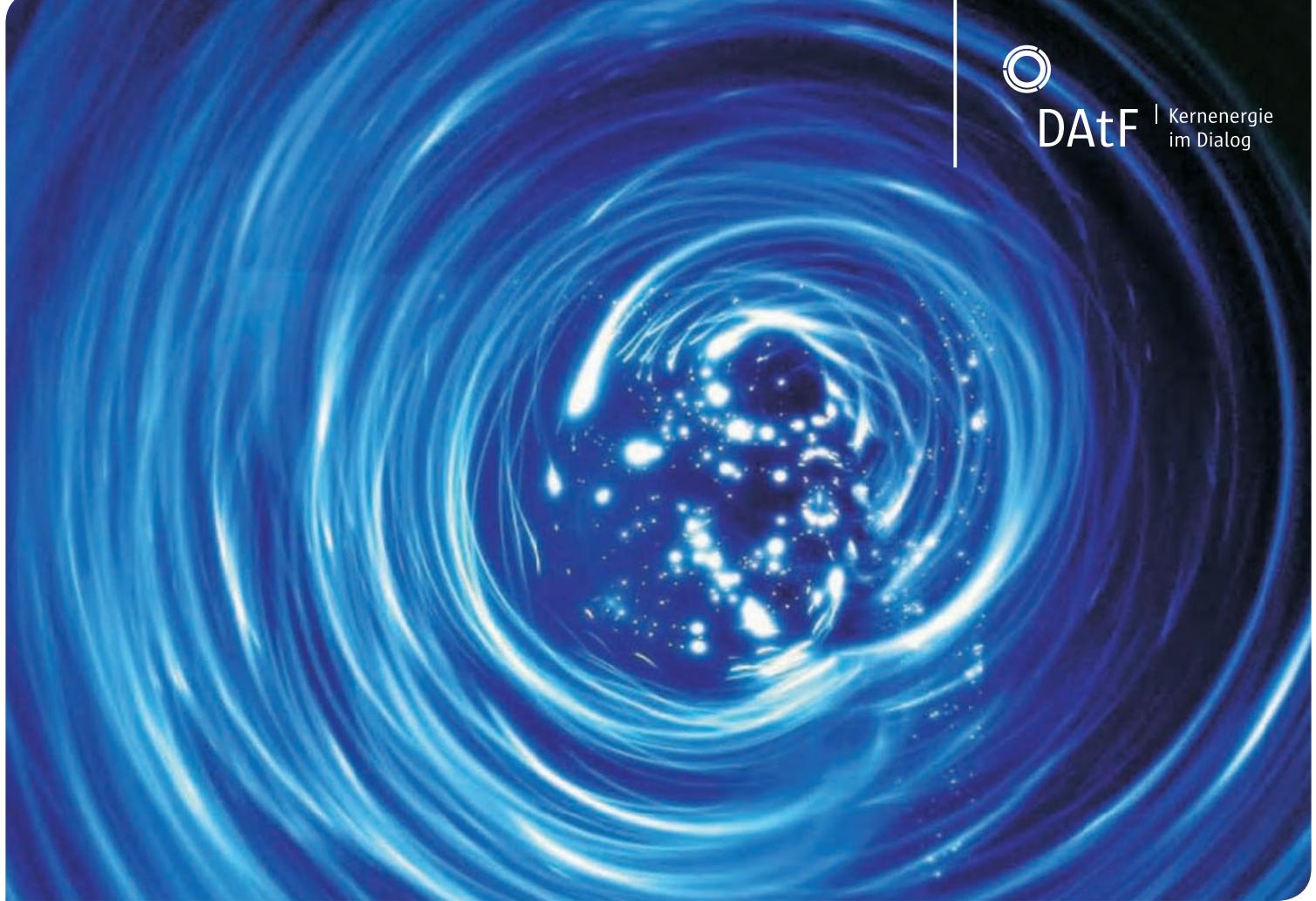




DAfF | Kernenergie
im Dialog



Radioaktivität und Strahlenschutz

Martin Volkmer

Radioaktivität und Strahlenschutz

Martin Volkmer

Herausgeber:
Deutsches Atomforum e.V.
Robert-Koch-Platz 4
10115 Berlin

info@
www.kernenergie.de

Wissenschaftliche Beratung: Winfried Koelzer

Dezember 2012

Alle Rechte vorbehalten.

Inhalt

1 Chemische Elemente und ihre kleinsten Teilchen	7	6 Strahlenwirkungen auf lebende Zellen.	40
1.1 Chemische Elemente	8	6.1 Aufbau einer Zelle	41
1.2 Aufbau des Atoms.	9	6.2 Erbträger DNS.	41
1.3 Aufbau der Atomkerne	11	6.3 Zellteilungen	42
2 Kernumwandlungen und Radioaktivität	12	6.4 Die strahlenbiologische Reaktionskette	43
2.1 Alpha-, Beta- und Gammastrahlen	13	6.5 Somatische und genetische Schäden	44
2.1.1 Alphastrahlen	13	6.6 Faktorenabhängigkeit	
2.1.2 Betastrahlen	13	der Strahlenwirkungen	46
2.1.3 Gammastrahlen	14	6.6.1 Strahlenart	46
2.2 Protonen- und Neutronenstrahlen	15	6.6.2 Dosis	46
2.3 Elektroneneinfang	16	6.6.3 Zeitliche Dosisverteilung	46
2.4 Halbwertszeit	16	6.6.4 Räumliche Dosisverteilung	46
3 Energie von Strahlungsteilchen und Gammaquanten	17	6.6.5 Relative Strahlen-	
3.1 Energieeinheit Elektronvolt.	18	empfindlichkeit	46
3.2 Energie der Teilchenstrahlen	18	6.6.6 Milieufaktoren	47
3.2.1 Energie von Alphateilchen	18	6.7 Strahlenempfindlichkeit	
3.2.2 Energie von Betateilchen	19	von Lebewesen	47
3.2.3 Energie von Neutronen	19	7 Radionuklide im menschlichen Körper	48
3.3 Energiebilanz bei der Kernspaltung	20	7.1 Standardmensch	49
3.4 Energie und Wellenlänge der Gammastrahlen.	21	7.2 Nahrungsketten und	
3.5 Energie und Wellenlänge bei Röntgenstrahlen	22	Expositionspfade	49
4 Wechselwirkungen von Strahlung mit Materie	23	7.3 Anreicherung von Radionukliden	
4.1 Wechselwirkungen von Alphateilchen mit Materie	24	in Nahrungsketten	50
4.2 Wechselwirkungen von Betateilchen mit Materie	25	7.4 Natürliche Radionuklide	
4.3 Wechselwirkungen von Neutronen mit Materie	26	in Nahrungsmitteln	51
4.4 Wechselwirkungen von Gammastrahlen mit Materie	28	7.5 Aufnahmewege und Speicherorgane	52
4.4.1 Photoeffekt.	28	7.6 Verweilzeit der Radionuklide	
4.4.2 Comptoneffekt	28	im Körper	53
4.4.3 Paarbildung	29	7.7 Natürliche Aktivität	
5 Strahlenmessung und Maßeinheiten	30	des Standardmenschen	56
5.1 Ionisationskammer	31	7.8 Bestimmung der Dosis aus der	
5.2 Energiedosis	31	inkorporierten Aktivität.	57
5.3 Organdosis	32	8 Natürliche Strahlenquellen –	
5.4 Effektive Dosis	33	natürliche Strahlenexposition	58
5.5 Folgedosis.	33	8.1 Kosmische Strahlung und	
5.6 Bestimmung der Impulsrate mit einem Zählrohr	34	die Erzeugung neuer Radionuklide	59
5.7 Aktivität.	35	8.2 Natürliche Radionuklide ohne	
5.8 Aktivitätsbestimmung	35	und mit Zerfallsreihen	60
5.9 Bestimmung von Radionukliden mit der Gammaspektroskopie	36	8.3 Natürliche Radionuklide	
5.10 Stabdosimeter	38	in Boden, Wasser und Luft	61
5.11 Filmdosimeter	38	8.4 Natürliche Radionuklide	
5.12 Neutronenmessgeräte	39	in Baustoffen	63

9 Künstliche Strahlenquellen – zivilisatorische Strahlenexpositionen . . .	66
9.1 Medizinische Anwendung von Röntgenstrahlen	67
9.2 Anwendungen von Radionukliden in der Medizin	68
9.3 Strahlenexposition in Deutschland durch den Reaktorunfall von Tschernobyl.	69
9.4 Strahlenexposition durch Kernwaffentests	70
9.5 Strahlenexposition durch Flugverkehr	71
9.6 Strahlenquellen in einem Kernkraftwerk Strahlenexposition durch Kernkraft- werke	72
9.7 Vergleich von natürlicher und künstlicher Strahleneinwirkung . . .	75
9.8 Zusammenfassung der Strahlen- exposition.	75
10 Strahlenschutzmaßnahmen gegen äußere Strahleneinwirkung.	77
10.1 Verringerung der Quellstärke.	78
10.2 Verringerung der Bestrahlungszeit . .	79
10.3 Einhaltung eines Sicherheits- abstandes.	80
10.4 Abschirmung der Strahlung	80
10.4.1 Abschirmung von Alphastrahlen	80
10.4.2 Abschirmung von Betastrahlen	81
10.4.3 Abschirmung von Gammastrahlen	82
10.4.4 Abschirmung von Neutronenstrahlen.	83
10.5 Abschirmung der Direktstrahlung in einem Kernkraftwerk.	84
11 Schutzmaßnahmen in einem Kernkraftwerk zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe	85
11.1 Mehrfacheinschluss radioaktiver Stoffe	86
11.2 Druckdifferenz als Sicherheitsbarriere	87
11.3 Verringerung der Aktivität bei Abluft und Abwasser	88
11.3.1 Behandlung gasförmiger Reaktorbetriebsabfälle	88
11.3.2 Behandlung flüssiger Reaktorbetriebsabfälle	89
11.3.3 Behandlung fester Reaktorbetriebsabfälle	89
11.4 Kontrollierte Ableitung radioaktiver Stoffe	89
11.5 Umgebungsüberwachung	90
12 Strahlenschutz für Personen in einem Kernkraftwerk.	91
12.1 Dosisgrenzwerte	92
12.2 Strahlenschutzbereiche.	92
12.3 Bereiche, die keine Strahlenschutz- bereiche sind	93
12.4 Kontrolle der Strahlenexposition . . .	93
12.5 Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten im Kontrollbereich	94
Sachwortverzeichnis	96

Chemische Elemente und ihre kleinsten Teilchen

1



1.1 Chemische Elemente

Zurzeit sind 118 chemische Elemente (Tab. 1.01) bekannt. Alle Elemente mit der Ordnungszahl 95 und höher sind künstlich hergestellt. Einige Elemente – Technetium, Promethium, Astat, Neptunium und Plutonium – wurden zuerst künstlich

hergestellt und erst danach wurde auch ihr natürliches Vorkommen nachgewiesen.

In der Tab. 1.02 sind die in der Erdrinde, Wasser und Luft am häufigsten auftretenden Elemente

Element	Symbol	OZ*	Element	Symbol	OZ*	Element	Symbol	OZ*
Wasserstoff	H	1	Niob	Nb	41	Thallium	Tl	81
Helium	He	2	Molybdän	Mo	42	Blei	Pb	82
Lithium	Li	3	Technetium	Tc	43	Wismut	Bi	83
Beryllium	Be	4	Ruthenium	Ru	44	Polonium	Po	84
Bor	B	5	Rhodium	Rh	45	Astat	At	85
Kohlenstoff	C	6	Palladium	Pd	46	Radon	Rn	86
Stickstoff	N	7	Silber	Ag	47	Francium	Fr	87
Sauerstoff	O	8	Cadmium	Cd	48	Radium	Ra	88
Fluor	F	9	Indium	In	49	Actinium	Ac	89
Neon	Ne	10	Zinn	Sn	50	Thorium	Th	90
Natrium	Na	11	Antimon	Sb	51	Protactinium	Pa	91
Magnesium	Mg	12	Tellur	Te	52	Uran	U	92
Aluminium	Al	13	Iod	I	53	Neptunium	Np	93
Silizium	Si	14	Xenon	Xe	54	Plutonium	Pu	94
Phosphor	P	15	Cäsium	Cs	55	Americium	Am	95
Schwefel	S	16	Barium	Ba	56	Curium	Cm	96
Chlor	Cl	17	Lanthan	La	57	Berkelium	Bk	97
Argon	Ar	18	Cer	Ce	58	Californium	Cf	98
Kalium	K	19	Praseodym	Pr	59	Einsteinium	Es	99
Calcium	Ca	20	Neodym	Nd	60	Fermium	Fm	100
Scandium	Sc	21	Promethium	Pm	61	Mendelevium	Md	101
Titan	Ti	22	Samarium	Sm	62	Nobelium	No	102
Vanadium	V	23	Europium	Eu	63	Lawrencium	Lw	103
Chrom	Cr	24	Gadolinium	Gd	64	Rutherfordium	Rf	104
Mangan	Mn	25	Terbium	Tb	65	Dubnium	Db	105
Eisen	Fe	26	Dysprosium	Dy	66	Seaborgium	Sb	106
Kobalt	Co	27	Holmium	Ho	67	Bohrium	Bh	107
Nickel	Ni	28	Erbium	Er	68	Hassium	Hs	108
Kupfer	Cu	29	Thulium	Tm	69	Meitnerium	Mt	109
Zink	Zn	30	Ytterbium	Yb	70	Darmstadtium	Ds	110
Gallium	Ga	31	Lutetium	Lu	71	Roentgenium	Rg	111
Germanium	Ge	32	Hafnium	Hf	72	Copernicium	Ch	112
Arsen	As	33	Tantal	Ta	73	noch ohne Namen		
Selen	Se	34	Wolfram	W	74	Flerovium	Fl	114
Brom	Br	35	Rhenium	Re	75	noch ohne Namen		
Krypton	Kr	36	Osmium	Os	76	Livermorium	Lv	116
Rubidium	Rb	37	Iridium	Ir	77	noch ohne Namen		
Strontium	Sr	38	Platin	Pt	78	noch ohne Namen		
Yttrium	Y	39	Gold	Au	79	OZ=Ordnungszahl		
Zirkonium	Zr	40	Quecksilber	Hg	80			

Tab. 1.01

Tabelle der chemischen Elemente, nach der Kernladungszahl (Protonenzahl) geordnet

aufgeführt. Auf die restlichen weniger als 0,2 % entfallen alle übrigen Elemente. Man nimmt an, dass sich unter der Erdkruste eine Schicht befindet, die vorwiegend aus Metallsulfiden besteht. Der Kern der Erde setzt sich wahrscheinlich im Wesentlichen aus Eisen und Nickel zusammen.

Die chemische Zusammensetzung des Menschen ist von seinen Erbanlagen, den Verzehr- und Lebensgewohnheiten, den örtlichen Gegebenheiten sowie seinem Alter abhängig. Für wissenschaftliche Berechnungen benötigt man aber eine einheitliche biologische Grundlage. Deshalb ist der

Element	Häufigkeit in %	Element	Häufigkeit in %
Sauerstoff	49,2	Titan	0,58
Silizium	25,7	Chlor	0,19
Aluminium	7,5	Phosphor	0,11
Eisen	4,71	Kohlenstoff	0,08
Calcium	3,39	Mangan	0,08
Natrium	2,63	Schwefel	0,06
Kalium	2,4	Barium	0,04
Magnesium	1,93	Stickstoff	0,03
Wasserstoff	0,87	Fluor	0,03

Standardmensch definiert worden. Bei ihm liegt man ein Alter von 20 bis 30 Jahren, eine Gesamtlebensdauer von 70 Jahren, ein Körpergewicht von 70 kg, eine Körperoberfläche von 1,8 m² sowie eine Körpergröße von 170 cm zugrunde. In der Tab. 1.03 sind einige Daten des Standardmenschen angegeben.

Element	Masse in g	Anteil des Körpergewichts in %
Sauerstoff	45.500	65
Kohlenstoff	12.600	18
Wasserstoff	7.000	10
Stickstoff	2.100	3
Calcium	1.050	1,5
Phosphor	700	1
Schwefel	175	0,25
Kalium	140	0,2
Natrium	105	0,15
Chlor	105	0,15
Magnesium	35	0,05
Eisen	4	0,0057
weitere Spurenelemente		

Tab. 1.02 (links)
Häufigkeit der Elemente
in Erdkruste, Luft und Wasser
(Angaben in Gewichtsprozent)

Tab. 1.03
Zusammensetzung
des menschlichen Körpers

Aufbau des Atoms 1.2

Die kleinsten Teilchen der chemischen Elemente werden Atome genannt. Sie sind so klein, dass Menschen sie nicht sehen können. 10 Millionen Atome aneinandergereiht ergeben nur etwa 1 mm. Im Modell werden Atome mit einem Kern und einer Hülle dargestellt.

Der Kern besteht aus positiv geladenen Protonen und – mit Ausnahme des leichten Wasserstoffisotops – elektrisch neutralen Neutronen. Sie

werden durch sehr starke Kernkräfte zusammengehalten. Die Kernkräfte stehen in einem gewissen Abstand im Gleichgewicht mit abstoßenden Kräften zwischen den positiv geladenen Protonen.

In der Atomhülle bewegen sich in der Regel ebenso viel negativ geladene Elektronen wie sich Protonen im Kern befinden. Das Atom ist dann nach außen elektrisch neutral (Abb. 1.01).

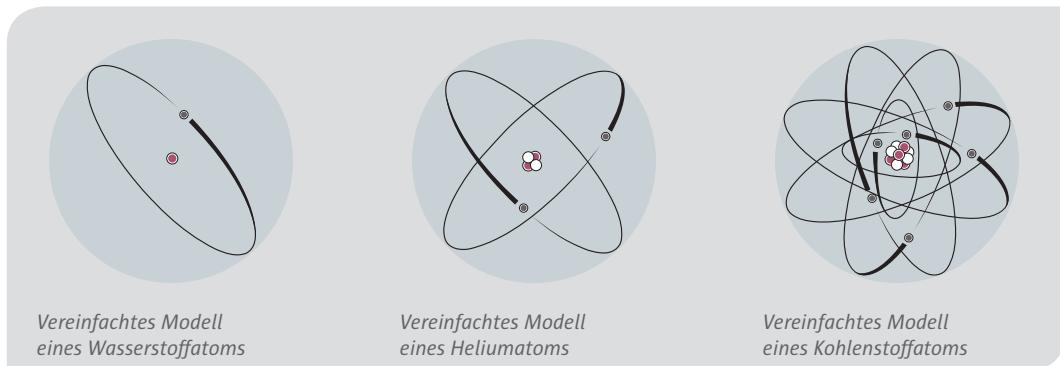


Abb. 1.01
Atome in vereinfachter Modelldarstellung. Das Atom besteht aus dem elektrisch positiv geladenen Kern und der elektrisch negativ geladenen Hülle.

- Bestandteile des Atoms:
 - Proton (+)
 - Neutron (-) Ausnahme: H-1
- Bestandteile der Atomhülle:
 - Elektron (o)

Verliert ein Atom ein Elektron aus seiner Hülle, überwiegen die positiven Ladungen im Kern (positives Ion). Nimmt ein Atom ein weiteres Elektron in die Hülle auf, überwiegen die negativen Ladungen in der Hülle (negatives Ion).

Berechnungen haben ergeben, dass die Hülle des Wasserstoffatoms einen Durchmesser von etwa 0,000 000 1 mm (zehnmillionstel Millimeter) hat. Der Kern (Proton) dagegen hat einen Durchmesser von etwa 0,000 000 001 Millimeter. Er ist fast 100.000-mal kleiner als der Durchmesser der Hülle (Abb. 1.02). Die Tab. 1.04 enthält Daten über die Massen und elektrischen Ladungen von Proton, Neutron und Elektron, den drei wichtigsten Elementarteilchen.

Um ein Elektron aus der Hülle abzutrennen, benötigt man Energie. Dabei zeigt sich, dass für die einzelnen Elektronen einer Atomhülle unterschiedlich viel Energie zum Abtrennen aufgewendet werden muss. Auf der Grundlage dieser Erkenntnis hat man ein Atommodell entwickelt, bei dem sich die Hülle aus einzelnen Schalen bzw. Bahnen aufbaut (K -, L -, M -, N -, O -, P - und Q -Schale, am Kern beginnend). Je weiter ein

Elektron vom Kern entfernt ist, desto weniger fest wird es von ihm gehalten und desto leichter ist es abzutrennen. Die Elektronen, die sich am weitesten außen befinden, sind an der chemischen Bindung beteiligt. Sie ermöglicht den Aufbau von Molekülen aus einzelnen Atomen.

In der Chemie rechnet man häufig mit Stoffmengen. Als Einheit benutzt man das Mol (mol). Die Anzahl der kleinsten Teilchen (Moleküle, Atome, Ionen) in 1 mol eines Stoffes wird durch die Avogadro-Konstante angegeben. Danach enthält 1 mol eines Stoffes $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen. Das entspricht einer Masse in Gramm, die sich aus der jeweiligen Atom- bzw. Molekularmasse errechnet.

Beispiel 1: Wie viele Atome enthält 1 g Eisen? Die relative Atommasse von Eisen beträgt rund 56. Daher sind in 56 g Eisen $6,022 \cdot 10^{23}$ Eisenatome enthalten.

1g Eisen enthält:

$$\frac{6,022 \times 10^{23}}{56} = \frac{60,22 \times 10^{22}}{56} \approx 1,1 \times 10^{22} \text{ Atome}$$

In Gedanken soll dieses 1 g Eisen über die Fläche der Stadt Hamburg verteilt werden. Die Fläche beträgt: $A = 755 \text{ km}^2 = 7,55 \cdot 10^8 \text{ m}^2$. Auf 1 m² befänden sich dann:

$$N = \frac{1,1 \times 10^{22}}{7,55 \times 10^8} \approx 1,5 \times 10^{13} \text{ Eisenatome}$$

Beispiel 2: Wie viele Wassermoleküle befinden sich in 1 g Wasser?

Die relativen Molekularmassen betragen (gerundet): Wasserstoff: 2; Sauerstoff: 16; Wasser: 18. Also enthalten 18 g Wasser $6,022 \cdot 10^{23}$ Wassermoleküle. 1 g Wasser enthält dann:

$$N = \frac{6,022 \times 10^{23}}{18} = \frac{60,22 \times 10^{22}}{18} \approx 3,4 \times 10^{22} \text{ Wassermoleküle}$$

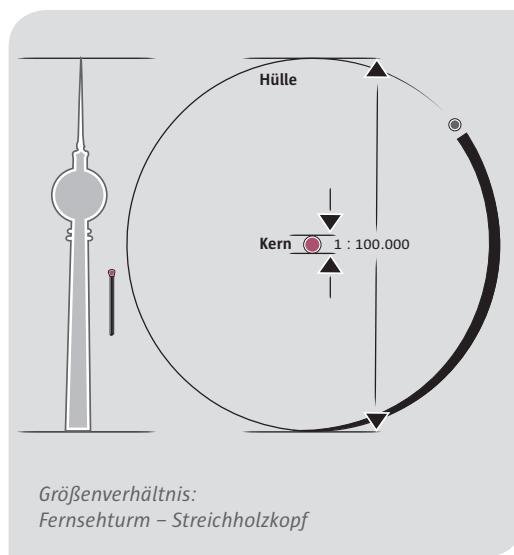


Abb. 1.02

Größenverhältnisse
im Wasserstoff-Atom

Elementarteilchen	Masse (Ruhemasse)		Ladung	
	in kg	in Elektronenmassen	in Coulomb	in Elementarladungen
Elektron	$9,10938 \times 10^{-31}$	1	$-1,6022 \times 10^{-19}$	-1
Proton	$1,67262 \times 10^{-27}$	1.836,15	$1,6022 \times 10^{-19}$	+1
Neutron	$1,67493 \times 10^{-27}$	1.838,68	0	0

Tab. 1.04

Masse und elektrische Ladung
der drei wichtigsten Elementarteilchen

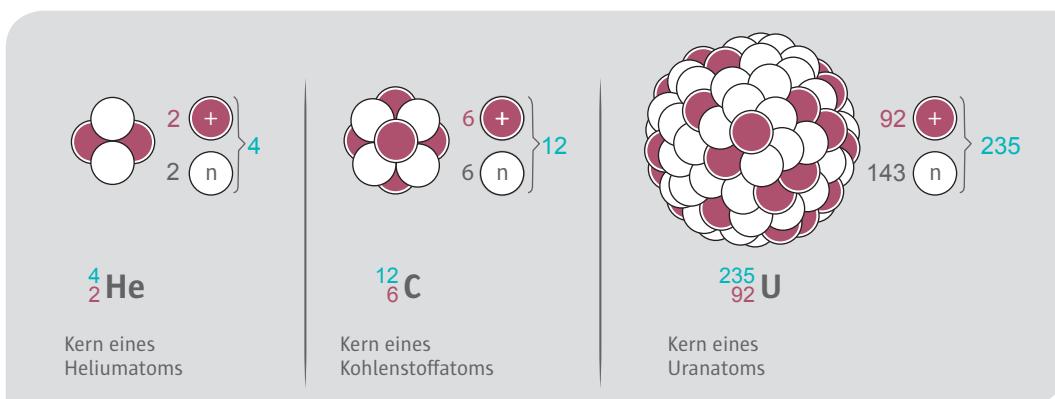


Abb. 1.03

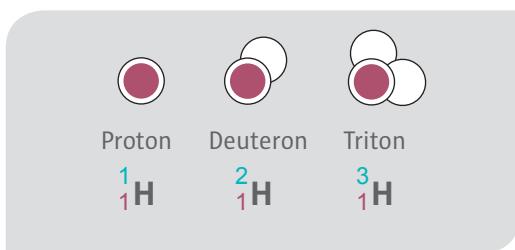
Aufbau der Atomkerne im Modell

Massenzahl:

Gesamtzahl der Protonen und Neutronen

Kernladungszahl:

Anzahl der Protonen



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

Proton und Neutron haben fast die gleiche Masse (Tab. 1.04). Die Masse des Elektrons beträgt aber nur 1/1836 der Masse des Protons. Das ist ein so geringer Betrag, dass man ihn bei der Betrachtung der Atommassen vernachlässigen kann. Praktisch ist die gesamte Masse eines Atoms in seinem Kern vereinigt. Eine wichtige Eigenschaft des Atomkerns ist seine Ladung.

Die Anzahl der positiven Elementarladungen im Kern ist gleich der Anzahl der Hüllenelektronen eines neutralen Atoms. Die Masse eines Atomkerns setzt sich aus der Masse der Protonen und der ein wenig größeren Masse der Neutronen zusammen (Abb. 1.03).

Zur Kennzeichnung des Kernaufbaus wird die Massenzahl (Anzahl der Protonen und Neutronen) oben links, die Kernladungszahl (Anzahl der Protonen) unten links neben das chemische Symbol gesetzt (Tab. 1.05). Eine Atomart, die durch Protonenzahl und Neutronenzahl charakterisiert ist, wird als Nuklid bezeichnet.

Für die Elementarteilchen gilt:

${}^1_1\text{p}$ Proton	${}^1_0\text{n}$ Neutron	${}^0_{-1}\text{e}$ Elektron
----------------------------	-----------------------------	---------------------------------

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

Im natürlichen Wasserstoff treten drei Isotope auf (Abb. 1.04):

99,989% ${}^1_1\text{H}$ Wasserstoff, leichter Wasserstoff
Der Kern besteht aus einem Proton (${}^1_1\text{p}$).

0,011% ${}^2_1\text{H} = \text{D}$ Schwerer Wasserstoff oder Deuterium (D)
Der Kern besteht aus einem Proton und einem Neutron.

kleinste Mengen ${}^3_1\text{H} = \text{T}$ Überschwerer Wasserstoff oder Tritium (T)
Der Kern besteht aus einem Proton und zwei Neutronen. Tritium wird in den oberen Schichten der Atmosphäre durch die kosmische Strahlung ständig neu gebildet und entsteht auch in Kernkraftwerken. Tritium ist radioaktiv.

Ein Wassermolekül, das z. B. die Wasserstoffisotope H-1 und H-3 (T) enthält, wird deshalb HTO abgekürzt. Enthält das Molekül nur das Isotop H-2, kürzt man es D_2O ab.

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

Abb. 1.04

Die Kerne der Wasserstoffisotope (Modelldarstellung)

Tab. 1.05

Kennzeichnung des Kernaufbaus

2 Kernumwandlungen und Radioaktivität



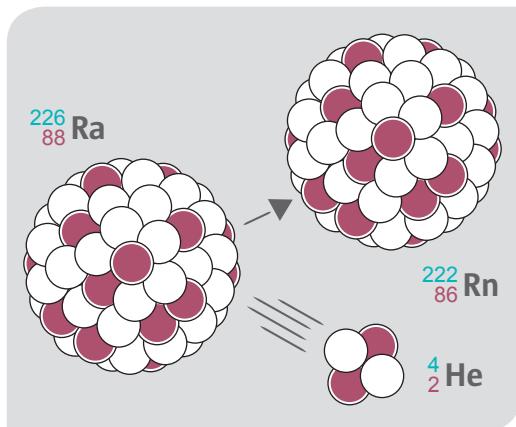
Bestimmte Nuklide (Atomkernarten) haben die Eigenschaft, sich von selbst, ohne äußere Einwirkung, umzuwandeln. Dabei wird Strahlung ausgesandt. Diese Eigenschaft bezeichnet man als Radioaktivität. Die Kerne radioaktiver Atome heißen Radionuklide. In der 8. Auflage der „Karlsruher Nuklidkarte“ von 2012 sind 3.847 verschiedene Nuklide (einschließlich Isomeren, also Atome desselben Nuklids, deren Kerne sich bei gleicher Kernladungs- und Massenzahl durch ihren Energiezustand unterscheiden) der 118 chemischen Elemente aufgeführt. Von diesen sind 257 stabil, alle anderen zerfallen spontan. Bei den in der Natur vorkommenden Radionukliden spricht man von natürlicher Radioaktivität, bei den durch künstliche Kernumwandlung erzeugten Radionukliden von künstlicher Radioaktivität.

2.1.1 Alphastrahlen

Die beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Heliumkerne (zwei Protonen, zwei Neutronen) werden Alphastrahlen genannt (Abb. 2.01). Die Geschwindigkeit der austretenden Alphateilchen liegt zwischen etwa 15.000 km/s und 20.000 km/s.

Beispiel: Der Kern des Radium-226 hat 88 Protonen und 138 Neutronen. Seine Kernladungszahl beträgt demnach 88, seine Massenzahl 226. Der Kern ist nicht stabil, da die Kernkräfte die abstoßenden Kräfte der Protonen untereinander nicht vollständig aufheben können. Der Kern hat deshalb das Bestreben, in einen stabileren Zustand überzugehen.

Dies geschieht in mehreren Stufen, von denen hier nur eine dargestellt ist. Der Kern schleudert einen Heliumkern heraus, wodurch die Kernladungszahl um 2, die Massezahl um 4 sinkt. Es entsteht das neue Element Radon (Rn). Dieser Vorgang kann durch eine Kernreaktionsgleichung beschrieben werden:



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

Bei alphastrahlenden Substanzen, die sich in geschlossenen Behältern befinden, kann deshalb nach einiger Zeit Heliumgas nachgewiesen werden: 1 g Radium und seine Folgeprodukte erzeugen in einem Jahr insgesamt $0,156 \text{ cm}^3$ Heliumgas (Angaben auf 0°C und Atmosphärendruck bezogen). Das entspricht etwa $4,29 \cdot 10^{18}$ Heliumatomen.

2.1.2 Betastrahlen

Beim Betazerfall wird aus dem Kern eines Radionuklids ein Elektron abgegeben. Seine Geschwindigkeit kann zwischen Null und nahezu Lichtgeschwindigkeit liegen. Diese Elektronen bilden dann Betastrahlen (Abb. 2.02).

Das Elektron entsteht, wenn sich im Kern ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umwandelt.

Reaktionsgleichung:



Beispiel eines Beta⁻-Zerfalls:

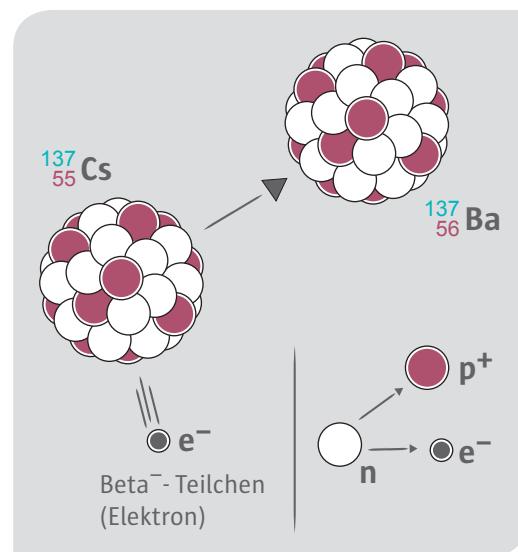


Abb. 2.01 (links)
Alphazerfall in Modelldarstellung

Abb. 2.02
Modell zur Entstehung
der Beta⁻-Strahlen

Cäsium-137 wandelt sich unter Aussenden eines Elektrons in Barium-137 um. Da jedes Elektron eine negative Elementarladung trägt, werden die Strahlen auch als Beta-Strahlen bezeichnet. Beta-Strahlen bilden einen Elektronenstrom, der die gleichen Eigenschaften zeigt wie der elektrische Strom in metallischen Leitern. So erzeugen z. B. beide ein Magnetfeld, das in konzentrischen Kreisen zur Ausbreitungsrichtung liegt. Da nach dem Aussenden eines Betateilchens der Kern ein Proton mehr besitzt, muss auch die Kernladungszahl des neu entstandenen Elements um eins höher liegen. Die Zahl der Kernteilchen hat sich jedoch insgesamt nicht verändert, wodurch die ursprüngliche Massenzahl erhalten bleibt.

Bei natürlichen und künstlich hergestellten Radioisotopen tritt eine Strahlung auf, bei der Teilchen von der Masse eines Elektrons mit einer positiven Ladung ausgeschleudert werden. Es sind Positronen. Die Strahlung wird deshalb Positronenstrahlung genannt (Abb. 2.03).

Abb. 2.03 (links)
Modell zur Entstehung
der Beta⁺-Strahlen

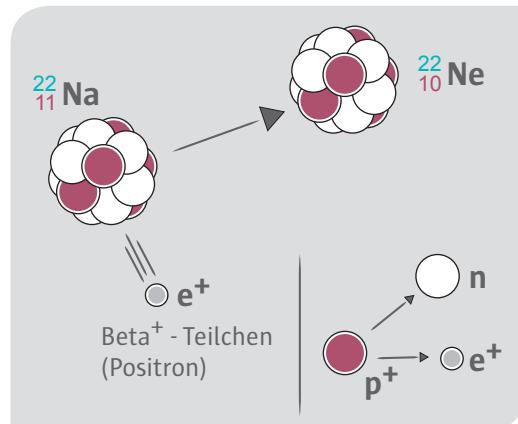


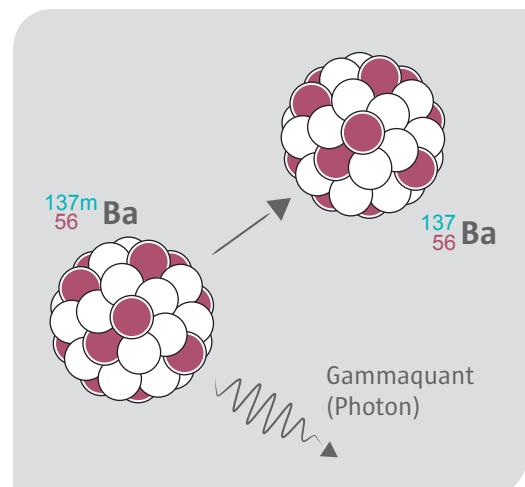
Abb. 2.04

Abgabe eines Gammaquants aus einem Atomkern (Modelldarstellung)

Durchdringungsvermögen und sind deshalb schwer nachzuweisen. (In den Abbildungen und bei den Kernreaktionsgleichungen werden hier aus Gründen der Vereinfachung Neutrino oder Antineutrino nicht mit angegeben.)

2.1.3 Gammastrahlen

Bei den Kernumwandlungen kann eine energiereiche Wellenstrahlung vorkommen. Sie hat die gleiche Natur wie das sichtbare Licht, sie ist nur energiereicher als dieses (kürzere Wellenlänge) und heißt Gammastrahlung. Die Gammastrahlung wird – wie auch das sichtbare Licht – in einzelnen „Portionen“ (Quanten, Photonen) abgegeben (Abb. 2.04).



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

Beispiel:



Das Positron entsteht, wenn sich im Kern ein Proton in ein Neutron und ein Positron umwandelt.

Reaktionsgleichung:



Beispiel eines Beta⁺-Zerfalls:



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

Beim Betazerfall wird außerdem ein weiteres Teilchen ausgesandt, das eine sehr, sehr kleine Ruhemasse (weniger als 2 eV) und keine elektrische Ladung besitzt. Bei der Umwandlung eines Neutrons entsteht ein Antineutrino, bei der Umwandlung eines Protons ein Neutrino. Neutrinos und Antineutrinos besitzen ein großes

Ein angeregter (m: metastabiler) Bariumkern gibt ein Gammaquant ab und geht dadurch in einen niedrigeren und gleichzeitig stabilen Energiezustand über. Gammaquanten stellen eine „Portion“ elektromagnetischer Energie dar. Da Energie und Masse einander äquivalent (gleichwertig) sind, lässt sich jedem Energiebetrag eine Masse zuordnen. Dies geschieht nach der von Einstein formulierten Gleichung:

$$E = m \cdot c_0^2 \rightarrow m = E/c_0^2$$

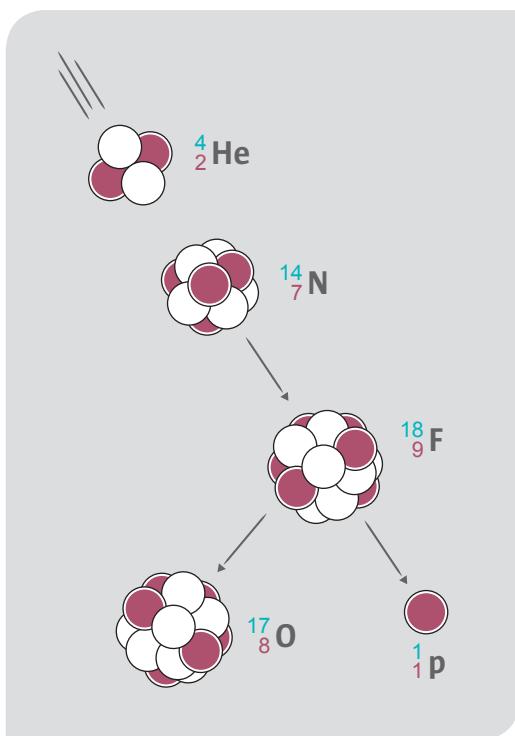
(E: Energie; m: Masse; c_0 : Vakuumlichtgeschwindigkeit).

Bei Gammaquanten, die von radioaktiven Atomkernen ausgesandt werden, ergeben sich Massen, die etwa der Elektronenmasse entsprechen.

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

Protonen- und Neutronenstrahlen 2.2

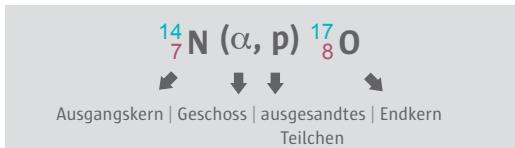
Die erste künstliche Kernumwandlung wurde in einer mit Stickstoff gefüllten Nebelkammer beobachtet. Aus den Untersuchungen ergab sich folgende Erklärung: Ein Alphateilchen (Heliumkern) dringt in den Kern eines Stickstoffatoms ein und verschmilzt mit ihm für kurze Zeit zu einem hochangeregten Zwischenkern des Elements Fluor. Der Fluorkern zerfällt in einen Sauerstoffkern und ein Proton (Abb. 2.05).



Kernreaktionsgleichung:



Als abgekürzte Schreibweise für Kernreaktionen wird folgende Zusammenstellung benutzt:



Bei dieser Schreibweise wird der Zwischenkern nicht mit angegeben. Nach der Kernreaktion erfolgt ein Elektronenausgleich, d. h. es werden

aus der Umgebung so viele Elektronen aufgenommen (oder in anderen Fällen an sie abgegeben), dass die beteiligten Atome wieder elektrisch neutral sind.

Werden Neutronen aus einem Atomkern herausgeschlagen oder herausgeschleudert, entsteht dadurch eine Neutronenstrahlung. Das kann z. B. in den oberen Schichten der Atmosphäre durch Zusammenprall der kosmischen Primärteilchen mit den Luftmolekülen geschehen oder bei Kernspaltungen in einem Kernkraftwerk.

Bei der Kernspaltung nimmt der Kern des Uran-235 ein Neutron auf, wodurch er in starke Schwingungen gerät und sich spaltet. Dabei fliegen zwei mittelschwere Trümmerkerne (Spaltprodukte) und zwei bis drei Neutronen auseinander. Außerdem werden einige Gammaquanten abgegeben. Bei Kernspaltungen entsteht also Neutronenstrahlung (Abb. 2.06).

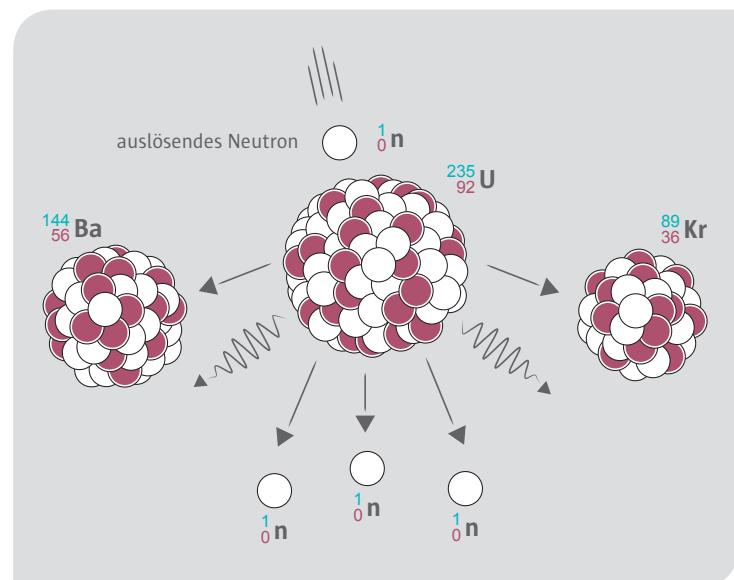
Ein freies Neutron ist radioaktiv. Es zerfällt in ein Proton und ein Elektron sowie ein Antineutrino (in der Reaktionsgleichung weggelassen).

Reaktionsgleichung:



Abb. 2.05 (links)
Nachweis freier Protonen durch Rutherford 1919 (Modelldarstellung)

Abb. 2.06 (unten)
Modell zur Spaltung eines Kernes von U-235



2.3 Elektroneneinfang

Bei natürlichen und künstlich erzeugten Radionukliden kann noch eine weitere Umwandlungsart auftreten, der so genannte Elektroneneinfang. Der Kern eines neutronenarmen Atoms fängt meist aus der innersten Schale der Elektronenhülle (der K-Schale, daher auch der Name K-Einfang) ein Elektron ein, wodurch sich ein Proton in ein Neutron umwandelt (Abb. 2.07).

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

Reaktionsgleichung:



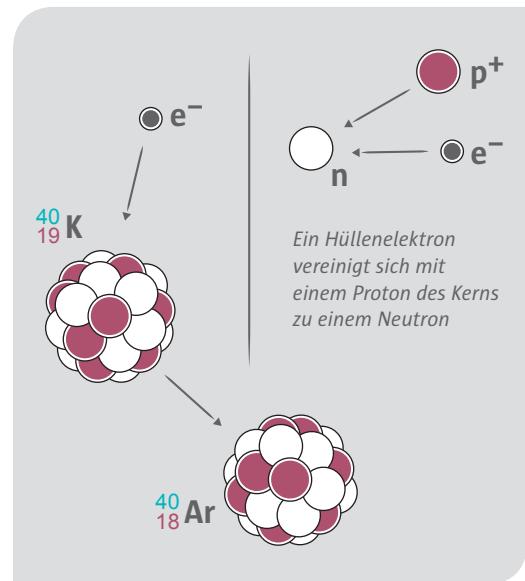
Beispiel:



Abb. 2.07

Einfang eines Hüllenelektrons im Modell

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



2.4 Halbwertszeit

Bei einem einzelnen radioaktiven Atomkern kann man nicht vorhersagen, zu welchem Zeitpunkt er zerfallen wird. Er kann in der nächsten Sekunde oder aber erst in Tausenden von Jahren zerfallen. Bei einer großen Anzahl von Atomen lässt sich aber eine Wahrscheinlichkeitssaussage über den Ablauf des Zerfalls machen.

Es zerfallen zum Beispiel von einer Menge Wasserstoff-3 (Tritium) in ca. 12,3 Jahren die Hälfte

der Atome, nach weiteren 12,3 Jahren ist von dem Rest wiederum die Hälfte zerfallen usw. (Abb. 2.08). Die Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Anzahl von Atomkernen zerfallen ist, wird Halbwertszeit ($T_{1/2}$) genannt. Sie ist für jedes Radionuklid eine charakteristische Größe. Die Halbwertszeiten liegen zwischen Milliarden Jahren und Sekundenbruchteilen (Tab. 2.01).

