schilddrüse ebenfalls 30 rem/a sowie bei anderen Organen 15 rem/a. Die genannten Werte gelten für beruflich strahlenexponierte Personen. Für nichtberufliche strahlenexponierte Personen gilt jeweils  $\frac{1}{10}$  der Werte, die für beruflich strahlenexponierte Personen zugelassen sind.

Diese heute gültigen höchstzulässigen Jahresdosen sind das Ergebnis einer langjährigen Erfahrung, die man beim Einsatz und der Anwendung radioaktiver Strahlung gewonnen hat. So wurde im Jahre 1902 eine Jahresdosis von 2500 Röntgen für ungefährlich gehalten. Dieser Dosisgrenzwert wurde schon 1920 auf 100 Röntgen reduziert. Im Jahre 1931 wurde dieser Wert auf 50 Röntgen herabgesetzt. Nach 5 weiteren Jahren wurde dieser Wert im Jahre 1936 halbiert. 1948 legte man den Dosisgrenzwert auf 15 Röntgen fest. Schließlich entschied man sich 1956 für 5 Röntgen als Jahresdosisgrenzwert, einen Wert also, der den fünfhundertsten Teil der im Jahre 1902 zulässigen Höchstosis ausmacht.

Die aufgezeigte zeitliche Entwicklung bei der stetigen Reduktion der zulässigen Dosisgrenzwerte macht deutlich, daß es offenbar schwierig ist, die Festlegung einer unschädlichen, zulässigen oder erlaubten Dosis verbindlich zu treffen. Hier wird offenbar willkürlich nach Ermessen vorgegangen. Als Konsequenz dieser Ausführung darf jedoch festgehalten werden, daß es keine absolut unschädliche Dosis gibt. Über die durch radioaktive Strahlung verursachten Schäden wurde bereits unter 6. berichtet.

## 8. Strahlenbelastung nach Tschernobyl

### 8.1 Strahlungskomponenten

Nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl sind zahlreiche radioaktive Elemente oder auch Radionuklide mit der Luftströmung in die Bundesrepublik Deutschland gelangt. Dadurch wurde zunächst die Luft durch radioaktive Nuklide zusätzlich belastet. Durch später einsetzenden Regen wurden diese Nuklide weitgehend aus der Luft ausgewaschen und haben sich auf der Erdoberfläche konzentriert. Auf dem Weg von Tschernobyl in die Bundesrepublik Deutschland sind dabei je nach Halbwertszeit der Radionuklide unterschiedliche Anteile der in Tschernobyl freigesetzten Substanzmengen zerfallen. Die noch nicht zerfallenen Radionuklide haben zu einer Belastungszunahme durch radioaktive Strahlung in der Bundesrepublik Deutschland geführt.

Die aus der Sowjetunion eingeströmten Radionuklide zeigen ein breites Spektrum von Elementen, von denen Jod-131 das häufigste ist. Seine Halbwertszeit beträgt etwa 8 Tage. Etwa 8 bis 10 % der meßbaren und aus dem Reaktorunfall in der UdSSR stammenden Radionuklide haben Halbwertszeiten von mehr als einem Monat. Von diesen längerlebigen Radionukliden entfällt etwa  $\frac{1}{3}$  auf das Isotop Cäsium-137 mit einer Halbwertszeit von 30 Jahren und in noch geringeren Mengen auch Strontium-90 mit einer Halbwertszeit von knapp 30 Jahren.

Solange die radioaktiven Nuklide sich in der Luft befinden, wo sie sich an kleine Schwebepartikel (Aerosole) mit Durchmessern von 0,08 bis 0,2  $\mu$ m angelagert haben, verteilen sie sich zunehmend. Wenn die radioaktiven Nuklide jedoch durch Regen aus der Luft ausgewaschen werden, konzentrieren sie sich auf dem Boden und bleiben dort haften. In der ersten Phase trat auch im Boden ein weiterer Auswascheffekt in tiefere Schichten auf. Das Grundwasser ist dabei praktisch nicht gefährdet, da das häufigste Isotop Jod-131 zu schnell zerfällt und das Isotop Cäsium-137

sehr stark an Säuren des Bodens haftet, so daß es trotz seiner langen Halbwertszeit das Grundwasser nicht belasten wird. Es bleibt in den obersten Schichten des Bodens konzentriert.