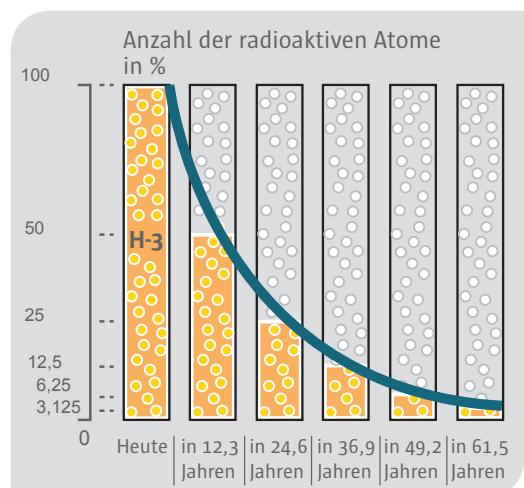


Abb. 2.08

Zerfall des Wasserstoff-3 (Tritium)

radioaktiv
 nicht radioaktiv

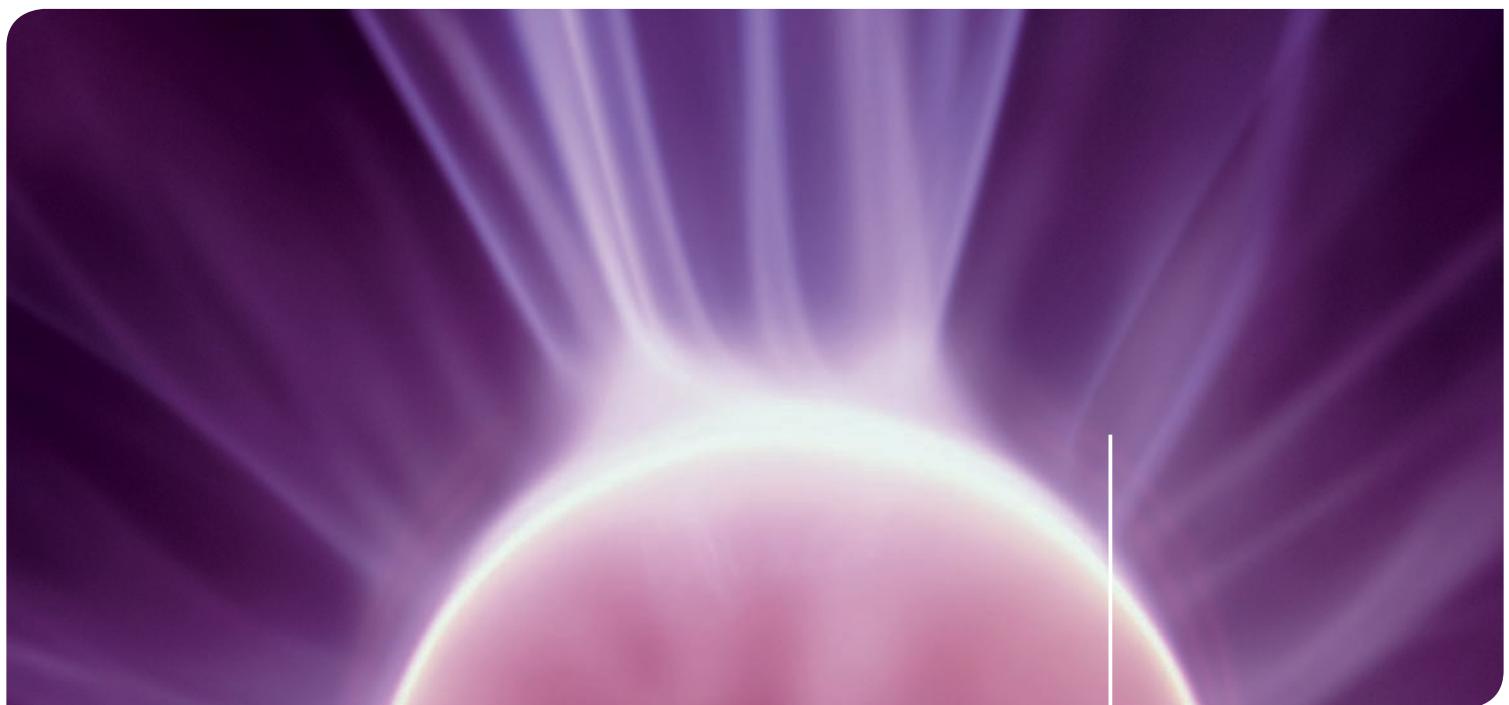
Tab. 2.01

Halbwertszeiten einiger Radionuklide

Radionuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart
Uran-238	$4,468 \times 10^9$ Jahre	Alpha
Kalium-40	$1,277 \times 10^9$ Jahre	Beta-Minus, K-Einfang
Plutonium-239	24.110 Jahre	Alpha
Cäsium-137	30,17 Jahre	Beta-Minus
Iod-131	8,0207 Tage	Beta-Minus
Thorium-231	25,52 Stunden	Beta-Minus
Radon-220	55,6 Sekunden	Alpha
Polonium-214	$1,643 \times 10^{-4}$ Sekunden	Alpha

Energie von Strahlungsteilchen und Gammaquanten

3



3.1 Energieeinheit Elektronvolt

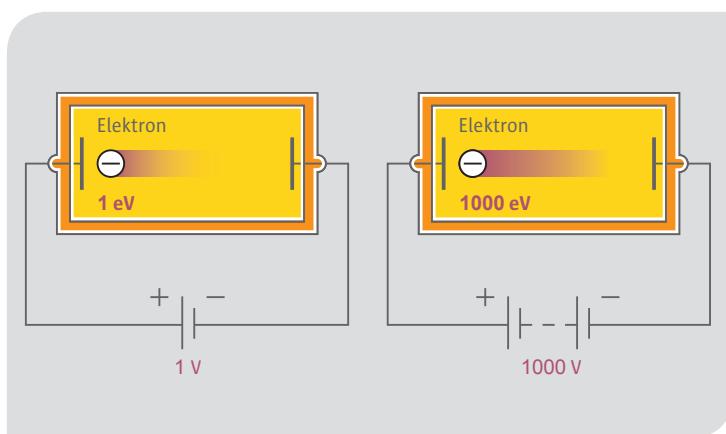
Zum Messen von Energien werden die Einheiten Newtonmeter (Nm), Joule (J) und Wattsekunde (Ws) verwendet. Dabei gilt:

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$$

Bei Kernumwandlungen treten sehr viel kleinere Energiewerte auf. Deshalb ist zusätzlich die Einheit Elektronvolt (eV) festgelegt worden. Definition: 1 eV ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es beim freien Durchlaufen einer Spannung von 1 V beschleunigt wird (Abb. 3.01). Je höher also die Spannung ist, desto größer wird die Bewegungsenergie der Teilchen.

Abb. 3.01

Veranschaulichung der Energieeinheit Elektronvolt



Vielfache von 1 eV:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Kiloelektronvolt (keV)} &= 10^3 \text{ eV} \\ 1 \text{ Megaelektronvolt (MeV)} &= 10^6 \text{ eV} \\ 1 \text{ Gigaelektronvolt (GeV)} &= 10^9 \text{ eV} \end{aligned}$$

Für Umrechnungen gilt:

$$\begin{aligned} 1 \text{ eV} &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ 1 \text{ J} &= 6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV} \end{aligned}$$

Beispiele:

Die Bewegungsenergie von Gasatomen und Gasmolekülen ist von der Temperatur des Gases abhängig. Bei Zimmertemperatur beträgt sie etwa 0,04 eV (Bewegungsenergie). Energiebeiträge dieser Größenordnung (einige 0,01 eV) werden als thermische Energie bezeichnet. Thermische Neutronen, die bei der Spaltung der Kerne von Uran-235 eine Rolle spielen, haben bei 293,6 K eine Energie von 0,0253 eV. Das entspricht einer mittleren Geschwindigkeit des einzelnen Neutrons von 2.200 m/s = 7.920 km/h. Freie Elektronen in einem Metalldraht führen Schwirrbewegungen aus, ihre ungerichtete mittlere Geschwindigkeit liegt bei 10^5 bis 10^6 m/s. Ihre Driftgeschwindigkeit bei einem Kupferleiter von 1 Quadratmillimeter Querschnitt und einer Stromstärke von 0,5 A beträgt etwa $4 \cdot 10^{-5}$ ms/s = 0,04 mm/s.

3.2 Energie der Teilchenstrahlen

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

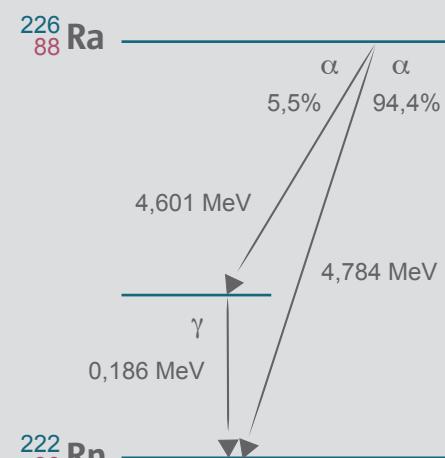
3.2.1 Energie von Alphateilchen

Die von einem Atomkern ausgesandten Alphateilchen besitzen alle dieselbe Energie oder beim Zerfall in mehrere Gruppen unterschiedliche Energien. Die Alphateilchen einer Gruppe haben aber immer dieselbe Energie. Beispiele für einen Gruppenzerfall (Abb. 3.02):

Abb. 3.02

Umwandlungsschema für Ra-226, vereinfacht

Hat das Alphateilchen die Maximalenergie erhalten, ist der Kern in den Grundzustand übergegangen. Ist die Energie des Alphateilchens kleiner, befindet sich der Kern noch in einem angeregten Zustand. Die restliche Energie des



angeregten Kerns wird in Form eines Gammaquants abgegeben. Beispiele für die Energie von Alphateilchen einiger Radionuklide sind in Tab. 3.01 angegeben.

Radionuklid	Energie der Alphateilchen in MeV in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeit
Rn-222	5,48952; ...
Ra-226	4,78434; 4,601; ...
U-238	4,198; 4,151; ...
Pu-239	5,1566; 5,1443; ...

Radionuklid	Maximalenergie von Beta ⁻ -Teilchen in MeV
H-3	0,0186
Co-60	0,3; 1,5
Pb-210	0,02; 0,06
Bi-214	1,5; 3,3; ...

Tab. 3.01 (links)

Beispiele für Energien der Alphateilchen einiger Alphazerfälle (Die Punkte hinter den Energiewerten weisen auf weitere Alphateilchen hin, die mit geringer Häufigkeit auftreten)

Tab. 3.02

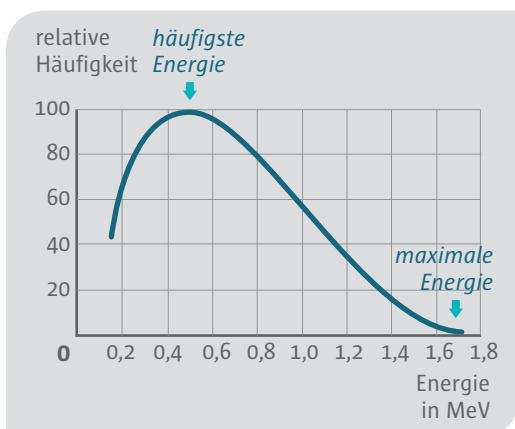
Maximale Beta⁻-Energie einiger Radionuklide

3.2.2 Energie von Betateilchen

Die beim Betazerfall auftretenden Elektronen oder Positronen besitzen alle unterschiedliche Energien. Sie können zwischen Null und einem Maximalwert liegen, wobei die größte Häufigkeit für jedes Radionuklid bei einem bestimmten Energiewert liegt (Abb. 3.03). Die mittlere Energie \bar{E} der Betateilchen ergibt sich zu:

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

Die kontinuierliche Energieverteilung röhrt daher, dass beim Betazerfall außer dem Elektron ein Antineutrino bzw. außer dem Positron ein Neutrino entsteht. Die frei werdende Zerfallsenergie verteilt sich dann nach Zufall in beliebigen Bruchteilen der Maximalenergie auf die beiden Elementarteilchen.



Nach heutiger Erkenntnis besitzen Neutrinos und Antineutrinos keine Ruhemasse und keine Ladung. Sie stellen also eine Portion besonderer Energie dar. Da sie ein außerordentlich hohes Durchdringungsvermögen haben, lassen sie sich nur schwer nachweisen.

In Kernreaktionsgleichungen, Umwandlungsschemata und Tabellen wird nur die Maximalenergie angegeben (Tab. 3.02).

Beispiel für einen Beta⁻-Zerfall:



Wird durch Elektron und Antineutrino bzw. Positron und Neutrino nicht die gesamte Zerfallsenergie verbraucht, entstehen zusätzlich noch ein Gammaquant oder mehrere Gammaquanten (Abb. 3.04).

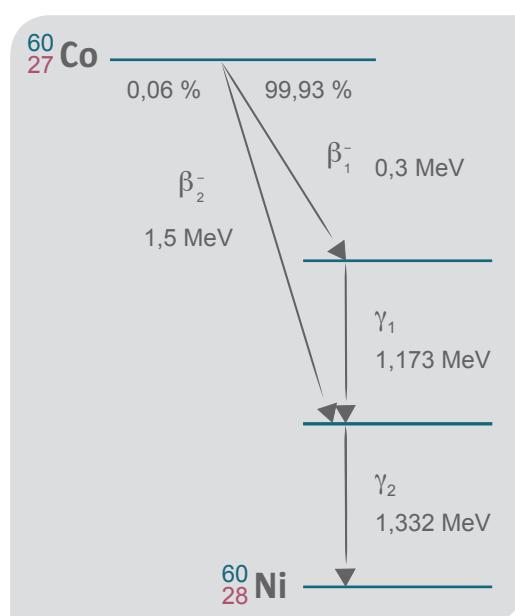


Abb. 3.03 (links)

Energieverteilung beim Beta⁻-Zerfall des P-32

Abb. 3.04

Umwandlungsschema für Co-60, vereinfacht

3.2.3 Energie von Neutronen

Abhängig von der Entstehungsart haben die bei Kernprozessen erzeugten Neutronen eine einheitliche Energie oder ihre Energie liegt zwischen Null und einem Höchstwert (kontinuierliche Energieverteilung). Bei der Freisetzung von Neutronen mit Hilfe von Gammaquanten (Kernphotoeffekt) entstehen Neutronen, die alle eine einheitliche Geschwindigkeit und damit auch gleich viel Bewegungsenergie besitzen. Beispiel (Abb. 3.05):

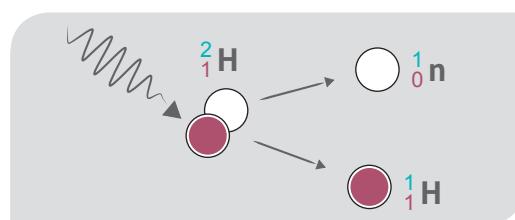
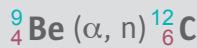


Abb. 3.05

Strahlungseinfang bei schwerem Wasserstoff (Modelldarstellung)

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

Kurzschreibweise der Reaktion:



Vollständige Reaktion:



Abb. 3.06

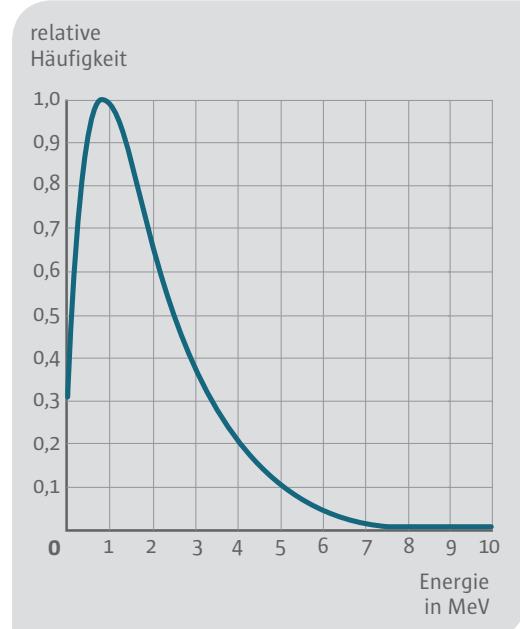
Energieverteilung der Neutronen, die bei Spaltung von U-235 durch thermische Neutronen entstehen

Die stärksten kommerziellen Neutronenquellen stellen heute die Kernreaktoren dar. In ihnen verwendet man in der Regel U-235 als spaltbares Material. Bei der Spaltung eines jeden Kerns entstehen zwei mittelschwere Trümmerkerne sowie zwei bis drei Neutronen. Diese Spaltneutronen haben unterschiedliche Geschwindigkeiten (Energien), wobei der Wert von etwa 0,7 MeV am häufigsten auftritt (Abb. 3.06).

Zur Charakterisierung der Neutronen nach ihrer Geschwindigkeit und damit ihrer Energie wird die Einteilung nach Tab. 3.03 verwendet. Die angegebenen Energiebeträge stellen Richtwerte dar, die Übergänge sind fließend.

Tab. 3.03

Einteilung der Neutronen nach ihrer kinetischen Energie



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

3.3 Energiebilanz bei der Kernspaltung

Bei der Spaltung eines Kerns U-235 (Abb. 3.07) werden ca. 210 MeV Energie frei. Sie setzen sich aus folgenden Teilbeträgen zusammen (Tab. 3.04):

Art der Energie	Energie
Bewegungsenergie der Spaltprodukte	175 MeV
Bewegungsenergie der prompten Neutronen	5 MeV
Energie der bei der Kernspaltung unmittelbar entstehenden Gammastrahlung	7 MeV
Energie der Betateilchen (Betazerfall der Spaltprodukte)	7 MeV
Energie der Gammaquanten beim Zerfall der Spaltprodukte	6 MeV
Energie der Neutrinos	10 MeV
Summe	210 MeV

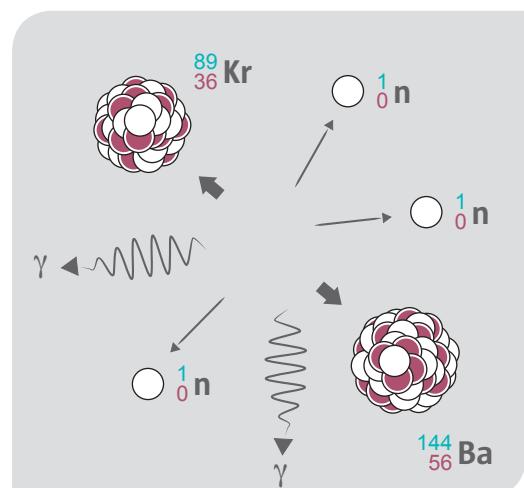
Abb. 3.07

Spaltproduktkerne und Neutronen, die bei der Kernspaltung entstehen, besitzen Bewegungsenergie (Modelldarstellung)

Tab. 3.04

Energiefreisetzung bei der Kernspaltung

Werden die Teilchen an der umgebenden Materie abgebremst, erhöhen sie die kinetische Energie der Materienteilchen und damit die Temperatur. Von dem Energiebetrag von 210 MeV können in einem Kernreaktor nur etwa 190 MeV = $1,9 \cdot 10^8$ eV genutzt werden, das sind rund 90 %.



Die Energie der prompten Gammastrahlen wird nur z. T. im Innern des Reaktors absorbiert. Die Zerfallsenergie der Spaltprodukte wird z. T. erst im radioaktiven Abfall außerhalb des Reaktors frei. Die Energie der Neutrinos kann praktisch gar nicht genutzt werden, da sie mit Materie kaum in Wechselwirkung treten. Die pro Kernspaltung

nutzbare Energie von $1,9 \cdot 10^8$ eV ist ein sehr kleiner Betrag. Da $1 \text{ J} = 6,242 \cdot 10^{18}$ eV entspricht, müssen zur Erzeugung von 1 J Wärme rund 33 Milliarden Urankerne gespalten werden.

$$N = \frac{6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV}}{1,9 \cdot 10^8 \text{ eV}} \approx 3,3 \cdot 10^{10} = 33 \text{ Mrd.}$$

Energie und Wellenlänge der Gammastrahlen 3.4

Alphateilchen, Betateilchen, Protonen und Neutronen, die bei Kernumwandlungen ausgeschleudert werden, ergeben eine Teilchenstrahlung. Gammaquanten bilden eine elektromagnetische Wellenstrahlung, die dieselbe Natur hat wie z. B. Rundfunkwellen, das sichtbare Licht oder Röntgenstrahlen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen beträgt im Vakuum $c_0 = 299.792,458 \text{ km/s} \approx 300.000 \text{ km/s}$.

Sie ist unabhängig von der Energie der einzelnen Gammaquanten (Photonen). Die Energie der Gammaquanten kann bis zu 10^7 -mal so groß sein wie die Energie der Lichtquanten (Abb. 3.08). Die Energie eines einzelnen Quants ist nur von seiner Wellenlänge bzw. seiner Frequenz abhängig. Je kleiner die Wellenlänge (bzw. je größer die Frequenz) eines Quants, desto größer ist auch seine Energie (Abb. 3.09).

Strahlenart	Frequenz in s^{-1}	Wellenlänge in m	Energie	
			in eV	in J
	3×10^0	10^8	$1,24 \times 10^{-14}$	$1,99 \times 10^{-33}$
	3×10^1	10^7	$1,24 \times 10^{-13}$	$1,99 \times 10^{-32}$
	3×10^2	10^6	$1,24 \times 10^{-12}$	$1,99 \times 10^{-31}$
	3×10^3	10^5	$1,24 \times 10^{-11}$	$1,99 \times 10^{-30}$
	3×10^4	10^4	$1,24 \times 10^{-10}$	$1,99 \times 10^{-29}$
	3×10^5	10^3	$1,24 \times 10^{-9}$	$1,99 \times 10^{-28}$
	3×10^6	10^2	$1,24 \times 10^{-8}$	$1,99 \times 10^{-27}$
	3×10^7	10	$1,24 \times 10^{-7}$	$1,99 \times 10^{-26}$
	3×10^8	1	$1,24 \times 10^{-6}$	$1,99 \times 10^{-25}$
	3×10^9	10^{-1}	$1,24 \times 10^{-5}$	$1,99 \times 10^{-24}$
	3×10^{10}	10^{-2}	$1,24 \times 10^{-4}$	$1,99 \times 10^{-23}$
	3×10^{11}	10^{-3}	$1,24 \times 10^{-3}$	$1,99 \times 10^{-22}$
	3×10^{12}	10^{-4}	$1,24 \times 10^{-2}$	$1,99 \times 10^{-21}$
	3×10^{13}	10^{-5}	$1,24 \times 10^{-1}$	$1,99 \times 10^{-20}$
	3×10^{14}	10^{-6}	$1,24 \times 10^0$	$1,99 \times 10^{-19}$
	3×10^{15}	10^{-7}	$1,24 \times 10^1$	$1,99 \times 10^{-18}$
	3×10^{16}	10^{-8}	$1,24 \times 10^2$	$1,99 \times 10^{-17}$
	3×10^{17}	10^{-9}	$1,24 \times 10^3$	$1,99 \times 10^{-16}$
	3×10^{18}	10^{-10}	$1,24 \times 10^4$	$1,99 \times 10^{-15}$
	3×10^{19}	10^{-11}	$1,24 \times 10^5$	$1,99 \times 10^{-14}$
	3×10^{20}	10^{-12}	$1,24 \times 10^6$	$1,99 \times 10^{-13}$
	3×10^{21}	10^{-13}	$1,24 \times 10^7$	$1,99 \times 10^{-12}$
	3×10^{22}	10^{-14}	$1,24 \times 10^8$	$1,99 \times 10^{-11}$
	3×10^{23}	10^{-15}	$1,24 \times 10^9$	$1,99 \times 10^{-10}$
	3×10^{24}	10^{-16}	$1,24 \times 10^{10}$	$1,99 \times 10^{-9}$

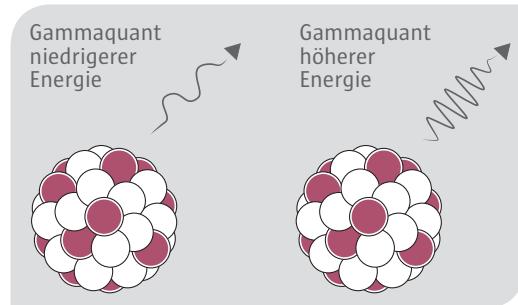
Abb. 3.08

Beziehung zwischen Frequenzen, Wellenlänge und Energie elektromagnetischer Wellen

Gammaquanten werden u. a. nach einem Alpha- oder Betazerfall aus einem Kern emittiert, wenn dieser noch überschüssige Energie besitzt (Tab. 3.05). Das kann in einer oder in mehreren Stufen

Abb. 3.09

Wellenlänge bzw. Frequenz eines Quants bestimmen seine Energie (Modelldarstellung)



Tab. 3.05

Energie der häufigsten Gammaquanten in MeV

(* in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeit)

geschehen. Die Quanten jeder einzelnen Stufe haben alle dieselbe Energie. Die Anzahl der ausgesandten Quanten kann also größer sein als die Anzahl der umgewandelten Atomkerne.

Radio-nuklid	Umwand-lungsart	Energie der häufigsten Gammaquanten in MeV*
Be-7	K-Einfang	0,478
N-16	Beta-Minus	6,129; 7,115; ...
Na-22	Beta-Plus	1,275
Ba-137m	Gamma	0,662
U-235	Alpha	0,186; 0,144; ...

3.5 Energie und Wellenlänge bei Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen werden mit Hilfe von Röntgenröhren erzeugt (Abb. 3.10). In einer luftleeren Glaskugel stehen sich Katode und Anode gegenüber. Aus der glühenden Katode treten Elektronen aus (Glühemission), die durch eine hohe Spannung (bis 400 kV) zwischen Katode und Anode beschleunigt werden. Treffen sie auf die Wolframanode, entsteht Röntgenstrahlung. Dabei wird nur 1 % der Bewegungsenergie in Röntgenstrahlung, aber 99 % in Wärme umgewandelt. Die Anode muss deshalb bei leistungsstarken Geräten fortlaufend gekühlt werden.

Abb. 3.10 (links)

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

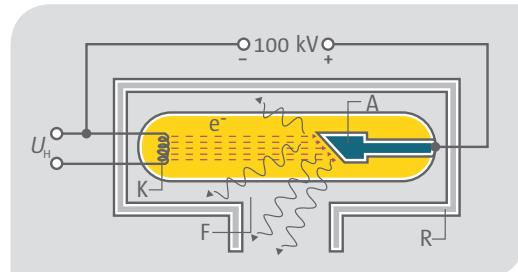
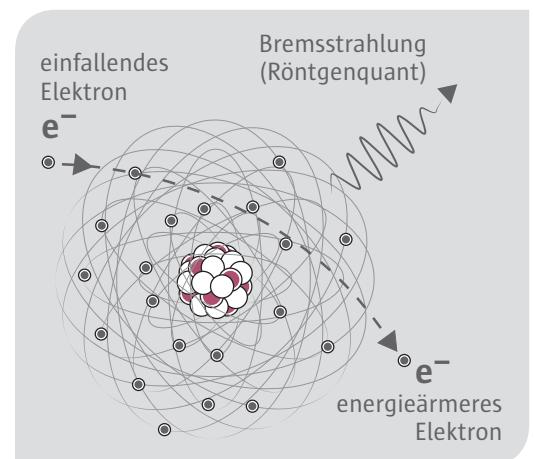


Abb. 3.11

Erzeugung von Bremsstrahlung durch Abbremsung eines Elektrons im elektrischen Feld eines Atoms (Modelldarstellung)

reguliert.) Außer der Bremsstrahlung wird noch eine vom Anodenmaterial abhängige charakteristische Röntgenstrahlung erzeugt. Sie besitzt ein Linienspektrum, das das kontinuierliche Bremsstrahlungsspektrum überlagert.

Röntgenstrahlen treten auch bei anderen technischen Einrichtungen auf, sobald beschleunigte Elektronen abgebremst werden (z. B. beim Fernsehgerät mit Bildröhre, Oszilloskop, Elektronenbeschleuniger).



In einer Röntgenröhre entsteht überwiegend Röntgenbremsstrahlung. Ihre Entstehung kann man sich im Modell folgendermaßen vorstellen: Ein beschleunigtes Elektron dringt in ein Atom des Anodenmaterials ein und wird dabei ganz oder teilweise abgebremst. Die verlorene gesamte Bewegungsenergie wird in Form eines Röntgenquants abgegeben (Abb. 3.11).

Diese Quanten bilden die Röntgenbremsstrahlung mit kontinuierlicher Energieverteilung (Abb. 3.12). Je höher die Beschleunigungsspannung ist, desto mehr Röntgenquante werden erzeugt und desto energiereichere bzw. härtere Quanten (Quanten mit kürzerer Wellenlänge) entstehen. (Beim Betrieb einer Röntgenröhre wird die Intensität der Strahlung durch die Höhe des Katodenstromes

relative Anzahl der emittierten Röntgenquanten

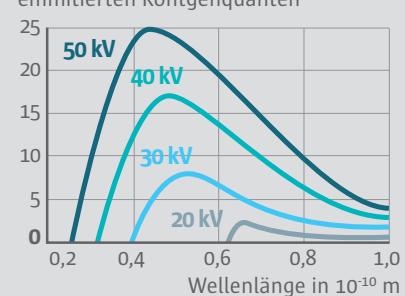
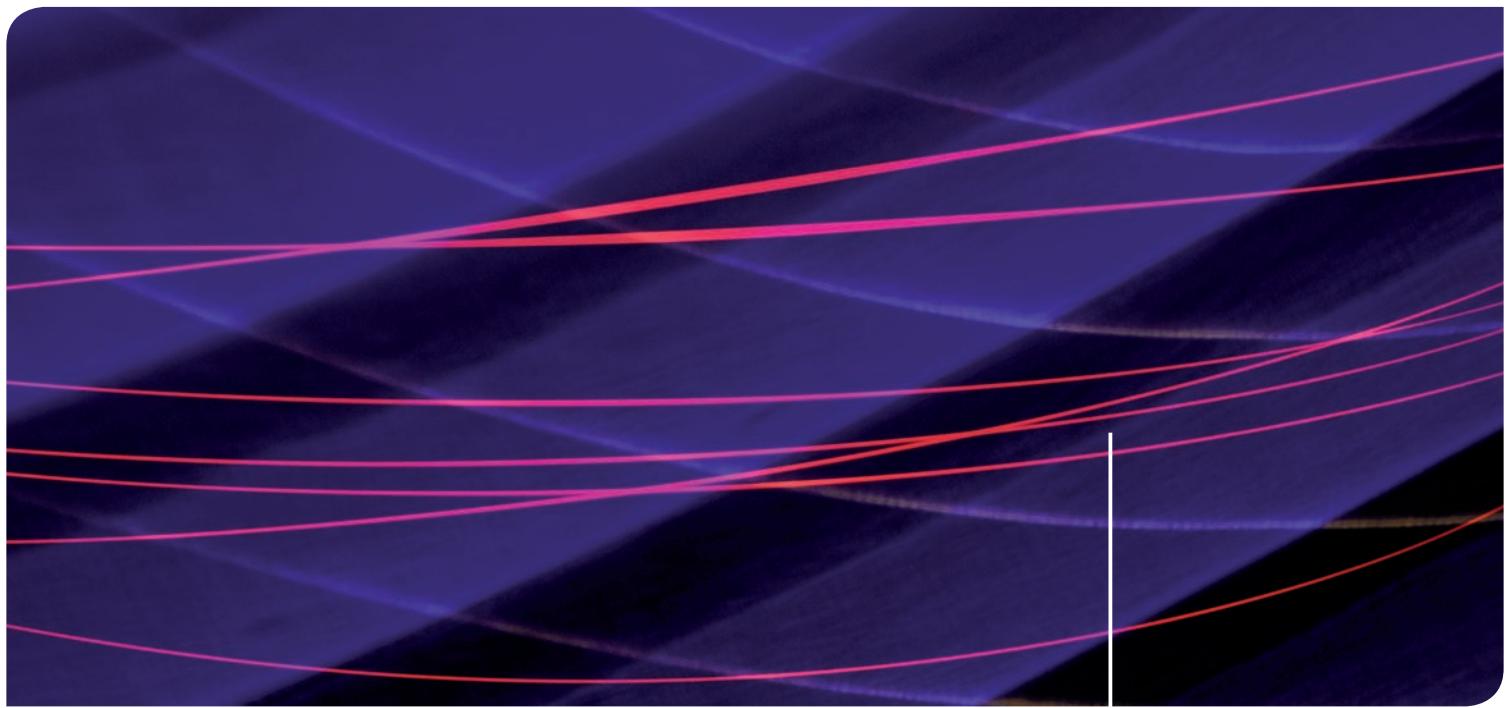


Abb. 3.12

Röntgenbremspektren bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen

Wechselwirkungen von Strahlung mit Materie

4



Beim Auftreffen auf Materie wirken Strahlungsteilchen und Gammaquanten auf Hüllen oder Kerne der Atome ein und rufen an ihnen Veränderungen hervor. Dabei finden stets auch Rückwirkungen auf die Teilchen oder Quanten statt (z. B. Verringerung ihrer Energie, Änderung der Bewegungsrichtung). Man spricht deshalb

allgemein von Wechselwirkungen der Strahlung mit Materie. Welche Wechselwirkungen stattfinden, ist von der Art der Strahlung, der Energie der Strahlungsteilchen bzw. Quanten und der Art des Wechselwirkungsmaterials abhängig. Häufig treten verschiedene Wechselwirkungen gleichzeitig auf, wobei meist eine überwiegt.

4.1 Wechselwirkungen von Alphateilchen mit Materie

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

Durch die Abtrennung eines Elektrons aus der Atomhülle entsteht ein positives Ion. Das abgelöste Elektron kann sich an ein neutrales Atom anlagern, sodass sich ein negatives Ion bildet. Beide Ionen ergeben dann ein Ionenpaar (Abb. 4.01).

Wie viel Energie zur Bildung eines Ionenpaares erforderlich ist, zeigt Tab. 4.01.

Die Alphateilchen geben ihre Energie längs der Flugbahn nicht gleichmäßig ab, so dass die Anzahl der erzeugten Ionenpaare pro Weglänge auch nicht gleich ist. Die in Abb. 4.02 dargestellte Kurve steigt mit wachsender Weglänge erst langsam, dann schnell an, um am Ende steil abzufallen. Dies bedeutet, dass die größte Anzahl der Ionenpaare pro Weglänge erst dann erzeugt wird, wenn das Alphateilchen bereits einen großen Teil seiner Bewegungsenergie verloren hat. Dieser Sachverhalt lässt sich vereinfacht dadurch erklären, dass sich langsame Teilchen längere Zeit in der Nähe der Atomhüllen aufhalten und verstärkt Ionisationen hervorrufen können.

Bei der Anregung eines Atoms wird ein Hüllenelektron vom Kern weiter entfernt und damit auf ein höheres Energieniveau gehoben. Beim Zurückspringen auf das Ausgangsniveau wird die zugeführte Energie in Form eines Strahlungsquants (Photons) oder mehrerer Strahlungsquanten abgegeben (Abb. 4.03).

Tab. 4.01

Energie zum Abtrennen des ersten Elektrons (Ionisierungsenergie) bei verschiedenen Gasen

Gasart	H ₂	He	N ₂	O ₂	Luft	Ar
Ionisierungsenergie in eV	36,3	41,1	34,7	31,1	34,0	26,1

Bei einer Ionisation oder Anregung gibt ein Alphateilchen Energie ab und wird dadurch langsamer. In Luft unter Normalbedingungen ist es nach 4 bis 7 cm auf thermische Geschwindigkeiten abgebremst. Es kann dann an Atomhüllen

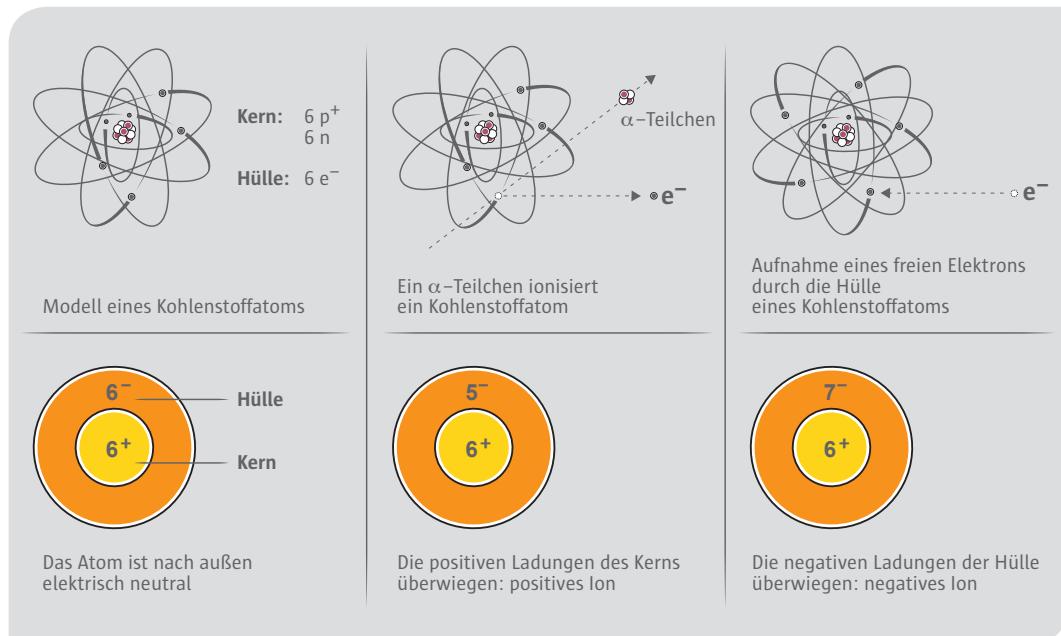


Abb. 4.01

Ladungsverhältnisse bei der Bildung eines Ionenpaares

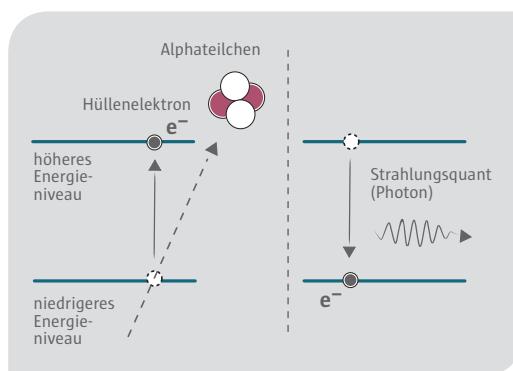
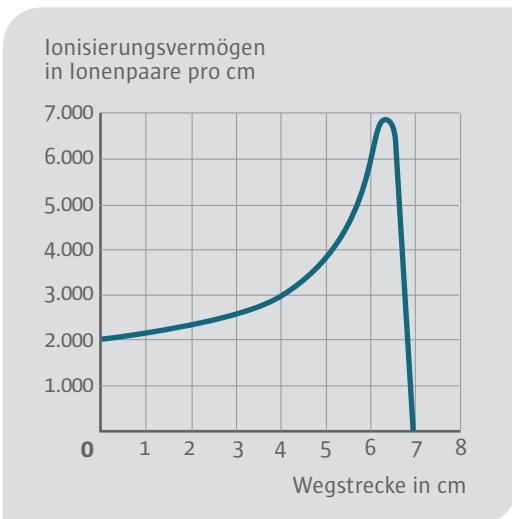


Abb. 4.02 (links)
Ionenbildung längs der Bahn eines Alphateilchens in Luft

Abb. 4.03
Anregung eines Atoms durch ein Alphateilchen

keine Veränderungen mehr herbeiführen und ist deshalb für Organismen ungefährlich. Ein abgebremstes Alphateilchen nimmt zwei freie Elektronen auf und wandelt sich dadurch in ein Heliumatom um:



Wechselwirkungen von Betateilchen mit Materie 4.2

Treffen Betateilchen auf Materie, treten Ionisation, Anregung, Streuung und Erzeugung von Bremsstrahlung auf. Ionisation und Erzeugung von Bremsstrahlung sind die wichtigsten Prozesse. Bei einer Ionisierung ist die Anzahl der pro Weglänge erzeugten Ionenpaare 100 bis 1.000-mal kleiner als bei Alphateilchen (Tab. 4.02). Betastrahlung gehört deshalb zu einer locker ionisierenden Strahlung im Gegensatz zu Alphastrahlung, die dicht ionisiert.

Energie der Teilchen in MeV	Ionenpaare/cm	
	bei Alphateilchen	bei Betateilchen
1	60.000	50
10	16.000	45

Ein Betateilchen muss also eine längere Strecke zurücklegen, um seine Energie durch Ionisationen abzugeben. Die Reichweite von Betastrahlen ist deshalb größer als die von Alphastrahlen. Da Betateilchen aber eine kontinuierliche Energieverteilung besitzen, kann keine einheitliche Reichweite angegeben werden. Sie liegt in Luft zwischen einigen Zentimetern bis zu einigen Metern.

Auch bei Betateilchen steigt die Anzahl der gebildeten Ionenpaare, wenn sie sich verlangsamen. Es wird ein Maximum erreicht, wenn die Teilchen zur Ruhe kommen. Reicht die Energie eines Betateilchens nicht aus, um ein Atom zu ionisieren, kommt es zu einer Anregung.

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

Da Betateilchen eine sehr geringe Masse haben, werden sie bei Wechselwirkungen mit den Atomhüllen (Ionisation, Anregung) oder den Atomkernen (Strahlungsbremse) aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung stark abgelenkt. Sie werden gestreut. Eine solche Ablenkung wird umso wahrscheinlicher, je geringer die Energie eines Elektrons ist. Sind die Betateilchen auf thermische Geschwindigkeiten abgebremst, werden sie entweder von positiven Ionen eingefangen oder sie lagern sich an neutralen Atomen an und bilden dadurch negative Ionen.

Tab. 4.02
Erzeugung von Ionenpaaren pro Weglänge

4.3 Wechselwirkungen von Neutronen mit Materie

Neutronen besitzen keine elektrische Ladung. Sie sind elektrisch neutral und können deshalb auf die Atomhüllen des Wechselwirkungsmaterials nicht einwirken. Aus diesem Grund finden direkte Ionisationen und Anregungen nicht statt. Die Wechselwirkungen der Neutronen mit Materie beruhen auf Zusammenstößen mit den Atomkernen. Die dabei auftretenden Vorgänge sind von der Energie der Neutronen abhängig. Da viele Neutronenquellen Neutronen mit einer kontinuierlichen Energieverteilung emittieren, werden meist mehrere Wechselwirkungsprozesse gleichzeitig auftreten.

Elastische Zusammenstöße finden im Energiebereich 10 keV bis 1 MeV statt. Die Summe der Bewegungsenergien der Stoßpartner vor und nach dem Stoß ist dann gleich:

$$E_1 = E_2 + E_3$$

Ein Neutron kann seine Bewegungsenergie am besten auf einen Kern übertragen, wenn Kern und Neutron dieselbe Masse haben. Beim Kern eines Wasserstoffatoms (Proton) ist eine Energieübertragung zu fast 100 % möglich. Der von einem Neutron angestoßene Kern, der nun selbst Bewegungsenergie besitzt, wird Rückstoßkern genannt. Seine Bewegungsenergie kann so groß sein, dass er sich aus dem Atom- oder Molekülverband löst und andere Atome in seiner Umgebung ionisiert oder anregt. Wegen seiner großen Masse legt er dabei nur einen relativ kleinen Weg zurück, so dass eine sehr hohe Anzahl von Ionenpaaren pro Wegstrecke erzeugt wird.

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

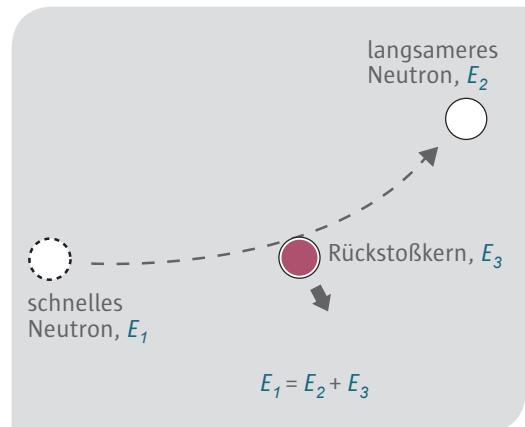


Abb. 4.04

Elastischer Stoß in Modelldarstellung (E_1, E_2, E_3 : Bewegungsenergien)

Zu unelastischen Zusammenstößen kommt es vorwiegend im Energiebereich zwischen 1 MeV und 10 MeV. Dabei ist die Summe der Bewegungsenergien vor und nach dem Stoß nicht gleich. Das Neutron hat den Atomkern angeregt, der die Anregungsenergie in Form eines Gammaquants wieder abgibt (Abb. 4.05).

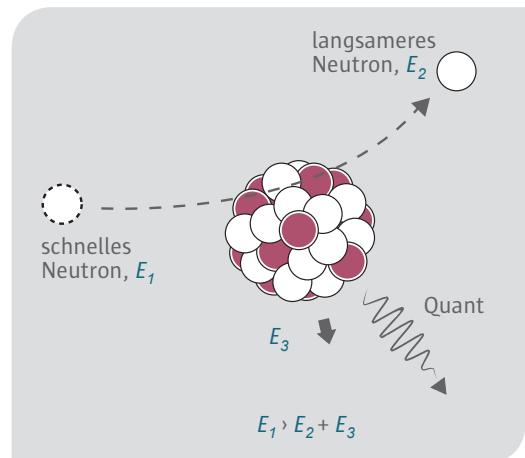


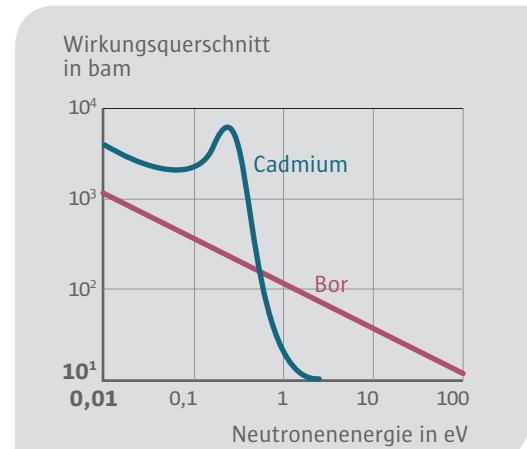
Abb. 4.05 (links)

Unelastischer Stoß in Modelldarstellung (E_1, E_2, E_3 : Bewegungsenergien)

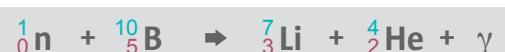
Abb. 4.06

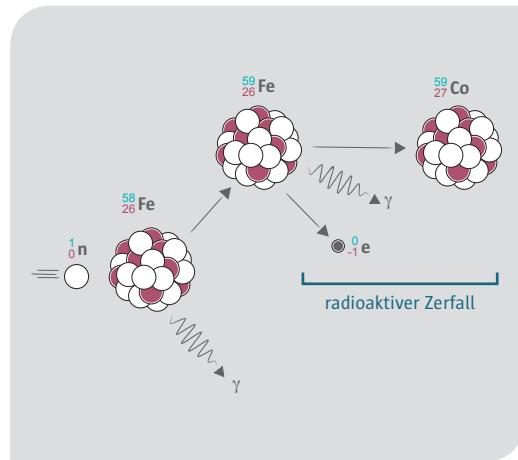
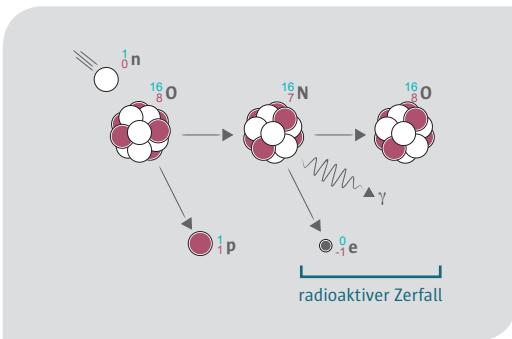
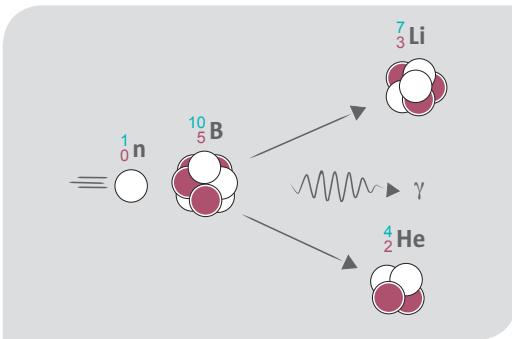
Wahrscheinlichkeit für den Neutroneneinfang in Abhängigkeit von der Energie

Die Wahrscheinlichkeit für einen Neutroneneinfang ist von der Bewegungsenergie der Neutronen abhängig. Der Wirkungsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Kernreaktion eintritt. Seine Einheit ist 1 barn = 10^{-28} m^2 . Das ist etwa die Querschnittsfläche eines Atomkerns. Sie ist meist umso größer, je langsamer die Neutronen sind. Das Neutron kann dann längere Zeit in Kernnähe verweilen, wodurch die Wahrscheinlichkeit für eine Einfangreaktion größer wird. Daneben gibt es noch den Resonanzeingang, bei dem Neutronen ganz bestimmter Energie bevorzugt eingefangen werden (Abb. 4.06).



Eine für die Reaktorregelung und den Strahlenschutz wichtige Kernreaktion ist der Neutroneneinfang durch Bor (Abb. 4.07). Die dabei entstehenden Alphateilchen wandeln sich durch Aufnahme von freien Elektronen in Helium um:





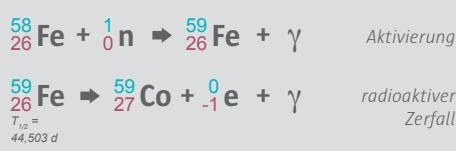
Der Sauerstoff-16, der im Kühlmittel eines Siedewasserreaktors enthalten ist, wandelt sich z. T. durch Neutroneneinfang in Stickstoff-16 um (Abb. 4.08). Er ist radioaktiv (Halbwertszeit 7,13 s), sodass besondere Strahlenschutzmaßnahmen getroffen werden müssen.

Stickstoff-16 zerfällt unter Aussendung eines Betaeilchens zu Sauerstoff-16. Gleichzeitig werden sehr energiereiche Gammaquanten abgegeben.



Metallteile und Beton, die zum Aufbau eines Kernkraftwerks verwendet werden, können durch Neutronenbestrahlung ebenfalls radioaktiv werden und dann über eine mehr oder weniger lange Zeit Strahlung aussenden.

Beispiel 1:



Beispiel 2:

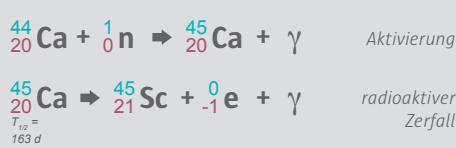


Abb. 4.07 (links)

Kernreaktion beim Neutroneneinfang mittels Bor in den Regelstäben eines Reaktors (Modelldarstellung)

Abb. 4.08 (links unten)

Aktivierung von Sauerstoff durch Neutronen und anschließender radioaktiver Zerfall (Modelldarstellung)

Abb. 4.09

Aktivierung von Eisen durch Neutronen und anschließender radioaktiver Zerfall (Modelldarstellung)

Die Absorption thermischer Neutronen im Körpergewebe geschieht hauptsächlich durch die folgenden Reaktionen. Die erste, häufigere Reaktion führt zu einem stabilen Endkern, bei der zweiten Reaktion entsteht ein radioaktives Zwischenprodukt.

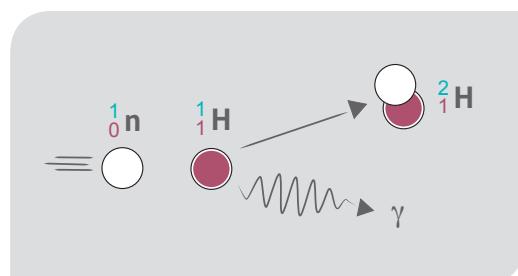


Abb. 4.10

Neutroneneinfang durch H-1 (Modelldarstellung)

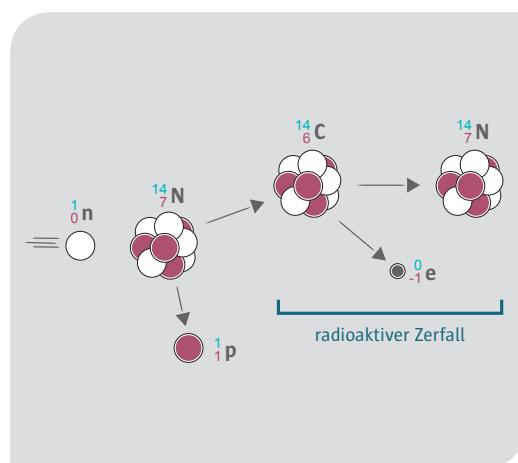


Abb. 4.11

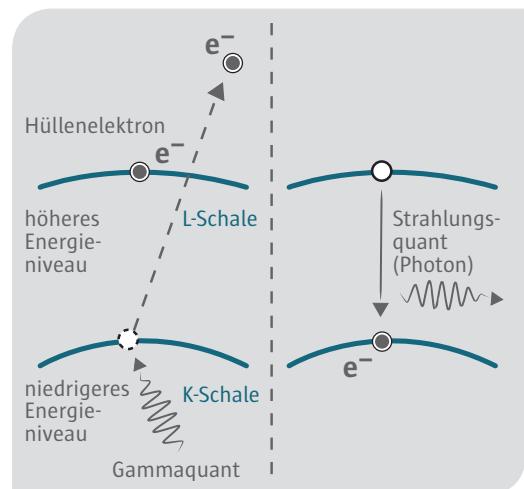
Aktivierung von Stickstoff durch Neutronen und anschließender radioaktiver Zerfall (Modelldarstellung)

4.4 Wechselwirkungen von Gammastrahlen mit Materie

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

Abb. 4.13

Entstehung der Röntgenfluoreszenzstrahlung (Modelldarstellung)



4.4.1 Photoeffekt

Beim Photoeffekt, der vorherrschend bei kleinen Quantenenergien und großen Kernladungszahlen des Absorbermaterials auftritt, kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen den Quanten und den Elektronen der Atomhüllen. Die Energie eines von der Hülle aufgenommenen Quants dient zur Abspaltung eines Elektrons (oder mehrerer Elektronen). Überschüssige Energie erhält das abgetrennte Elektron als Bewegungsenergie. Der Photoeffekt führt also zu einer Ionisation (Abb. 4.12). Beim Photoeffekt verschwindet das Gammaquant. Das frei werdende Elektron wird Photoelektron genannt. Es gibt seine Energie durch Anregung oder Ionisation an die Atome der Umgebung ab (Sekundärstrahlung).

Abb. 4.12 (links)

Photoeffekt (Modelldarstellung)

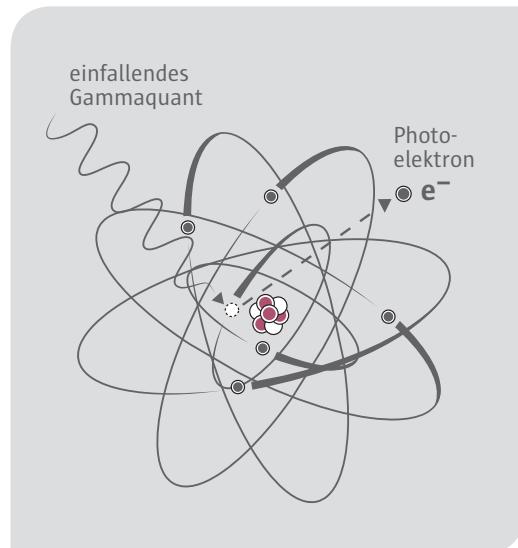
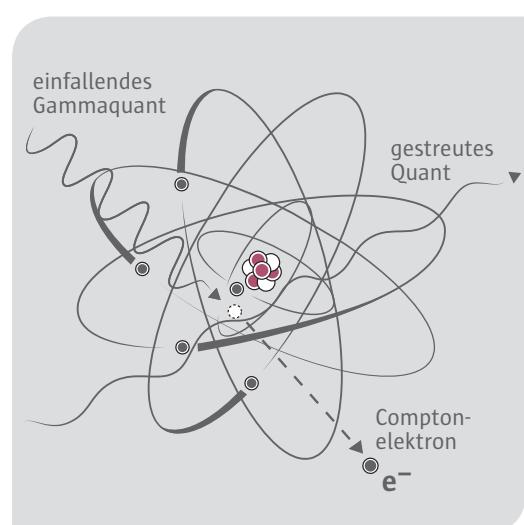


Abb. 4.14

Comptoneffekt (Modelldarstellung)



Der Photoeffekt findet bevorzugt an Elektronen der kernnahen Schalen (überwiegend der K-Schale) statt. Das Atom besitzt dann an dieser Stelle eine Lücke, in die ein Elektron aus einer weiter außen liegenden Schale springt. Die dabei frei werdende Energie wird als Röntgenquant emittiert. Diese Strahlung wird Röntgen-Fluoreszenzstrahlung genannt (Abb. 4.13). Sie kann entweder das Wechselwirkungsmaterial verlassen oder weitere Photoeffekte hervorrufen.

Das Atom, an dem die Comptonstreuung stattgefunden hat, verliert ein Elektron seiner Hülle und wird dadurch ionisiert. Das gestreute Gammaquant kann weitere Effekte hervorrufen, bis seine Energie so niedrig geworden ist, dass es durch einen Photoeffekt ganz aufgezehrt wird. Das Comptonelektron kann im Wechselwirkungsmaterial zu Ionisationen und Anregungen führen.

Beim Photoeffekt und beim Comptoneffekt reagieren Gammaquanten mit Hüllenelektronen. Der Unterschied zwischen beiden Effekten ist in Tab. 4.03 zusammengestellt.

Photoeffekt	Comptoneffekt
Ein Gammaquant wirkt auf ein kernnahes Elektron ein.	Ein Gammaquant wirkt auf ein äußeres Elektron ein.
Das Gammaquant überträgt seine gesamte Energie auf das Elektron und verschwindet dabei. (Abtrennarbeit, Beschleunigung des Elektrons)	Das Gammaquant überträgt einen Teil seiner Energie auf das Elektron (Abtrennarbeit praktisch null, Beschleunigung des Elektrons) und wird als Quant mit niedrigerer Frequenz (größere Wellenlänge) gestreut.
Das Elektron wird vom Atom losgelöst (Ionisation).	Das Elektron wird vom Atom losgelöst (Ionisation).
Das Photoelektron kann weitere Wechselwirkungen verursachen.	Das Comptonelektron kann weitere Wechselwirkungen verursachen.

Tab. 4.03

Vergleich von Photoeffekt und Comptoneffekt bei Gammaquanten

4.4.3 Paarbildung

Bei höherer Quantenenergie überwiegt im Wechselwirkungsmaterial der Paarbildungseffekt. Dabei wird das Quant im elektrischen Feld eines Atomkerns vernichtet und in ein Elektron und ein Positron umgewandelt (Abb. 4.15). Ein Quant muss mindestens eine Energie von 1,022

Energie und finden die Wechselwirkungen in einem Material mit höherer Ordnungszahl statt, kann dabei Bremsstrahlung erzeugt werden. Der primäre Umwandlung von hoher Quantenenergie in kinetische Teilchenenergie folgt dann eine teilweise Rückumwandlung in Quanten niedriger Energie (Abb. 4.17).

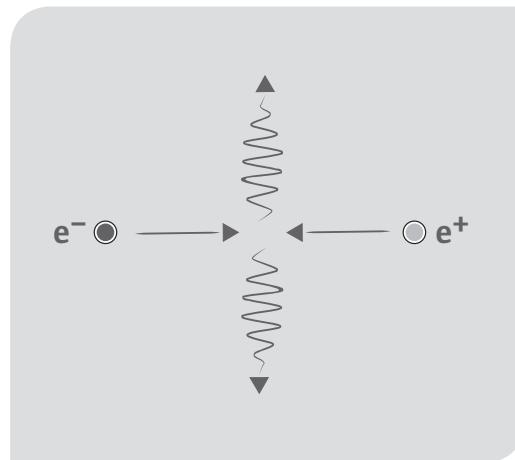
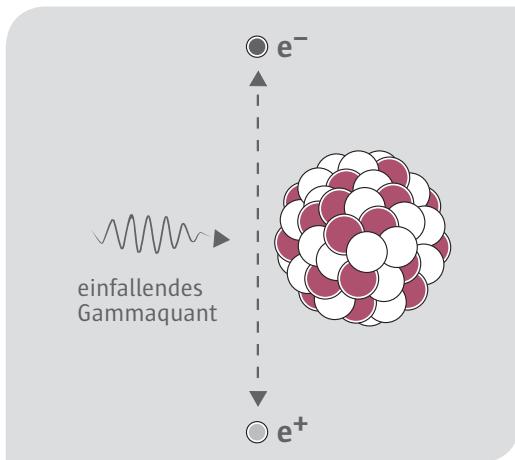


Abb. 4.15 (links)

Paarbildung (Modelldarstellung)

Abb. 4.16

Elektron und Positron vereinigen sich und zerstrahlen. Es entstehen zwei Gammaquante. (Modelldarstellung)

MeV besitzen, um die beiden Teilchen erzeugen zu können, denn die Ruhemasse des Elektrons und des Positrons von jeweils $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg ist äquivalent einer Energie von je 0,511 MeV. Überzählige Quantenenergie übernehmen Elektron und Positron als Bewegungsenergie. Der Paarbildungseffekt spielt vor allem bei Elementen mit hoher Ordnungszahl eine Rolle.

Das beim Paarbildungseffekt entstandene Positron hat eine relativ geringe Lebensdauer. Nach der Übertragung der Bewegungsenergie auf das Wechselwirkungsmaterial vereinigt es sich mit einem Elektron und zerstrahlt dabei in zwei Gammaquante von je 0,511 MeV. Dieser Vorgang stellt die Umwandlung von Materie in Energie dar (Abb. 4.16).

Besitzen die bei Photoeffekt, Comptoneffekt oder Paarbildung erzeugten Elektronen genügend

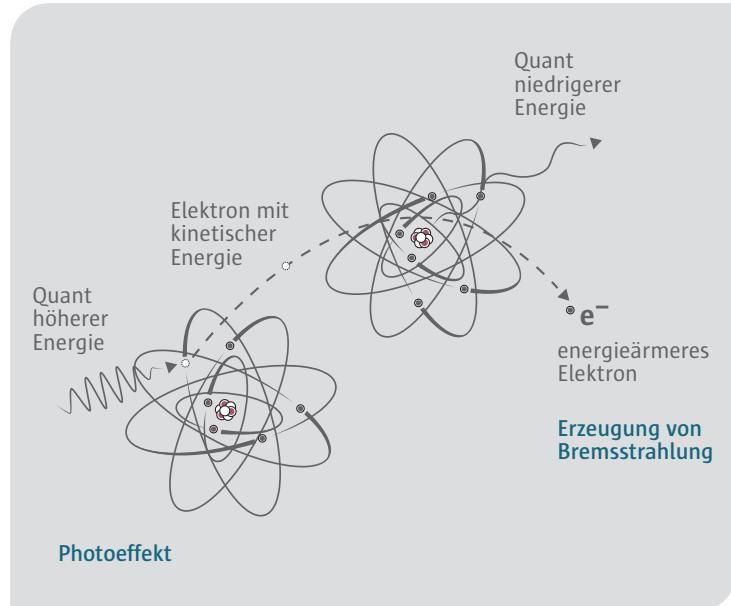
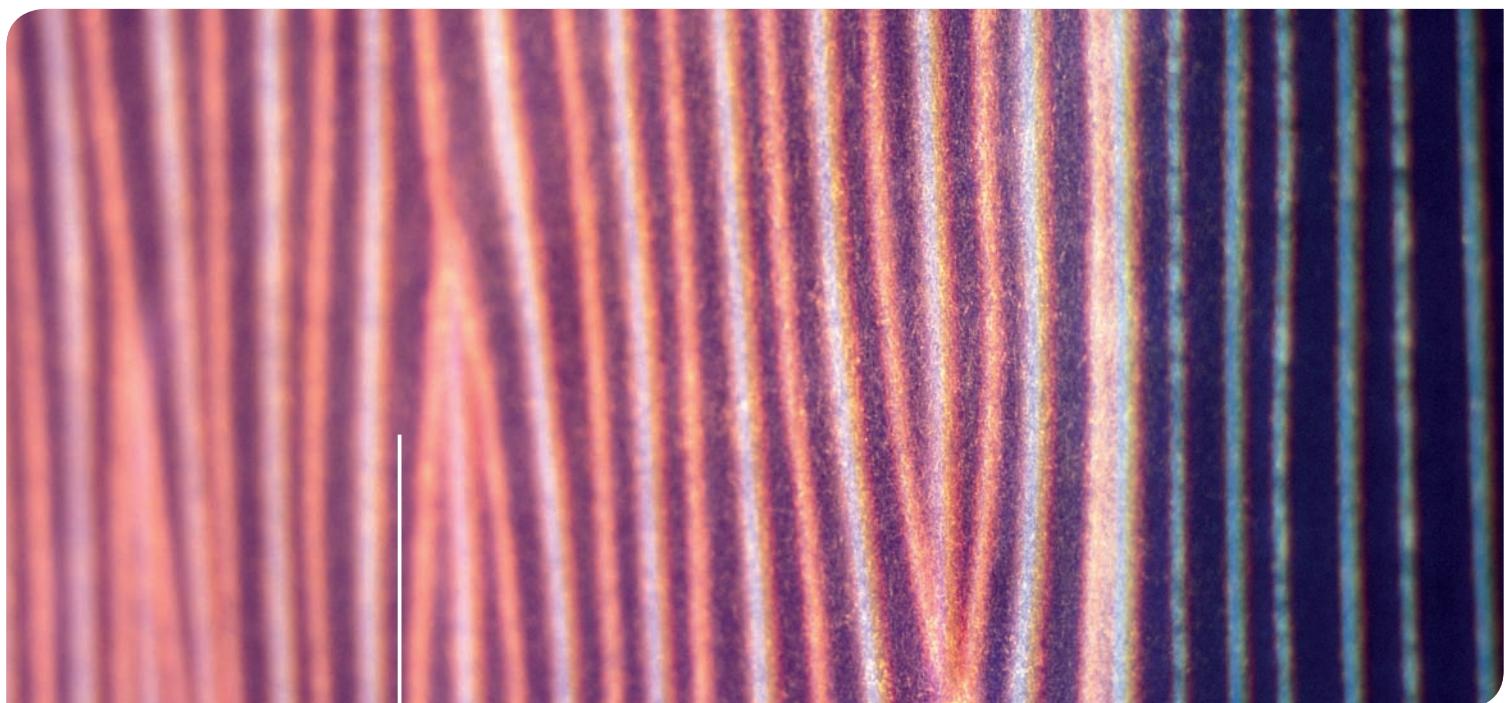


Abb. 4.17

Umwandlung eines Gammaquants höherer Energie in kinetische Teilchenenergie und teilweise Rückumwandlung in ein Quant niedrigerer Energie (Modelldarstellung)

5

Strahlenmessung und Maßeinheiten

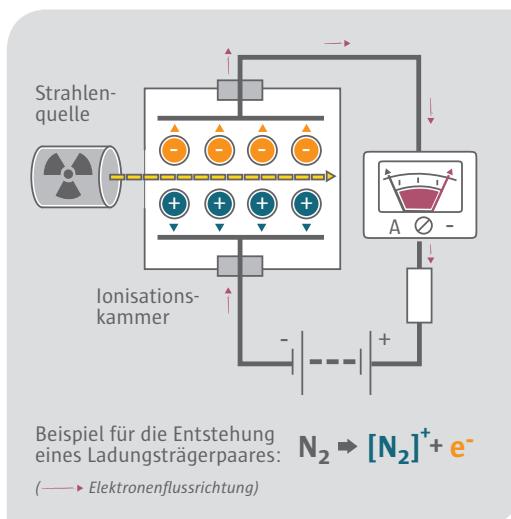


Der Mensch besitzt kein Sinnesorgan für ionisierende Strahlen. Sie lassen sich nur mit Hilfe von Messinstrumenten nachweisen. Strahlenmessungen sind nur möglich, wenn Wechselwirkungen der Strahlung mit Materie stattfinden. Erst wenn die Strahlung eine nachweisbare Verände-

runghervorruft, kann diese erfasst werden. Der Grad der Veränderung ist dann ein Maß für die Intensität der verursachenden Strahlung. Einige besonders wichtige Messverfahren werden hier in vereinfachter Form vorgestellt.

Ionisationskammer 5.1

Eine Ionisationskammer besteht im einfachsten Fall aus einem luftgefüllten Behälter, in dem sich zwei Elektroden befinden. Sie sind über einen Strommesser mit einer Gleichspannungsquelle verbunden. Gelangt Strahlung in das Innere, werden Ionen erzeugt, und die Luft zwischen den Elektroden wird elektrisch leitend. Daraufhin kommt es zu einem Stromfluss, der durch ein Messgerät angezeigt wird (Abb. 5.01).



In der Ionisationskammer werden positives Ion und herausgelöstes Elektron zur jeweils entgegengesetzten geladenen Elektrode hin beschleunigt. Die Spannung wird so gewählt, dass einerseits Ion und Elektron nicht mehr rekombinieren (sich wieder vereinigen) können, andererseits aber die Beschleunigung zu den Elektroden nicht so stark

ist, dass durch Zusammenstöße mit Luftpolekülen weitere Ionisationen ausgelöst werden. Die Stromstärke ist dann allein der Anzahl der primär erzeugten Ionen bzw. Elektronen proportional. Die Stromstärken werden an einem Messgerät angezeigt.

Zum Nachweis von Alpha- und Betateilchen werden die Wände der Ionisationskammer aus sehr dünnem Material hergestellt, damit die Teilchen möglichst ungehindert in das Innere gelangen können. Bei Gammaquanten wählt man dagegen dicke Wände, damit die Gammaquanten aus den Atomen der Kammerwand Elektronen herauslösen, die dann in der Luft der Kammer weitere Ionisationen hervorrufen. Soll die Kammer näherungsweise den Verhältnissen in einem organischen Gewebe angepasst werden, verwendet man für den Aufbau spezielle Kunststoffe.

Die durch Strahlung erzeugten Elektronen stellen eine Ladungsmenge dar. Daraus wurde die früher benutzte Größe der Ionendosis hergeleitet. Die Ionendosis gibt die erzeugte Ladung pro Masse der durchstrahlten Luft an. Wenn in 1 kg Luft durch ionisierende Strahlen so viele Ionen bzw. freie Elektronen erzeugt werden, dass im angeschlossenen Leiterkreis 1 Sekunde lang ein Strom von 1 A fließt, beträgt die Ionendosis 1 C/kg. Das entspricht $6,25 \cdot 10^{18}$ Elektronen bzw. Ionen pro 1 kg Luft. Für die Ionendosis wurde die Einheit Röntgen R verwendet. Für Umrechnungen gilt:

$$1 R = 2,58 \cdot 10^4 \text{ C/kg.}$$

Abb. 5.01

Prinzipieller Aufbau einer Ionisationskammer

Energiedosis 5.2

In Luft wird zur Bildung eines Ladungsträgerpaares die Energie von 34 eV benötigt. Da der Quotient 1 C/1 kg Auskunft darüber gibt, wie viele Paare erzeugt worden sind, lässt sich auch die Energie berechnen, die dafür notwendig war. Statt die erzeugte Ladung oder die erzeugten Ladungsträgerpaare anzugeben, kann man also auch die Energie betrachten, die bei der Ionisation auf die Luftpoleküle übertragen worden ist. Die von einem Stoff aufgenommene Energie kann

ebenfalls als Maß für die physikalische Strahleneffektivität verwendet werden. Dafür ist die Energiedosis definiert worden. Die Energiedosis einer ionisierenden Strahlung gibt die pro Masse eines durchstrahlten Stoffes absorbierte Energie an:

$$\begin{aligned} \text{Energiedosis} &= \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse}}; \\ D &= \frac{E}{m} \end{aligned}$$

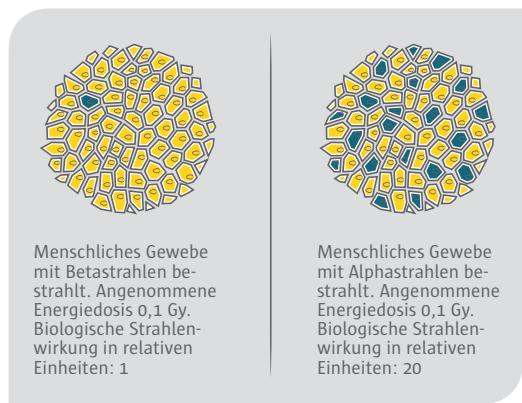
Der Quotient 1 J/1 kg wird als Einheit für die Energiedosis verwendet. Der besondere Einheitename für die Energiedosis ist das Gray (Gy):

$$1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}}$$

Die Energiedosis wurde früher in der Einheit Rad (rd oder rad) angegeben. Das Wort Rad ergibt sich aus der englischen Bezeichnung „radiation absorbed dose“. Für Umrechnungen gilt: 1 Gy = 100 Rad.

5.3 Organdosis

Mit der Energiedosis allein kann die biologische Strahlenwirkung nicht beurteilt werden. Es zeigt sich nämlich, dass bei gleichen Energiedosen, aber unterschiedlichen Strahlenarten, die hervorgerufenen Effekte unterschiedlich sein können. Wird z. B. von zwei gleichen biologischen Objekten das eine mit Alphastrahlen, das andere mit Betastrahlen bestrahlt und nehmen beide Objekte gleich viel Energie auf, so sind die durch die Alphastrahlen hervorgerufenen biologischen Strahlenwirkungen etwa 20-mal größer (Abb. 5.02). Die größere biologische Wirkung von Alphastrahlen kann durch die größere Anzahl erzeugter Ionen oder Anregungen pro Weglänge erklärt werden. Eine dichtere Ionisierung in einem kleinen Bereich ist viel schädlicher als eine gleich große Anzahl von Ionisationen, die auf einen größeren Bereich verteilt sind.



Tab. 5.01

Strahlungs-Wichtungsfaktoren nach Strahlenschutzverordnung

Abb. 5.02

Bei gleicher Energiedosis rufen Alphastrahlen eine größere biologische Wirkung hervor als Betastrahlen

- intakte Zelle
- geschädigte Zelle

R im Index stammt von der englischen Bezeichnung radiation (Strahlung).

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen biologischen Wirkung der verschiedenen Strahlenarten wurde der Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R eingeführt (Tab. 5.01). Das Produkt aus der über das Gewebe oder Organ T gemittelten Energiedosis $D_{T,R}$, die durch die Strahlung R erzeugt wird, und dem Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R ist die Organdosis $H_{T,R}$. Besteht die Strahlung aus Arten und Energien mit unterschiedlichen Werten von w_R , so werden die einzelnen Beiträge addiert. Für die Organdosis H_T für das Gewebe oder Organ T gilt dann:

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

Da die Strahlungs-Wichtungsfaktoren Zahlenwerte ohne Einheit sind, ergibt sich als Einheit der Organdosis der Quotient J/kg (dieselbe Einheit wie für die Energiedosis). Als besonderer Einheitename für die Organdosis ist das Sievert (Sv) festgelegt worden.

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

Für die Organdosis wurde früher die Einheit Rem (rem = röntgen equivalent man) benutzt. Für Umrechnungen gilt: 1 Sv = 100 rem.

Die so definierte Organdosis und deren Angabe in der Einheit Sievert darf aufgrund der Herleitung der Strahlungs-Wichtungsfaktoren streng genommen nur für Personen und Strahlendosen bis in den Bereich von etwa 0,5 bis 1 Sv verwendet werden. Die Energiedosis mit ihrer Einheit Gray kann dagegen für jede Dosis, jedes Lebewesen und jeden Stoff genutzt werden. Bei medizinisch-therapeutischen Strahlenanwendungen erfolgt daher wegen der normalerweise sehr hohen Dosiswerte die Dosisangabe in Gray.

Effektive Dosis 5.4

Gewebe oder Organe	Gewebe-Wichtungsfaktor w_T
Gonaden	0,20
Dickdarm	0,12
Knochenmark (rot)	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,05
Brust	0,05
Leber	0,05
Schilddrüse	0,05
Speiseröhre	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
andere Organe oder Gewebe*	0,05

* Für Berechnungszwecke setzten sich „andere Organe oder Gewebe“ wie folgt zusammen: **Bauchspeicheldrüse, Dünndarm, Gebärmutter, Gehirn, Milz, Muskel, Nebennieren, Niere und Thymusdrüse.** In den außergewöhnlichen Fällen, in denen ein einziges der „anderen Organe und Gewebe“ eine Äquivalentdosis erhält, die über der höchsten Dosis in einem der 12 Organe liegt, für die ein Wichtungsfaktor angegeben ist, sollte ein Wichtungsfaktor von 0,025 für dieses Organ oder Gewebe und ein Wichtungsfaktor von 0,025 für die mittlere Organdosis der restlichen „anderen Organe und Gewebe“ gesetzt werden.

Da die Strahlenempfindlichkeit einzelner Organe bzw. Gewebe z. T. erhebliche Unterschiede aufweist, liefern die jeweiligen Organdosen unterschiedliche Beiträge zum strahlenbedingten Gesamtrisiko, also der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Krebs oder Leukämie. Zur Berechnung der effektiven Dosis E , die ein Maß für das gesamte Strahlenrisiko darstellt, wurden deshalb von der Internationalen Strahlenschutzkommission bezüglich der Strahlenspätschäden für verschiedene Gewebe und Organe die Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T (Tab. 5.02) eingeführt.

Tim Index stammt von der englischen Bezeichnung tissue (= Gewebe)

Die effektive Dosis E ist die Summe der mit dem zugehörigen Gewebe-Wichtungsfaktor w_T multiplizierten Organdosen H_T . Dabei ist über alle in Tab. 5.02 aufgeführte Organe und Gewebe zu summieren. Die Einheit der effektiven Dosis ist ebenfalls das Sievert (Einheitenzeichen: Sv):

$$E = \sum_T w_T H_T$$

Tab. 5.02
Gewebe-Wichtungsfaktoren nach Strahlenschutzverordnung

Folgedosis 5.5

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

angegeben, ist für Erwachsene ein Zeitraum von 50 Jahren und für Kinder ein Zeitraum vom jeweiligen Alter bis zum Alter von 70 Jahren zu Grunde zu legen.

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt$$

5.6 Bestimmung der Impulsrate mit einem Zählrohr

Detektoren, die das Ionisationsprinzip nutzen, können auch als Zählrohre gebaut werden (z. B. Geiger-Müller-Zählrohr) (Abb. 5.03). Ein verschlossenes Metallrohr oder ein Glasrohr mit innen aufgedampftem Metallbelag bildet die Katode, ein dünner, im Innern axial angebrachter Draht die Anode.

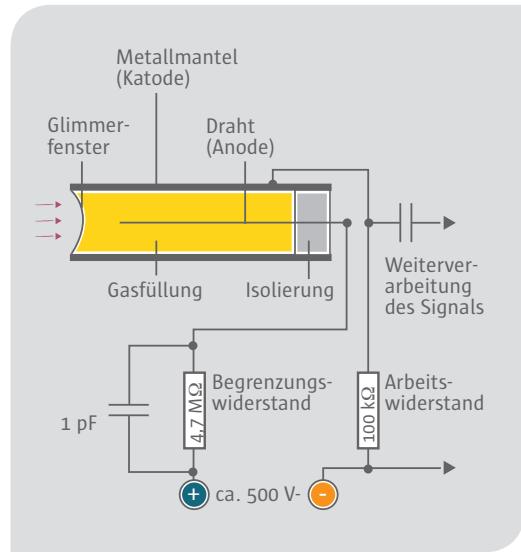


Abb. 5.03

Schnitt durch ein gasgefülltes Endfensterzählrohr

Als Gasfüllung verwendet man Gemische aus Edelgasen mit Zusätzen von Halogenen bei Unterdruck. Die Spannung beträgt 500 bis 600 V. Damit Strahlungsteilchen in das Innere gelangen können, ist entweder die Rohrwand sehr dünn oder es gibt ein besonders dünnes Strahleneintrittsfenster. Gammaquanten können dagegen auch ein Metallrohr durchdringen und dabei Elektronen aus den Atomhüllen abtrennen. Das Ionisationsvermögen von Quanten ist energieabhängig und etwa 100-mal kleiner als das von Alpha- oder Betaeilchen.

Abb. 5.04

Ganzkörper-Monitor mit großflächigen Proportionalzählern an einem Kontrollbereichsausgang

Ionen, die im Innern des Rohres durch Strahlung entstanden sind, werden durch die Spannung so stark beschleunigt, dass lawinenartig weitere Ionisationen entstehen. Ein Ionenpaar kann dabei bis zu 10^8 Elektronen bzw. Ionen erzeugen. Es entsteht also ein Stromstoß, der am Widerstand einen Spannungsabfall verursacht. Er wird elektronisch weiter verarbeitet und durch ein Zählgerät registriert. Dadurch ist es möglich, die Teilchenzahl zu zählen.

Solange im Zählrohr eine Entladung stattfindet, kann kein weiteres Teilchen registriert werden. Die Zeit, die vergeht, bis das Zählrohr nach der Registrierung eines Teilchens wieder arbeitsbereit ist, wird Totzeit genannt (positive Ionen müssen zur Kathode wandern, Spannung zwischen Kathode und Anode muss sich wieder aufbauen). Bei hochwertigen Zählrohren ist die Totzeit < 0,1 ms. Eine Bestimmung der Art und Energie der Teilchen, die

den Impuls auslösen, ist mit einem Geiger-Müller-Zähler nicht möglich.

Der Proportionalzähler ist ein weiterer Detektor, der den Ionisationsprozess in einem Gas zum Strahlungsnachweis nutzt. Aufgrund seiner besonderen Betriebsweise gestattet er eine Unterscheidung zwischen Alpha- und Betastrahlung. Er wird häufig als Detektor mit großen Strahleneintrittsfenstern gebaut. Er dient zur Überwachung großer Flächen (Hände, Schuhsohlen, Kleidung, Tischflächen usw.). Der Zählraum besteht aus einem flachen Körper von etwa 15 mm Höhe. Er ist auf einer Seite mit einem Strahleneintrittsfenster aus metallbedampfter, sehr dünner Kunststofffolie abgeschlossen. Durch den Detektor strömt als Zählgas Methan oder ein Argon-Methan-Gemisch. Daher auch der Name „Durchflusszähler“. Die Anzahl der pro Zeiteinheit registrierten Teilchen oder Gammaquanten hängt neben der Aktivität der Quelle auch von der Größe des Strahleneintrittsfensters ab. Durchflusszähler lassen sich auch zu größeren Einheiten zusammenschalten (Abb. 5.04).



Aktivität 5.7

Strahlungsteilchen und Strahlungsquanten, die bei Kernumwandlungen entstehen, werden von einer radioaktiven Substanz willkürlich nach allen Seiten ausgesandt. Ein Zählrohr kann also immer nur einen Teil der Strahlung registrieren. Um neben der Impulsrate auch angeben zu können, wie strahlungsaktiv eine untersuchte radioaktive Strahlenquelle insgesamt ist, hat man die Aktivität definiert. Die Aktivität gibt die Anzahl der Kernumwandlungen pro Zeit an.

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

Die Anzahl der Kernumwandlungen wird als Zahlenwert ohne Einheit angegeben. Für die Zeit wird als Einheit die Sekunde gewählt. Die Einheit der Aktivität ist also $1/\text{s} = \text{s}^{-1}$ (reziproke Sekunde). Als besonderer Einheitenname für die Aktivität wurde das Becquerel (Bq) eingeführt.

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

Die Zahlenangabe in Becquerel gibt also die Anzahl der Kernumwandlungen pro Sekunde an. Bei 10 Kernumwandlungen pro Sekunde ergibt sich eine Aktivität von 10 Bq, bei 1.000 Kernumwandlungen pro Sekunde eine Aktivität von 1.000 Bq = 1 kBq.

Bei sehr kurzer Halbwertszeit eines Radionuklids nimmt seine Aktivität relativ schnell ab. So hat z. B. 1 pg (1 billionst Gramm) I-131 eine Aktivität von rund 4.600 Bq. Da die Halbwertszeit von I-131 8,02 d beträgt, ist die I-131-Aktivität nach dieser Zeit auf 2.300 Bq gesunken, nach weiteren 8,02 d auf 1.150 Bq usw.

Viele Radionuklide bilden nach ihrer Umwandlung Tochterkerne, die wiederum radioaktiv sind. So wandelt sich z. B. Ra-226 in das radioaktive

Edelgas Rn-222 um. Aktivitätsangaben für ein Radionuklid – in diesem Fall Ra-226 – beziehen sich aber immer auf die Ausgangssubstanz, nicht auf die angesammelten Folgeprodukte. Eine Angabe über die Aktivität kann sich allerdings auch auf die Gesamtheit der vorhandenen Radionuklide (Gesamtaktivität) oder auf ein einzelnes Radionuklid beziehen. Dieses muss immer mit angegeben werden.

Früher war die Einheit der Aktivität „Curie“ (Ci). Für die Umrechnung gilt:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Curie (Ci)} &= 10^0 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \\ 1 \text{ Millicurie (mCi)} &= 10^{-3} \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ Bq} \\ 1 \text{ Mikrocurie (\mu Ci)} &= 10^{-6} \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ Bq} \\ 1 \text{ Nanocurie (nCi)} &= 10^{-9} \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^1 \text{ Bq} \\ 1 \text{ Picocurie (pCi)} &= 10^{-12} \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Bq} \end{aligned}$$

Abgeleitete Aktivitätseinheiten:

- Spezifische Aktivität (Bq/kg, Bq/g usw.), siehe Tab. 5.03
- Aktivitätskonzentration (Bq/m³, Bq/l usw.)
- Flächenaktivität (Bq/m², Bq/cm² usw.)

Radionuklid	spezifische Aktivität in Bq/g
H-3	$3,6 \times 10^{14}$
C-14	$1,7 \times 10^{11}$
Fe-59	$1,8 \times 10^{15}$
Co-60	$4,1 \times 10^{13}$
Kr-85	$1,4 \times 10^{13}$
Sr-90	$5,3 \times 10^{12}$
I-131	$4,6 \times 10^{15}$
Xe-133	$6,8 \times 10^{15}$
Cs-134	$4,8 \times 10^{13}$
Cs-137	$3,2 \times 10^{12}$
U-nat	$2,5 \times 10^4$
Pu-239	$2,3 \times 10^9$
K-nat	$3,1 \times 10^1$

Tab. 5.03

Spezifische Aktivität einiger Radionuklide (gerundet)

Aktivitätsbestimmung 5.8

Die spezifische Aktivität eines Stoffes (z. B. von Nahrungsmitteln) kann mit Hilfe eines Zählrohrs bestimmt werden. Dazu muss ein besonderes Messverfahren angewandt werden. Dies ist in Abb. 5.05 in vereinfachter Form dargestellt.

Zunächst wird die Messapparatur kalibriert. Dazu benutzt man eine Lösung, deren spezifische Aktivität genau bekannt ist (z. B. Lösung mit Cs-134,

$A_{sp} = 540 \text{ Bq/g}$). Von dieser Lösung entnimmt man z. B. genau 1 g, das man mit Wasser auf 1 kg auffüllt. Das Wasser hat jetzt eine spezifische Aktivität von 540 Bq/kg (natürliche Aktivität nicht mitgerechnet). Anschließend wird ein dünnwandiges Zählrohr in die Flüssigkeit getaucht und die Impulsrate ermittelt. Es wird angenommen, dass sie 216/s beträgt. Da im gesamten Wasser 540 Kernumwandlungen pro Sekunde stattfinden, ist

demnach nur ein Teil der Strahlung vom Zählrohr registriert worden.

Die Impulsrate muss also jeweils mit dem Korrekturfaktor multipliziert werden, um die tatsächliche Aktivität der Flüssigkeit zu erhalten.

$$K = \frac{540}{216} = 2,5$$

In einem zweiten Schritt wird der Probenbehälter entleert, gesäubert und mit 1 kg Milch

gefüllt. Man taucht das Zählrohr erneut ein und bestimmt die Impulsrate. Sie soll hier 108/s betragen. Da der Korrekturfaktor 2,5 beträgt, finden in der Milch $108/s \cdot 2,5 = 270$ Umwandlungen/s statt. Es ergibt sich also eine spezifische Aktivität von $A_{sp} = 270$ Bq/kg. Diese Angabe sagt jedoch nichts darüber aus, welche Radionuklide in der Milch vorhanden sind. Durch die Glaswand des Zählrohres gelangen nur die Gammaquanten und die energiereichen Betateilchen. Bei reinen Alphastrahlern oder reinen Betastrahlern muss ein anderes Messverfahren gewählt werden.

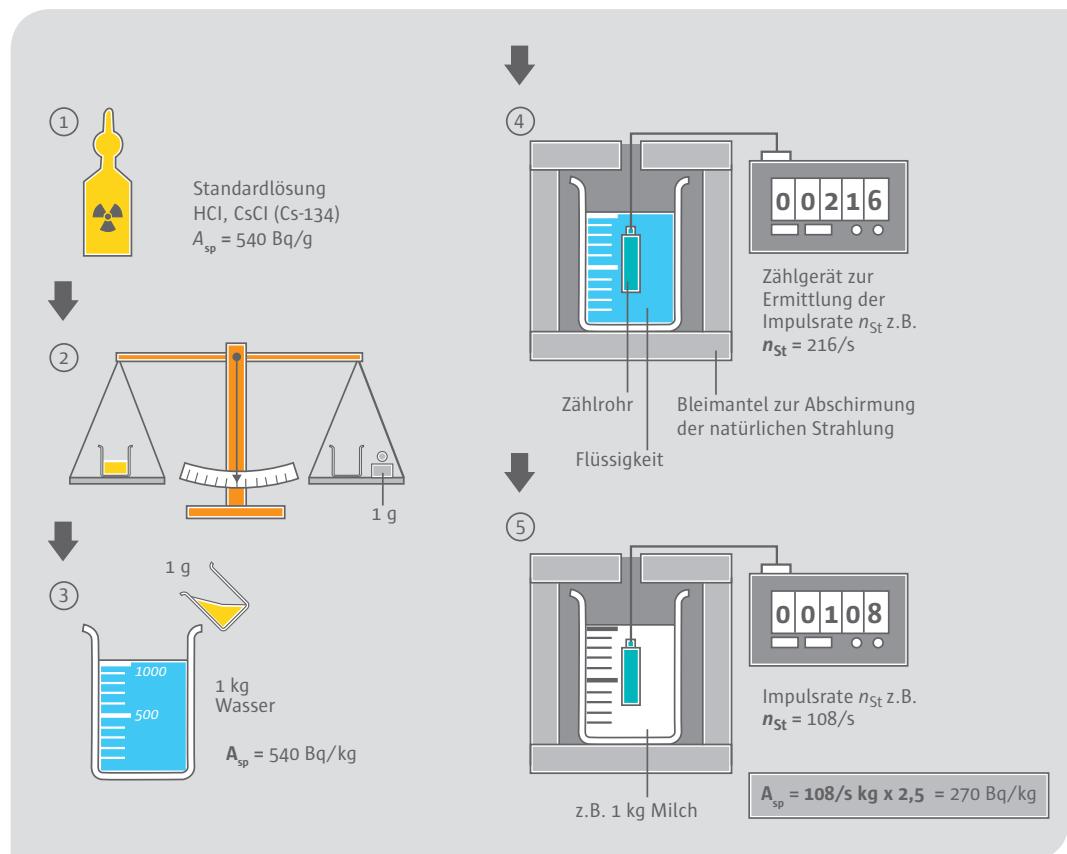


Abb. 5.05

Bestimmung der spezifischen Aktivität (vereinfachte Darstellung)

5.9 Bestimmung von Radionukliden mit der Gammaspektroskopie

Bei der Bestimmung der Gesamtaktivität kann man nicht angeben, welche Radionuklide die Strahlung verursacht haben. Da die einzelnen Radionuklide aber für den Menschen unterschiedlich gefährlich sind, muss man sie aus Gründen des Strahlenschutzes einzeln bestimmen.

Fast alle Radionuklide senden Gammaquanten einer charakteristischen Energie aus (Tab. 5.04). Durch Bestimmung der Gammaenergien lassen sich die Radionuklide identifizieren.

Dafür verwendet man heute bevorzugt Halbleiterdetektoren. Der Halbleiterdetektor besteht im Prinzip aus einer Halbleiterdiode, die

Radionuklid	Energie der Gammaquanten in keV
N-16	6.129; 7.115
Na-22	1.275
K-40	1.461
Co-60	1.332; 1.173 ...
I-131	364; 637; 284
Cs-134	605; 796 ...
Cs-137/ Ba-137 m	662
Ra-226	186 ...
U-238	(50 ...)