Das radioaktive Isotop Jod-131 stellte trotz seiner geringen Halbwertszeit von ca. 8 Tagen in der Anfangsphase die größte Gefährdung dar. Es gelangte bei der Futteraufnahme der Kühe schon nach ca. 20 Stunden in die Milch. Beim Verzehr von dieser mit Jod-131 belasteten Milch durch die Menschen gelangt das Jod in den menschlichen Körper und wird dort konzentriert in der Schilddrüse abgelagert. Daraus resultiert eine stark überhöhte Belastung eines einzigen Organs — nämlich der Schilddrüse — im Vergleich zu den übrigen Teilen des Körpers (vgl. auch Tab. 6). Das radioaktive Isotop Strontium-90 nimmt die zweite Stelle in der Gefährdungsskala ein. Dieses Isotop wird vom Organismus anstelle von Calcium in die Knochen substanz eingebaut. Die von diesem Isotop ausgehende Bestrahlung schädigt das Knochenmark und damit das Immunsystem des Menschen. Der Anteil des Strontium-90 nimmt nach dem überwiegend angefallenen Jod-131 und einigen Prozent Cäsium-137 erst die dritte Stelle ein.

### 8.2 Einzelwerte

Zum Abschluß sollen noch einige Belastungswerte für Boden, Luft und Nahrungsmittel besprochen werden, wobei sowohl auf vereinzelt gemessene extreme Werte als auch auf die verschiedenen Richtwerte der Strahlenschutzkommission des Bundes eingegangen wird.

Auf dem Boden wurden extreme Werte bis zu 120 Becquerel pro Quadratmeter (120 Bq/m<sup>2</sup>) gemessen. Beim Daueraufenthalt auf Böden mit dieser radioaktiven Belastung würde eine Äquivalentdosis von ca. 0,18 mrem/Tag resultieren.

In Luft wurden gegenüber dem Normalwert (2–10 Bq/m<sup>3</sup>) kurzfristig extreme Werte von bis zu 150 Becquerel pro Kubikmeter (150 Bq/m<sup>3</sup>) gemessen. Daraus ergibt sich für die absorbierte Strahlendosis bei einem Tag Aufenthalt ein Wert von 15 mrem für die Ganzkörperbelastung und von 100 rem für die Schilddrüse (auf das Isotop Jod-131 zurückzuführen).

Für Nahrungsmittel hat das Isotop Jod-131 die größte Bedeutung. Hier wurden an einigen Orten Extremwerte bis zu 2000 Becquerel pro Liter Frischmilch von Kühen und 2000 Becquerel pro Kilogramm Blattgemüse gemessen. Die Molkereimilch lag spätestens ab Mitte Mai 1986 unter 100 Becquerel pro Liter. Von der Strahlenschutzkommission wurden als Richtwerte 500 Becquerel pro Liter Milch (Normalwert 2 Bq/l) und 250 Becquerel pro Kilogramm Blattgemüse festgelegt. Diese Richtwerte sind so zu verstehen, daß bei normalem Verzehr radioaktiv belasteter Nahrung (Frischmilch und Blattgemüse) — pro Tag also zum Beispiel 1 Liter Milch und 1 kg Blattgemüse — das Strahlenrisiko minimiert wird.