Tab. 5.04

Energie der Gammaquanten einiger Radionuklide
(Reihenfolge gibt die Häufigkeit an, Intensitäten unter 1 % in Klammern)

in Sperrrichtung betrieben wird. Dringt ein Gammaquant in die Sperrsicht ein, wird in ihr ein Elektronen-Loch-Paar erzeugt. Die Ladungstrennung führt zum Aufbau einer elektrischen Spannung. Im Idealfall wird das Gammaquant dabei „aufgezehrt“ und die gesamte Energie auf das Elektron übertragen (Photoeffekt, siehe Kapitel 4.4.1). Die Amplitude des Spannungsimpulses ist dann der übertragenen Energie proportional. Die nachgeschaltete Elektronik braucht also nur die Spannungsimpulse nach ihrer Amplitude zu sortieren und zu zählen. Über einen Bildschirm oder einen Drucker erhält man dann eine Darstellung, wie sie Abb. 5.06 und Abb. 5.07 zeigen. Auf der Abszissenachse sind die Gammaenergien in Form schmaler Kanäle angegeben, auf der Ordinatenachse die Anzahl der Impulse, die von Gammaquanten bestimmter Energie erzeugt worden sind.

Bei der Wechselwirkung von Gammaquanten mit Materien treten außer dem Photoeffekt auch andere Effekte auf (Comptoneffekt, Paarbildungseffekt, siehe Kapitel 4.4.2 und 4.4.3). Diese „Störeffekte“ führen zu einer Beeinträchtigung des Messergebnisses. Man versucht sie durch besondere Maßnahmen möglichst klein zu halten.

Damit in Halbleiterdetektoren durch die Umgebungswärme nicht unkontrolliert Elektronen-Loch-Paare entstehen, muss der Detektor mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden.

Zur Herabsetzung der natürlichen Umgebungsstrahlung wird häufig eine mindestens 5 cm dicke Bleiabschirmung eingesetzt. Halbdetektoren, mit denen Alpha- und Betateilchen nachgewiesen werden sollen, müssen eine Sperrsicht dicht unter der Oberfläche besitzen.

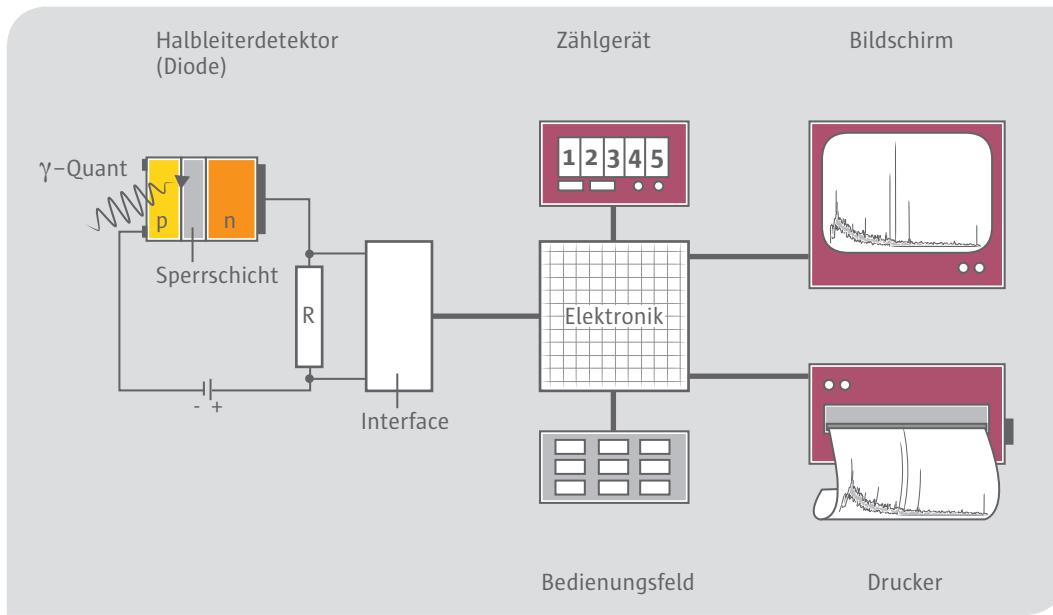


Abb. 5.06
Vereinfachte Darstellung eines Versuchsaufbaus zur Gammaspektroskopie

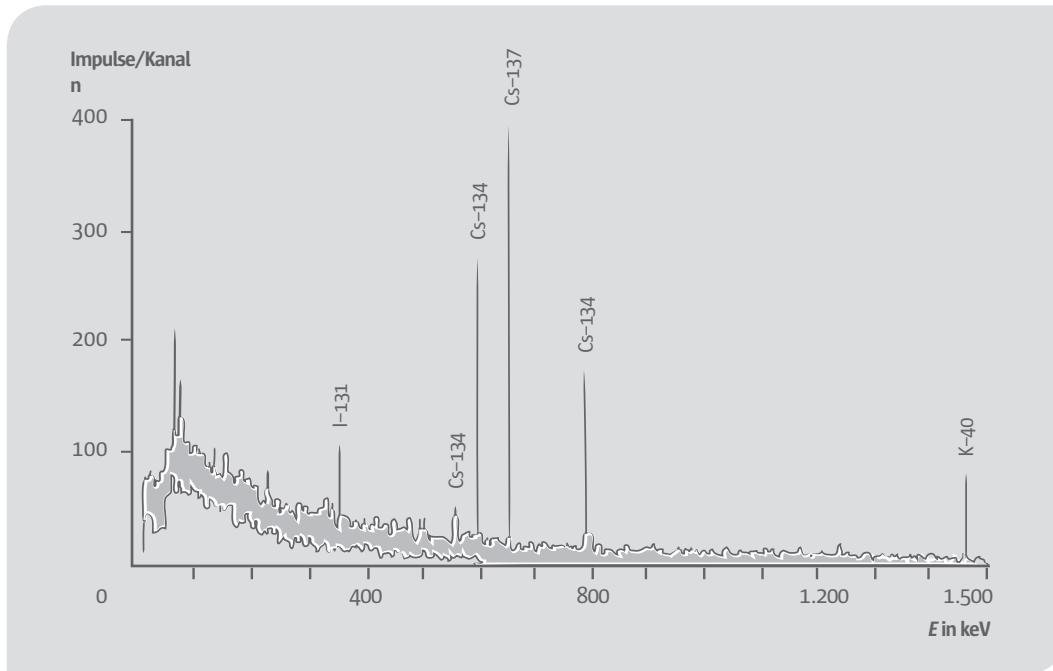


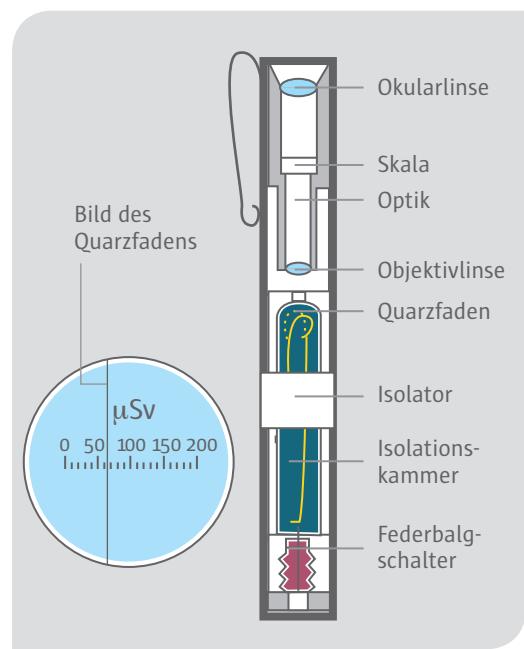
Abb. 5.07
Beispiel eines Gammaenergie-Spektrums

5.10 Stabdosimeter

Nach dem Prinzip der Ionisationskammer arbeitet auch das Stabdosimeter (Taschendosimeter). Es handelt sich um ein füllhalterähnliches Messgerät, in dem sich ein Elektrometer (Elektroskop) befindet. Man lädt das Stabdosimeter an einer Spannungsquelle auf, sodass sich das bewegliche Fädchen spreizt. Auf einer durchsichtigen Skala wird dann der Wert Null angezeigt. Treffen Gammastrahlen das Dosimeter, entlädt sich das Elektrometer, und die Spannung an ihm sinkt. Das ist am Rückgang des gespreizten Fäden zu erkennen. Je mehr sich das Elektrometer entlädt, desto stärker geht das Fädchen zurück. Die Skala ist in μSv kalibriert, sodass sofort die Körperdosis abgelesen werden kann (Abb. 5.08). Solange keine Bestrahlung erfolgt, beträgt der Spannungsrückgang durch Selbstentladung und die natürliche Umgebungsstrahlung nur wenige Prozent. Für Messungen von Gammastrahlen niedriger Energie werden Stabdosimeter mit speziellen Kunststoffbehältern verwendet.

Abb. 5.08

Prinzipaufbau eines Stabdosimeters



5.11 Filmdosimeter

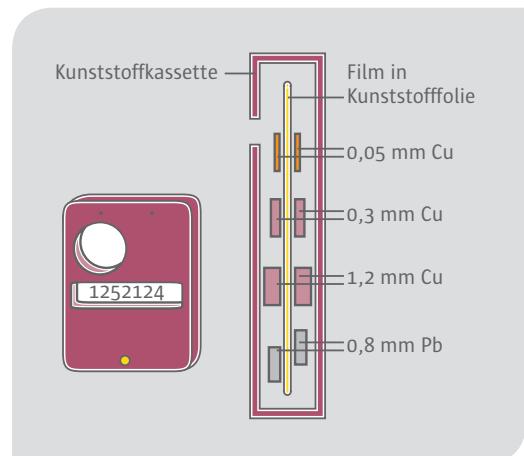
Filmdosimeter bestehen aus einer Kunststoffkassette, in der sich in einer lichtdichten Kunststofffolie zwei Filmabschnitte befinden. In der Kassette sind außerdem einige Metallfilter untergebracht (Abb. 5.09). Gammastrahlen, die in das Innere gelangen, rufen eine Schwärzung des Films hervor. Aus ihr lässt sich nachträglich ermitteln, wie groß die erhaltene Strahlendosis gewesen ist.

Abb. 5.09

Filmdosimeter
Vorderansicht und Seitenansicht
(vereinfachte Schnittzeichnung)

Die Gammaquanten lösen in der Kunststoffwand, in den Filtern und im Film Elektronen aus, die dann in der Silberbromid-Schicht Ionisationen bewirken. Dadurch kommt es zu Molekülveränderungen. Bei der Entwicklung des Films entstehen an diesen Stellen Silberkörnchen. Sie sind für Licht undurchlässig und rufen eine Trübung („Schwärzung“) des Films hervor. Die Trübung ist von der Energie und der Menge der einfallenden Quanten abhängig. Die Auswertung der Trübungsunterschiede wird mit speziellen Geräten vorgenommen und die Dosis mit Hilfe eines Computers berechnet.

Die Filmschwärzung ist aber nicht nur von der eingestrahlten Dosis, sondern auch von der Energie der eingestrahlten Quanten abhängig. Um die Energieabhängigkeit berücksichtigen zu können, sind Teile des Films mit verschiedenen Metallfiltern abgedeckt. Dadurch entstehen einzelne Felder. Je größer die Energie der Quanten ist, desto mehr Felder des Films werden getrübt.



Die an der Vorder- und Rückseite versetzt angeordneten Bleifilter ermöglichen es festzustellen, aus welcher Richtung die Strahlung gekommen ist. Kam sie von hinten, muss zusätzlich bedacht werden, dass sie dann den menschlichen Körper vollständig durchdrungen hat.

Neutronenmessgeräte 5.12

Neutronen sind nicht in der Lage, Atome direkt zu ionisieren. Um Neutronen nachzuweisen, lässt man sie Kernreaktionen ausführen. Die dabei erzeugten geladenen Teilchen (Alphateilchen, Spaltproduktkerne) bewirken dann Ionisationen. Zählrohre zum Nachweis von thermischen Neutronen bestehen aus einem gasgefüllten, verschlossenen Aluminium- oder Messingrohr. Seine Innenseite ist mit Bor, Lithium oder Uran-235 belegt. Es ist auch möglich, das Rohr mit dem Gas BF_3 zu füllen.

Es kommt dann zu folgenden Primärreaktionen:

Rohrauskleidung mit Bor oder Gasfüllung BF_3 :



Rohrauskleidung mit Lithium:



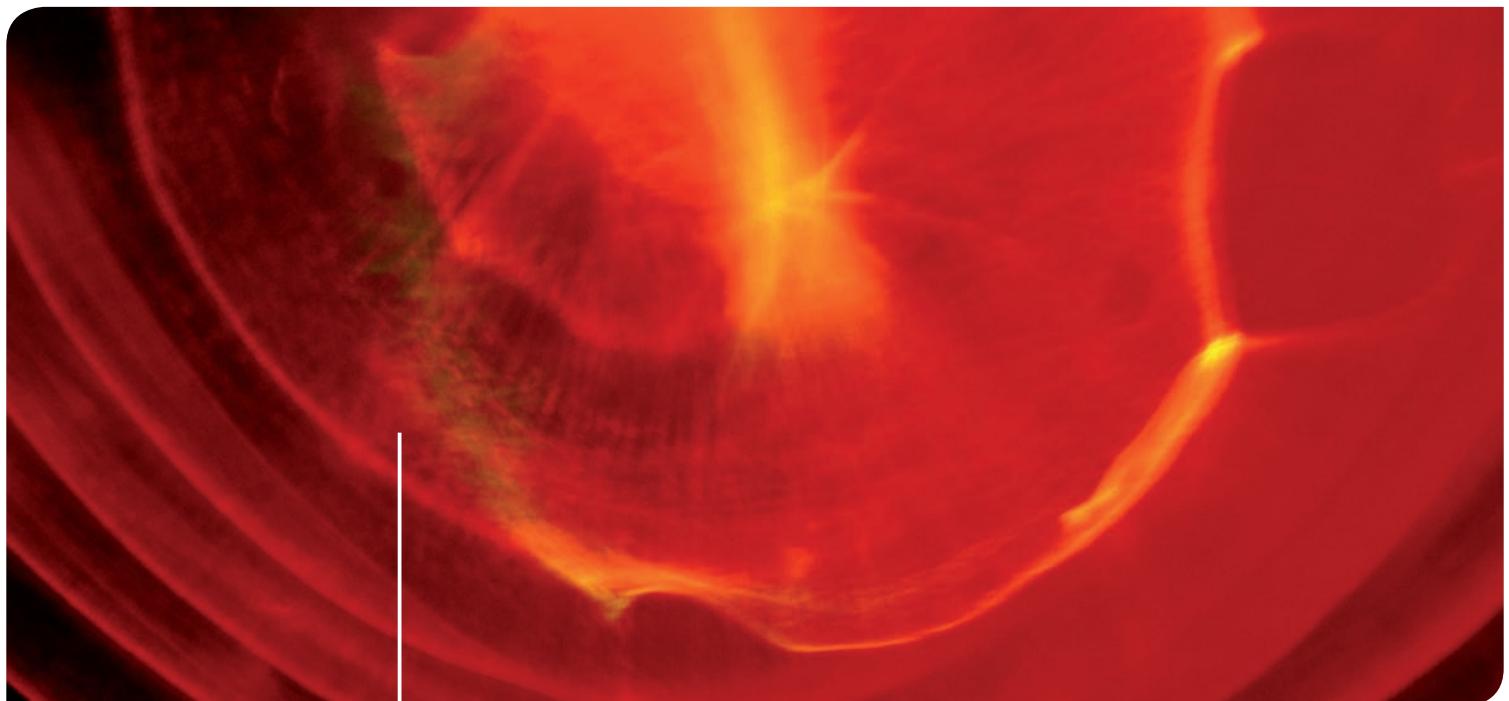
Rohrauskleidung mit Uran-235, z. B.:



Schnelle Neutronen können z. B. durch einen Paraffinmantel abgebremst werden, der um das Zählrohr gelegt wird. Durch wachsende Dicken von Kunststoffumhüllungen, die Neutronen abbremsen, lässt sich auch ihre Energie ermitteln.

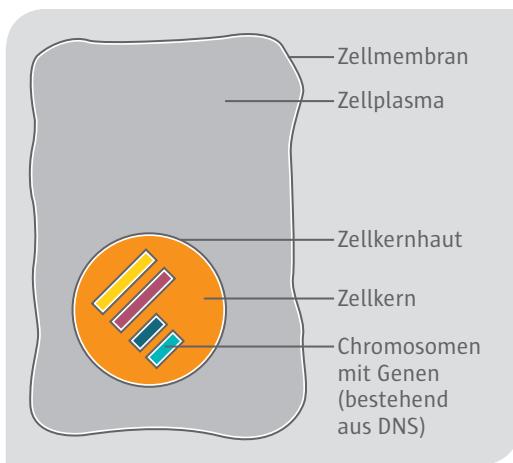
6

Strahlenwirkungen auf lebende Zellen



Aufbau einer Zelle 6.1

Grundbausteine aller Lebewesen sind Zellen. Es sind in der Regel sehr kleine Gebilde, die man mit bloßem Auge nicht erkennen kann. Die Körperzellen des Menschen haben Durchmesser zwischen 0,01 mm und 0,1 mm. Sie sind also mindestens 100.000-mal größer als ein Atom. Insgesamt enthält ein menschlicher Körper rund 50–100 Billionen Zellen, davon sind 25 Billionen rote Blutkörperchen (Erythrozyten). Trotz vielfältiger Unterschiede in Aufbau und Funktion der Zellen lassen sie sich mit demselben Schema beschreiben. Es ist in Abb. 6.01 dargestellt.



Die Zellmembran grenzt die Zelle nach außen hin ab. Sie ist aber für bestimmte Stoffe durchlässig. Dadurch können Stoffe zur Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen aufgenommen und so genannte Verbrennungsprodukte aus dem Innern ausgeschieden werden. Das Zellplasma besitzt eine komplizierte Struktur. In ihm laufen vielfältige Vorgänge ab, die zur Aufrechterhaltung des Zelllebens notwendig sind (Erneuerung bestimmter Zellbestandteile, Erzeugung von Energie, Wachstum, Vermehrung). Die Regelung der chemischen Prozesse wird von bestimmten Enzymen (Biokatalysatoren) übernommen.

Der Zellkern enthält die Chromosomen, in denen die Informationen über Aufbau und Funktionen der Zellen gespeichert sind. Die Chromosomenzahl ist bei jedem Lebewesen konstant (Tab. 6.01).

Lebewesen/ Pflanzen	Anzahl der Chromosomen
Spulwurm	2
Erbse	14
Walderdbeere	14
Kaninchen	44
Mensch	46
Menschenaffe	48
Kartoffel	48
Hund	78
Neunauge	174

Tab. 6.01

Chromosomenzahl einiger Lebewesen bzw. Pflanzen

Die Lebensdauer einer Zelle ist begrenzt. Damit es in einem Organismus nicht zur Abnahme des Zellbestandes kommt, müssen fortlaufend Zellen nachgebildet werden. Es werden jedoch nicht alle Zellen des menschlichen Körpers erneuert, so z. B. nicht die Nervenzellen und einige Arten von Muskelzellen. Bei Organen mit erhöhter Nutzung (z. B. Haut, Darmtrakt, Blutkörperchen) sind die Erneuerungsraten aber erstaunlich hoch. Tab. 6.02 gibt dazu einige Beispiele.

System	Produktionsrate in 10^9 Zellen/d
Haut	0,7
Magen/Darm	56,0
Erythrozyten (rote Körperzellen)	200,0
Lymphozyten (Art weißer Blutkörperchen)	20,0

Tab. 6.02

Erneuerungsraten menschlicher Zellen

Erbträger DNS 6.2

Die Zellen eines Organismus sind sehr stark spezialisiert. Die Chromosomen einer Zelle enthalten aber nicht nur die Informationen für diese speziellen Funktionen, sondern alle Informationen, die zur Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen eines Organismus erforderlich sind. Wie erreicht wird, dass jede Zelle nur das für sie passende aus dem Informationsspeicher abliest, ist noch nicht genau erforscht.

Die Chromosomen sind Träger der Gene (beim Menschen geschätzt 60.000/Zelle), diese

wiederum bestehen aus Molekülen, die man unter dem Namen Desoxyribonukleinsäure (deutsch abgekürzt DNS, englisch abgekürzt DNA) zusammenfasst. Sie enthalten letztlich die verschlüsselten Informationen. Die DNS enthält drei verschiedene Grundbausteine: den Zucker Desoxyribonukleinsäure, vier unterschiedliche organische Basen und Phosphorsäure. Sie sind zu einem langen Kettenmolekül verknüpft, das einer Strickleiter ähnelt. In Wirklichkeit ist diese Strickleiter noch zusätzlich schraubenförmig verdreht (Abb. 6.02).

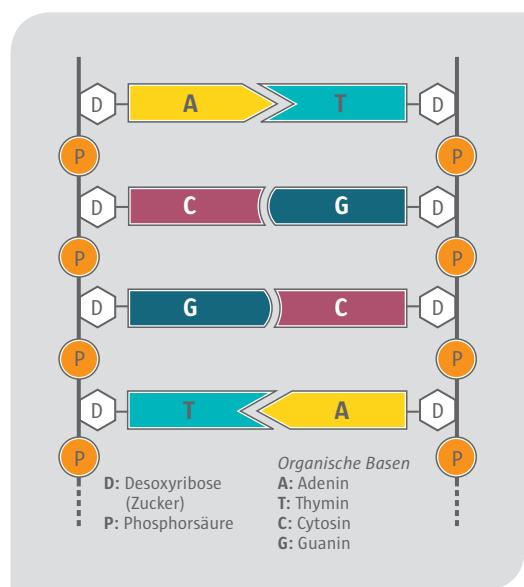


Abb. 6.02

DNS-Aufbau in vereinfachter Darstellung

Immer zwei bestimmte Basen bilden eine Sprosse dieser Strickleiter: Adenin-Thymin oder Guanin-Cytosin. Die Information wird durch die

Aufeinanderfolge der Basenpaare festgelegt, so wie bei der Schrift erst eine sinnvolle Reihenfolge von Buchstaben eine Wortinformation ergibt. Drei Basenpaare bilden die kleinste Verschlüsselungseinheit (Codon). 100 bis 300 hintereinander liegende Codons ergeben ein Gen.

Gesunde Zellen sind in der Lage, im richtigen Augenblick den richtigen Abschnitt der DNS zu lesen und dadurch die erforderlichen biochemischen Reaktionen auszulösen. Wenn ein Gen aktiviert wird, wird der Aufbau einer Aminosäurekette gesteuert, indem das dafür zuständige Codon abgelesen wird. Außerhalb des Zellkerns wird sie mit anderen Aminosäuren zu einem Enzym zusammengesetzt. Es kann dann in der Zelle selbst wirken oder in ein anderes Organ transportiert werden. Das Enzym wirkt wie ein Katalysator. Die beiden miteinander verbundenen Basen verhalten sich wie Positiv und Negativ zueinander. Durch die Basenfolge des einen Strangs ist also immer die Basenfolge des anderen Strangs festgelegt.

6.3 Zellteilungen

Bei der Befruchtung verschmelzen Ei- und Samenzelle miteinander. Die Chromosomen gelangen in einen gemeinsamen Zellkern. Damit es von Generation zu Generation nicht zu einer Verdopplung der Chromosomenzahl kommt, besitzen die Keimzellen nur den einfachen, die Körperzellen aber den doppelten Chromosomensatz. Bei der Entstehung der Fortpflanzungszellen muss also der Chromosomensatz der Körperzellen halbiert werden (Abb. 6.03).

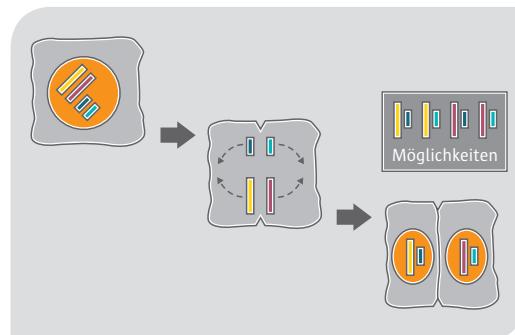
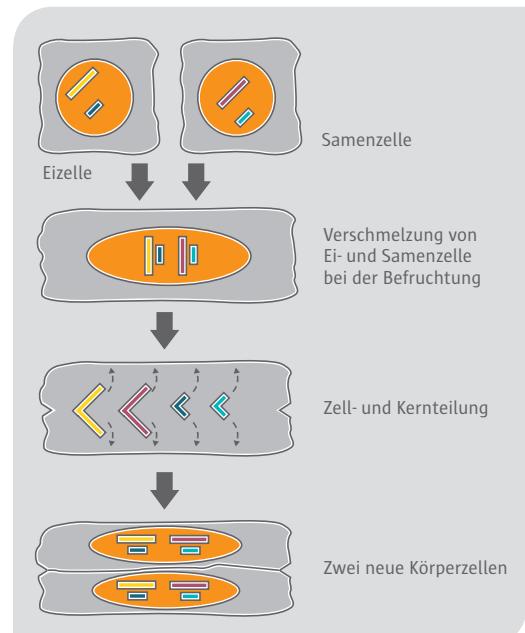


Abb. 6.03

Entstehung von Fortpflanzungszellen aus Körperzellen in vereinfachter Darstellung

Bei der Selbstverdoppelung einer DNS sowie durch eine Reihe äußerer Einflüsse (z. B. chemische Substanzen, energiereiche Strahlung, Temperaturschock, Viren) können Schäden auftreten, die zu einer Veränderung der Erbinformationen führen. Sie wird Mutation genannt. Vollzieht sie sich in einer Körperzelle, spricht man von somatischer Mutation (Soma = Körper). Bei den Keimzellen ergibt sich eine Keimzellenmutation. Man unterscheidet drei Mutationsarten: Gen- oder Punktmutation, Chromosomenmutation und Genommutation.



Bei der Vermehrung von Körperzellen durch Zellteilung vollzieht sich auch eine Teilung der Chromosomen im Kern. Dabei spalten sich in den Chromosomen die Doppelstränge der DNS der Länge nach, indem die Basenpaare aufgetrennt werden. Kurz hinter der Trennstelle bildet jede halbe DNS wieder das komplementäre Gegenstück, indem die erforderlichen Bausteine im Zellplasma gebildet werden. Zum Schluss sind zwei identische DNS-Stränge vorhanden (Chromatiden). Sie wandern in die beiden neuen Zellen (Abb. 6.04).

Abb. 6.04

Befruchtung und nachfolgende Zellteilung in vereinfachter Darstellung

- Bei einer Punktmutation ergeben sich Veränderungen in einem kleinen Bereich des DNS-Doppelstrangs. Wird z. B. die Folge der Basenpaare von G G A auf G A G umgestellt, ist der Code für die Entstehung einer anderen Aminosäure entstanden. Ein Enzym, in das diese veränderte Aminosäure eingebaut wird, hat dann unter Umständen veränderte biochemische Eigenschaften.
- Bei einer Chromosomenmutation bricht ein Chromosom in zwei oder mehrere Teile auseinander. Dabei können Teile verloren gehen, getrennt bleiben, fehlerhaft zusammenwachsen oder sich an andere Chromosomen anlagern.
- Von einer Genommutation spricht man, wenn sich die Chromosomenzahl ändert. So ist z. B. beim Down-Syndrom (Mongolismus) das Chromosom Nr. 21 nicht zweifach, sondern dreifach vorhanden.

Die strahlenbiologische Reaktionskette 6.4

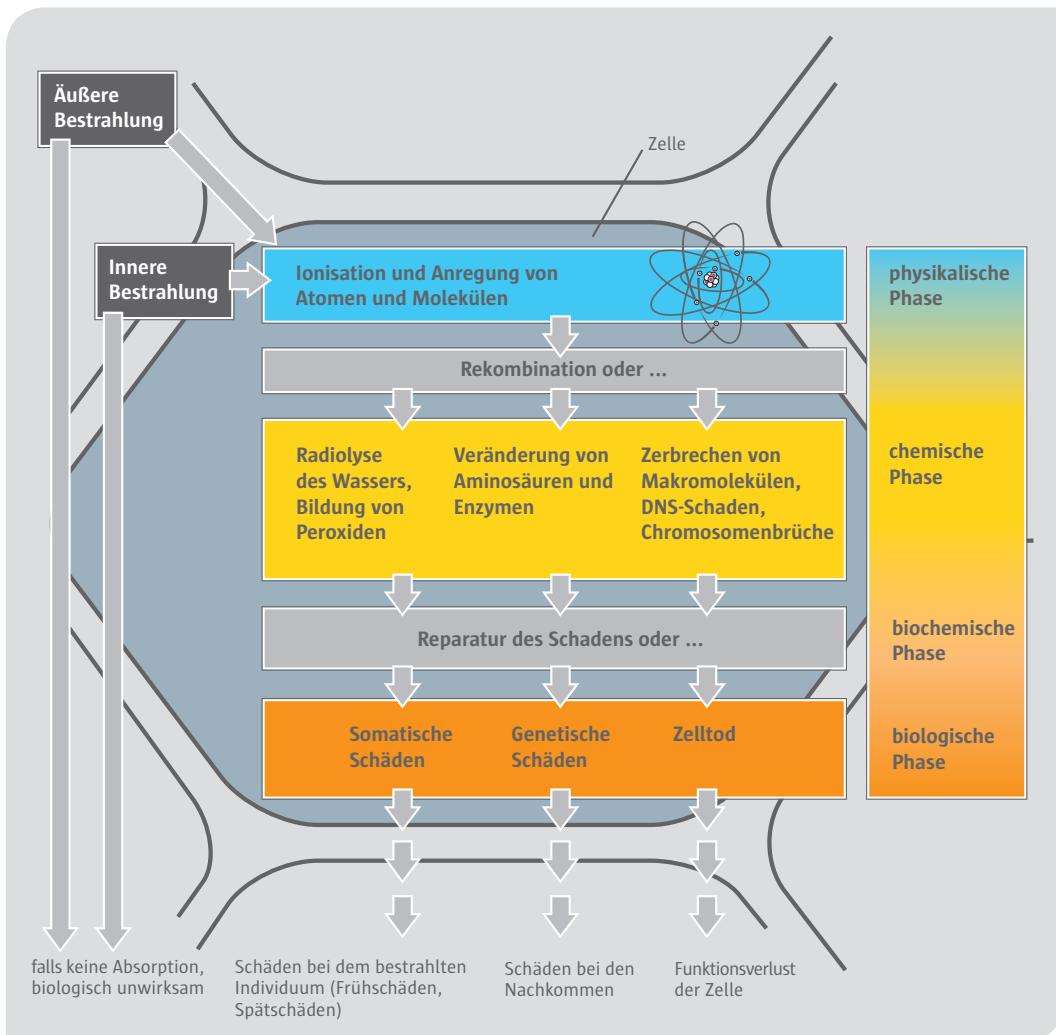


Abb. 6.05

Die physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge in einer Zelle nach Strahleneinwirkung

Treffen ionisierende Strahlen auf einen Organismus (z. B. den Menschen), treten in den einzelnen Zellen physikalische und u. U. in der Folge chemische und biologische Effekte auf (Abb. 6.05).

Von den vielen Wechselwirkungen ionisierender Strahlen mit Materie sind letztlich nur die Ionisation und die Anregung von Bedeutung. Sie führen zu Veränderungen in den Atomhüllen, die allein die Bindung zwischen den Atomen eines Moleküls gewährleisten. Bei der Ionisation wird

ein Elektron aus der Atomhülle abgetrennt, bei der Anregung in der Hülle verschoben (auf ein höheres Energieniveau gehoben). Beide Effekte sind jedoch nicht endgültig. So kann die Ionisation durch Aufnahme eines freien Elektrons wieder rückgängig gemacht werden (Rekombination), das „verschobene“ Elektron wieder seinen ursprünglichen Platz einnehmen. Findet keine Rückbildung des physikalischen Primäreffektes statt, befindet sich die Elektronenhülle in einem veränderten bzw. instabilen Zustand.

Hat ein Strahlungsteilchen oder Energiequant ein die chemische Bindung vermittelndes Elektron entfernt oder „verschoben“, zerbricht das Molekül (Abb. 6.06). Die entstandenen Bruchstücke reagieren nun chemisch anders als die Ursprungsmoleküle.

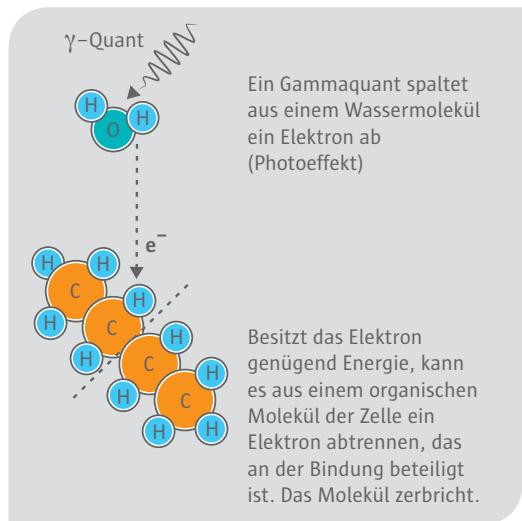


Abb. 6.06
Beispiel für eine direkte Strahlenwirkung (zur Vereinfachung an einer kurzen Kohlenwasserstoffkette aufgezeigt)

Das gleiche gilt für neue Verbindungen, die aus den Bruchstücken entstehen können. Sind diese Verbindungen giftig, wird der Schaden noch verstärkt. So kann z. B. Wasser, aus dem eine Zelle zu etwa 80 % besteht, durch ionisierende Strahlen in Wasserstoffperoxid (H_2O_2) umgewandelt werden. Es ist bereits in schwacher Konzentration ein Zellgift.

Die veränderten oder neu entstandenen Moleküle bzw. Molekülstrukturen, deren biochemische Funktionsfähigkeit gestört oder gänzlich verloren gegangen ist, können repariert oder über den Stoffwechsel aus der Zelle entfernt werden. So

werden z. B. Einzelstrangbrüche bei der DNS sehr erfolgreich behoben.

Die physikalischen Primäreffekte und die daraus folgenden chemischen Sekundäreffekte können schließlich zu einem biologischen Bestrahlungseffekt führen: die Zelle zeigt ein verändertes biologisches Verhalten oder ist nicht mehr funktionsfähig. Das führt jedoch nicht in jedem Fall dazu, dass der Schaden nach außen erkennbar wird.

Der menschliche Körper besitzt – wie alle anderen Lebewesen auch – die Fähigkeit, geschädigte oder nicht mehr funktionsfähige Zellen zu erkennen und mit Hilfe des Immunsystems zu bekämpfen und abzubauen. Der biologische Bestrahlungseffekt bleibt dann ohne gesundheitliche Konsequenz für den betreffenden Menschen. Versagt das Abwehr- bzw. Reparatursystem oder wird es überfordert, kommt es zu einem Strahlenschaden. Er kann sofort oder nach einer längeren Zeit offenbar werden.

Grundsätzlich gilt, dass der Zellkern empfindlicher auf ionisierende Strahlen reagiert als das Zellplasma. Das ist auch verständlich, denn der Kern enthält die makromolekularen Informationsspeicher (DNS), die die vielfältigen Zellfunktionen steuern und regeln.

Einen biologischen Bestrahlungseffekt stellt man deshalb auch bevorzugt an Zellen fest, die sich zum Zeitpunkt der Bestrahlung zu teilen beginnen oder in der Teilung befinden. Die Reparaturmechanismen sind dann nur noch ungenügend wirksam. Eine hohe Zellteilungsrate findet sich z. B. im Embryo, bei der Produktion roter Blutkörperchen oder bei den Schleimhautzellen im Magen-Darm-Trakt.

6.5 Somatische und genetische Schäden

Bei den Schäden, die ionisierende Strahlen an Organismen hervorrufen, unterscheidet man zwischen somatischen und genetischen (vererbaren) Schäden. Somatische Schäden (Körperschäden) treten nur beim bestrahlten Individuum, vererbbarer Schäden (Erbschäden) bei den Nachkommen auf. Davon sind aber nicht nur die direkten Nachkommen, sondern auch spätere Generationen betroffen. Die somatischen Schäden unterteilt man in Früh- und Spätschäden, letztere noch einmal in maligne (bösartig wuchernde) und nichtmaligne (nicht bösartig wuchernde) Spätschäden (Abb. 6.07).

Für das Auftreten von Frühschäden muss der Organismus von einer Mindestmenge an Strahlung getroffen werden. Diese Schwellendosis für den Menschen liegt bei einmaliger

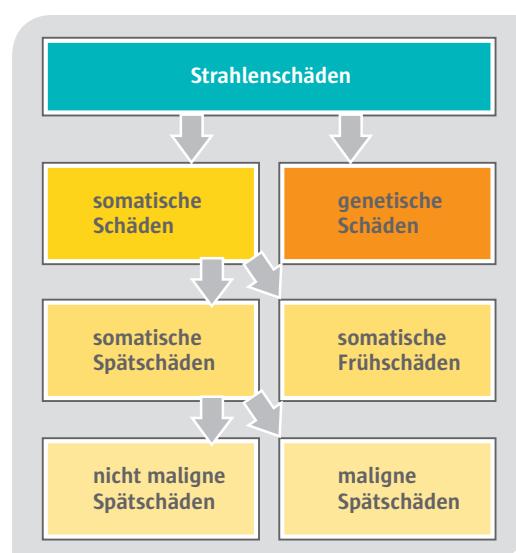


Abb. 6.07
Einteilung der Strahlenschäden

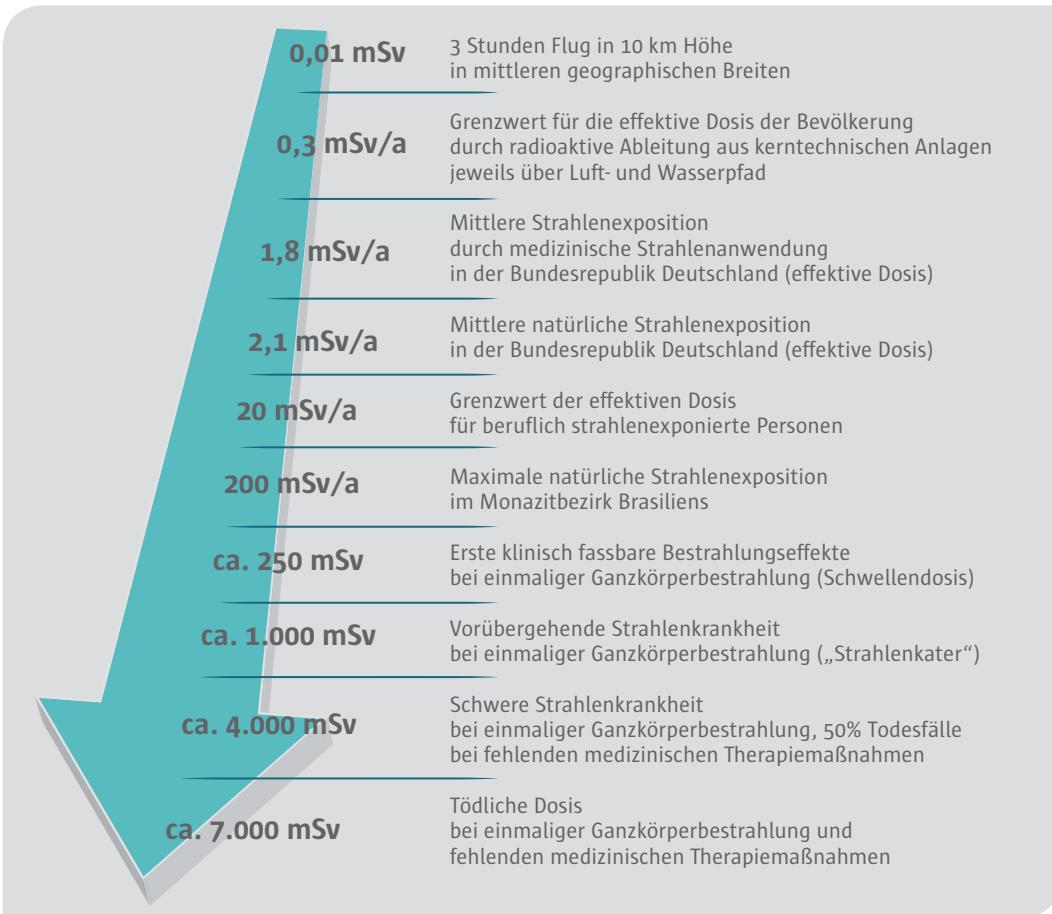


Abb. 6.08

Beispiele für Körperdosis-Leistungen und Körperdosen (Die Angaben zu den Werten 250 bis 7.000 mSv beschreiben somatische Strahlenfrühschäden. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit sind vereinfachend auch diese Dosen in der Einheit Sievert statt Gray angegeben.)

Ganzkörperbestrahlung zwischen 200 und 300 mSv. Es zeigen sich z. B. kurzzeitige Veränderungen des Blutbildes. Je größer die Strahlungsmenge wird, desto gravierender sind auch diese Strahlenschäden. Frühschäden beim Menschen sind z. B. außer Veränderungen des Blutbildes, Unwohlsein, Erbrechen, Entzündungen der Schleimhäute und Fieber. Eine einmalige Ganzkörperbestrahlung mit einer Dosis von 7.000 mSv gilt als tödlich, wenn keine Therapiemaßnahmen durchgeführt werden (Abb. 6.08).

Somatische Spätschäden treten erst nach Jahren oder Jahrzehnten auf. Dabei hat sich der Schaden in den Zellen unmittelbar nach der Bestrahlung ergeben. Die am Gesamtorganismus beobachtbaren Krankheitssymptome treten aber sehr viel später in Erscheinung.

Für das Auftreten eines Strahlenfrühschadens (Hautrötung, Haarausfall, Blutarmut) gibt es eine Mindestdosis von 500 mSv und mehr, die überschritten sein muss, damit Schäden dieser Art entstehen (Schwellendosis, Kurve C in Abb. 6.09.). Bleibt die Dosis unterhalb dieses Schwellenwerts, dann treten diese Erkrankungen zwar nicht auf, die Entstehung von Spätschäden ist aber nicht ausgeschlossen.

Bei bösartigen Spätschäden (z. B. Leukämie, Krebs) ist diese Mindestmenge an Strahlung sehr klein oder es gibt überhaupt keine Schwelle (Kurve

A oder B in Abb. 6.09). Es würde dann bedeuten, dass auch einzelne Strahlungsteilchen oder Gammaquanten Krebs auslösen können, wenn z. B. die von der Strahlung getroffene Zelle bereits vorgeschädigt ist bzw. der Reparaturmechanismus und das Immunsystem des Körpers geschwächt sind. Mit steigender Strahlungsmenge nimmt aber nicht die Schwere der Erkrankung zu, sondern die Wahrscheinlichkeit für eine Erkrankung. Das ist aber bei kleinen Strahlenexpositionen im Bereich von einigen zehn Millisievert bisher weder experimentell nachgewiesen noch durch statistische Erhebungen gesichert ermittelt. Diese Annahme ergibt sich lediglich durch rückwärtige Verlängerungen der Dosis-Wirkungs-Kurve für Strahlendosen oberhalb von einigen hundert Millisievert (Kurve A in Abb. 6.09).

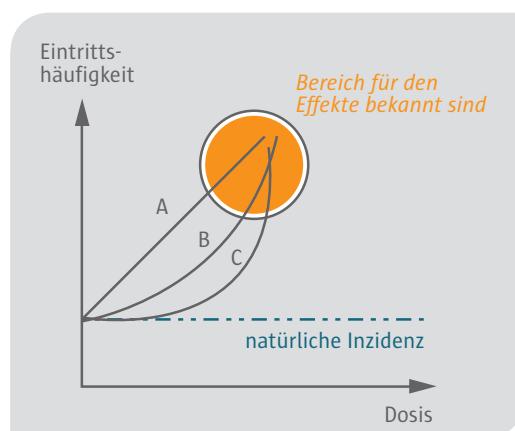


Abb. 6.09

Genereller Verlauf der Extrapolationsmöglichkeiten aus dem Bereich bekannter Dosis-Risiko-Beziehung (hohe Strahlendosen) in den Bereich kleiner Strahlendosen

A: lineare Extrapolation

B: linear-quadratische Extrapolation

C: Risikokurve mit Schwellenwert

Bei genetischen Schäden treten Veränderungen an den Chromosomen der Keimzellen auf. Sie wirken sich erst bei den Nachkommen aus. Auch bei genetischen Schäden ist eine Reparatur möglich oder es kann die nach einem falschen genetischen Code aufgebaute Zelle, das daraus entstandene Gewebe bzw. der nicht lebensfähige Embryo abgestoßen werden. Ein genetischer Schaden würde dann nicht an die nächste Generation weitergegeben.

Grundsätzlich sind Mutationen natürliche Ereignisse, die bei Menschen, Tieren und Pflanzen immer wieder vorkommen. Sie können spontan

aufreten oder gezielt durch chemische bzw. physikalische Einflüsse herbeigeführt werden. Dass auch ionisierende Strahlen Mutationen auslösen, ist bereits 1927 nachgewiesen worden.

Die durch die natürliche Strahleneinwirkung hervorgerufenen Mutationen sind zahlenmäßig so gering, dass sie aus den zeitlichen Schwankungen der natürlichen Mutationsraten nicht hervortreten. Erst eine Keimdrüsendiffusionsdosis von etwa 10 mSv einer locker ionisierenden Strahlung (Beta- oder Gammastrahlung) führt unter 1 Million Neugeborenen zu der Spontanrate 0,006 % genetischer Schadensfälle.

6.6 Faktorenabhängigkeit der Strahlenwirkungen

Somatische und in geringerem Umfang auch genetische Strahlenwirkungen sind von verschiedenen Bedingungen abhängig. Sie sind durch die Anwendung ionisierender Strahlen in der Medizin seit langem bekannt (Abb. 6.10).

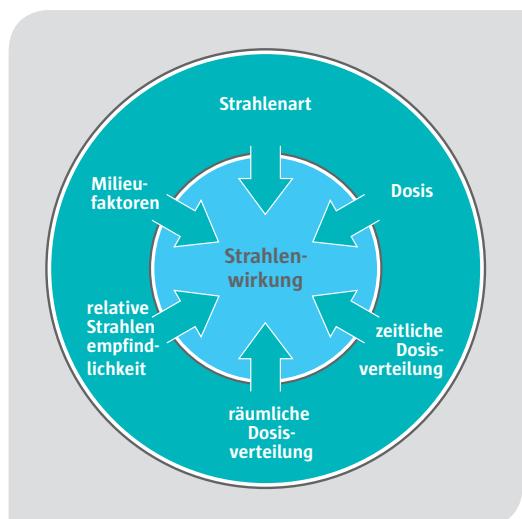


Abb. 6.10

Die biologische Strahlenwirkung ist von mehreren Faktoren abhängig

Nachfolgend werden diese Faktoren im Wesentlichen für die somatischen Schäden beschrieben.

6.6.1 Strahlenart

Wie bereits im Kapitel 5.3 erwähnt, haben die einzelnen Strahlenarten unterschiedliche biologische Wirkungen bei gleichen Energiedosen. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, dass sie eine unterschiedliche Ionisationsdichte hervorrufen. Je größer sie ist, desto größer sind auch die biologischen Wirkungen. Das wird durch den Strahlungs-Wichtungsfaktor berücksichtigt.

6.6.2 Dosis

Grundsätzlich gilt, dass die Strahlenwirkungen bzw. die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Strahlenwirkung mit der Dosis zunehmen. Bei somatischen Frühgeschäden gibt es dafür einen Schwellenwert. Bei bösartigen Spätschäden

sowie bei genetischen Schäden wird kein Schwellenwert angenommen. Im ungünstigsten Fall können schon kleine Dosen zu Effekten führen.

6.6.3 Zeitliche Dosisverteilung

Die Wirkung einer Dosis ist um so geringer, je größer die zeitlichen Abstände zwischen den Teildosen sind. Bei einer Aufteilung der Dosen entstehen pro Zeit weniger Molekülbruchstücke. Da sie dann in der Zelle in geringerer Dichte vorliegen, sind auch die Reaktionsmöglichkeiten zwischen ihnen kleiner. Durch Aufteilung einer Gesamtdosis können Schädigungen zwischenzeitlich ganz oder teilweise beseitigt werden. Hinsichtlich des Auftretens von Strahlenspätschäden können sich u. U. auch mehrere über längere Zeiträume verteilte Einzeldosen aufsummieren.

6.6.4 Räumliche Dosisverteilung

Aus der medizinischen Strahlentherapie ist bekannt, dass Dosen von 30 bis 50 Gy, die lokal zur Bestrahlung eines Tumors eingesetzt werden, im Allgemeinen den Gesamtorganismus nicht in Gefahr bringen. Als Ganzkörperdosen würden diese Werte aber immer zum Tode führen. Man muss also immer zwischen Ganzkörper- und Teilkörperfunden unterscheiden.

6.6.5 Relative Strahlenempfindlichkeit

Einzelne Organe oder Gewebe des Menschen sind gegenüber ionisierenden Strahlen unterschiedlich empfindlich (Abb. 6.11). Die Organe und Gewebe mit der generell höheren Strahlenempfindlichkeit haben eines gemeinsam: In ihnen findet eine große Anzahl von Zellteilungen statt. Die Strahlung wirkt dann im Augenblick der Zellteilung ein und kann den Teilungsvorgang verzögern bzw. mehr oder weniger lange blockieren. Zusätzlich können die Zellen ihre Teilungsfähigkeit verlieren. Insgesamt wird also das Gleichgewicht zwischen Zellverlust und Zellerneuerung gestört. Wegen der hohen Zellteilungstätigkeit ist auch der Embryo im Mutterleib besonders strahlenempfindlich.

Dabei stellen die ersten vier Wochen das gefährlichste Stadium dar.

6.6.6 Milieufaktoren

Einzelne Organe des Menschen oder der gesamte Organismus können z. B. durch die Art der Ernährung, den Missbrauch von Genussmitteln, die Anwendung bestimmter Arzneimittel sowie andere Faktoren für Strahlen besonders sensibilisiert werden. So sind z. B. mit Sauerstoff gut versorgte Zellen besonders strahlenempfindlich.

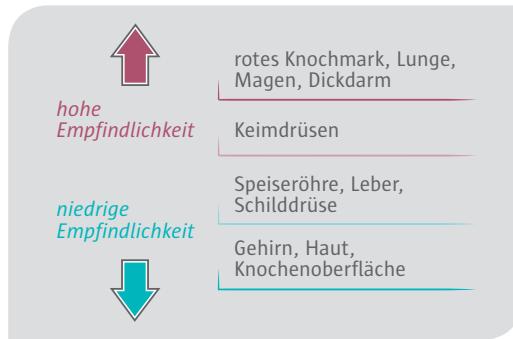


Abb. 6.11

Rangfolge der Strahlenempfindlichkeit verschiedener Organe im Menschen in Bezug auf Strahlenschäden

Strahlenempfindlichkeit von Lebewesen 6.7

Lebewesen zeigen gegenüber ionisierenden Strahlen eine unterschiedliche Empfindlichkeit. Diese Unterschiede können mit Hilfe der mittleren Letaldosis (letal = tödlich) beschrieben werden. Sie gibt die Energiedosis an, die – ohne medizinische Gegenmaßnahmen – bei einer Ganzkörperbestrahlung für 50 % der Individuen einer großen Zahl bestrahlter Lebewesen innerhalb von 30 Tagen durch somatische Frühschäden zum Tode führt.

Die mittlere Letaldosis $LD_{50/30}$ liegt für Menschen bei einer Energiedosis von 4,5 Gy. Einige Lebewesen zeigen eine deutlich geringere Strahlenempfindlichkeit.

Bei Pflanzen hat man in Experimenten festgestellt, dass die Empfindlichkeit gegenüber ionisierenden Strahlen vom Gehalt der Zellkerne an DNS abhängt. Es wird vermutet, dass die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit bei Tieren auch damit zusammenhängt.

7

Radionuklide im menschlichen Körper



Die Stoffwechselvorgänge der Menschen sind von ihren Erbanlagen, den Verzehr- und Lebensgewohnheiten, den örtlichen Gegebenheiten sowie ihrem Geschlecht und Alter abhängig. Soll die Strahlendosis abgeschätzt werden, die durch aufgenommene Radionuklide entsteht, benötigt man eine einheitliche biologische Grundlage.

In Tab. 7.01 ist angegeben, wie viele Nahrungsmittel in Abhängigkeit vom Alter der Person im Mittel pro Jahr verzehrt werden. Bei den Verzehrgewohnheiten können sich für das einzelne Individuum unter Umständen deutliche Abweichungen von den angegebenen Durchschnittswerten ergeben. Deshalb werden z. B. bei der Berechnung der Strahlenexposition durch die Emission radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen Konservativitätsfaktoren von 2 bis 5 angewandt.

Lebensmittel	mittlere Verzehrrate der Referenzperson in kg/a					
	Altersgruppe					
	≤ 1 Jahr	> 1 – ≤ 2 Jahre	> 2 – ≤ 7 Jahre	> 7 – ≤ 12 Jahre	> 12 – ≤ 17 Jahre	> 17 Jahre
Trinkwasser	55	100	100	150	200	350
Muttermilch, Milchfertigprodukte mit Trinkwasser	200	–	–	–	–	–
Milch, Milchprodukte	45	160	160	170	170	130
Fisch	0,5	3	3	4,5	5	7,5
Fleisch, Wurst, Eier	5	13	50	65	80	90
Getreide, Getreideprodukte	12	30	80	95	110	110
einheimisches Frischobst, Obstprodukte, Obstsäfte	25	45	65	65	60	35
Kartoffeln, Wurzelgemüse	30	40	45	55	55	55
Blattgemüse	3	6	7	9	11	13
Gemüse, Gemüseprodukte	5	17	30	35	35	40

Tab. 7.01

Mittlere Verzehrraten der Referenzperson in kg/a nach Strahlenschutzverordnung

Nahrungsketten und Expositionspfade 7.2

Radioaktive Stoffe aus der Luft, dem Wasser und dem Boden gelangen direkt mit der Atemluft oder dem Trinkwasser in den menschlichen Körper oder indirekt über eine der Nahrungsketten (Abb. 7.01).

Bei den Nahrungsketten lassen sich folgende Glieder unterscheiden:

- Ablagerung radioaktiver Stoffe aus der Luft auf den Pflanzen oder dem Boden,
- Aufnahme radioaktiver Stoffe über die Blätter oder die Wurzeln in die Pflanzen,
- Verzehr der Pflanzen durch Tier oder Mensch,
- Verarbeitung der Tiere oder tierischer Produkte zu Nahrungsmitteln.

Die Herkunft der Nahrungs- und Genussmittel, des Wassers und der Luft sowie die Lebens- und Ernährungsgewohnheiten des Menschen bestimmen unter anderem die Menge der vom Körper aufgenommenen radioaktiven Stoffe. So kann die Verwendung von Brunnen- oder Quellwasser mit erhöhtem Radiumgehalt, der bevorzugte Aufenthalt in schlecht belüfteten Räumen eines Natursteinhauses mit dadurch stark erhöhtem Radongehalt oder der verstärkte Verzehr von Nahrungsmitteln mit einem erhöhten Gehalt an Radionukliden den Radionuklidgehalt des menschlichen Körpers erhöhen. Es ist nicht zu verhindern, dass natürliche Radionuklide in den menschlichen Körper gelangen, da die gesamte Erdmaterie (einschließlich Pflanzen und Tiere) von Natur aus radioaktive Stoffe enthält.

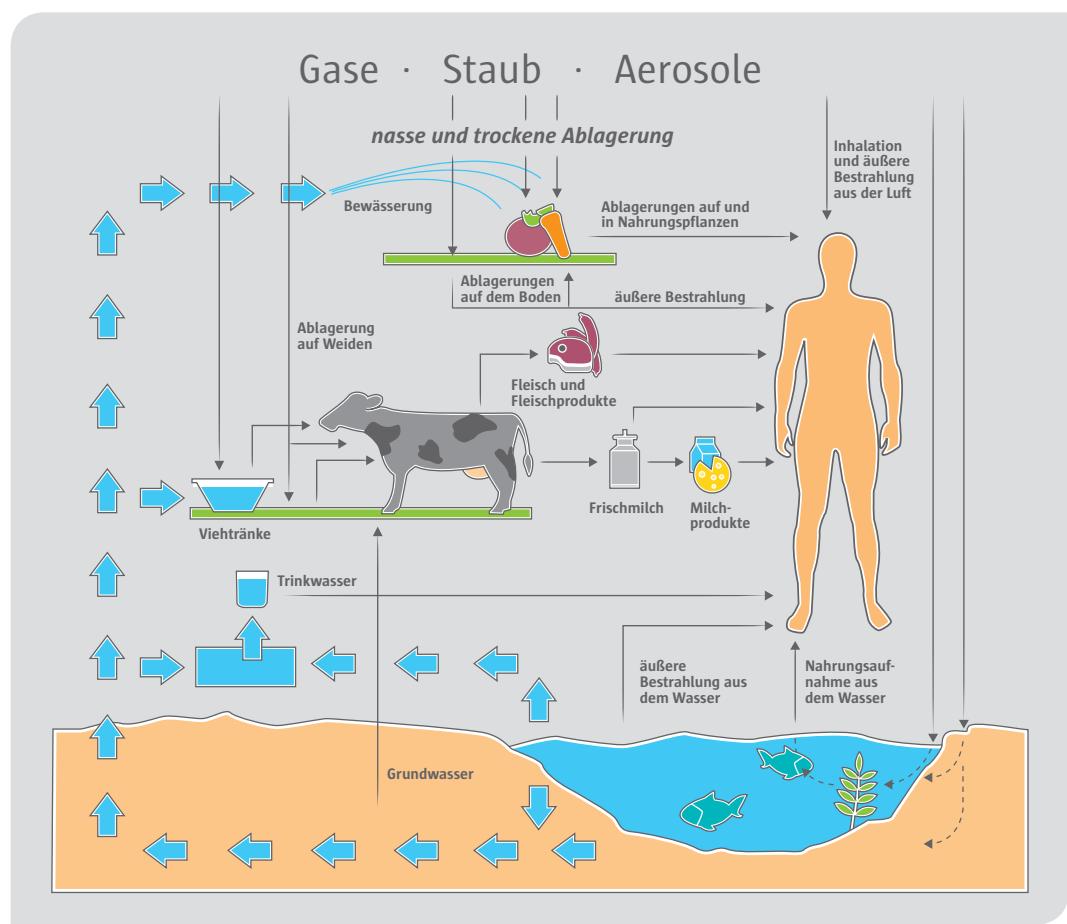


Abb. 7.01

Expositionspfade für radioaktive Stoffe

7.3 Anreicherung von Radionukliden in Nahrungsketten

In den Gliedern der Nahrungsketten können sich Radionuklide anreichern. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Organismus nicht für alle Elemente einen Regelmechanismus besitzt, um bestimmte Konzentrationen einzuhalten.

Beim Menschen gehören z. B. die Elemente Kalium und Calcium zu den sogenannten geregelten Elementen. Es bedeutet, dass ein gesunder Organismus bei ausreichendem Nahrungsangebot seine Konzentration im Körper auf einem bestimmten Wert hält.

Im Standardmenschen sind es für Calcium 1.100 g und für Kalium 140 g. Bei erhöhter Zufuhr dieser Elemente wird der nicht benötigte Anteil mit den Ausscheidungsprodukten vermehrt wieder abgegeben.

Die Elemente Strontium und Cäsium zählen beim Menschen zu den nicht geregelten Elementen. Je größer das Angebot dieser Elemente in der Nahrung ist, desto mehr wird auch resorbiert und verbleibt eine mehr oder minder lange Zeit im Körper. Von einem bestimmten Sättigungswert an bildet sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Aufnahme und Ausscheidung.

Einen Anreicherungsvorgang im Nahrungssystem eines Süßwassersees zeigt Abb. 7.02. Die Anreicherungsfaktoren geben das Verhältnis der Strontium-90-Konzentration im Organismus zu der im Wasser an. Die Anreicherungsfaktoren sind auf das Frischgewicht bezogen und in relativen Einheiten angegeben.

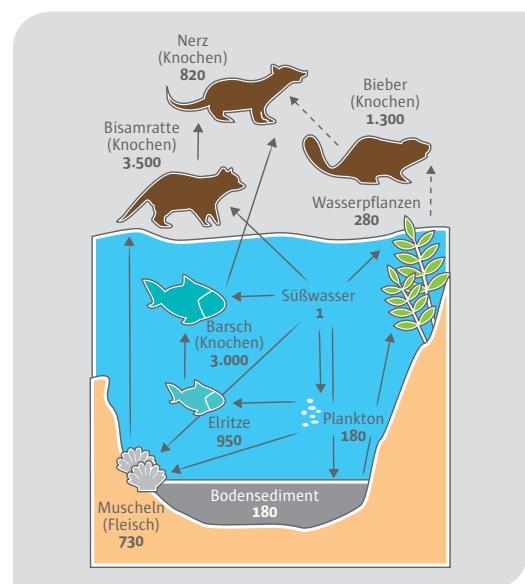


Abb. 7.02

Typische Anreicherungsfaktoren von Sr-90 im Nahrungssystem eines Süßwassersees

Im Boden, im Wasser und in der Luft unserer Biosphäre sind natürliche Radionuklide vorhanden. Durch Stoffwechselvorgänge gelangen sie in pflanzliche und tierische Organismen und somit in die Nahrungsmittel des Menschen.

Der größte Anteil der natürlichen Aktivität in Nahrungsmitteln röhrt vom Kalium-40 her. Uran, Radium, Thorium sowie Blei-210 und Polonium-210 ergeben demgegenüber eine geringe spezifische Aktivität (Tab. 7.02). Hinzu kommt noch das natürliche Radionuklid Kohlenstoff-14, dass in Nahrungsmitteln eine typische spezifische Aktivität von 70 Bq/kg aufweist.

Kalium – und damit auch Kalium-40 – ist praktisch auf der gesamten Erdoberfläche und in den Gewässern (Seen, Flüsse, Meere) vorhanden. Die Pflanzen nehmen Kalium mit den Wurzeln aus dem Boden oder dem Wasser auf und speichern es in den Stängeln, Ästen, Blättern, Blüten, Früchten usw. Mit der pflanzlichen Nahrung gelangt das Kalium-40 dann auch in die Tiere und die Menschen. Der Kaliumgehalt in den Nahrungsmitteln ist unterschiedlich (Abb. 7.03). Die daraus resultierende spezifische Aktivität von Kalium-40 liegt für die meisten Lebensmittel zwischen 50 und 300 Bq/kg.

Für die Konzentrationsschwankungen lassen sich im Wesentlichen drei Gründe anführen:

- Die pflanzlichen und tierischen Organismen, aus denen die Nahrungsmittel gewonnen werden, verfügen über unterschiedliche physiologische Mechanismen und speichern deshalb unterschiedlich viele Radionuklide in ihren Zellen.

- Die Konzentration an natürlichen Radionukliden ist an den Orten der Nahrungsmittelgewinnung unterschiedlich. So haben Kartoffeln normalerweise eine mittlere Konzentration an Radium-226 von etwa 0,03 Bq/kg. Kartoffeln aus Gebieten mit erhöhter natürlicher Radioaktivität (z. B. Monazitgebiet in Kerala/Indien) haben dagegen einen Gehalt an Ra-226 von etwa 0,8 Bq/kg.
- Manche Radionuklide verhalten sich biochemisch ähnlich wie jene Elemente, die für den betreffenden Organismus physiologisch wichtig sind. So zeigt Rubidium eine ähnliche (nicht gleiche) chemische Reaktionsfähigkeit wie Sodium und Kalium (Alkalimetalle); Radium verhält sich ähnlich wie die beiden verwandten Elemente Barium und Calcium (Erdalkalimetalle). Diese Ähnlichkeit im Verhalten kann dazu führen, dass bei verstärkter Aufnahme von Calcium (z. B. intensiverer Knochenbaustoffwechsel in der Wachstumsphase von Tieren) auch vermehrt Radium eingebaut wird.

Die Aufnahme von Radium durch Pflanzen ist in der Regel gering. Eine Ausnahme bildet der Paranussbaum. Er reichert verstärkt Barium an, womit gleichzeitig eine extrem hohe Aufnahme von Radium verbunden ist.

Uran, Radium und Thorium werden von den Pflanzen ausschließlich aus dem Boden aufgenommen. Blei-210 und Polonium-210 entstehen zum Teil in der Atmosphäre als Folgeprodukte des Radons. Diese Radionuklide können dann nicht nur aus dem Boden aufgenommen, sondern zu einem erheblichen Teil auch durch die Blätter der Pflanzen aus der Luft „herausgefiltert“ werden.

Produkt	Natürliche Radionuklide in Nahrungsmitteln und in Trinkwasser in Bq/l bzw. Bq/kg Frischgewicht, Median-Werte							
	K-40	U-238	U-234	Th-230	Ra-226	Pb-210	Th-232	Ra-228
Trinkwasser	0,1	0,005	0,006		0,001	0,002		0,003
Milch	50	0,002	0,005	0,001	0,004	0,011	0,001	
Fische (Süßwasser)	118	0,004	0,006		0,007	0,032		
Rindfleisch	94	0,001	0,001	0,100	0,008	0,018		
Getreide	120	0,011	0,011	0,010	0,160	0,365	0,009	0,190
Obst	50	0,002	0,005	0,001	0,014	0,040	0,001	0,018
Blattgemüse	200	0,012	0,011	0,006	0,037	0,130	0,004	0,056
Wurzelgemüse	90	0,005	0,002	0,006	0,030	0,022	0,004	0,045

Tab. 7.02

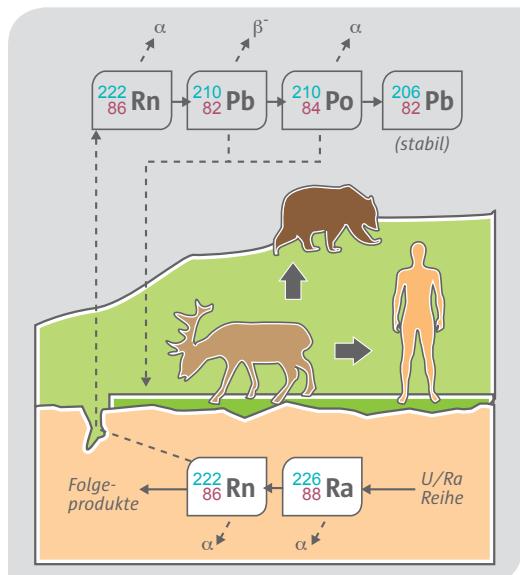
Konzentrationen natürlicher Radionuklide in Trinkwasser und in Nahrungsmitteln

Bei langsam wachsenden Pflanzen (z. B. Flechten in den Tundren) geht eine solche Filterung über lange Zeit vor sich. Pb-210 und Po-210 können in ihnen angereichert auftreten und Ausgangspunkt für eine Nahrungskette mit erhöhtem Gehalt an Pb-210 und Po-210 sein. Sie reicht vom Primärproduzenten Pflanze über den Primärkonsumennten Rentier bis zu den Sekundärkonsumenten Bär oder Mensch.

In den Zähnen von Lappen, die Rentiere züchten, ist eine doppelt so hohe Aktivität an Pb-210 und Po-210 nachgewiesen worden wie bei einer Population, die nicht in arktischen Gebieten lebt.

Abb. 7.03

Teil einer Nahrungskette in den Tundren (Zerfallsstufen unvollständig dargestellt)



7.5 Aufnahmewege und Speicherorgane

Stoffe – auch radioaktive – können auf verschiedenen Wegen in den Körper gelangen (Abb. 7.04):

- über die Luftwege und Lungenräume (Inhalation),
- über den Verdauungskanal (Ingestion),
- durch die intakte Haut (perkutane Resorption),
- durch Wunden oder über andere natürliche oder künstliche Körperöffnungen.

In der Regel ist nur die Aufnahme über die Lunge und den Verdauungskanal von Bedeutung, weil auf diesen Wegen die größten Substanzmengen in das Körperinnere gelangen. Ein Teil der inkorporierten Radionuklide wird vom Körper resorbiert, das heißt durch die Zellschichten hindurch in den Blutkreislauf bzw. das Lymphsystem aufgenommen. Dadurch können sie in alle Teile des Körpers gelangen. Der nicht resorbierte Teil der radioaktiven Stoffe wird über Nieren und Darm sowie zum Teil auch über die Lunge wieder ausgeschieden.

Für jedes Radionuklid gibt es eine Hauptablagerrungsstätte, an der ein besonders großer Prozentsatz des resorbierten Materials gespeichert wird (Speicherorgan, Tab. 7.03). Die unterschiedliche Verteilung der resorbierten radioaktiven Stoffe im menschlichen Körper führt zu unterschiedlichen Strahlenexpositionen der einzelnen Organe.

Die Abb. 7.05 bis Abb. 7.08 zeigen für die natürlichen Nuklide der Elemente Kalium, Iod, Cäsium und Strontium die tägliche Aufnahme mit der Nahrung, die Resorption durch den Körper, die Speicherung in einem bestimmten Organ und die Ausscheidung über Darm bzw. Nieren.

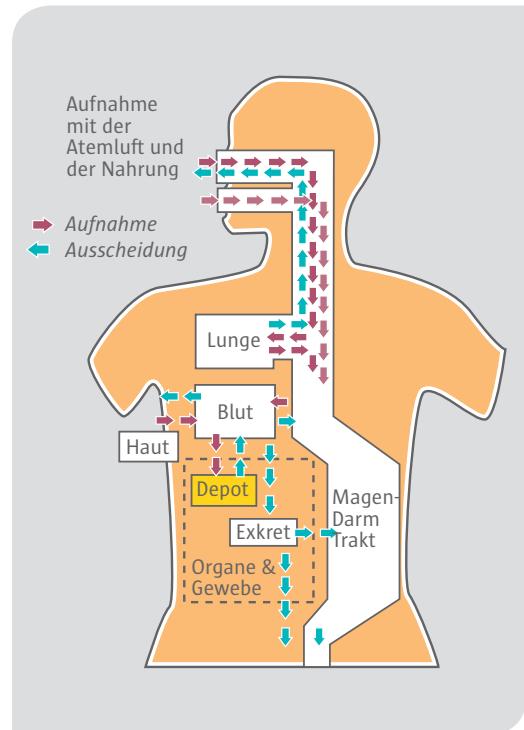
Radionuklid	Speicherorgan
H-3	Körpergewebe/Körperwasser
C-14	Fett
K-40	Muskulatur/Ganzkörper
Sr-90	Knochen
I-131	Schilddrüse
Cs-137	Muskulatur/Ganzkörper
Ra-226	Knochen
U-238	Nieren/Knochen

Abb. 7.04

Die wesentlichen Transportwege für radioaktive Stoffe im menschlichen Körper

Tab. 7.03

Speicherorgane für einige Radionuklide



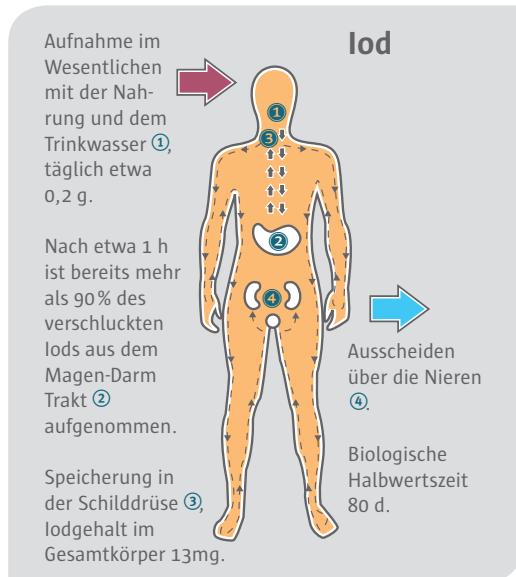
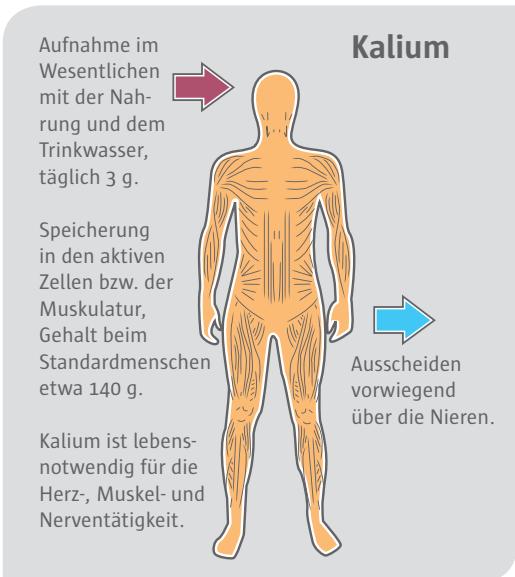


Abb. 7.05 (links)
Kalium im menschlichen Körper

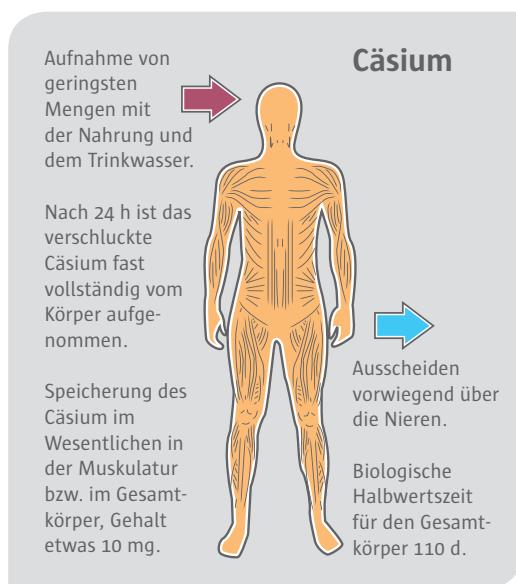
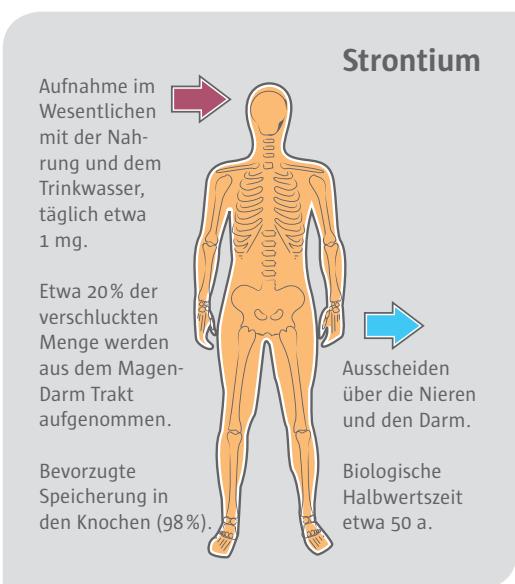


Abb. 7.07 (links)
Strontium im menschlichen Körper

Abb. 7.08
Cäsium im menschlichen Körper

Treten in Nahrungsmitteln und Trinkwasser zusätzlich künstlich erzeugte Radionuklide auf, verändern sich die genannten Aufnahmewerte. Die angegebenen biologischen Halbwertszeiten sind

(für Kalium als geregeltes Element ist das Konzept der biologischen Halbwertszeit nicht anwendbar) ein Maß für die Ausscheidungsgeschwindigkeit eines resorbierten Radionuklids.

Verweilzeit der Radionuklide im Körper 7.6

Die vom Körper resorbierten und in bestimmten Organen gespeicherten Nuklide werden im Wesentlichen mit dem Urin sowie dem Kot wieder ausgeschieden. Eine Ausscheidung über die Lunge und die Haut spielt praktisch nur bei radioaktiven Edelgasen bzw. tritiumhaltigem Wasser eine Rolle. Bei stillenden Müttern werden bestimmte Radionuklide auch über Muttermilch abgegeben.

Bei der Ausscheidung sowohl der radioaktiven als auch der stabilen Nuklide werden etwa in gleichen Zeitabschnitten gleiche Bruchteile

Radionuklid	biologische Halbwertszeit
H-3	10 d
I-131	80 d (Schilddrüse)
Cs-137	110 d (Mann) 65 d (Frau)
Th-232	2 a (Leber) 20 a (Knochenoberfläche)
U-238	14 a (Knochenoberfläche)
Pu-239	20 a (Leber) 50 a (Knochenoberfläche)

Tab. 7.04
Biologische Halbwertszeit einiger Radionuklide für Erwachsene

ausgeschieden. Aufgrund dieser Erfahrung kann man eine biologische Halbwertszeit definieren. Sie gibt an, nach welcher Zeit die Hälfte eines vom Körper resorbierten radioaktiven oder stabilen Nuklids wieder ausgeschieden ist.

Für viele Radionuklide wird die Ausscheidung durch mehrere partielle biologische Halbwertszeiten beschrieben. Den Ausscheidungsvorgang für Cäsium-137 zeigt Abb. 7.09.

Die biologische Halbwertszeit eines Radionuklids kann für ein bestimmtes Organ und den gesamten Organismus unterschiedlich sein. Sie ist kein konstanter Wert, sondern unter anderem abhängig vom Lebensalter und von den Ernährungsgewohnheiten. Beispiele für biologische Halbwertszeiten sind in Tab. 7.04 angegeben.

Die Verweilzeit von Radionukliden im Skelett und in der Leber ist im Allgemeinen hoch, während sie aus der Niere und aus weichem Gewebe meist rasch ausgeschieden werden. Bei einigen Radionukliden ist es möglich, die Verweilzeit im Körper durch therapeutische Maßnahmen zu verkürzen.

Neben der Ausscheidung eines Radionuklids nimmt die Aktivität im Innern des menschlichen Körpers zusätzlich durch radioaktiven Zerfall ab. Das wird im Folgenden an den nicht wirklich existierenden Radionukliden X₁ und Y₁ deutlich gemacht.

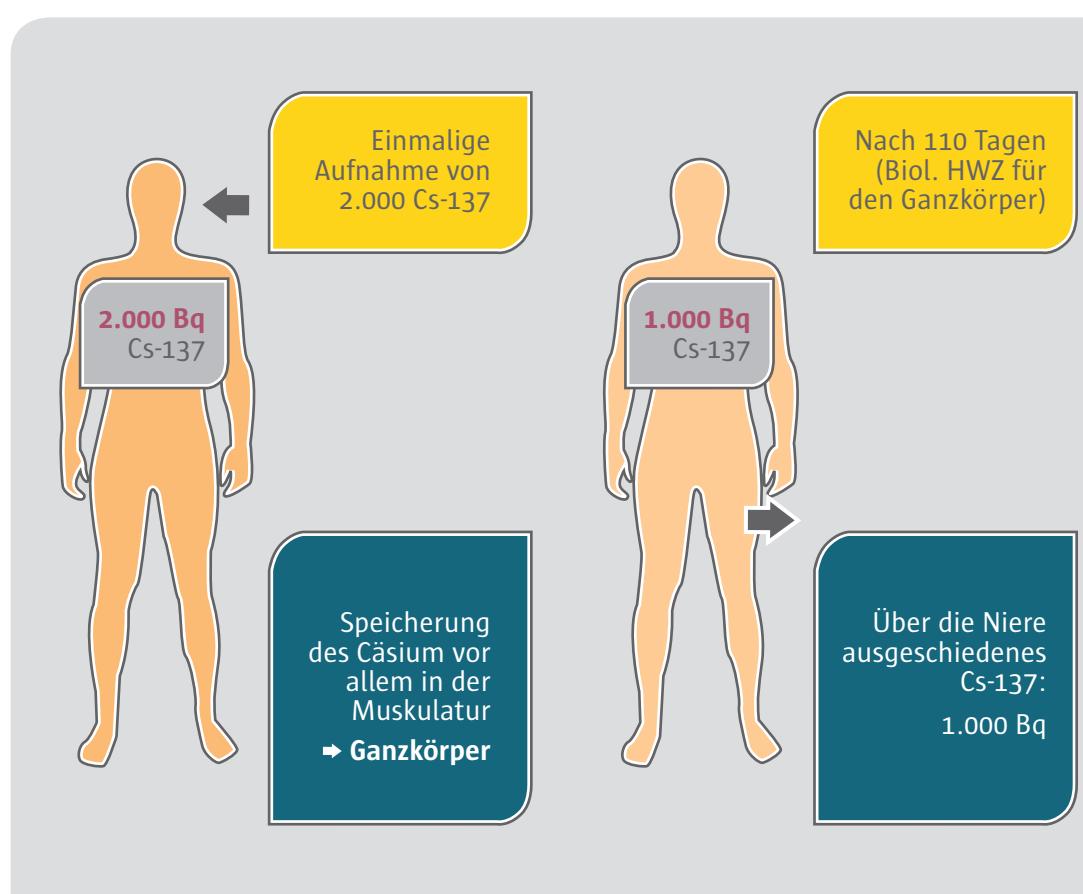
Beispiel 1:

Radionuklid X₁ wandelt sich in das stabile Nuklid X₂ um. Physikalische Halbwertszeit 5 d, biologische Halbwertszeit 60 d. Noch ehe eine biologische Halbwertszeit von 60 Tagen abgelaufen ist, sind bereits zehn physikalische Halbwertszeiten vergangen. Dabei hat sich das Radionuklid zu mehr als 99,9 % in das stabile Nuklid X₂ umgewandelt. Zur Beurteilung der internen Strahlenexposition des Menschen wäre in diesem Fall also nur die physikalische Halbwertszeit von Bedeutung.

Beispiel 2:

Radionuklid Y₁ wandelt sich in das stabile Nuklid Y₂ um. Physikalische Halbwertszeit 50 a, biologische Halbwertszeit 10 d. Noch ehe ein Bruchteil der physikalischen Halbwertszeit abgelaufen ist, sind bereits mehr als zehn biologische Halbwertszeiten vergangen und das Radionuklid praktisch vollständig aus dem Körper ausgeschieden. Von Bedeutung wäre also in diesem Fall nur die biologische Halbwertszeit.

Das Zusammenwirken der physikalischen Halbwertszeit T_p und der biologischen Halbwertszeit T_b ergibt die effektive Halbwertszeit T_{eff} . Sie gibt an, in welchem Maße die Aktivität eines Radionuklids durch radioaktiven Zerfall und biologische Ausscheidungsvorgänge im Körper abnimmt.



Die effektive Halbwertszeit lässt sich nach folgenden Gleichungen berechnen:

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_p \cdot T_b}{T_p + T_b}$$

Die effektive Halbwertszeit ist von entscheidender Bedeutung für die Strahleneinwirkung der in den Organismus aufgenommenen Radionuklide. Zwischen T_p und T_b können große Unterschiede auftreten. In solchen Fällen entspricht T_{eff} nahezu dem kleineren von beiden Werten.

Beispiel 1:

H-3
 $T_p = 12,323 \text{ a} = 4.501 \text{ d}$ $T_b = 10 \text{ d}$ $T_{\text{eff}} = 9,98 \text{ d}$

Beispiel 2:

I-131, Schilddrüse
 $T_p = 8,02 \text{ d}$ $T_b = 80 \text{ d}$ $T_{\text{eff}} = 7,3 \text{ d}$

Beispiel 3:

I-129, Schilddrüse
 $T_p = 1,57 \cdot 10^7 \text{ a} = 5,73 \cdot 10^9 \text{ d}$ $T_b = 80 \text{ d}$ $T_{\text{eff}} = 80 \text{ d}$

Beispiel 4:

Pu-239, Knochenoberfläche
 $T_p = 2,411 \cdot 10^4 \text{ a}$ $T_b = 50 \text{ a}$ $T_{\text{eff}} = 49,9 \text{ a}$

Aufgrund der physikalischen und biologischen Faktoren und der Strahlungseigenschaften lässt sich die relative Gefährlichkeit von Radionukliden klassifizieren (Tab. 7.05). Dafür wird der Begriff Radiotoxizität verwendet. Darunter versteht man die Toxizität, die auf den ionisierenden Strahlen des inkorporierten Radionuklids und seiner Folgeprodukte beruht.

Radiotoxizität	Radionuklide
sehr hoch	Ac-227, Th*, U*
hoch	Co-60, Cs-137, Ra-226
mittel	Na-22, Tc-99m, I-131
gering	H-3, S-35, Ni-63
sehr gering	C-14 (Dioxid), Kr-83m

Tab. 7.05

Relative Radiotoxizität für einige Radionuklide

(*Thorium und Uran einschließlich aller Folgeprodukte der jeweiligen Zerfallsreihe)

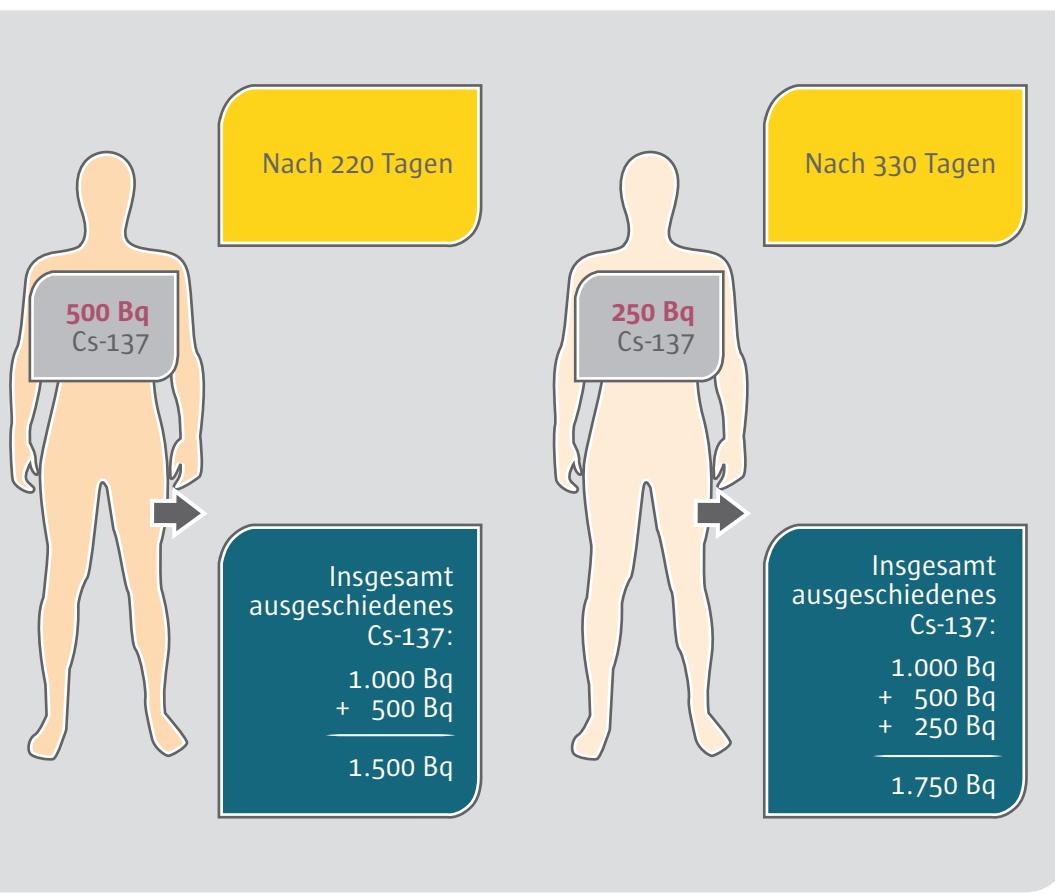


Abb. 7.09

Die biologische Halbwertszeit

7.7 Natürliche Aktivität des Standardmenschens

Natürliche Radionuklide, die mit der Atemluft, dem Trinkwasser und der Nahrung in den menschlichen Körper gelangen, werden von ihm zum Teil resorbiert und über Stoffwechselprozesse wieder ausgeschieden. Als Ergebnis von Zufuhr und Ausscheidung stellt sich ein Gleichgewichtszustand der im Körper vorhandenen Aktivität natürlich radioaktiver Stoffe ein. Bei den natürlichen Radionukliden im menschlichen Körper handelt es sich im Wesentlichen um K-40, C-14 sowie einige Folgeprodukte aus der Uran-Radium- und der Thorium-Zerfallsreihe.

Die Tab. 7.06 gibt die im Standardmensch vorhandenen natürlichen Radionuklide und ihre Aktivität an. Die Gesamtaktivität des menschlichen Körpers (Standardmensch) beträgt etwa 9.000 Bq. Dies bedeutet, dass in 1 Sekunde etwa 9.000 Kernumwandlungen stattfinden, an einem Tag sind es über 750 Millionen.

Da sich die resorbierten Radionuklide an unterschiedlichen Stellen im Körper ablagern, ist die Aktivität nicht gleichmäßig im Körper verteilt. Für einen Vergleich der Aktivität des Menschen mit der von Nahrungsmitteln wird in Abb. 7.10 jedoch eine gleichmäßige Verteilung angenommen.

Tab. 7.06

Natürliche radioaktive Stoffe im Menschen

Nuklid	Aktivität in Bq
H-3	25
Be-7	25
C-14	3.800
K-40	4.200
Rb-87	650
U-238, Th-234, Pa-234m, U-234	4
Th-230	0,4
Ra-226	1
kurzlebige Rn-222-Zerfallsprodukte	15
Pb-210, Bi-210, Po-210	60
Th-232	0,1
Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224	1,5
kurzlebige Rn-220-Zerfallsprodukte	30

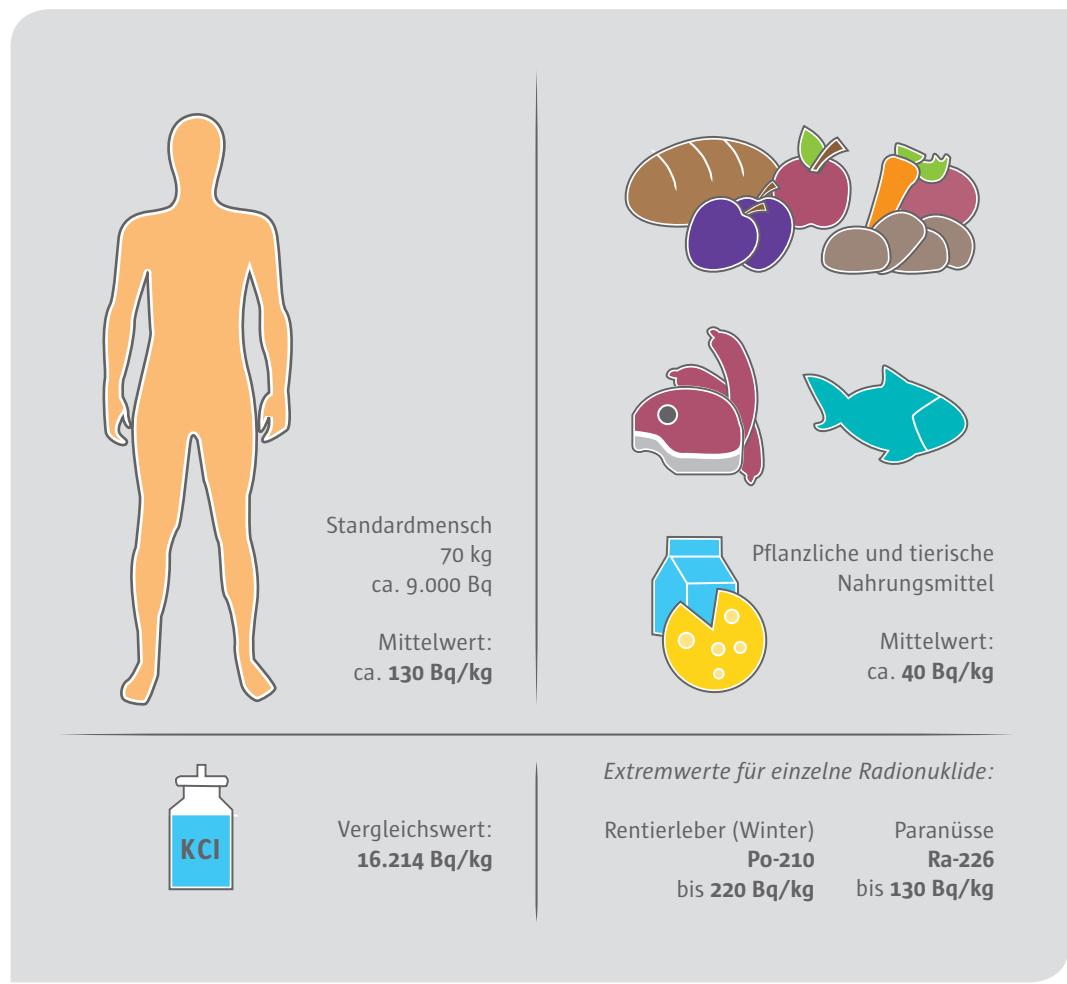


Abb. 7.10

Natürliche Radioaktivität im Menschen und in Nahrungsmitteln

Bestimmung der Dosis aus der inkorporierten Aktivität 7.8

Ionisierende Strahlen können auf zweierlei Weise auf den Menschen einwirken. Es ist eine Bestrahlung von außen möglich (externe Strahlenexposition) und der Körper kann von innen bestrahlt werden (interne Strahlenexposition), wenn Radionuklide mit der Nahrung und der Atemluft in den Körper gelangen.