In Tab. 6 sind einige Organdosen zusammengestellt, die beim Verzehr kontaminierter Nahrung auftreten. Die Dosiswerte sind angegeben in Mikrorem durch Becquerel ( $\mu$ rem/Bq). Berechnet wurden diese Werte mit den Dosisfaktoren aus der BMI-Richtlinie „Allgemeine Berechnungsgrundlage für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer“ (Richtlinie zu § 45 Strahlenschutzverordnung) — Rundschreiben des BMI vom 15. 8. 1979 — RS II 2 — 515603/2 — in der Fassung vom 24. 6. 1985. In dieser Tabelle sind einige wenige charakteristische radioaktive Nuklide und deren Belastung für be-

a) Kleinkind	Knochen	Leber	Schilddrüse	Ganzkörper
Nuklid Sr-90	675,7			173,0
J-131	0,92	1,11	432,4	0,65
Cs-137	17,57	19,73		1,14
b) Erwachsene	Knochen	Leber	Schilddrüse	Ganzkörper
Nuklid Sr-90	256,8			24,1
J-131			51,35	0,08
Cs-137	2,03	2,54		1,14

Rechenbeispiel:

Der einmalige Verzehr von 1 l Milch mit einer spezifischen J-131-Aktivität von 100 Bq/l führt dann bei einem Erwachsenen zu einer Schilddrüsendosis von 5135  $\mu$ rem (5,135 mrem).

**Tabelle 6: Organdosen beim Verzehr kontaminierter Nahrung (Ausschnitt). Die Dosis ist angegeben in  $\mu$ rem/Bq.**

stimmte Körperteile bzw. Organe aufgeführt. Die Belastung ist in  $\mu$ rem/Bq angegeben und zwar sowohl für ein Kleinkind als auch für einen Erwachsenen.

Der Verzehr von Nahrungsmitteln, die entsprechend den Richtwerten radioaktiv belastet sind, würde folgendes bedeuten: Die einmalige Aufnahme von einem Liter Milch mit 500 Becquerel Jod-131 würde bei Erwachsenen zu einer Schilddrüsenbelastung von etwas mehr als 25 mrem führen. Trinkt dagegen ein Kleinkind einen Liter Milch mit 500 Becquerel Jod-131, führt dieses zu einer Schilddrüsenbelastung des Kleinkindes von etwas mehr als 215 mrem. Entsprechendes gilt für richtwertbelastetes Frischgemüse.

Der niedrigere Richtwert bei Blattgemüse ist damit zu erklären, daß in der Regel nicht mehr als 1 Liter Milch pro Tag getrunken, dagegen aber eher 2 kg Frischgemüse verzehrt werden. Da inzwischen selbst die Extremwerte von einigen Tausend Bq/m<sup>2</sup> an Jod-131 wegen der geringen Halbwertszeit von 8 Tagen auf weniger als 1/1000 des Anfangswertes abgefallen sind, kann davon ausgegangen werden, daß von einer Jod-131 Belastung nicht mehr gesprochen werden muß.

Etwas anders liegen dagegen die Verhältnisse beim Isotop Cäsium-137. Dort wurden Aktivitäten bis zu 30 Bq/m<sup>2</sup> gemessen. Wegen der langen Halbwertszeit von 30 Jahren wird die Cäsium-137-Belastung noch lange erhalten bleiben. Sie wird allerdings, wie schon ausgeführt, in den obersten Schichten des Erdbodens haftend konzentriert. Selbst wenn die Cäsium-137-Aktivität von 30 Bq/m<sup>2</sup> durch den Verzehr kontaminierter Nahrung vom Menschen aufgenommen würde, ergäbe dies eine Belastung der Leber von 75  $\mu$ rem bzw. eine Ganzkörperbelastung von weniger als 30  $\mu$ rem für einen Erwachsenen. Beim Kleinkind wäre die Leberbelastung etwa achtmal so hoch.

Nach einer Studie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung in Neuherberg bei München wird geschätzt, daß die äußere Belastung der Bundesbürger durch die Tschernobyl-Radioaktivität über ein ganzes Jahr hinweg bei etwa 10 bis 40 mrem liegen wird. Dieser Wert ist zur normalen Umweltbelastung von etwa 170 mrem zu addieren. Diese Einschätzung der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung in Neuherberg deckt sich mit der Empfehlung der Strahlenschutzkommission vom 7. Mai 1986, wonach festgestellt wird, daß die aus dem Tschernobyl-Unfall akkumulierte Dosis durch langlebige Radionuklide kleiner ist als die Dosis durch die natürliche Kalium-40-Aktivität. Im ungünstigsten Fall kommt sie dieser etwa gleich.