Um berechnen zu können, welche Strahlendosis ein Mensch erhält, wenn eine bestimmte Menge radioaktiver Stoffe in seinen Körper gelangt, hat man so genannte Dosisfaktoren ermittelt. Sie erlauben es, z. B. aus der spezifischen Aktivität von Nahrungsmitteln die durch die Aufnahme dieser Aktivität in dem Körper zu erwartende Strahlenexposition zu berechnen.

In Tab. 7.07 sind die Dosisfaktoren für einige Radionuklide zusammengestellt. Die Abb. 7.11 veranschaulicht dies für die Aufnahme von Cs-137.

Die Dosisfaktoren sind von dem jeweiligen Radionuklid, der chemischen Verbindung des Radionuklids, dem Aufnahmeweg, dem Speicherorgan und dem Alter der Person abhängig. Die in Tab. 7.07 angegebenen Werte sind die unter ungünstigen Annahmen ermittelten Werte.

Die Folgedosis D_f , die sich bei einer Aufnahme radioaktiver Stoffe ergibt, ist das Produkt aus dem Dosisfaktor (DF) und der aufgenommenen Aktivität A.

Beispiel 1:

Ein einjähriges Kind trinkt 0,5 l Milch, dessen I-131-Aktivität 50 Bq/l beträgt. Wie hoch ist die zusätzliche Strahlenexposition der Schilddrüse und wie hoch ist die effektive Dosis?

Schilddrüsendosis:

$$D_f = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/Bq} \times 25 \text{ Bq} = 9,25 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} = 0,0925 \text{ mSv}$$

effektive Dosis:

$$D_f = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ Sv/Bq} \times 25 \text{ Bq} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Sv} = 0,0045 \text{ mSv}$$

Beispiel 2:

Ein Erwachsener isst 100 g Paranüsse mit einer spezifischen Aktivität an Ra-226 von 100 Bq/kg. Wie hoch ist die Strahlenexposition der Knochenoberfläche und die effektive Dosis?

Knochenoberflächendosis:

$$D_f = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/Bq} \times 10 \text{ Bq} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,12 \text{ mSv}$$

effektive Dosis:

$$D_f = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ Sv/Bq} \times 10 \text{ Bq} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ Sv} = 0,0028 \text{ mSv}$$

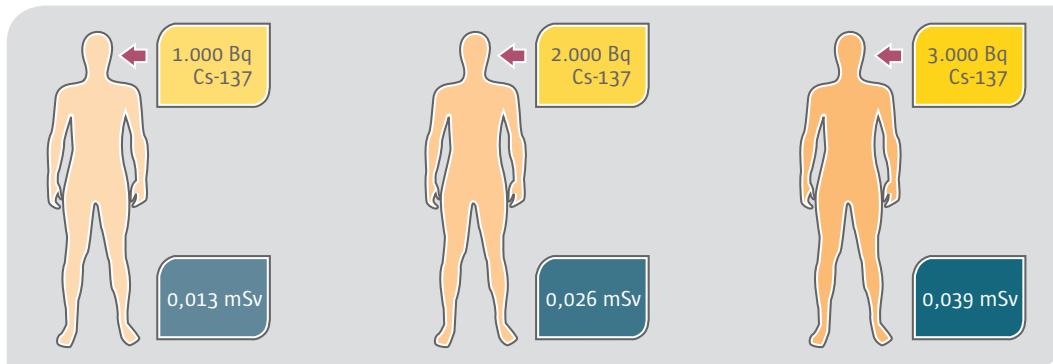


Abb. 7.11

Veranschaulichung des Dosisfaktors für Cs-137; angegeben ist die aus einer Zufuhr von Cs-137 mit der Nahrung resultierende effektive 50-Jahre-Folgedosis für einen Erwachsenen

Radionuklid	Organ	Dosisfaktor in Sv/Bq	
		Kind 1 Jahr	Erwachsene
K-40	effektive Dosis	$6,2 \times 10^{-8}$	$6,2 \times 10^{-9}$
Sr-90	Knochenoberfläche effektive Dosis	$2,3 \times 10^{-6}$ $2,3 \times 10^{-7}$	$4,1 \times 10^{-7}$ $2,8 \times 10^{-8}$
I-131	Schilddrüse effektive Dosis	$3,7 \times 10^{-6}$ $1,8 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-7}$ $2,2 \times 10^{-8}$
Cs-134	effektive Dosis	$2,6 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-8}$
Cs-137	effektive Dosis	$2,1 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-8}$
Po-210	Nieren effektive Dosis	$1,8 \times 10^{-4}$ $2,6 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$ $1,2 \times 10^{-6}$
Ra-226	Knochenoberfläche effektive Dosis	$1,6 \times 10^{-4}$ $4,7 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-5}$ $2,8 \times 10^{-7}$

Tab. 7.07

Dosisfaktoren zur Berechnung der Folgedosis bei einer Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung

8

Natürliche Strahlenquellen – natürliche Strahlenexposition



Die natürliche ionisierende Strahlung lässt sich auf vier verschiedene Quellen zurückführen:

- Aus dem Weltall trifft eine Teilchenstrahlung und energiereiche Photonenstrahlung auf die Erde (kosmische Strahlung).
- In der Erdatmosphäre werden durch die kosmische Strahlung ständig Radionuklide neu gebildet (kosmogene Radionuklide).

- In der Erdmaterie wandeln sich natürliche Radionuklide mit langer Halbwertszeit in nur einem Zerfallsschritt in inaktive Nuklide um.
- In der Erdmaterie wandeln sich die natürlichen Radionuklide Thorium und Uran mit langer Halbwertszeit in mehreren Stufen zu inaktiven Nukliden um.

Kosmische Strahlung und die Erzeugung neuer Radionuklide 8.1

Von der Sonne und anderen Sternen trifft eine energiereiche Teilchenstrahlung auf die Lufthülle unserer Erde. Diese Strahlung besteht im Wesentlichen aus Protonen, also aus Wasserstoffkernen (Tab. 8.01). Sie wird primäre kosmische Strahlung genannt.

Teilchenart	Anteil
Protonen	86 %
Heliumkerne	12 %
schwere Kerne	1 %
Elektronen	1 %

Die Energie kosmischer Protonen kann mehr als 10^{14} MeV betragen. Beim Zusammenprall mit den Molekülen der Lufthülle werden Atomkerne zertrümmert. Dabei entstehen neue Kerne und Teilchen, die weiterfliegen und z. T. weitere Kerne zertrümmern, bis ihre ursprüngliche Energie aufgebraucht ist. Am Erdboden ist fast nur die Strahlung zu beobachten, die durch vielfältige Sekundärprozesse entsteht (Abb. 8.01). Diese überwiegend aus Myonen sowie aus Photonen,

Elektronen, Neutronen und Protonen bestehende Strahlung wird sekundäre kosmische Strahlung genannt.

Die wichtigsten Radionuklide, die durch die kosmische Strahlung erzeugt werden, sind H-3, Be-7, C-14 und Na-22.

Entstehung von C-14:



Tab. 8.01

Zusammensetzung
der geladenen Teilchen in der primären
kosmischen Strahlung

Die gesamte natürliche C-14-Aktivität in der Biosphäre beträgt etwa $1 \cdot 10^{19}$ Bq. Die spezifische natürliche Aktivität von C-14 des Kohlenstoffes, der aus Bäumen gewonnen wurde, beträgt 227 Bq/kg.

Entstehung von H-3:



Die gesamte Aktivität des auf natürlichem Wege erzeugten Tritium liegt bei $1,3 \cdot 10^{18}$ Bq. Es ist zu etwa 99 % im Wasser gebunden. Die natürliche Tritiumaktivität des Meerwassers beträgt etwa 100 Bq/m³, in kontinentalen Oberflächengewässern zwischen 200 und 900 Bq/m³.

Elektronen und Gammaquanten der sekundären kosmischen Strahlung besitzen nur ein geringes Durchdringungsvermögen. Sie werden bereits durch die Luft teilweise absorbiert. Die praktisch völlige Abschirmung kann durch 15 cm Blei erreicht werden.

Der Neutronenanteil der sekundären kosmischen Strahlung ist in Meereshöhe gering, er nimmt aber mit der Höhe stark zu und bewirkt in einer Höhe von 15 km bereits rund 50 % der gesamten kosmischen Strahlenexposition in dieser Höhe.

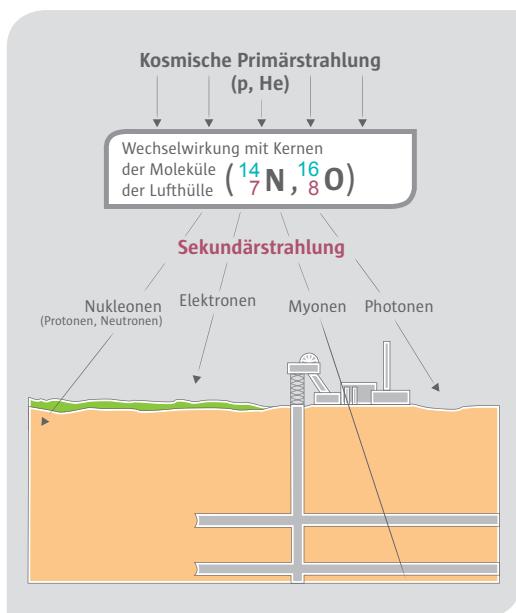


Abb. 8.01

Komponenten der kosmischen
Sekundärstrahlung

Eine weitere Komponente der sekundären kosmischen Strahlung besteht aus den Myonen. Myonen sind Elementarteilchen, die dem Elektron ähneln, jedoch eine deutlich höhere Masse aufweisen. In Meereshöhe besteht die kosmische Strahlung zu etwa 90 % aus Myonen. Die Intensität der Myonenstrahlung wird durch eine 1 m dicke Bleiplatte erst auf die Hälfte herabgesetzt. Myonen sind deshalb noch in Bergwerken und auf dem Grund tiefer Seen nachgewiesen worden.

Die Neutrino-Strahlung der primären kosmischen Strahlung ist trotz ihrer großen Intensität von rund 10^{11} Neutrinos $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ohne Bedeutung. Die Wechselwirkungen zwischen Neutrinos und Materie sind außerordentlich schwach. So wird z. B. von 1 Million Neutrinos, die durch die Erdkugel fliegen, nur eines absorbiert. Sie tragen deshalb auch nicht zur Strahlenexposition bei.

8.2 Natürliche Radionuklide ohne und mit Zerfallsreihen

In der Natur existieren viele Radionuklide mit extrem langer Halbwertszeit, die sich nur durch einen einzigen Zerfallsschritt in inaktive Nuklide umwandeln (Tab. 8.02). Es handelt sich dabei um Radionuklide aus der Entstehungszeit der irdischen Materie. Durch die sehr lange Halbwertszeit ist ihre Aktivität seit ihrer Entstehung kaum abgeklungen. Die langen Halbwertszeiten und der zum Teil geringe Anteil dieser Nuklide an der Isotopenzusammensetzung des jeweiligen Elements bedingt nur eine geringe spezifische Aktivität und damit eine vernachlässigbare Strahlenexposition.

Eine Ausnahme in dieser Hinsicht stellt das Kalium-40 dar. Das in der Natur vorkommende Kalium besteht zu 93,2581 % aus K-39, zu 6,7302 % aus K-41 und zu 0,0117 % aus dem radioaktiven K-40, das unter Aussenden eines Betateilchens zu Ca-40 oder durch K-Einfang zu Ar-40 zerfällt (Abb. 8.02). Da das K-40 mit dem angegebenen Anteil in jeder Kaliumverbindung vertreten ist,

sind auch alle Kaliumverbindungen radioaktiv. Auch der menschliche Körper enthält Kalium. Beim erwachsenen Menschen beträgt der Kaliumanteil etwa 2 g pro Kilogramm Körpergewicht; das entspricht beim Standardmenschen einer Kalium-40-Aktivität im Gesamtkörper von 4.200 Bq.

Es gibt außerdem natürliche Radionuklide mit sehr langen Halbwertszeiten, die sich in mehreren Stufen in inaktive Nuklide umwandeln. Dabei werden ständig Radionuklide mit zum Teil sehr kurzen Halbwertszeiten neu gebildet. In der Natur kommen noch drei Zerfallsreihen vor (Tab. 8.03 und Abb. 8.03). In den frühen Zeiten der Erdgeschichte existierte eine weitere Zerfallsreihe, die Plutonium-Neptunium-Reihe. Diese Zerfallsreihe ist „ausgestorben“, weil die Anfangsglieder dieser Reihe eine – verglichen mit dem Alter der Erde – geringe Halbwertszeit haben. Nachdem aber Pu-241 künstlich hergestellt worden ist, existiert diese Zerfallsreihe im Prinzip wieder.

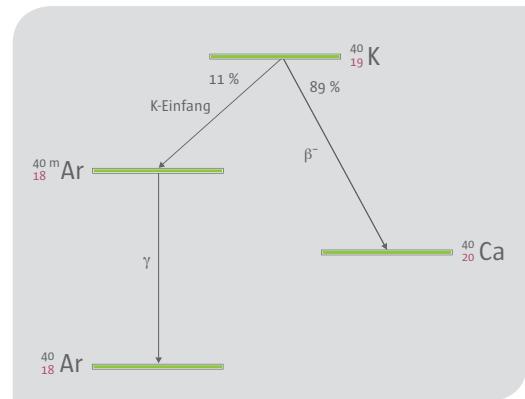
Nuklid	Halbwertszeit in Jahren	Nuklid	Halbwertszeit in Jahren
K-40	$1,28 \times 10^9$	La-138	$1,05 \times 10^{11}$
V-50	$1,4 \times 10^{17}$	Nd-144	$2,29 \times 10^{15}$
Ge-76	$1,53 \times 10^{21}$	Nd-150	$1,7 \times 10^{19}$
Se-82	$1,08 \times 10^{20}$	Sm-147	$1,06 \times 10^{11}$
Rb-87	$4,8 \times 10^{10}$	Sm-148	$7,0 \times 10^{15}$
Zr-96	$3,9 \times 10^{19}$	Gd-152	$1,1 \times 10^{14}$
Mo-100	$1,15 \times 10^{19}$	Lu-176	$3,8 \times 10^{10}$
Cd-113	$9,0 \times 10^{15}$	Hf-174	$2,0 \times 10^{15}$
Cd-116	$2,6 \times 10^{19}$	Ta-180	$1,2 \times 10^{15}$
In-115	$4,4 \times 10^{14}$	Re-187	$5,0 \times 10^{10}$
Te-123	$1,24 \times 10^{13}$	Os-186	$2,0 \times 10^{15}$
Te-128	$7,2 \times 10^{24}$	Pt-190	$6,5 \times 10^{11}$
Te-130	$2,7 \times 10^{21}$	Bi-209	$1,9 \times 10^{19}$

Abb. 8.02

Tab. 8.02 (links)

Radioaktive Urnuklide ohne Zerfallsreihen

Tab. 8.03



Zerfallsreihe	Beginn	Ende
Thorium-Reihe	$^{232}_{90}\text{Th}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$
Uran-Actinium-Reihe	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{207}_{82}\text{Pb}$
Uran-Radium-Reihe	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{206}_{82}\text{Pb}$

Geringste Mengen von Pu-239 entstehen in der Natur ständig neu durch Neutronenbestrahlung von U-238. Diese Neutronen stammen überwiegend aus der Spontanspaltung des U-238 (ca. 50 Neutronen/h · g Uran).

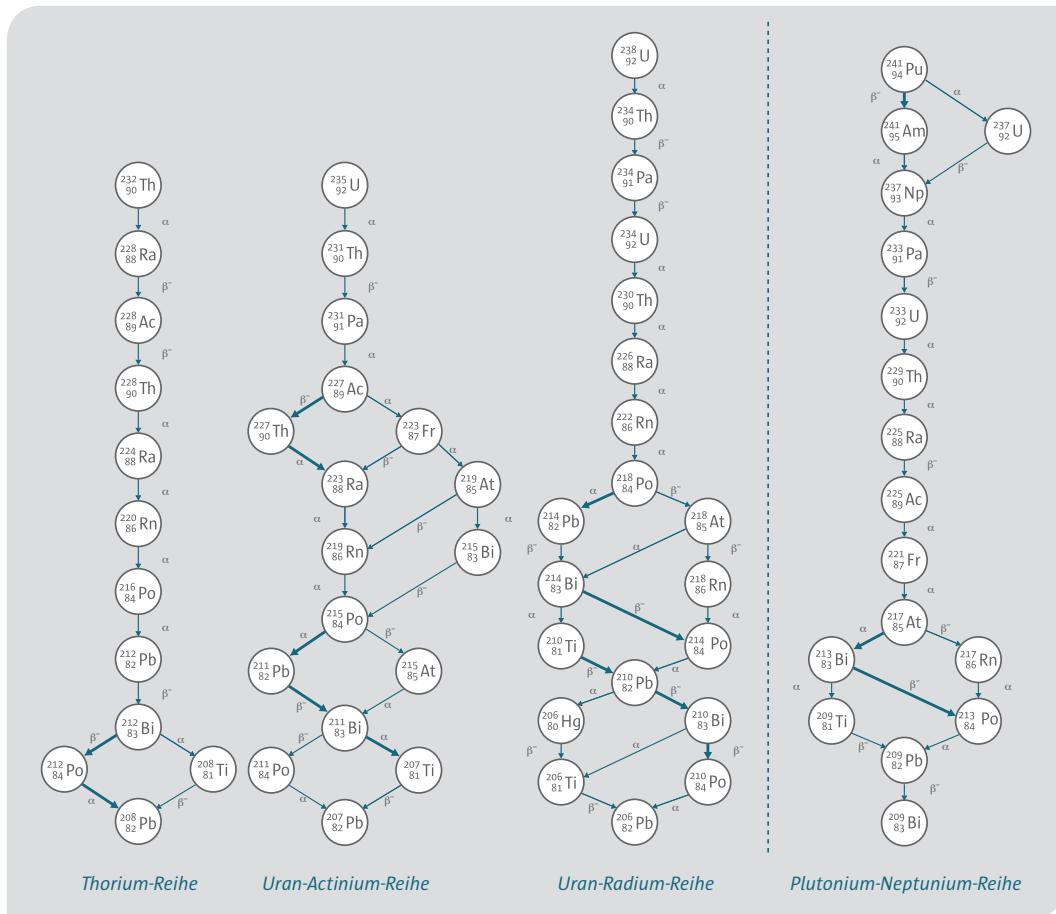


Abb. 8.03

Die natürlichen Th-, U-Ac- und U-Ra-Zerfallsreihe und die künstliche Pu-Np-Zerfallsreihen

Natürliche Radionuklide in Boden, Wasser und Luft 8.3

Die natürlichen Radionuklide kommen im Erdkörper, im Wasser und in der Luft in unterschiedlichen Konzentrationen vor. Durch Verwitterungsprozesse oder meteorologische Faktoren kann sich die Konzentration kurzzeitig oder über längere Zeiträume hinweg ändern. Der Gehalt der oberen Schichten des Erdbodens an natürlichen Radionukliden wird auch durch den Mineraldünger verändert, den man in der Landwirtschaft einsetzt. Tab. 8.04 gibt typische Werte für die spezifische Aktivität einiger Bodenarten an. Die Variationsbreite dieser Werte kann groß sein.

In den drei Zerfallsreihen durchlaufen die Radionuklide die Kernladungszahl 86, die des Radons. Dieses Edelgas kann durch Erdspalten und Bodenkapillaren in die Atmosphäre gelangen. Dieser Vorgang ist von geologischen und meteorologischen Bedingungen abhängig. So wird z. B. durch Schnee oder Wasser das Austreten des Radons aus dem Erdboden größtenteils verhindert.

Bodenart	Spezifische Aktivität in Bq/kg		
	K-40	Th-232	Ra-226
Granit	1.000	120	100
Tuff	1.000	100	100
Gneis	900	45	75
Sandstein	500	25	20
Basalt	270	30	25

Tab. 8.04

Typische spezifische Aktivität natürlicher Radionuklide in verschiedenen Bodenarten (gerundet)

Die drei Radonisotope haben sehr unterschiedliche Halbwertszeiten (siehe Tab. 8.05).

Isotop	Halbwertszeit
Rn-219	3,96 s
Rn-220	55 s
Rn-222	3,825 d

Tab. 8.05

Radonisotope der natürlichen Radioaktivitätszerfallsreihen

Bei Rn-222 reicht die Halbwertszeit von 3,8 d aus, dass es nach dem Ausströmen aus der Erde oder dem Mauerwerk der Häuser in den unteren Luftsichten verteilt wird. Man schätzt, dass von dem entstandenen Rn-222 im Mittel 15 % in den Luftraum gelangen. Dort zerfällt das Radionuklid weiter (Abb. 8.04).

Die Rn-222-Konzentration beträgt in der bodennahen Luft im Mittel 14 Bq/m³. Über meeresnahen Luftsichten ist die Radonkonzentration geringer, da der Radiumgehalt des Meeres geringer ist als der des Erdbodens.

Die in der Atmosphäre entstehenden Folgeprodukte des Radon sowie die durch die kosmische Strahlung erzeugten Radionuklide gelangen durch Sedimentation, Konvektion, Diffusion oder mit dem Niederschlag zur Erde bzw. in die Gewässer. Grund- und Quellwasser enthalten als wichtigste Radionuklide Radon und seine Folgeprodukte. Im Meerwasser wird die Aktivität im Wesentlichen durch das K-40 verursacht. Die Tab. 8.06 enthält typische Wertebereiche der natürlichen radioaktiven Stoffe im Wasser.

Wasser-vorkommen	Konzentration an natürlichen Radionukliden in Bq/l						
	H-3	Ra-226	Rn-222*	K-40	U-238	Pb-210	Po-210
Meer	0,02 bis 0,06	0,001 bis 0,006	0,001 bis 0,03	12	0,04	0,002	
Flüsse, Seen	0,04 bis 0,4	< 0,0004 bis 0,1	0,4 bis 2	0,04 bis 2	0,0006 bis 0,04	0,004 bis 0,2	
Grundwasser	0,04 bis 0,4	< 0,004 bis 0,4	4 bis 400	0,004 bis 0,4	0,001 bis 0,2	0,002	0,0004 bis 0,002
Regen	0,4 bis 1		40 bis 4.000	0,004 bis 0,1		0,01 bis 0,2	0,004 bis 0,04
Trinkwasser	0,2	0,004	0,4 bis 4	0,2	0,002	0,001	0,0004

Tab. 8.06

Typische Aktivitätswerte natürlicher Radionuklide in Wasser (gerundet)

* und kurzlebige Folgeprodukte

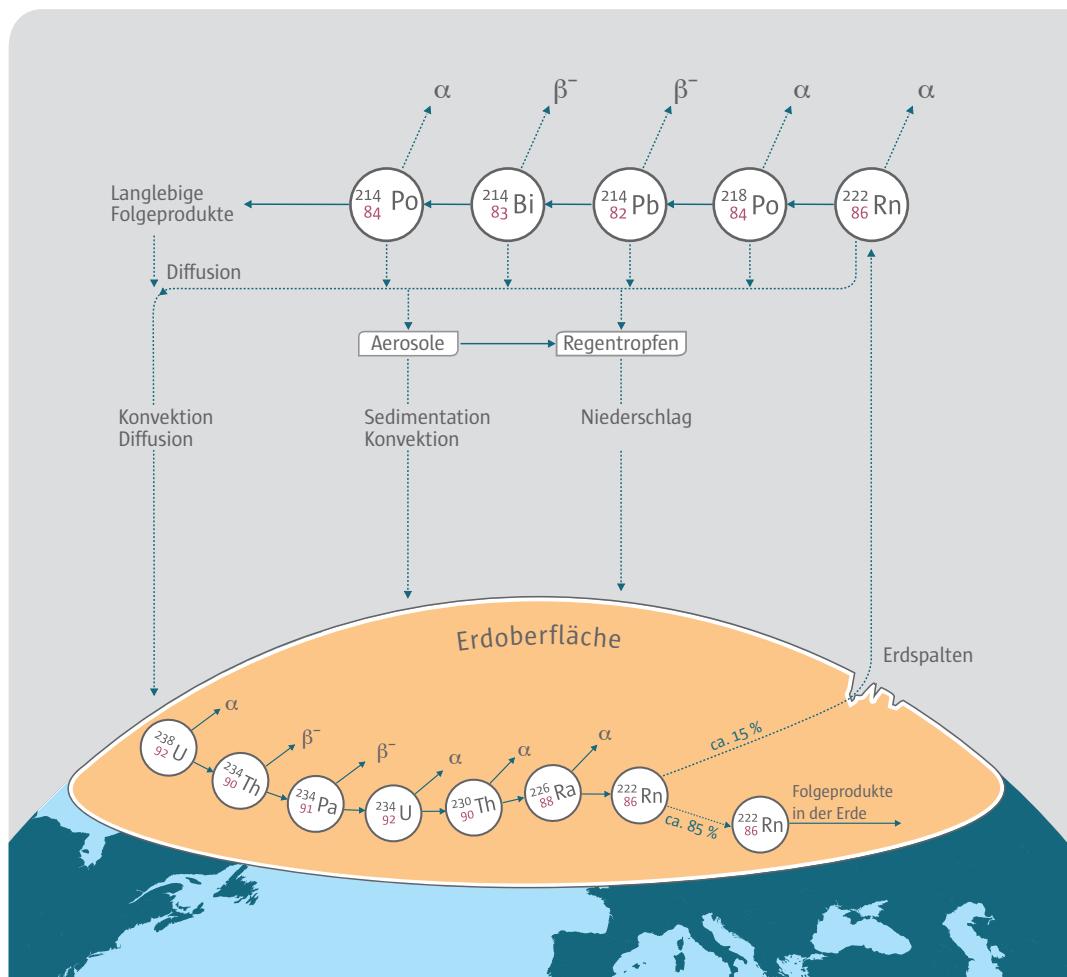


Abb. 8.04

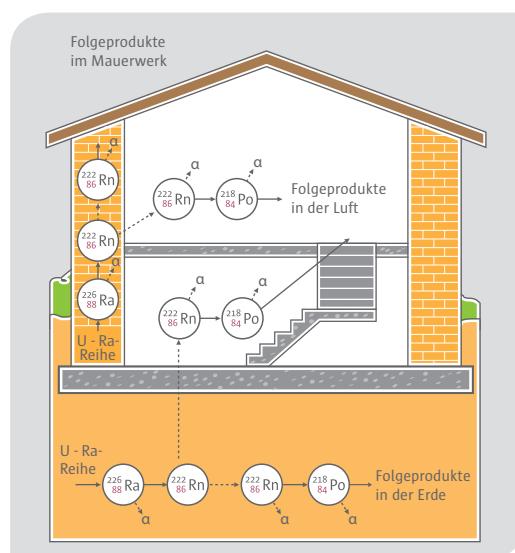
Entstehung des Rn-222 und seiner Folgeprodukte in bodennaher Luft

Die von den Menschen verwendeten Baumaterialien enthalten ebenfalls radioaktive Stoffe. Ihre Konzentration schwankt in Abhängigkeit von der Baustoffgruppe und der Herkunft. Verallgemeinernd lassen sich über die wichtigsten Baumaterialien die in der Tab. 8.07 enthaltenen relativen Angaben machen.

Baustoff	Radionuklidegehalt
Holz, Kunststoff	sehr niedrig
Kalksandstein	niedrig
Ziegel, Beton	mittel
Granit	hoch
Schlackenstein, Bimsstein	sehr hoch

Die Wohnungen stellen eine Anhäufung von Erdmaterie dar. Je größer die Masse ist, die die Bewohner umgibt, desto mehr natürliche Radionuklide sind auch vorhanden und senden Strahlen aus. Bei Gebäuden muss zusätzlich bedacht werden, dass beim radioaktiven Zerfall von Uran-238, Uran-235 und Thorium-232 in den Zerfallsreihen auch Isotope des Elements Radon auftreten. Radon ist ein radioaktives Edelgas, das aus dem Erdboden und Gebäudewänden zum Teil ausströmt und dann in der Luft weiter zerfällt

(Abb. 8.05). In Gebäuden mit gegenüber dem Erdreich undichten Kellerräumen (z. B. mit Naturstein- oder Naturbodenkeller) oder mit geringer Lüftung kann sich dadurch in den Wohnräumen eine deutlich höhere Radonkonzentration ergeben als in der Freiluft. Das verwendete Baumaterial, die Bauweise und die in den Gebäuden stattfindende Ventilation sind dabei von Bedeutung. Die Rn-222-Aktivitätskonzentration der Luft in Wohnungen beträgt im Mittel 50 Bq/m³ gegenüber 14 Bq/m³ im Freien.



Tab. 8.07

Klassifizierung von Baustoffen nach dem Radionuklidegehalt

Abb. 8.05

Eindringen des radioaktiven Edelgases Radon in Wohnräume

Natürliche externe Strahlenexposition des Menschen 8.5

8.5.1 Kosmische Strahlung

Die kosmische Strahlung wurde 1912 von Hess entdeckt, der eine mit der Höhe zunehmende Ionisation in der Atmosphäre feststellte.

Mit einem Zahlenwert von eins für den Strahlungswichtungsfaktor der ionisierenden Komponente der kosmischen Strahlung, einem

Aufenthaltsanteil von 80 % in Häusern und 20 % im Freien und einem mittleren Abschirmfaktor der Häuser von 0,8 ergibt sich ein Beitrag der ionisierenden Komponente zur effektiven Jahresdosis von 0,24 mSv in Meereshöhe. Der Beitrag der Neutronenkomponente zur effektiven Jahresdosis beträgt unter Berücksichtigung der Strahlungswichtungsfaktoren für das Neutronenenergiespektrum 0,07 mSv pro Jahr in Meereshöhe. Die gesamte effektive Jahresdosis durch die kosmische Strahlung in Meereshöhe liegt damit unter Berücksichtigung der anteiligen Aufenthaltszeiten im Freien und in Häusern und deren Abschirmung bei rund 0,3 mSv.

Mit zunehmender Höhe über dem Meer steigt die Exposition durch kosmische Strahlung an (siehe Abb. 8.06). Der Anteil der ionisierenden Komponente an der gesamten effektiven Dosis steigt dabei langsamer an als der Anteil durch die Neutronenkomponente. Ständiger Aufenthalt auf der Zugspitze führt – unter Berücksichtigung von 20 % Aufenthalt im Freien und 80 % Aufenthalt in Gebäuden und deren Abschirmung – zu einer

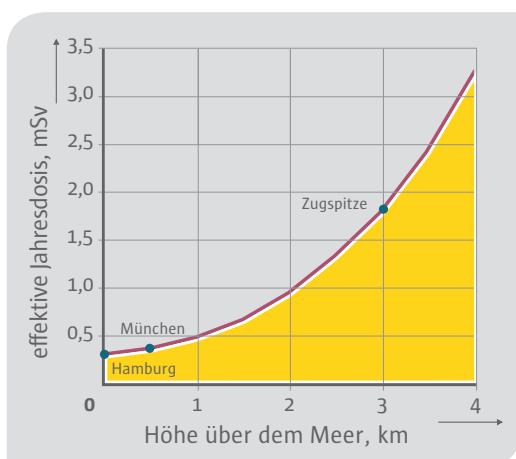


Abb. 8.06

Dosisleistung durch kosmische Strahlung für mittlere Breiten

effektiven Jahresdosis von 1,7 mSv (davon mehr als die Hälfte durch Neutronen). Die Tab. 8.08 enthält Daten der kosmischen Strahlenexposition für einige hochgelegene Großstädte. Viele der aufgeführten Städte liegen in äquatornahen Bereichen. Dort ist der Anteil der Neutronen in der kosmischen Strahlung deutlich geringer als in mittleren und polaren Breiten.

Ort	Einwohnerzahl in der Metro- polregion Millionen	Höhe m	effektive Jahres- dosis mSv
La Rinconada	0,03	5.100	3,7
La Paz	2,4	3.900	1,9
Lhasa	0,5	3.650	1,8
Quito	1,8	2.840	1,0
Addis Abeba	4,6	2.350	0,8
Mexiko Stadt	21,2	2.240	0,7
Nairobi	3,2	1.660	0,5
Denver	2,6	1.610	0,6

Tab. 8.08

Kosmische Strahlenexposition in hochgelegenen Städten

Tab. 8.10

Einfluss der Baumaterialien
auf die Exposition in Wohngebäuden,
Deutschland

8.5.2 Terrestrische Strahlung

Die Erdkruste enthält in unterschiedlicher Konzentration und in regional großer Variation eine Vielzahl natürlich radioaktiver Stoffe (siehe Tab. 8.04). Die beim Zerfall emittierte ionisierende Strahlung wird terrestrische Strahlung genannt. Die Strahlenexposition im Freien ist

von der jeweiligen spezifischen Aktivität aller dieser Radionuklide im Boden abhängig. Generell ist der Radioaktivitätsgehalt im Urgestein höher als in Sedimentgestein. Infolge des unterschiedlichen Gehalts der verschiedenen Gesteinsarten an natürlich radioaktiven Stoffen sind die Werte der terrestrischen Strahlung durch den geologischen Untergrund und insbesondere durch die obersten Bodenschichten bedingt von Ort zu Ort sehr unterschiedlich.

Die umfangreichen Messungen der terrestrischen Strahlung in Deutschland sind für die einzelnen Bundesländer in der Tab. 8.09 zusammengefasst. Als Mittelwert für Deutschland erhält man für die terrestrische Strahlenexposition im Freien einen Wert der effektiven Jahresdosis von 0,35 mSv.

Das zum Hausbau verwandte Baumaterial hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die durch natürliche radioaktive Stoffe hervorgerufene externe Strahlenexposition. Der gewichtete Mittelwert für die Exposition in Häusern liegt um rund 20 % höher als im Freien. Die Tab. 8.10 gibt den zusätzlichen Betrag der effektiven Jahresdosis in Häusern für einige wichtige Baustoffe an.

Baustoff	zusätzliche effektive Jahresdosis in mSv
Holz	0
Kalkstein, Beton	0,12
Ziegel, Klinker	0,15
Schlackenstein, Bims	0,25

Berücksichtigt man einen Aufenthalt von 20 % im Freien und 80 % in Häusern, so errechnet sich die mittlere effektive Jahresdosis der Bevölkerung in Deutschland durch die terrestrische Strahlung zu 0,4 mSv. In einigen Gebieten der Erde sind infolge höherer Konzentrationen natürlich radioaktiver Stoffe die Strahlendosen wesentlich größer (siehe Tab. 8.11). Ebenfalls hohe Werte der durch die terrestrische Strahlung bedingten Exposition wurden im Nil- und im Gangesdelta mit bis zu 3,5 mSv/a gemessen.

Gebiet	Mittlere effek- tive Jahres- dosis in mSv	Jahres- Ortsdosis bis zu mSv
Deutschland	0,4	5
Indien: Bereiche in Kerala und Tamil Nadu	4,0	55
Brasilien: Bereiche in Espirito Santo	6,0	175
Iran: Bereiche in der Stadt Ramsar	6,0	1.200

Tab. 8.09 (links)

Ländermittelwerte der terrestrischen Strahlendosis im Freien

Tab. 8.11

Terrestrische Strahlung
in verschiedenen Gebieten

Natürliche interne Strahlenexposition 8.6

Die im Durchschnitt im menschlichen Körper vorhandenen Aktivitäten natürlicher Radionuklide betragen – bezogen auf den Standardmenschen – etwa 9.000 Bq (siehe Tab. 7.06).

Von den natürlich radioaktiven Stoffen bewirkt Kalium-40 eine nicht unbeträchtliche Strahlendosis. Neben einer äußeren Strahlenexposition führt Kalium-40 zu einer inneren Strahlendosis, da Kalium und mit ihm Kalium-40 als lebenswichtiges Element im Körper vorhanden sein muss. Beim erwachsenen Menschen beträgt der Kaliumanteil etwa 2 g pro Kilogramm Körpermengen; das entspricht einer Kalium-40-Aktivität im Gesamtkörper von 4.200 Bq. Auch die mit der Nahrung aufgenommenen Radionuklide der Zerfallsreihen von Uran und Thorium bewirken in den verschiedenen Organen und Geweben des menschlichen Körpers unterschiedliche Organdosen.

Radon-222 und Radon-220 sind natürliche radioaktive, gasförmige Stoffe. Von diesen beiden Radon-Isotopen verursacht insbesondere das Radon-222 durch die kurzlebigen Folgeprodukte Po-218, Pb-214, Bi-214 und Po-214 den bei weitem größten Beitrag zur natürlichen Strahlenexposition des Menschen. Die Jahresmittelwerte der Radonkonzentration der bodennahen Luft in Deutschland überdecken den Bereich von 8 bis 30 Bq/m³. Der Mittelwert der Häufigkeitsverteilung der Radonkonzentrationswerte in den

Wohnungen beträgt 50 Bq pro m³. Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass in 10 % der Wohnungen die Radonkonzentration über 80 Bq/m³ und in 1 % der Wohnungen über 200 Bq/m³ liegt. Aus den Mittelwerten der Radonkonzentration im Freien in Deutschland von 14 Bq/m³ und in Häusern von 50 Bq/m³ lässt sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufenthaltsdauer die mittlere effektive Dosis durch Radon und seine Zerfallsprodukte zu 1,1 mSv/a berechnen.

Aufgrund neuer Erkenntnisse über das Lungenkrebsrisiko durch Radon und seine Folgeprodukte empfiehlt die Internationale Strahlenschutzkommission geänderte Faktoren zur Umrechnung der Radonkonzentration in effektive Dosis. Die Anwendung der neuen Berechnungsvorschläge führt zu einer Erhöhung der mittleren effektiven Dosis durch Radon und seiner Folgeprodukte in Deutschland von 1,1 auf 2,2 mSv/a.

Von den durch die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit den Atomen der hohen Atmosphärenschichten ständig neu entstehenden Radionukliden hat nur Kohlenstoff-14 für die Strahlenexposition des Menschen eine – allerdings geringe – Bedeutung. Aus dem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt in den verschiedenen Körperfunden errechnet sich eine effektive Jahresdosis von 12 µSv. Die Beiträge durch andere kosmogene Radionuklide sind gering (Na-22: 0,15 µSv/a, Be-7: 0,03 µSv/a, H-3: 0,01 µSv/a).

Zusammenfassung der natürlichen Strahlenexposition 8.7

Die effektive Dosis aus allen natürlichen Strahlenquellen ergibt sich zu einem Drittel aus externer und zwei Dritteln aus interner Strahlenexposition (Tab. 8.12).

Individuelle, lokale und regionale Abweichungen von diesen mittleren Werten können erheblich sein. In Deutschland liegt für 95 % der Einwohner die effektive Jahresdosis im Bereich von 1,2 bis 4,6 mSv mit einem mittleren Wert von 2,1 mSv.

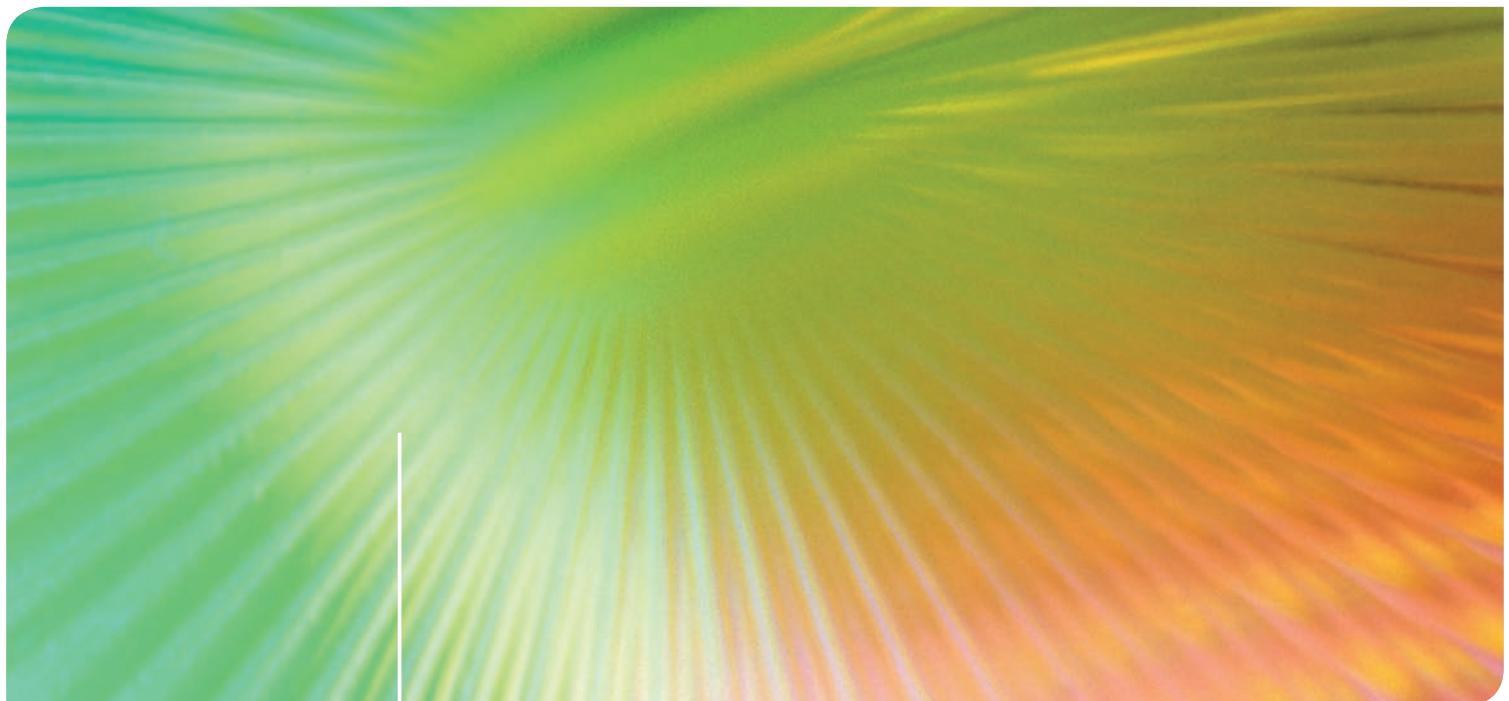
Exposition durch	effektive Jahresdosis in mSv		
	Bestrahlung von außen	Bestrahlung von innen	gesamt
Kosmische Strahlung			
in Meereshöhe: ionisierende Komponente Neutronen	0,24 0,07		} 0,3
in 1.000 m Höhe: ionisierende Komponente Neutronen	0,3 0,15		} 0,45
kosmogene Radionuklide			
primordiale Radionuklide		0,02	0,02
K-40 Rb-87	0,15	0,17 0,006	0,3
U-238-Reihe: U-238 ➔ Ra-226 Rn-222 ➔ Po-214 Pb-210 ➔ Po-210	} 0,12	0,02 1,1 0,05	} 1,3
Th-232-Reihe: Th-232 ➔ Ra-224 Rn-220 ➔ Tl-208	} 0,14	0,01 0,07	} 0,2
Summe	0,7	1,4	2,1

Tab. 8.12

Mittlere natürliche Strahlenexposition in Deutschland unter Berücksichtigung einer Aufenthaltszeit von 20 % im Freien und 80 % in Gebäuden.

9

Künstliche Strahlenquellen – zivilisatorische Strahlenexpositionen



Außer der natürlichen Strahleneinwirkung sind die Menschen einer zivilisatorisch bedingten Strahleneinwirkung ausgesetzt. Sie kommt im Wesentlichen durch folgende Anwendungen zustande:

- Strahleneinsatz in der Medizin,
- Reaktorunfall von Tschernobyl,
- Kernwaffenversuche,
- Anwendungen ionisierender Strahlen in Wissenschaft, Technik und Haushalt,
- Flugverkehr,
- Betrieb von Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Einrichtungen.

Medizinische Anwendung von Röntgenstrahlen 9.1

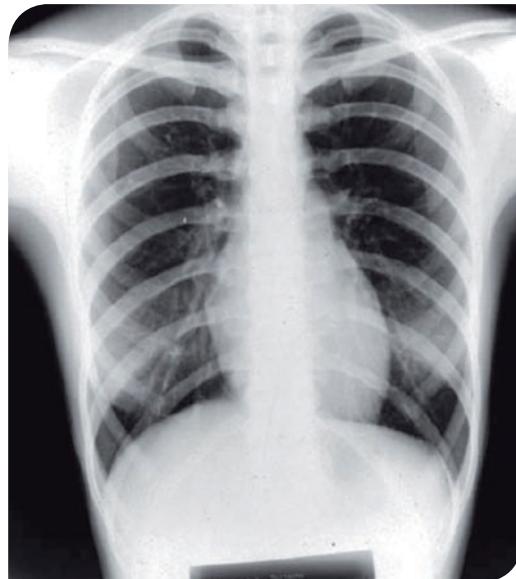
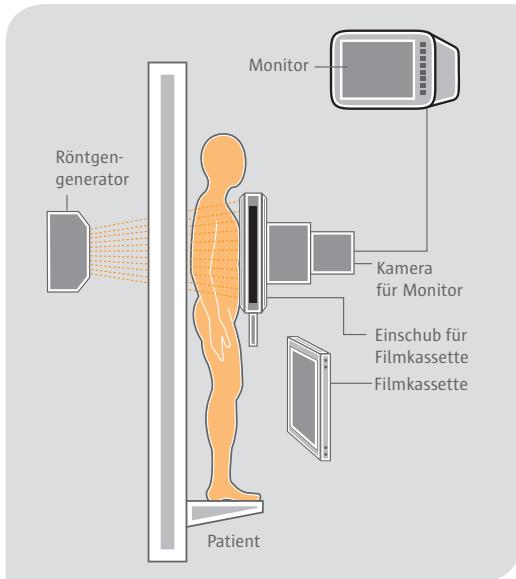


Abb. 9.01 (links)
Herstellen einer Röntgenaufnahme

Abb. 9.02
Röntgenaufnahme eines Brustkorbs

Röntgenstrahlen werden in der Medizin zur Diagnose und Therapie eingesetzt.

Bei der Diagnostik wird der zu untersuchende Körperteil eines Menschen durchstrahlt (Abb. 9.01). Nach dem Austritt der Strahlen aus dem Körper lässt man sie auf einen Fluoreszenzschirm treffen (z. B. Zinksulfid), der dann aufleuchtet. Die Röntgenstrahlen selbst sind für Menschen nicht sichtbar. Da Röntgenstrahlen von verschiedenen Stoffen verschieden stark absorbiert werden, entstehen auf dem Schirm, einem Monitor oder einem Film Bilder vom Innern des Körpers. Organe mit größerer Strahlenabsorption (z. B. Knochen, Herz) führen zu hellen Stellen, solche mit geringerer Strahlenabsorption (z. B. Lungengewebe) zu dunkleren Stellen (Abb. 9.02).

Die Anwendung der Röntgenstrahlen in der medizinischen Diagnostik führt zu einer Strahlenexposition des Menschen. Sie ist von der Art und dem Umfang der durchgeföhrten Untersuchung abhängig. Die Tab. 9.01 gibt dafür einige Orientierungswerte, im individuellen Fall können erhebliche Abweichungen auftreten. Das beruht auf der sehr großen Variabilität der Einzeldosis bei jeder Untersuchung, die vom untersuchenden Arzt, der speziellen medizinischen Situation, der genutzten Technik, der Bestrahlungsfeldgröße und der Zahl

der Aufnahmen je Untersuchung und noch weiteren Faktoren abhängt. In Deutschland wurden im Jahr 2009 rund 135 Mio. Röntgenuntersuchungen durchgeführt.

Untersuchungsart	effektive Dosis, mSv
Computertomographie	
Bauchraum	8,8 – 16,4
Lendenwirbelsäule	4,8 – 8,7
Brustkorb	4,2 – 6,7
Röntgen-Aufnahmen und Durchleuchtung	
Herzkranzgefäß	6 – 16
Darm	5 – 12
Gallenblase	1 – 8
Röntgen-Aufnahme	
Lendenwirbelsäule	0,6 – 1,1
Mammographie beidseits	0,2 – 0,04
Brustkorb	0,02 – 0,04
Zahn	≤ 0,01

Tab. 9.01:
Typische Werte für die effektive Dosis häufig durchgeföhrter Röntgenuntersuchungen

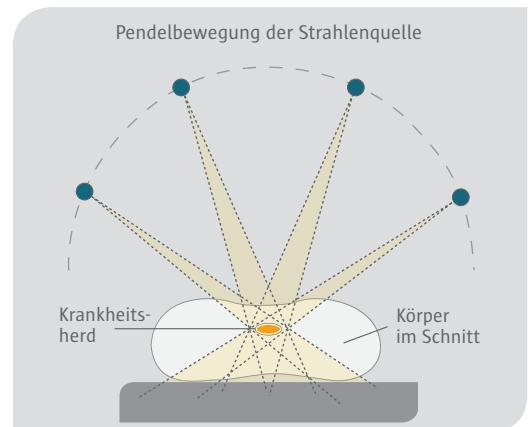
Die mittlere effektive Jahresdosis pro Einwohner in Deutschland durch die Röntgendiagnostik beträgt 1,7 mSv. Die durch die Röntgendiagnostik bewirkte effektive Jahresdosis beträgt in den USA 2,25 mSv, in der Schweiz 1,2 mSv und in Großbritannien 0,38 mSv.

Denselben Effekt kann man auch dadurch erreichen, dass die Strahlenquelle um den Patienten pendelt, wodurch die Strahlung auf den Krankheitsherd dauernd, auf das andere Gewebe aber nur eine sehr viel kürzere Zeit einwirkt (Abb. 9.03).

In der Therapie werden ionisierende Strahlen eingesetzt, um z. B. die Zellen bösartiger Tumore zu bestimmen und dadurch abzutöten. Die Dosis wird dabei so hoch gewählt, dass die kranken Zellen abgetötet werden. Die Energiedosis im Zielgewebe ist sehr viel höher als bei der Diagnostik und beträgt bis zu 60 Gy. Damit bei einem tieferliegenden Tumor nur der Krankheitsherd und nicht das umgebende Gewebe geschädigt wird, werden mehrere aufeinanderfolgende Bestrahlungen aus unterschiedlichen Richtungen vorgenommen. Dadurch wird der Krankheitsherd mehrfach, das übrige Gewebe aber nur einmalig bestrahlt. Im Krankheitsherd addiert sich die Strahlenwirkung.

Abb. 9.03

Prinzip der Pendelbestrahlung



9.2 Anwendungen von Radionukliden in der Medizin

Bei nuklearmedizinischen Untersuchungen wird dem Patienten eine radioaktive Substanz verabreicht, die vom Körper resorbiert und in bestimmte Organe transportiert wird. In welches Organ ein bestimmtes Radionuklid transportiert wird, ist auch davon abhängig, in welche chemische Verbindung es eingebaut worden ist. Da die verabreichte Substanz Strahlen aussendet, ist ihr Weg im Körper sowie die Stellen erhöhter Konzentration von außen gut zu verfolgen. Aus der Aufnahmefähigkeit und der Konzentration im Organ oder Teilen davon lassen sich Rückschlüsse auf die Organfunktion ziehen oder auch Tumoren erkennen. Die verabreichten Substanzen enthalten radioaktive Isotope, die eine möglichst kurze Halbwertszeit besitzen, nicht zu lange im Körper gespeichert werden und deren Strahlung nicht zu energiereich ist.

Ein besonders bekanntes Beispiel aus der Nuklearmedizin ist die Schilddrüsen-Funktionsprüfung. Wird dem Patienten eine bestimmte Menge Tc-99m injiziert, wird es in einigen Stunden bis zu 90 % in die Schilddrüse aufgenommen. Der zeitliche Verlauf der Aufnahme durch die Schilddrüse und die insgesamt gespeicherte Menge geben Auskunft über den Funktionszustand der Schilddrüse. Die Abb. 9.04 zeigt ein so genanntes Schilddrüsen-Szintigramm. Das von der Schilddrüse aufgenommene Radionuklid sendet Strahlen aus, die ein Detektor von außen registriert. Ein angeschlossener Drucker zeichnet je nach Anzahl der Impulse verschiedenfarbige Striche. Das Szintigramm zeigt die Lage und Größe der beiden Schilddrüsenlappen. Der erweiterte rechte Lappen weist auf eine Funktionsstörung hin.

Tab. 9.02

Effektive Dosis bei nuklearmedizinischen Untersuchungen

Die Tab. 9.02 enthält Angaben über die effektive Strahlendosis für verschiedene nuklearmedizinische Untersuchungen. Der gewichtete Mittelwert der effektiven Dosis beträgt 2,7 mSv pro Untersuchung. Aus den rund 3,2 Mio. Untersuchungen im Jahr – die häufigsten Untersuchungen betreffen mit 41 % die Schilddrüse und mit 28 % das Skelett – ergibt sich eine gesamte Effektivdosis von rund 7.600 Sv. Die mittlere effektive Jahresdosis pro Einwohner in Deutschland durch nuklearmedizinische Untersuchungen beträgt damit rund 0,1 mSv. Im Vergleich zur Röntgendiagnostik ist der Beitrag der nuklearmedizinischen Untersuchungen zur gesamten Strahlenexposition durch die Medizin gering.

unter-suchtes Organ	Radio-pharmakon	applizierte Aktivität in MBq	effektive Dosis in mSv
Gehirn	Tc-99m-HMPAO	700	6,5
Lunge	Tc-99m-MAA	100	1,1
Herz	Tl-201-Chlorid	75	17
Gefäße	Tc-99m-Ery	700	0,6
Niere	Tc-99m-DMSA	75	0,65
Skelett	Tc-99m-Phosphonat	600	3,5
Schilddrüse	Tc-99m-Pertechnetat	50	0,6
Leber/Galle	Tc-99m-HIDA	150	2,3



Abb. 9.04
I-131-Szintigramm einer Schilddrüse

Nach dem gleichen Verfahren lassen sich auch Therapiemaßnahmen durchführen. Da Iod praktisch ausschließlich in der Schilddrüse gespeichert wird, kann durch verabfolgtes radioaktives Iod (I-131, I-123) z. B. ein Schilddrüsentumor zerstört

werden. Die von radioaktivem Iod ausgesandten Betateilchen haben in organischem Gewebe nur eine geringe Reichweite, so dass sie praktisch nur auf die Schilddrüse selbst einwirken.

Strahlenexposition in Deutschland durch den Reaktorunfall von Tschernobyl

9.3

Aufgrund des Reaktorunfalls von Tschernobyl am 26. April 1986 gelangten aus dem zerstörten Reaktor große Mengen radioaktiver Stoffe ins Freie. Ein Großteil der Radionuklide hat zu einer hohen Kontamination der Umwelt in einer 30-km-Zone um den Reaktor geführt. Als Folge des Brands des Reaktors wurden radioaktive Stoffe in mehrere Kilometer Höhe transportiert und z. T. über weite Gebiete verteilt.

Durch meteorologische Einflüsse bedingt sind die aus der radioaktiven Wolke abgelagerten Aktivitätsmengen in den Regionen der Bundesrepublik sehr unterschiedlich – im Norden und Westen deutlich geringer als im Süden und Südosten. Daher ist keine bundeseinheitliche Darstellung hinsichtlich der resultierenden Strahlendosis,

die zudem noch stark von der individuellen Ernährungsgewohnheit abhängt, möglich.

Die Strahlenexposition in Deutschland betrug für Kleinkinder, für die sich gegenüber Erwachsenen generell höhere Dosiswerte errechnen, für das Jahr des Unfalls zwischen 0,1 mSv in Gebieten nördlich der Donau und 0,6 mSv für Bereiche des Voralpengebietes.

Berechnet man die entsprechende Dosis für die nächsten 50 Jahre, so ergibt sich ein Gesamtbetrag von 0,4 mSv im Norden und 2,3 mSv in den Voralpen. Für Einzelpersonen mit extremen Lebens- und Verzehrgewohnheiten können sich Dosiswerte bis zum Zwei- oder Dreifachen dieser Werte ergeben.

Personengruppe	Zeitraum	nördlich der Donau	südlich der Donau	Voralpen
Kleinkinder	1. Jahr	0,12	0,35	0,6
	Lebenszeit	0,4	1,2	2,3
Erwachsene	1. Jahr	0,1	0,3	0,5
	Lebenszeit	0,4	1,1	2,1

Tab. 9.03
Abgeschätzte mittlere Strahlenexposition (effektive Dosis in mSv) durch den Tschernobylunfall in verschiedenen Teilen Deutschlands

9.4 Strahlenexposition durch Kernwaffentests

Kernwaffen beruhen auf dem Prinzip der Kernspaltung und gegebenenfalls zusätzlich der Kernfusion (Wasserstoffbombe).

Kernwaffenexplosionen erzeugen sehr große Aktivitätsmengen insbesondere an Spaltprodukten. Daneben haben für die Strahlenexposition auch noch die bei der Explosion aus dem Uran-238 entstehenden Plutoniumisotope Pu-239, Pu-240 und Pu-241 sowie der Teil des ungespalten gebliebenen Bombenmaterials Pu-239 eine Bedeutung (Tab. 9.04). Bis Ende 2006 wurden nach UN-Angaben 543 Kernwaffen oberirdisch und 1.877 Kernwaffen unterirdisch gezündet. Die Stärke der oberirdischen Explosionen entsprach einem Äquivalent von 440 Megatonnen TNT (Trinitrotoluol, konventioneller Sprengstoff), die der unterirdischen Explosionen 90 Megatonnen TNT. Die nach Zahl und Sprengkraft größten Versuchsserien wurden in den Jahren 1961/62 durch die USA und die Sowjetunion mit 128 Explosionen durchgeführt.

Radionuklid	Halbwertszeit	Freigesetzte Aktivität in 10^{18} Bq
H-3	12,32 a	240
C-14	5.730 a	0,22
Sr-90	28,5 a	0,6
Zr-95	64 d	150
Ru-106	368 d	12
I-131	8,02 d	700
Cs-137	30,17 a	1
Ce-144	284,8 d	30
Pu-239	$2,41 \times 10^4$ a	0,01
Pu-240	6.550 a	0,01

Tab. 9.04

Aktivität einiger Radionuklide, die insgesamt bei den oberirdischen Kernwaffentests freigesetzt wurden

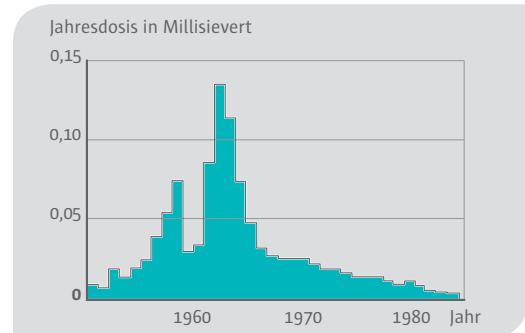
Abb. 9.05

Jährliche Dosis in Mitteleuropa durch Kernwaffentests

Die bei den oberirdischen Explosionen erzeugten größeren radioaktiven Schwebstoffpartikel sinken meist innerhalb von 100 km wieder zu Boden. Dieser lokale Fallout kann bis zu 50 % der gesamten Aktivität betragen. Kleinere radioaktive Schwebstoffpartikel werden bis in Höhen von 50 km gehoben und mit Luftströmungen über große Entfernung transportiert. In höheren Luftschichten verweilen die radioaktiven Schwebstoffe bis zu einigen Jahren. In dieser Zeit können sie global verteilt werden. Durch Luftaustausch gelangen sie in untere Luftschichten, von wo aus sie durch Sedimentation und Niederschlag den Erdboden erreichen.

Die Strahlenexposition der Bevölkerung durch den radioaktiven Fallout folgt aus einer externen Bestrahlung durch die auf dem Boden abgelagerte Aktivität und durch die interne Strahlendosis infolge Inhalation oder Verzehr von kontaminierter Nahrungsmitteln. Den zeitlichen Verlauf der Exposition in Mitteleuropa gibt Abb. 9.05 wieder. Für Personen in Mitteleuropa ergibt sich für den Zeitraum von 1960 bis 2050 im Mittel eine effektive Dosis von rund 2 mSv; rund 80 % dieser Dosis sind in den Jahren von 1960 bis 1970 angefallen.

Abb. 9.06 zeigt die Ergebnisse von Messungen des Cs-137-Gehalts im Körper, die an einer Referenzpersonengruppe im Ganzkörperzähler des Forschungszentrums Karlsruhe durchgeführt wurden.



spezifische Aktivität der Körpermasse in Bq/kg

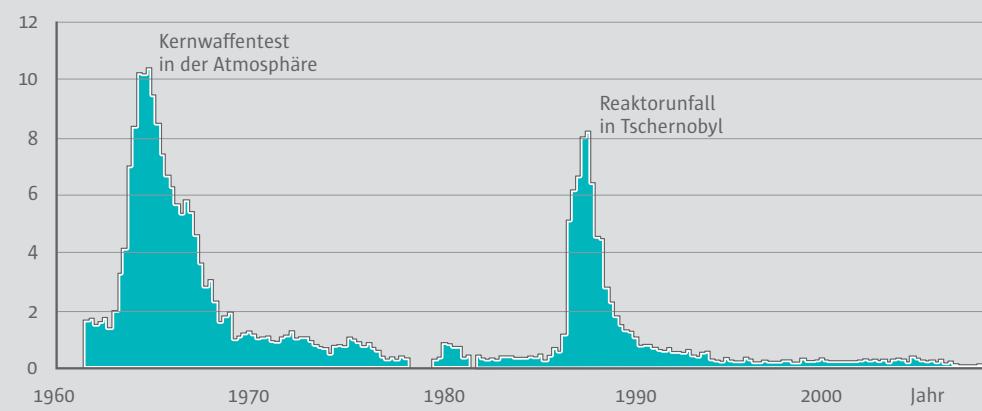
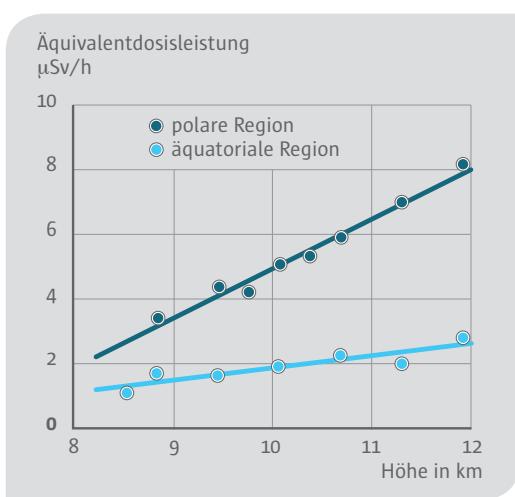


Abb. 9.06

Cs-137-Körperaktivität der Karlsruher Referenzgruppe



Eine erhöhte Strahlenexposition durch die kosmische Strahlung tritt bei Flügen in größeren Höhen auf. Die Strahlendosis hängt dabei nicht nur von der Flughöhe und der Flugdauer sondern auch von der Region ab. Das Magnetfeld der Erde bewirkt eine Ablenkung der geladenen Teilchen der primären kosmischen Strahlung. Daraus ergibt sich in Flughöhen von 12 km in polaren Breiten eine rund viermal so große Dosisleistung wie im äquatorialen Bereich (Abb. 9.07).

Strecke (Hin- und Rückflug)	Dauer h:min	Dosis in µSv
Frankfurt – Palma de Mallorca	4:20	12
Frankfurt – Teneriffa	9:00	30
Frankfurt – New York	16:00	110
Frankfurt – Vancouver	20:00	150
Frankfurt – Johannesburg	21:00	45
Frankfurt – San Francisco	22:10	160
Frankfurt – Sao Paulo	23:15	55

Die Tab 9.05 enthält Werte der Strahlenexposition auf verschiedenen Flugstrecken. Die Breitenabhängigkeit der Strahlendosis wird z. B. im Vergleich der Flugziele Vancouver/Johannesburg und San Francisco/Sao Paulo deutlich. Bei vergleichbarer Flugdauer ergibt sich auf den Flügen in äquatorialen Bereichen eine deutlich geringere Dosis als in polarer Region.

Weiterhin wird der aus der Galaxis stammende Anteil der kosmischen Strahlung durch das im 11-jährigen Zyklus als Folge der Sonnenfleckensintensität variierende Magnetfeld der Sonne beeinflusst. In Zeiten geringer Sonnenfleckensintensität sind das Magnetfeld der Sonne und die dadurch bewirkte Ablenkung der galaktischen Strahlung gering und daraus folgt ein größerer Beitrag der galaktischen Komponente der kosmischen Strahlung zu unserer Strahlendosis (siehe Abb. 9.08).

Die Strahlenexposition der Besatzung von Düsenflugzeugen durch kosmische Strahlung für die verschiedenen Flugrouten wurde intensiv untersucht. Bei Flugrouten in geomagnetischen Breiten von 50° N und mehr, Flugzeiten des Personals von 600 Stunden im Jahr und durchschnittlichen

Abb. 9.07

Dosisleistung als Funktion der Flughöhe für polare und äquatoriale Regionen

Flug		Flug-dauer in h	Dosis in mSv
Erdumkreisung	Apollo VII	260	3,6
Erdumkreisung	Saljut 6/IV	4.200	55
Erdumkreisung (Daten für 2004)	ISS, innen	24	0,5
	ISS, außen	24	1,3
Mondumkreisung	Apollo VIII	147	5,7
Mondlandung	Apollo XI	195	6
Mondlandung	Apollo XIV	209	15

Tab. 9.05 (links)

Strahlenexposition auf verschiedenen Flugstrecken Dezember 2012

Tab. 9.06

Strahlendosis bei Raumflügen

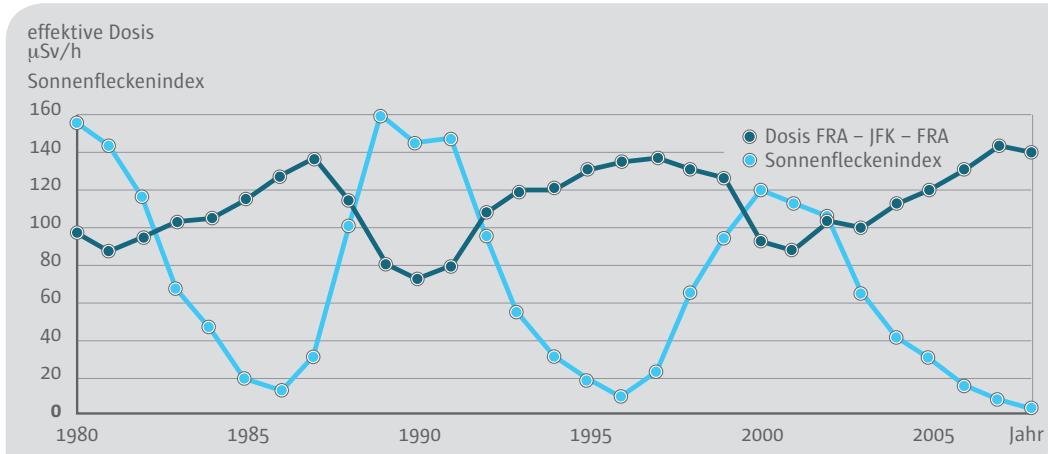


Abb. 9.08

Einfluss der Sonnenflecken auf die Strahlenexposition

Flug Frankfurt – New York – Frankfurt

Flughöhen von 10 km ergibt sich eine effektive Jahresdosis von 3 bis 4 mSv.

Bei Raumflügen treten noch höhere Dosen auf. In diesen Höhen fehlt die abschirmende Wirkung der Atmosphäre. Die Astronauten sind je nach Flugbahn insbesondere der intensiven Strahlung in den beiden Strahlungsgürteln ausgesetzt, die die Erde äquatorial in Höhen von etwa 1.000 bis

10.000 km und 20.000 bis 60.000 km umgeben und als Van-Allen-Gürtel bezeichnet werden. So ist ein großer Anteil der gesamten Strahlendosis bei den in Tab. 9.06 aufgelisteten Mondflügen auf den Dosisbeitrag aus diesen Strahlungsgürteln zurückzuführen. Die höhere Dosis beim Flug von Apollo XIV – verglichen mit dem Flug von Apollo XI – ist überwiegend durch den anderen Verlauf der Flugbahn durch die Strahlungsgürtel bedingt.

9.6 Strahlenquellen in einem Kernkraftwerk Strahlenexposition durch Kernkraftwerke

Die von einem Kernreaktor ausgehende Strahlung hat verschiedene Ursachen:

- Bei der Spaltung der Kerne des U-235 durch Neutronen tritt eine Neutronen- und Gammastrahlung auf. Beispiel:



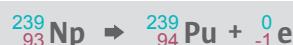
Trifft ein langsames (thermisches) Neutron auf einen Atomkern des Uran-235, wird es in den Kern aufgenommen. Es entsteht ein hochangeregter Zwischenkern des Isotops Uran-236. Seine Lebensdauer beträgt nur etwa 10^{-14} s.

Der neue Kern versucht, seine Anregungsenergie abzugeben. In etwa sechs von sieben Fällen tritt Spaltung ein, in einem Fall geht der Atomkern durch Aussenden eines Gammaquants in das langlebige Isotop Uran-236 über (Alphastrahler, Halbwertszeit $2,342 \cdot 10^7$ a).

Die Spaltung kann man sich im Modell so vorstellen, dass nach dem Einfang des Neutrons der Urankern zu schwingen beginnt, sich ellipsenförmig verformt, hantelförmig einschnürt und letztlich in zwei mittelschwere

Trümmerkerne sowie in zwei bis drei Neutronen zerfällt (Abb. 9.09). Zusätzlich tritt Gammastrahlung auf.

- Neutronen mittlerer sowie höherer Geschwindigkeit können vom U-238 aufgenommen werden. Dabei tritt keine Kernspaltung, sondern eine Umwandlung in das Uranisotop U-239 ein. Es ist ein Betastrahler, der sich in zwei Schritten zu Pu-239 umwandelt (Abb. 9.10):



Eine Umwandlung von U-238 zu Pu-239 findet in jedem Leichtwasserreaktor statt und trägt infolge der Spaltung der Pu-239-Kerne während des Reaktorbetriebs zu über 40 % zur Erzeugung elektrischer Energie bei. Die Abb. 9.11 gibt die Nuklidzusammensetzung im Kernbrennstoff vor und nach dem Reaktoreinsatz wieder.

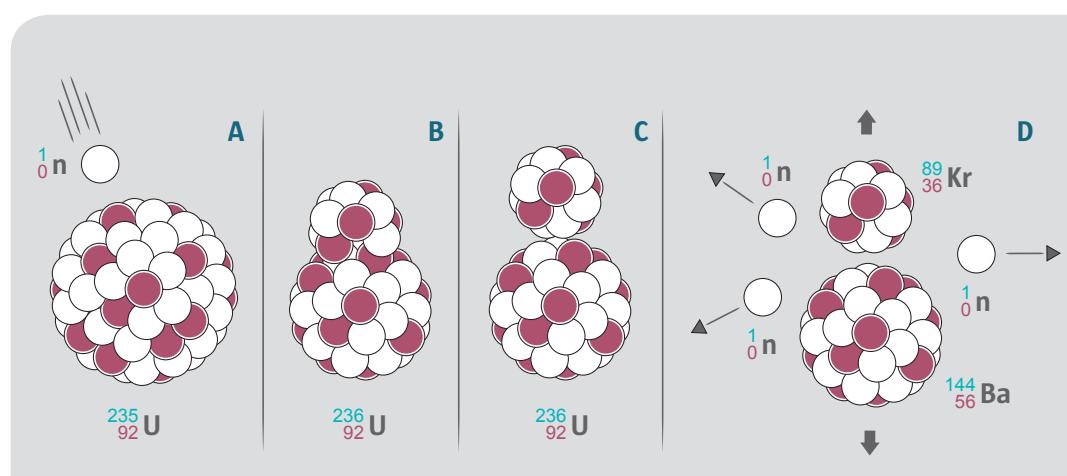
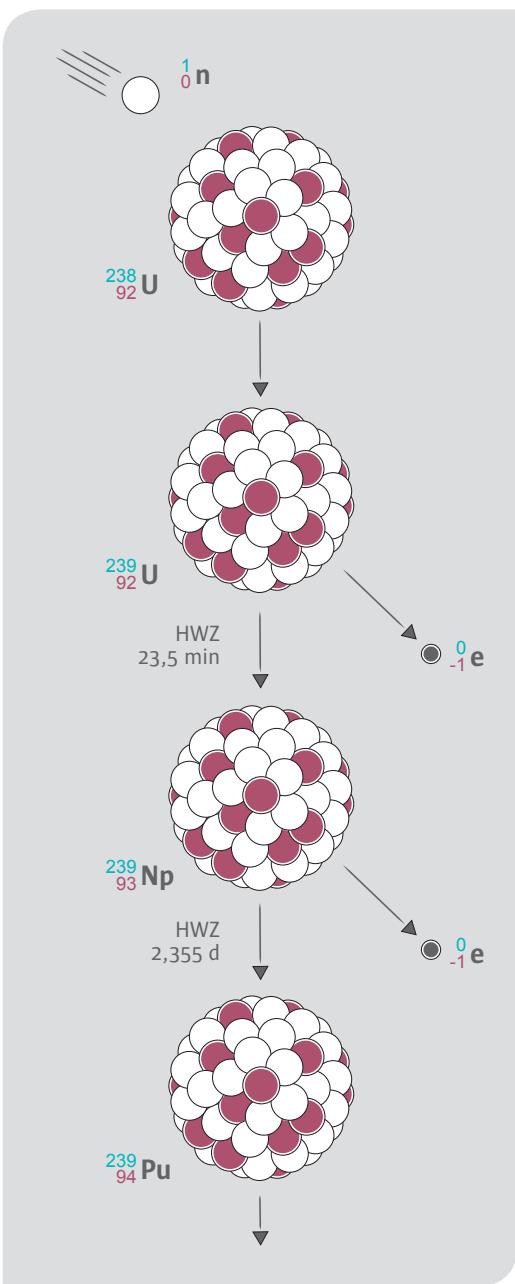


Abb. 9.09

Vier-Phasen-Modell zur Kernspaltung



- Die bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukte sind aufgrund ihres Neutronenüberschusses meist radioaktiv. Man kennt heute über 300 verschiedene Spaltprodukte des Uran-235, die sich auf 54 verschiedene Elemente verteilen, von Titan bis zu Ytterbium; hinzu kommen noch die Elemente Wasserstoff bis Kohlenstoff, die bei der ternären Spaltung (Spaltung des Urans in drei Spaltprodukte) entstehen. Hier einige Beispiele:



Die Massenzahlen der Spaltproduktkerne liegen etwa zwischen 70 und 160. Ein Maximum liegt bei der Massenzahl 95, ein zweites Maximum bei der Massenzahl 135. Die Massenzahlen liegen am häufigsten im Verhältnis 2 zu 3 zueinander.

Die Spaltprodukte wandeln sich unter Aussenden von Betastrahlen in stabile Kerne um. Dabei werden zum Teil Zerfallsreihen durchlaufen (Abb. 9.12 und Abb. 9.13). Es ist aber auch Neutronenemission möglich. Radioaktive Isotope eines bestimmten Elements (z. B. Iod) können direkt bei der Kernspaltung oder beim

Abb. 9.10
Entstehung von Pu-239 aus U-238

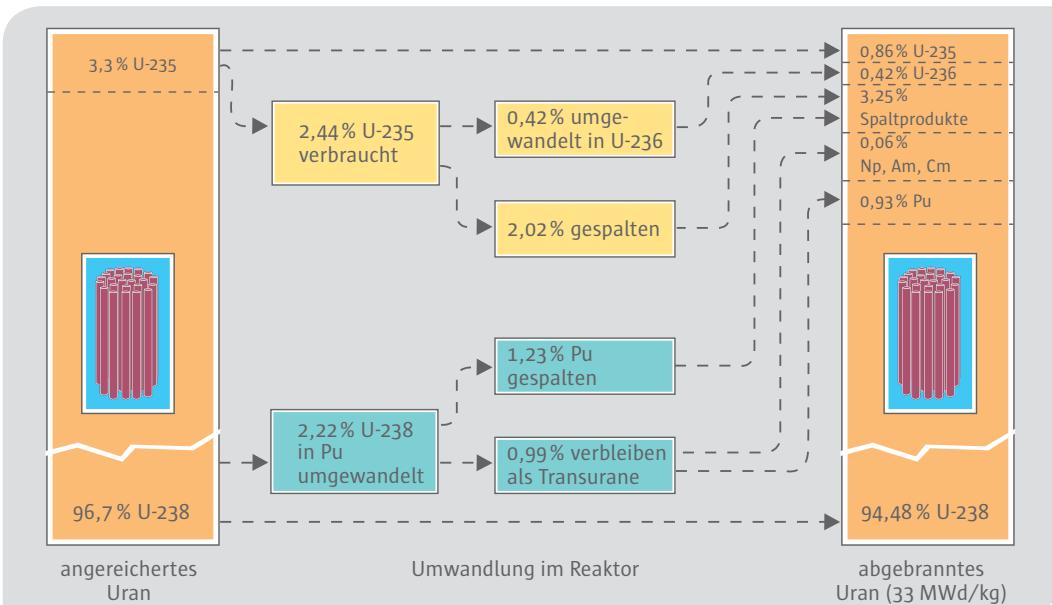


Abb. 9.11
Beispiel für die Radionuklidverteilung im Kernbrennstoff

nachträglichen Zerfall eines Spaltproduktes entstehen.

- Eine weitere Quelle bilden die Aktivierungsprodukte. Inaktive Nuklide können sich durch Aufnahme eines Neutrons in Radionuklide umwandeln. Zwei Beispiele:

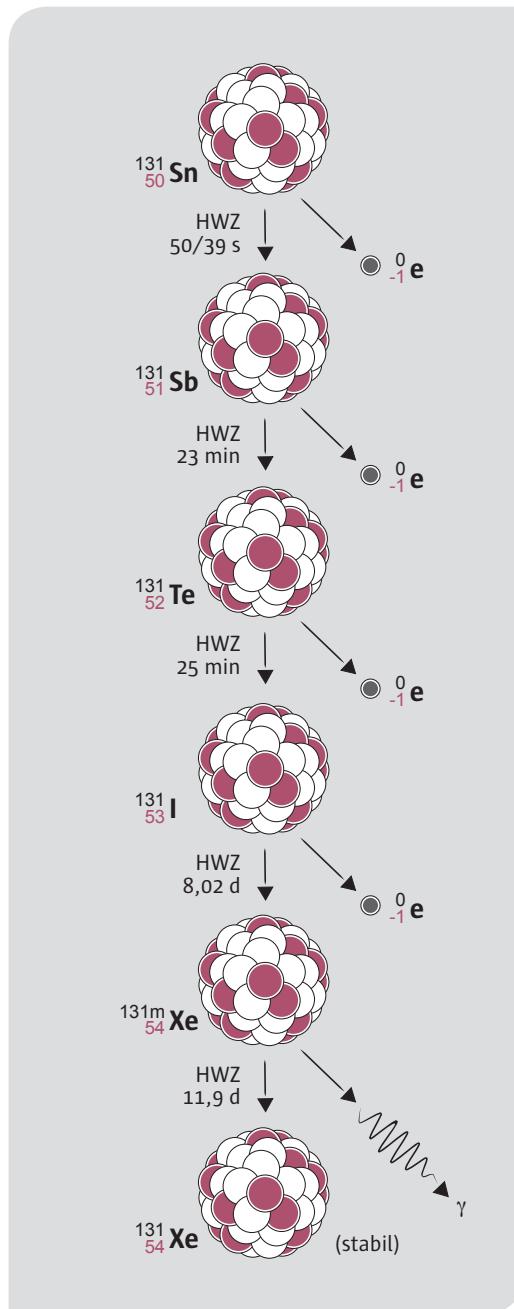
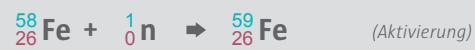
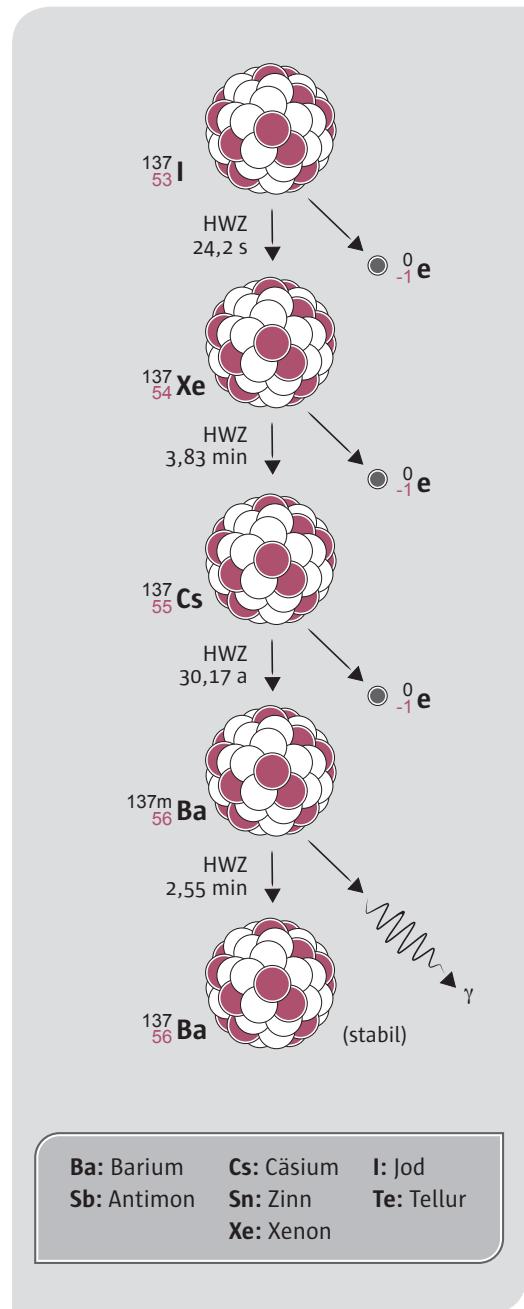


Abb. 9.13
Radioaktiver Zerfall des I-131

Materialien im Bereich der Neutronenstrahlung, wie z. B. Beton, Stahl und seine Legierungsbestandteile, Korrosionsprodukte oder die Luft, können auf diese Weise radioaktiv werden.

- Ein geringer und gegenüber den genannten Aktivitätsquellen vernachlässigbarer Beitrag röhrt von der Tatsache her, dass als Kernbrennstoff eingesetztes Uran selbst radioaktiv ist. Allerdings ist seine spezifische Aktivität gering.

Durch die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser beim Betrieb von Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen dürfen auch unter Berücksichtigung sehr restriktiver Berechnungsannahmen für jeden dieser Ableitungspfade an der ungünstigsten



Stelle in der Umgebung die Grenzwerte für die effektive Dosis von 0,3 mSv im Kalenderjahr nicht überschritten werden. Die aufgrund der Ableitung berechneten Dosiswerte sind deutlich niedriger.

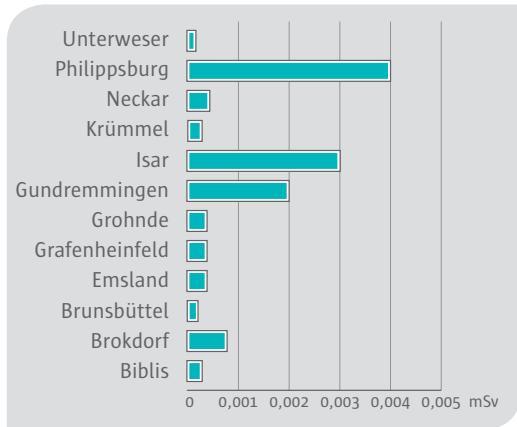


Abb. 9.14 zeigt die Dosisbeiträge durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Luft. Die Dosis durch die Ableitungen mit dem Abwasser beträgt weniger als ein Zehntel dieser Werte.

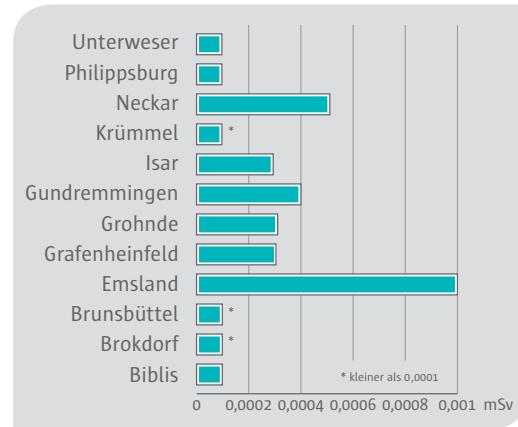


Abb. 9.14 (links)

Effektive Folgedosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle außerhalb von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft im Jahr 2010

Abb. 9.15

Effektive Folgedosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle außerhalb von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser im Jahr 2010 (*kleiner als 0,0001)

Vergleich von natürlicher und künstlicher Strahleneinwirkung

9.7

Natürliche und künstlich erzeugte Radionuklide senden gleichermaßen Alpha-, Beta- oder Gammastrahlen aus. Die Energie der ausgesandten Teilchen und Quanten ist vergleichbar.

Die biologischen Wirkungen ionisierender Strahlen beruhen auf Wechselwirkungen der Strahlungsteilchen oder Energiequanten mit den Molekülen der lebenden Zellen. Dabei ist allein entscheidend, welche physikalischen Primäreffekte hervorgerufen werden – gleichgültig, ob das ionisierende Teilchen von einem natürlichen oder

künstlich erzeugten Radionuklid ausgeschleudert wurde.

Die unterschiedliche biologische Wirksamkeit der verschiedenen Strahlenarten ist bekannt. Für den Strahlenschutz wurde deshalb das Sievert (Sv) als Maßeinheit für die Strahlendosis entwickelt, die diese Faktoren berücksichtigt. Die deutsche Strahlenschutzkommission hat dazu festgestellt: Diese Dosiseinheit ist für den Strahlenschutz ein zuverlässiges, hinreichend genaues Vergleichsmittel für unterschiedliche – natürliche oder künstliche – Strahlenexpositionen.

Zusammenfassung der Strahlenexposition

9.8

Die gesamte mittlere effektive Jahresdosis durch die natürliche Strahlenexposition beträgt in Deutschland 2,1 mSv. Die zivilisatorische Strahlenexposition von rund 1,9 mSv wird fast ausschließlich durch die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin bewirkt.

Die effektive Jahressdosis aus allen natürlichen und künstlichen Strahlenquellen beträgt für einen Einwohner in Deutschland im Mittel rund 4 mSv (siehe Abb. 9.16 und Tab. 9.07). Diese Dosis stammt etwa jeweils zur Hälfte aus der natürlichen und medizinischen Strahlenexposition. Gegenüber den Beiträgen durch Natur und Medizin und insbesondere unter Berücksichtigung der nicht unerheblichen Streuung dieser Dosiswerte sind alle anderen Dosisbeiträge faktisch zu vernachlässigen.

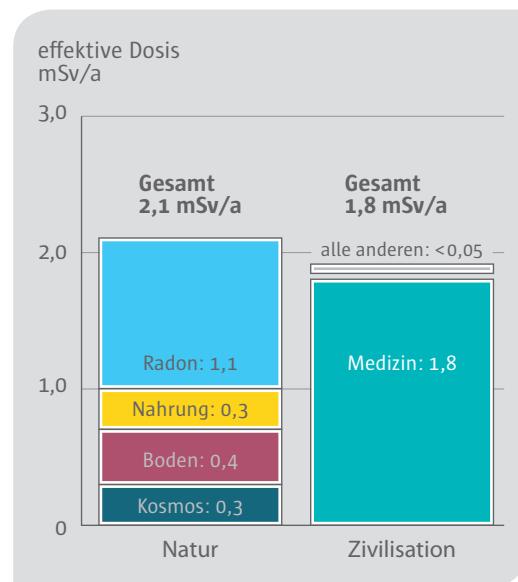


Abb. 9.16

Mittlere natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition in Deutschland

Ursache der Strahlendosis	effektive Jahresdosis in mSv		
	typischer Wert für die Bevölkerung	Wertebereich für exponierte Einzelpersonen	
Natur	kosmische Strahlung	0,3	0,3 bis 0,5
	terrestrische Strahlung	0,4	0,2 bis 3
	innere Bestrahlung	1,4	0,5 bis 8
Natur gesamt	2,1	1 bis 10	
Zivilisation	Medizin (Daten für 2009)	1,8	0,01 bis über 30
	Flugreisen	0,01	0,01 bis 3
	Tschernobyl-Unfall	0,005	0,005 bis 0,02
	Kernwaffentests	0,005	0,002 bis 0,01
	Industrieprodukte	0,001	< 0,001 bis 0,01
	fossile Energieträger	0,001	< 0,001 bis 0,01
	Kernkraftwerke	0,001	< 0,001 bis 0,01
	Beruf	0,35*	0,1 bis 20
Zivilisation gesamt	1,8	0,01 bis über 30	
gesamt	3,9		

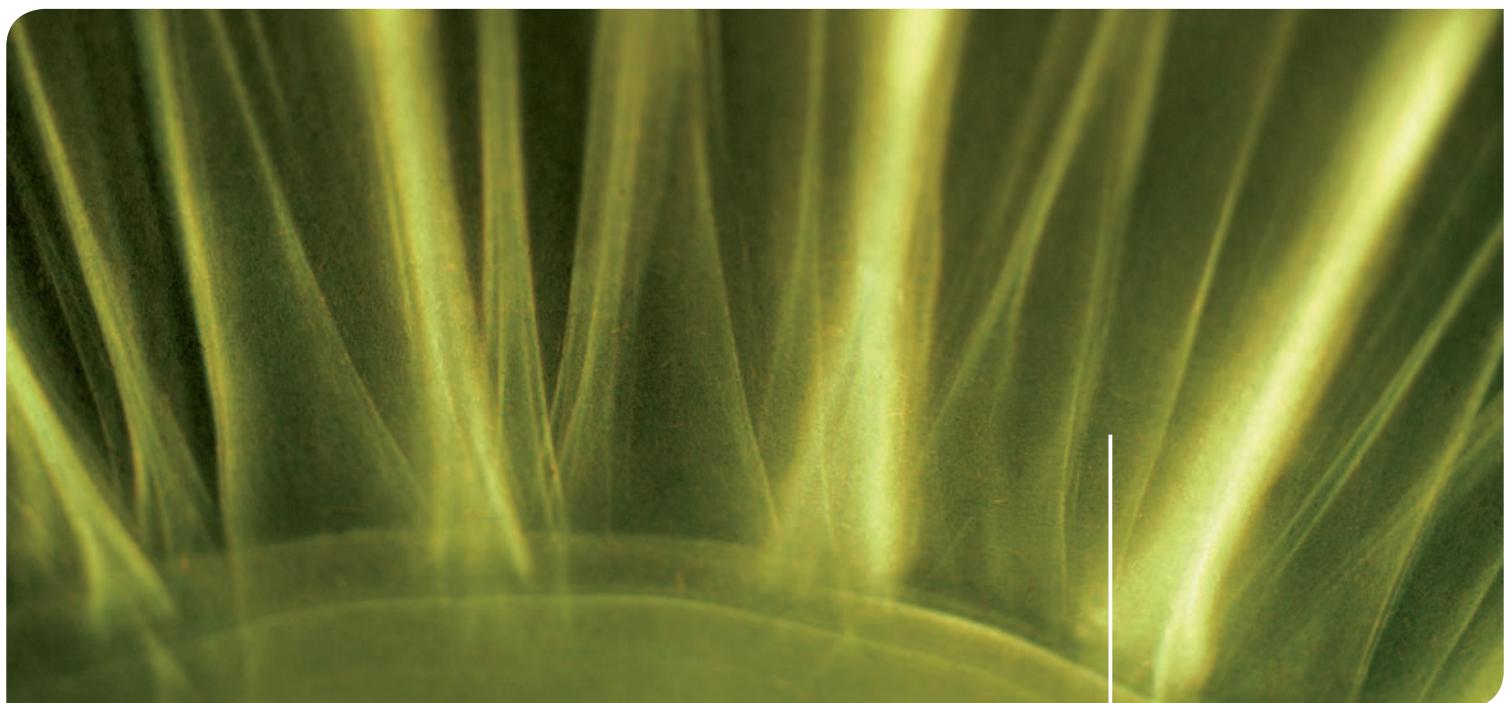
Tab. 9.07

Strahlenexposition der Bevölkerung
in Deutschland, 2010

*Nur bezogen auf die beruflich
exponierten Personen

Strahlenschutzmaßnahmen gegen äußere Strahleneinwirkung

10



Wenn sich eine Strahlenquelle außerhalb des menschlichen Körpers befindet, kann eine Strahleineinwirkung nur von außen stattfinden. Es stehen dann vier Schutzmaßnahmen zur Verfügung:

- Verringerung der Stärke der Strahlenquelle,
- zeitliche Begrenzung der Strahleineinwirkung,
- Einhalten eines Sicherheitsabstandes,
- Abschirmung der Strahlung.

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

10.1 Verringerung der Quellstärke

Die ionisierende Strahlung kann biologische Effekte hervorrufen und zu Strahlenschäden führen. Eine erste Strahlenschutzmaßnahme besteht deshalb darin, die Anzahl der Strahlungsteilchen oder Energiequanten zu reduzieren, die pro Zeit auf eine bestimmte Fläche treffen oder ein bestimmtes Körpervolumen durchsetzen. Es wird deshalb eine möglichst geringe Quellstärke gewählt.

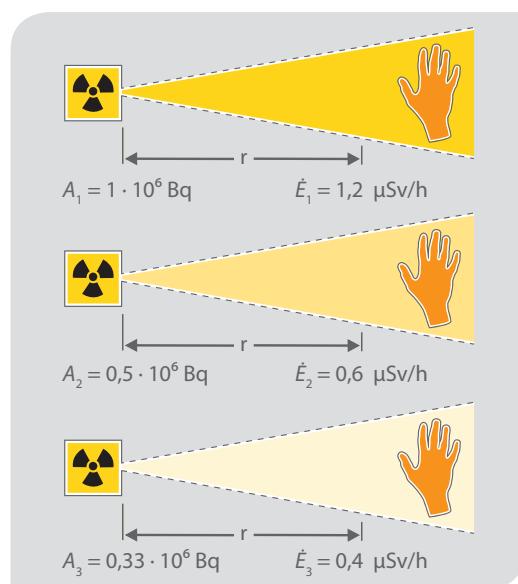


Abb. 10.01

Die Dosisleistung ist von der Aktivität der Strahlenquelle abhängig

Beispiel 2:

Bei der Anwendung von Röntgenstrahlen in der medizinischen Diagnostik werden heute weitgehend elektronische Bildverstärker eingesetzt (Abb. 10.02). Zur Erzeugung eines optimalen Bildes kommt man dann mit einer geringeren Strahlungsintensität aus. Sie wird dadurch herbeigeführt, dass man in der Röntgenröhre eine geringere Heizstromstärke einstellt. Die Verringerung der Quellstärke führt dann dazu, dass der Patient eine geringere Strahlendosis erhält.

Beispiel 3:

In manchen älteren Kernkraftwerken wurden für verschleißbeanspruchte Bauteile (Pumpen, Schieber, Ventile) Metalllegierungen mit einem hohen Anteil an Kobalt verwendet. Durch Korrosion und Verschleiß abgetragenes Kobalt gelangt dann mit dem Kühlmittel des Primärkreislaufs in den Reaktor, wo es einer intensiven



Beispiel 1:

In Forschung, und Technik werden Radionuklide als Strahlenquellen eingesetzt. Dabei gilt: je höher die Aktivität der Quelle ist, desto größer ist auch unter sonst gleichen Bedingungen die Dosisleistung für eine damit arbeitende Person (Abb. 10.01). Zur Verringerung der Dosisleistung werden deshalb möglichst geringe Aktivitäten eingesetzt. Das kann aber dazu führen, dass man die Messzeit entsprechend verlängern muss. Für den Experimentator kann sich dadurch letztlich doch wieder eine erhöhte Strahlendosis ergeben. Es ist deshalb in jedem Einzelfall zu entscheiden, welche Aktivität der Strahlenquelle und welche Messzeit am günstigsten sind.

Abb. 10.02

Röntgengerät mit Bildverstärker

Neutronenstrahlung ausgesetzt ist. Das in der Natur vorkommende Kobalt besteht zu 100 % aus Co-59. Durch Aufnahme eines Neutrons entsteht Co-60:



Co-60 ist radioaktiv und wandelt sich mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 5,272$ a unter Aussen- den eines Beta⁻-Teilchens in Nickel-60 um, das nicht mehr radioaktiv ist:



Die beim Zerfall auftretenden Gammaquanten besitzen eine relativ hohe Energie und bilden deshalb eine sehr durchdringende Gammastrahlung. Da sich die Korrosions- und Verschleißprodukte in der gesamten Primärkreis- Anlage verteilen und z. T. ablagern, ergibt sich in diesen Bereichen ein hoher Gammastrahlen- pegel, der Wartungs- und Reparaturarbeiten erschwert. Durch besondere Reinigungsver- fahren ist es gelungen, diese Ablagerungen weitgehend zu entfernen und damit den Strah- lenpegel deutlich zu verringern. Ergänzend werden die Kobalt enthaltenen Komponenten gegen solche ohne Kobalt ausgetauscht.

Verringerung der Bestrahlungszeit 10.2

Die von einer Person empfangene Strahlendosis ist proportional zur Bestrahlungszeit. Eine Verdoppelung oder Verzehnfachung der Bestrahlungszeit führt auch zur zwei- bzw. zehnfachen Strahlendosis (Abb. 10.03). Eine wichtige Strahlenschutzmaßnahme liegt also in der Verrin- geringung der Bestrahlungszeit. Je stärker eine Strah- lenquelle ist, desto größer wird die Bedeutung dieser Schutzmaßnahme.

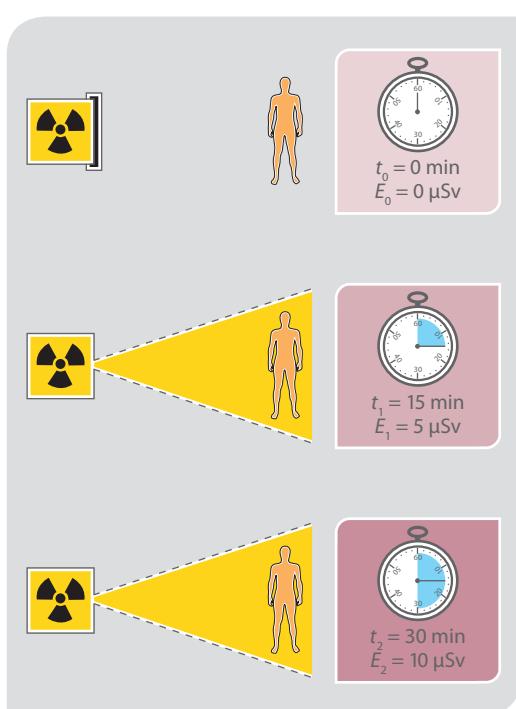
Arbeiten oder sogar automatisch arbeitende Geräte eingesetzt. Ist eine Kontrolle der aus- geführten Arbeit durch eine zweite Person notwendig, wartet der Kontrolleur während der Arbeit in größerer Entfernung oder hinter einer Abschirmung und sucht den Arbeitsplatz erst nach Durchführung der Arbeit auf.

Beispiel 2:

Bei der Röntgendiagnostik führt der Arzt die Beobachtungen möglichst nicht während der „Durchleuchtungen“ durch, sondern betrach- tet die aufgezeichneten Bilder anschließend. Es kann sich dabei um Filme oder elektro- nisch aufgezeichnete Bilder handeln. Durch diese Maßnahmen konnten die Dosiswerte für Patienten und Ärzte deutlich herabgesetzt werden.

Beispiel 3:

Bei nuklarmedizinischen Untersuchungen wählt man Radionuklide mit nicht zu langer physikalischer und biologischer Halbwertszeit. Früher wurde z. B. bei der Funktionsprüfung der Nieren u. a. I-131 eingesetzt. Heute verwendet man neben Tc-99m nur noch I-123. I-123 hat eine deutlich geringere Halbwertszeit, sendet keine Betateilchen aus und emittiert Gamma- quanten niedriger Energie (Tab. 10.01).



Beispiel 1:

Vor Arbeiten in der Nähe starker Strahlenquel- len trainiert man das Personal an einem Modell in der Werkstatt. Am Arbeitsplatz selbst kann die Arbeit dann in kurzer Zeit erledigt werden. Außerdem werden Hilfsgeräte für schnelles

Abb. 10.03

Die Strahlendosis ist von der Bestrahlungszeit abhängig

Radio- nuklid	Halb- wert- zeit	Zerfallsart	Energie der Gammaquanten in keV
I-131	8,02 d	Beta-Minus	364; 637; 284
I-123	13,2 h	Elektronen- einfang	159

Tab. 10.01

Angaben zu den Radionukliden I-131 und I-123

10.3 Einhaltung eines Sicherheitsabstandes

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

Es bedeutet:

- 2fache Entfernung: $1/4$ der ursprünglichen Strahlungsintensität
- 3fache Entfernung: $1/9$ der ursprünglichen Strahlungsintensität
- 4fache Entfernung: $1/16$ der ursprünglichen Strahlungsintensität usw.

Dass die Intensität der Strahlung mit der Entfernung von der Strahlenquelle abnimmt, ist darin begründet, dass die Flussdichte der von einer Quelle divergierend nach allen Seiten ausgesandten Teilchen oder Gammaquanten mit der Entfernung von der Quelle immer mehr abnimmt. Unter den angenommenen Bedingungen gilt dann: $I \sim 1/r^2$ (siehe Abb. 10.04). In der Praxis kann eine Strahlenquelle als punktartig angesehen werden,

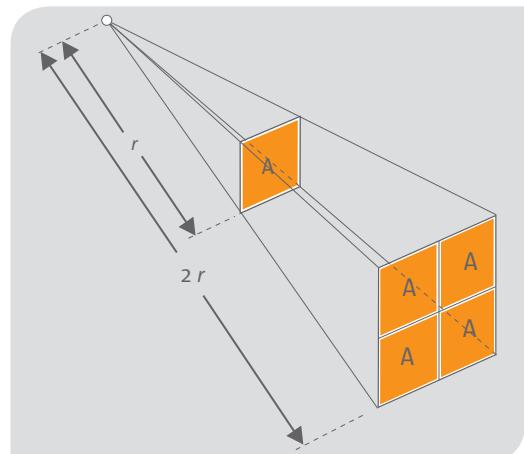


Abb. 10.05

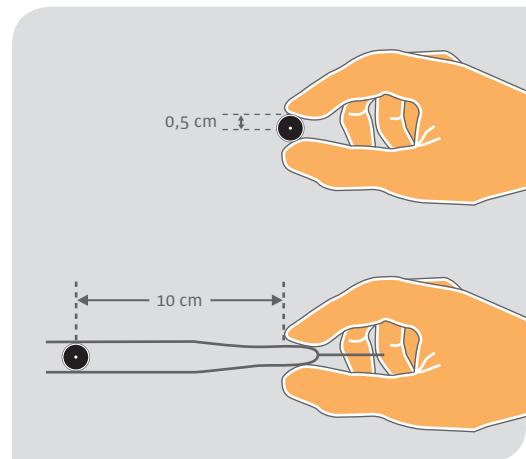
Verringern der Strahlenexposition durch Vergrößerung des Abstandes zur Strahlenquelle

Abb. 10.04

Die Intensität ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes

wenn der gewählte Abstand 5-mal so groß ist wie die Ausdehnung der Quelle. Bei flächenförmigen Quellen nimmt die Intensität wesentlich geringer, in besonderen Fällen linear mit der Entfernung ab ($I \sim 1/r$).

Wird zum Beispiel eine geringe Menge radioaktiver Substanz, die in einer Kugel mit einem Radius von $r = 0,5$ cm eingeschlossen ist, mit den Fingern angefasst, so ist die Haut des Fingers 0,5 cm vom Mittelpunkt der Kugel entfernt. Packt man die Kugel dagegen mit einer Pinzette, so ist die Hand etwa 10 cm vom Kugelmittelpunkt entfernt. Durch die 20fache Entfernung beträgt die Strahlungsintensität $(1/20)^2 = 1/400$ des ursprünglichen Wertes (Abb. 10.05). In kerntechnischen Anlagen und Laboratorien werden deshalb Werkzeuge mit längeren Griffen als sonst üblich verwendet. Bei 1 m langen Griffen lässt sich die Dosisleistung um den Faktor 10^4 verringern.



In der Praxis ist zusätzlich zu bedenken, dass die Strahlung durch die im Raum vorhandene Luft ganz oder teilweise absorbiert wird. Außerdem können Strahlungsteilchen und Gammaquanten an Körpern gestreut werden. In besonderen Fällen ist es dann möglich, dass die Intensität der Strahlung an bestimmten Stellen höher ist, als es nach dem Abstandsgesetz zu erwarten wäre.

10.4 Abschirmung der Strahlung

Bei der Abschirmung ionisierender Strahlen finden Wechselwirkungen der Strahlungsteilchen und Energiequanten mit dem Abschirmmaterial statt. Dabei können Energie und Bewegungsrichtung der Teilchen und Quanten geändert werden, andere Strahlungsteilchen oder Quanten entstehen oder die Strahlung völlig verschwinden.

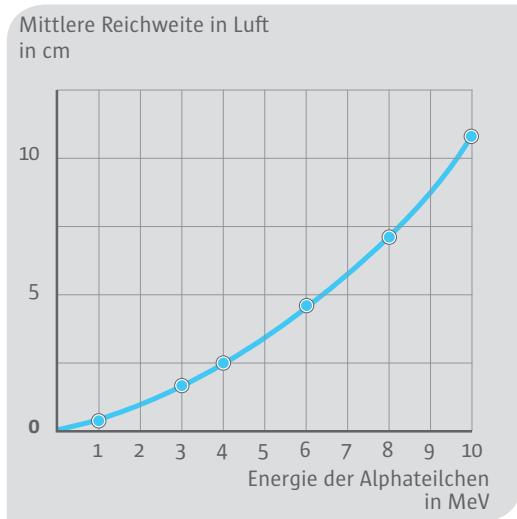
10.4.1 Abschirmung von Alphastrahlen

Alphateilchen geben ihre Energie im Wesentlichen dadurch ab, dass sie Atome oder Moleküle der durchstrahlten Materie ionisieren oder anregen. Da die Ionen in sehr großer Dichte erzeugt werden, verlieren Alphateilchen ihre Energie auf sehr kurzer Strecke. In Luft beträgt die Reichweite deshalb nur wenige Zentimeter, im Gewebe

weniger als 0,1 mm (Tab. 10.02). Im Prinzip lassen sich Alphastrahlen also bereits durch ein Blatt Papier vollständig abschirmen.

Teilchen-energie in MeV	Reichweite in		
	Luft (1.013 hPa)	Muskel-gewebe	Alumi-nium
1	0,3 cm	4 µm	2 µm
3	1,6 cm	16 µm	11 µm
4	2,5 cm	31 µm	16 µm
6	4,6 cm	56 µm	30 µm
8	7,4 cm	91 µm	48 µm
10	10,6 cm	130 µm	67 µm

Die geringe Reichweite von Alphateilchen in Luft (Abb. 10.06) bewirkt, dass in etwa 10 cm Entfernung von der Strahlenquelle keine Bestrahlung des Menschen durch Alphateilchen auftreten kann. Treffen Alphateilchen auf unbekleidete Körperteile des Menschen, werden sie bereits durch die oberen Hautschichten vollständig abgeschirmt.



In der Messtechnik muss die geringe Reichweite von Alphateilchen in Luft berücksichtigt werden. Außerdem können bei Strahlungsdetektoren, mit denen Alphastrahlen registriert werden sollen, nur extrem dünne Strahleneintrittsfenster verwendet werden.

10.4.2 Abschirmung von Betastrahlen

Treffen Betateilchen auf Materie, verlieren sie ihre Energie durch Ionisationen, Anregung, Streuung und Erzeugung von Bremsstrahlung. Ionisation und Erzeugung von Bremsstrahlung sind die wichtigsten Wechselwirkungsprozesse. Die Betateilchen treten im Wesentlichen mit den Hüllenelektronen der Atome in Wechselwirkung. Daraus folgt, dass sie ihre Energie auf umso kürzeren Strecken verlieren, je größer Dichte und Ordnungszahl des Abschirmmaterials sind.

In der Praxis werden zur Abschirmung von Betastrahlen jedoch keine Materialien höherer Ordnungszahl verwendet, weil die Energie der auftretenden Bremsstrahlung mit der Ordnungszahl wächst. Die „härtere“ Bremsstrahlung müsste dann ihrerseits durch zusätzliche Materialschichten abgeschirmt werden.

Zur optimalen Abschirmung von Betastrahlen wird eine Kombination zweier verschiedener Materialien verwendet (Abb. 10.07). Der Strahlenquelle zugewandt ist ein Absorbermaterial niedriger Ordnungszahl, wobei die Materialdicke etwas größer gewählt wird als die Reichweite der Betastrahlen in diesem Material. Dadurch wird die Betastrahlung vollständig absorbiert, und es entsteht nur wenig Bremsstrahlung geringerer Energie. Ein zusätzliches Material hoher Ordnungszahl (z. B. Blei) schwächt dann die Bremsstrahlung. Es kann bei Strahlenquellen geringerer Stärke entfallen.

Tab. 10.02

Reichweite von Alphateilchen verschiedener Energie in Luft, Muskelgewebe und Aluminium

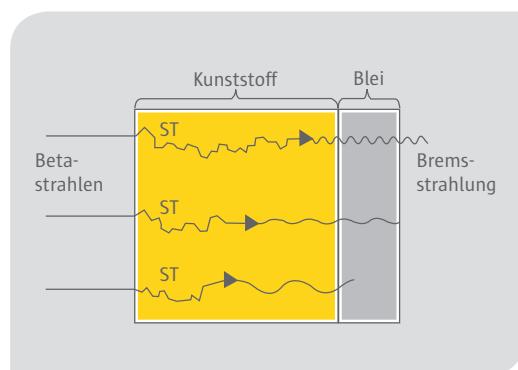


Abb. 10.07

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

Die maximale Energie von Betateilchen, die die meisten Radionuklide aussenden, ist nicht größer als 1 bis 2 MeV. Zur vollständigen Abschirmung sind also 4 mm Aluminium ausreichend (Tab. 10.03). Neben Aluminium werden auch Kunststoffe zur Abschirmung von Betastrahlen eingesetzt.

Betateilchen, die von außen auf den menschlichen Körper treffen, dringen nur wenige Millimeter ein. Es können also nur die obersten Gewebeschichten bestrahlt werden.

Teilchen-energie in MeV	Reichweite in		
	Luft (1.013 hPa)	Körper-gewebe	Alumi-nium
0,01	0,003 m	0,0025 mm	0,009 mm
0,1	0,10 m	0,16 mm	0,050 mm
0,5	1,2 m	1,87 mm	0,60 mm
1	3,1 m	4,75 mm	1,52 mm
2	7,1 m	11,1 mm	4,08 mm
5	19 m	27,8 mm	9,9 mm
10	39 m	60,8 mm	19,2 mm
20	78 m	123 mm	39,0 mm

Tab. 10.03

Reichweite von Betateilchen verschiedener Energie in Luft, Körpergewebe und Aluminium

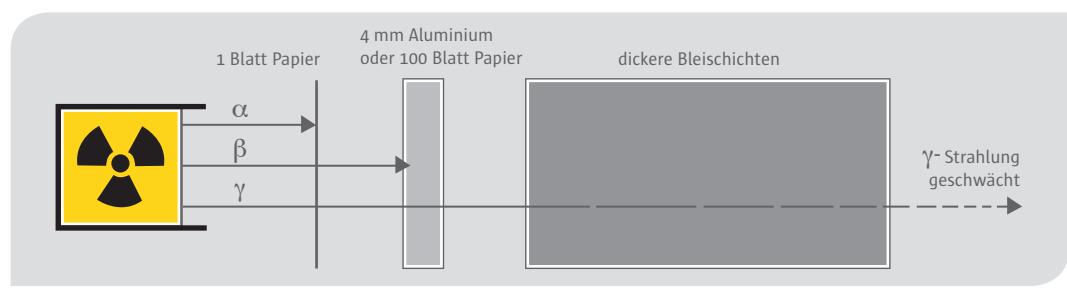


Abb. 10.08

Unterschiedliche Absorption von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung

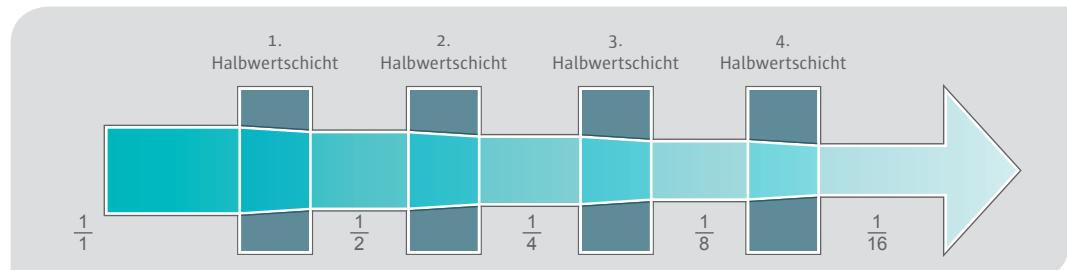


Abb. 10.09

Durch jede Halbwertschicht wird die Strahlungsintensität um den Faktor 2 geschwächt (schematische Darstellung, Streuung nicht berücksichtigt)

10.4.3 Abschirmung von Gammastrahlen

Durchdringt Gammastrahlung Materie, wird sie durch eine Reihe von Wechselwirkungsprozessen, die mit den Hüllenelektronen oder den Atomkernen stattfinden, geschwächt. Diese Prozesse sind als reine Treffervorgänge aufzufassen, also Zufallsereignisse. Es lässt sich deshalb immer nur ein bestimmter Anteil der Strahlung abschirmen, nicht aber die gesamte Strahlung (Abb. 10.08). Einzelne Gammaquanten können beliebig dicke Materieschichten durchdringen, wobei die Wahrscheinlichkeit dafür mit wachsender Schichtdicke immer geringer wird. Die Abschirmung der Gammastrahlung ist somit schwieriger als die der Alpha- oder Betastrahlung.

Für Gammastrahlung lässt sich keine maximale Reichweite angeben. Durch Absorbermaterialien erreicht man lediglich eine Schwächung der Strahlungsintensität auf einen bestimmten Bruchteil. Dabei hängt das Maß der Schwächung von der Energie der Strahlung und dem verwendeten Abschirmmaterial ab. Höhere Energie der Gammaquanten bedeutet ein größeres Durchdringungsvermögen, und eine höhere Ordnungszahl des Wechselwirkungsmaterials führt zu einer größeren Abschirmwirkung.

Die Energien der Gammaquanten, die von natürlichen und künstlichen Radionukliden bzw. bei Wechselwirkungsprozessen emittiert werden, liegen im Bereich von 0,003 MeV bis etwa 7 MeV. Abhängig von der Energie treten bei der Absorption drei Wechselwirkungsprozesse auf: Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildungseffekt. Diese drei Effekte überlagern sich im Wechselwirkungsmaterial, wobei in einzelnen Energiebereichen einer der Prozesse überwiegt (siehe Kapitel 4.4).

Zur Abschätzung der Materialdicken, die für die Strahlenabschirmung benötigt werden, hat man für die Strahlenschutzpraxis die Halbwertschicht und die Zehntelwertschicht definiert. Durch diese

Schichten wird die Intensität der Strahlung auf die Hälfte bzw. ein Zehntel reduziert.

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

Durch eine Halbwertschicht wird die Strahlungsintensität auf $(1/2)^1 = 1/2$, durch zwei Schichten auf $(1/2)^2 = 1/4$ und durch drei Schichten auf $(1/2)^3 = 1/8$ herabgesetzt. Bei 10 Halbwertschichten beträgt die Schwächung dann $(1/2)^{10} = 1/1024 \approx 0,1\%$ (Abb. 10.09).

Aus der Tab. 10.04 ist zu erkennen, dass die Dicke der Halbwertschicht bei wachsender Energie zunimmt, bei einer weiteren Energieerhöhung aber wieder abnimmt. Dies röhrt daher, dass die Gammastrahlung jetzt nicht nur durch den Photo- und den Comptoneffekt, sondern auch durch den Paarbildungseffekt Energie verliert. Durch Paarbildung werden aber Elektronen und Positronen und bei der Zerstrahlung der Positronen (Kapitel 4.4.3) niedriger energetische Gammastrahlung erzeugt, die ein geringeres Durchdringungsvermögen besitzt und für deren Abschirmung geringere Materialdicken und somit auch geringere Halbwertschichten erforderlich sind.

Für den Schutz vor Gammastrahlung ist Blei ein geeignetes Abschirmmaterial. In besonderen Fällen werden wegen der höheren Dichte Wolfram oder abgereichertes Uran verwendet, da sie bei gleicher Materialdicke zu einer noch stärkeren Schwächung der Strahlung führen. Da aber ihre Bereitstellung hohe Kosten verursacht, spielen sie in der Strahlenschutzpraxis keine bedeutsame

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

Tab. 10.04

Halbwert- und Zehntelwertschicht für Gammaquanten unterschiedlicher Energie



Rolle. Steht für den Strahlenschutz genügend Raum zur Verfügung, können auch andere, billigere Materialien verwendet werden, z. B. Eisen, Beton oder auch Wasser. Es ist dann eine dem Blei äquivalente, dickere Materialschicht zu wählen.

10.4.4 Abschirmung von Neutronenstrahlen

Die Absorption von Neutronen und damit die Abschirmung ist optimal bei geringen Neutronenergien möglich. In einem ersten Schritt muss deshalb ihre Energie (Geschwindigkeit) herabgesetzt werden. Dazu eignen sich am besten wasserstoffhaltige Materialien (z. B. Polyäthylen, Paraffin, Wasser), da die Masse von Neutron und Wasserstoffkern (Proton) praktisch gleich groß ist und bei Stößen besonders hohe Energiebeträge übertragen werden können (Tab. 10.05).

In einem zweiten Schritt werden die thermischen Neutronen eingefangen. Dafür eignen sich z. B. Bor oder Cadmium. Eine 6,5 mm dicke Boral-Schicht (Aluminium + B_4C -Zusatz) schwächt den Fluss thermischer Neutronen um den Faktor 10^{10} :



Beim Einfang der Neutronen durch Bor oder Cadmium wird eine Sekundärstrahlung ausgesandt. Zur Abschirmung dieser Sekundärstrahlung müssen Materialien großer Ordnungszahl eingesetzt werden, damit die Gammastrahlung sicher absorbiert wird. Ein klassischer Neutronenschild besteht also aus drei Schichten (Abb. 10.10).

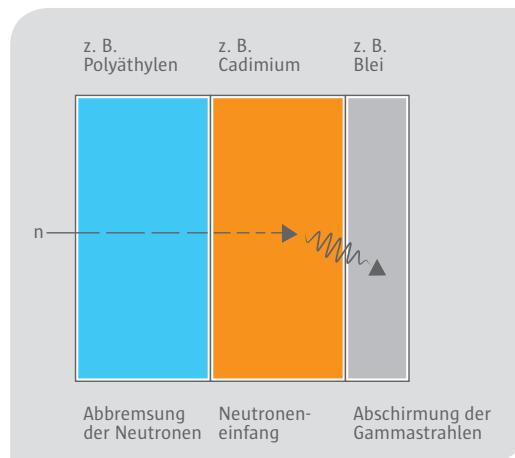


Abb. 10.10

Grundsätzlicher Aufbau eines Neutronenschildes

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

Die Tab. 10.06 enthält Daten über die Halbwert- und Zehntelwertschichten für Neutronen.

Stoff	Anzahl der Stöße zur Abbremsung von 2 MeV auf 0,025 eV
Wasserstoff	18
Wasser	19
Deuterium	25
Schweres Wasser	35
Helium	43
Beryllium	86
Kohlenstoff	114
Sauerstoff	150
Uran	2.172

Tab. 10.05 (links)

Mittlere Anzahl der Stöße bei der Abbremsung schneller Neutronen

Abschirmmaterial	Halbwertschicht in cm	Zehntelwertschicht in cm
Polyäthylen	6,3	21
Wasser	7	23
Normalbeton	7,5	25

Tab. 10.06

Effektive Halbwert- und Zehntelwertschicht für Neutronen, schmales Strahlenbündel (Neutronenerzeugung durch Uranspaltungen)

In einem Kernkraftwerk treten Alpha-, Beta-, Gamma- und Neutronenstrahlen auf. Diese Direktstrahlung wird durch eine Reihe von Barrieren praktisch vollständig abgeschirmt (Abb. 10.11).

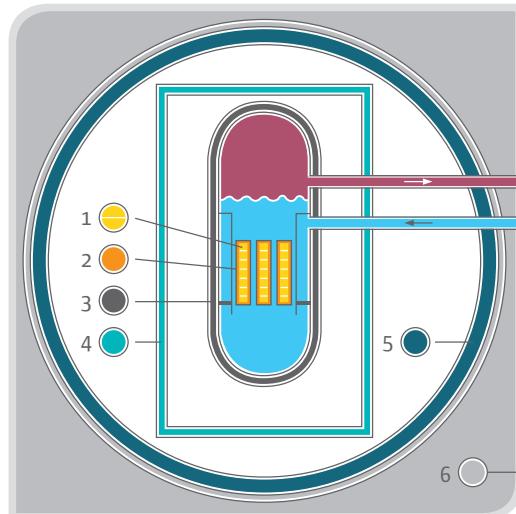


Abb. 10.11

Abschirmung der Direktstrahlung durch mehrere Barrieren

- 1 ⚡ Brennstoff-Kristallgitter
- 2 🔥 Brennstabhülle
- 3 🏢 Reaktordruckbehälter
- 4 💧 Biologischer Schild
- 5 🛡️ Sicherheitsbehälter
- 6 🏠 Reaktorgebäude

Alpha- und Betateilchen werden durch die Metallwand der Brennstäbe und das sie umgebende Wasser zu 100 % zurückgehalten. Die Gamma- und Neutronenstrahlen können den Reaktordruckbehälter aus Stahl z. T. durchdringen; dabei werden sie jedoch deutlich geschwächt. Die bis zu 25 cm starke Stahlwand des Druckbehälters verringert die Intensität der direkten Gammastrahlung bereits auf den 100.000sten Teil der Strahlung im Reaktorkern. Eine nahezu vollständige Abschirmung der verbleibenden Gammastrahlen und der Neutronenstrahlen geschieht durch einen 2 m

dicken Schild aus Stahlbeton, der den Reaktorbehälter umgibt. Die Direktstrahlung ist dann auf 1 billionstel (10^{-12}) reduziert. Sicherheitsbehälter und Reaktorgebäude bilden weitere Abschirmungen, sodass außerhalb des Kernkraftwerks praktisch keine Direktstrahlung mehr auftritt.

Außer dem Reaktor werden auch alle anderen Bereiche eines Kernkraftwerks abgeschirmt, von denen eine erhöhte Strahlung ausgeht. So gelangen z. B. bei einem Siedewasserreaktor mit dem Dampf auch Radionuklide (z. B. N-16) in die Dampfturbine, sodass von ihr Strahlen ausgehen. Zur Abschirmung dieser Direktstrahlung wird die Turbine eines Siedewasserreaktors deshalb mit Betonwänden umgeben.

Zur mobilen Abschirmung werden Bleimatten an Gerüsten verwendet. Dadurch kann jeder Arbeitsplatz den Anforderungen entsprechend abgeschirmt werden (Abb. 10.12).

Abgebrannte Brennelemente werden in einem Wasserbecken mit einer Stahlwanne und dicken Betonwänden innerhalb des Sicherheitsbehälters des Kernkraftwerks gelagert. Das Becken ist etwa 12 m tief, sodass in der Regel die Brennelemente mit einer 9 m hohen Wasserschicht bedeckt sind. Das Wasser dient gleichzeitig zur Strahlenabschirmung und zur Ableitung der Nachzerfallswärme der Brennelemente (Abb. 10.13). Abstandshalter zwischen den Brennelementpositionen und Neutronenabsorber verhindern eine nukleare Kettenreaktion.



Abb. 10.12 (links)

Bleimatten zur mobilen Abschirmung

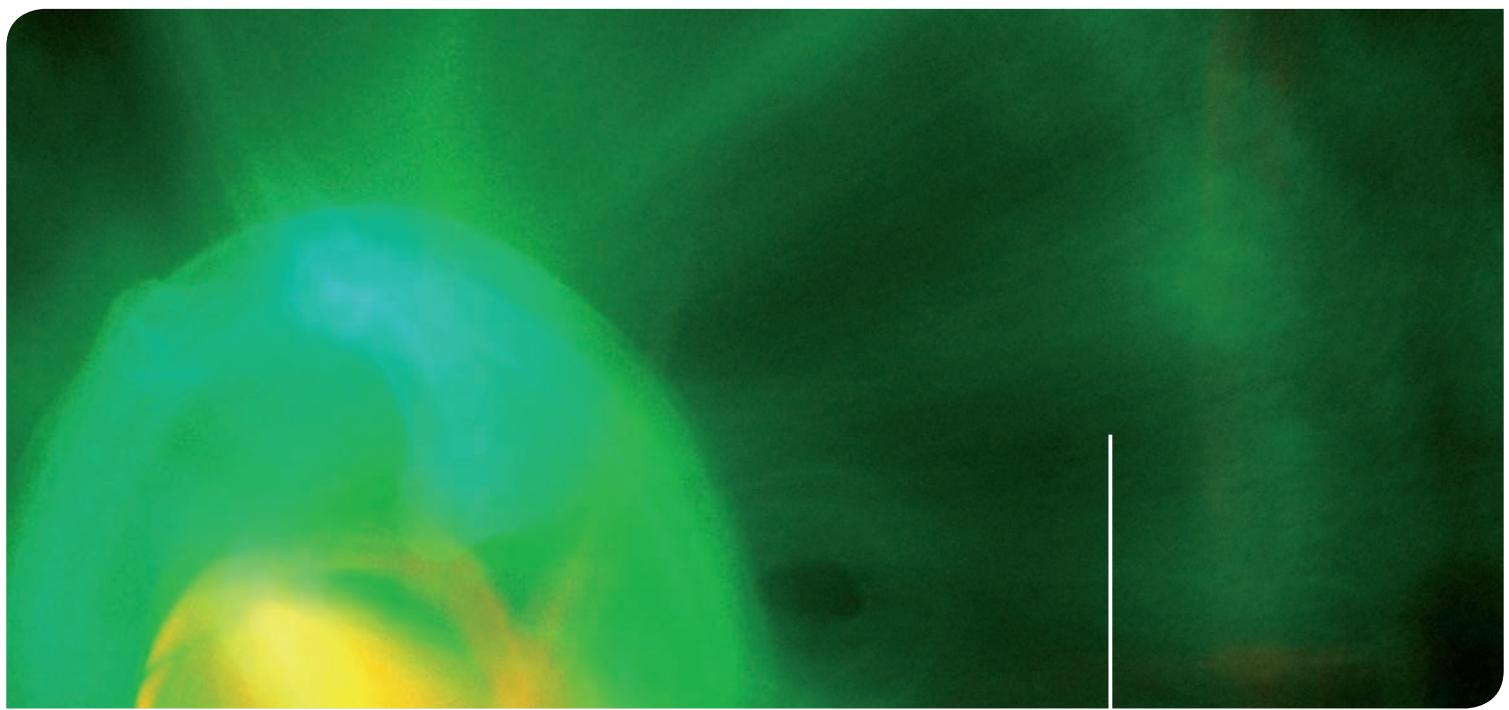


Abb. 10.13

Brennelementlagerbecken in einem Kernkraftwerk

Schutzmaßnahmen in einem Kernkraftwerk zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe

11



Radioaktive Stoffe können mit der Atemluft, dem Trinkwasser und der Nahrung in den menschlichen Körper gelangen und dann in seinem Innern Strahlen aussenden. Dabei gibt es gegenüber der äußeren Strahleneinwirkung drei Besonderheiten:

- Die äußere Strahleneinwirkung lässt sich in der Regel begrenzen, indem man sich nur kurze Zeit in der Nähe der Strahlenquelle aufhält, einen Sicherheitsabstand einhält und sich gegebenenfalls abschirmt. Befindet sich die Strahlenquelle aber im menschlichen Körper, können diese Schutzmaßnahmen nicht mehr angewandt werden. Man muss dann abwarten, bis das Radionuklid zerfallen oder vom Körper ausgeschieden worden ist. In vielen Fällen lässt sich die Ausscheidung mit Hilfe von Medikamenten beschleunigen.
- Radioaktive Stoffe, die vom menschlichen Körper resorbiert worden sind, werden meist nicht gleichmäßig verteilt, sondern in einem oder in mehreren Organen gespeichert. Dabei kann es zu einer höheren Belastung einzelner Organe kommen.
- Bei einer äußeren Strahleneinwirkung können Alphateilchen die menschliche Haut nicht durchdringen. Betaeilchen dringen nur wenige Millimeter in den menschlichen Körper ein. Die inneren Organe des Menschen werden also nicht erreicht. Anders liegen die

Verhältnisse, wenn sich radioaktive Stoffe in den Organen des Menschen befinden. Sie senden dann in ihnen selbst Alpha- und Betaeilchen aus. Gammastrahlen ausreichender Energie können bei äußerer und innerer Strahleneinwirkung praktisch alle Teile des Körpers erreichen (Abb. 11.1).

Im Folgenden werden am Beispiel des Kernkraftwerks einige besonders wichtige Einrichtungen vorgestellt, durch die Spaltprodukte und Aktivierungsprodukte in der Anlage selbst zurückgehalten werden, damit es nicht zu einer Kontamination bzw. Inkorporation kommt. Ähnliche Einrichtungen werden auch in den anderen kerntechnischen Anlagen eingesetzt.

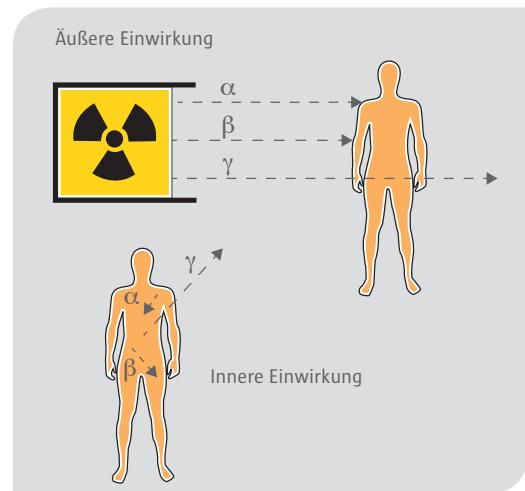


Abb. 11.01

Äußere und innere Einwirkung von Alpha-, Beta- und Gammastrahlen

11.1 Mehrfacheinschluss radioaktiver Stoffe

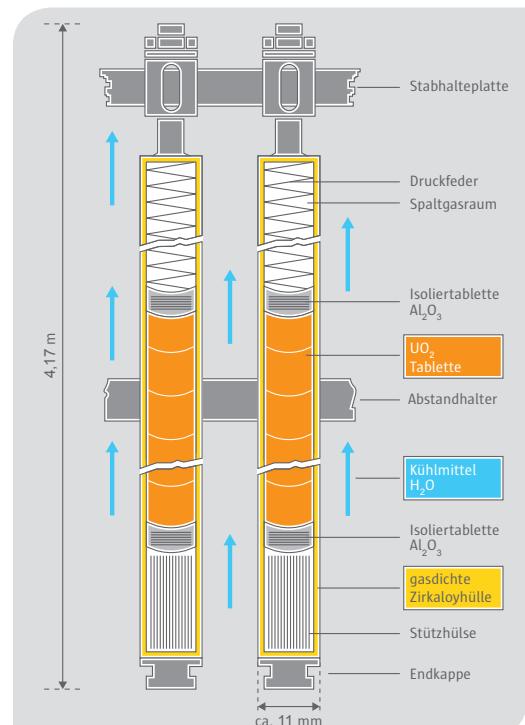
Damit die in einem Kernreaktor vorhandenen Radionuklide nicht ins Freie gelangen können, werden sie mehrfach eingeschlossen. Selbst wenn ein Einschluss undicht wird, bleiben die anderen wirksam. Die in Abb. 10.12 dargestellten Abschirmungen gegen Direktstrahlung sind z. T. gleichzeitig Barrieren gegen das unkontrollierte Austreten von Radionukliden.

Der Brennstoff, die meisten der Spaltprodukte sowie die Transurane bleiben weitgehend im Kristallgitter des Kernbrennstoffes eingeschlossen. Ein Teil der gasförmigen und leichtflüchtigen Spaltprodukte (z. B. Xenon, Krypton, Iod) sammeln sich im Spaltgasraum im oberen Teil des gasdichten Brennstabs (Abb. 11.02).

Den zweiten Einschluss bildet das Reaktordruckgefäß (Abb. 11.03) mit dem angeschlossenen Rohrsystem. Es ist ein dickwandiger Stahlbehälter mit einer Wandstärke von 17 bis 25 cm und einer Höhe von 10 bis 20 m. In seinem Innern befinden sich die Brennstäbe, die Regelstäbe und das Kühlmittel.

Abb. 11.02

Schnitt durch einen Brennstab



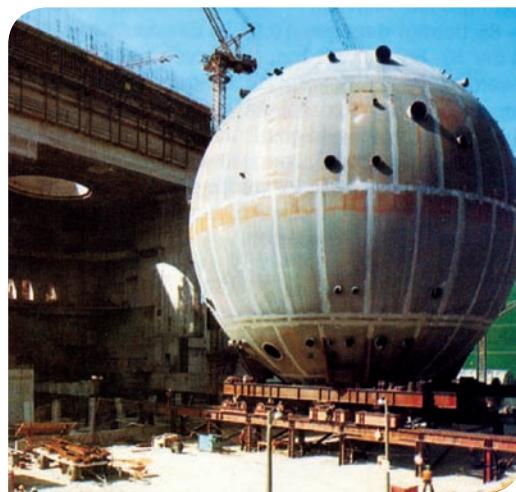


Abb. 11.03 (links)
Reaktordruckgefäß eines Druckwasserreaktors

Abb. 11.04
Der Sicherheitsbehälter eines Siedewasserreaktors wird in das Reaktorgebäude gefahren

Ein Sicherheitsbehälter aus Stahl umschließt das Reaktordruckgefäß und die unmittelbar daran anschließenden Teile des Kühlmittelkreislaufs. Rohrleitungen, die aus dem Sicherheitsbehälter herausführen, können durch mehrfach angeordnete schnell schließende Ventile abgesperrt werden. Der Sicherheitsbehälter ist so ausgelegt, dass auch bei einem Leck in einer Frischdampfleitung keine radioaktiven Stoffe ins Freie gelangen. Zusätzlich ist ein Druckabbausystem vorhanden.

Bei einem Störfall austretender Dampf würde dann im Sicherheitsbehälter kondensieren. Sicherheitsbehälter haben Durchmesser zwischen 25 und 30 m (Abb. 11.04). Um ihre Dichtheit zu erhöhen, besitzen einige Kernkraftwerke in einigen Zentimetern Abstand von der Außenwand des Sicherheitsbehälters eine Dichthaut aus Stahl. Der Zwischenraum wird durch Absaugen ständig auf Unterdruck gehalten.

Druckdifferenz als Sicherheitsbarriere 11.2

Bei der großen Anzahl von Brennstäben können vereinzelt Undichtigkeiten auftreten. Man geht heute davon aus, dass jeder 100.000ste Brennstab feinste Haarrisse oder Poren aufweist, durch die vor allem gasförmige und leicht flüchtige Radionuklide in das umgebende Wasser gelangen.

Im Kühlmittel vorhandene Stoffe werden durch die Neutronenstrahlung z. T. aktiviert und dadurch radioaktiv. Auf diese Weise entstehen z. B. Fe-59 und Co-60.

Durch kleinste Undichtigkeiten an verschiedenen Stellen des Kühlmittelkreises (z. B. bei Dichtungen von Pumpen und Ventilen) treten geringe Mengen radioaktiver Stoffe aus und befinden sich dann im Reaktorgebäude.

Damit die Spalt- und Aktivierungsprodukte das Reaktorgebäude auf keinen Fall unkontrolliert verlassen, werden verschiedene Unterdruckzonen eingerichtet. Da Luft immer von der Stelle mit höherem Druck zur Stelle mit niedrigerem Druck strömt, kann erreicht werden, dass bei normalem Betrieb Luft immer nur von weniger aktiven zu stärker aktiven Räumen strömt (also von außen nach innen). Der Luftdruck im Reaktorgebäude ist etwa 1 hPa (1 mbar) geringer als außerhalb des Gebäudes. Im möglicherweise vorhandenen Ringspalt zwischen Sicherheitsbehälter

und Dichthaut herrscht ein um 10 hPa (10 mbar) geringerer Druck. Im Sicherheitsbehälter selbst schwankt der Druck in Abhängigkeit von verschiedenen Betriebsbedingungen (Abb. 11.05).

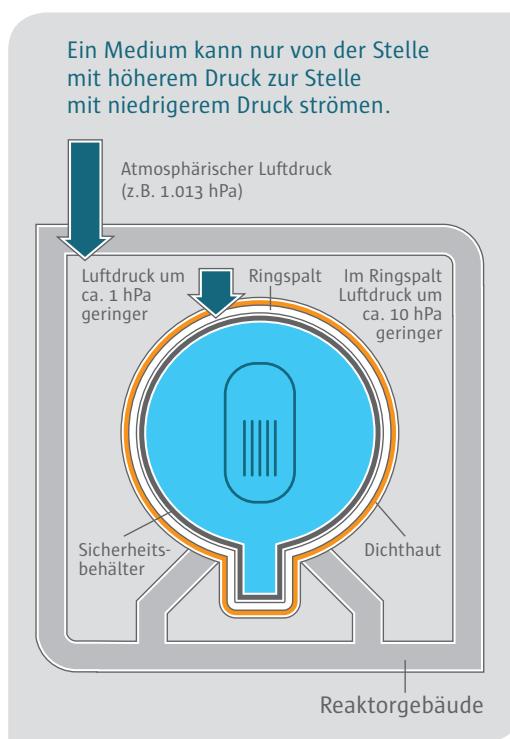


Abb. 11.05
Unterdruck im Reaktorgebäude und im Ringspalt

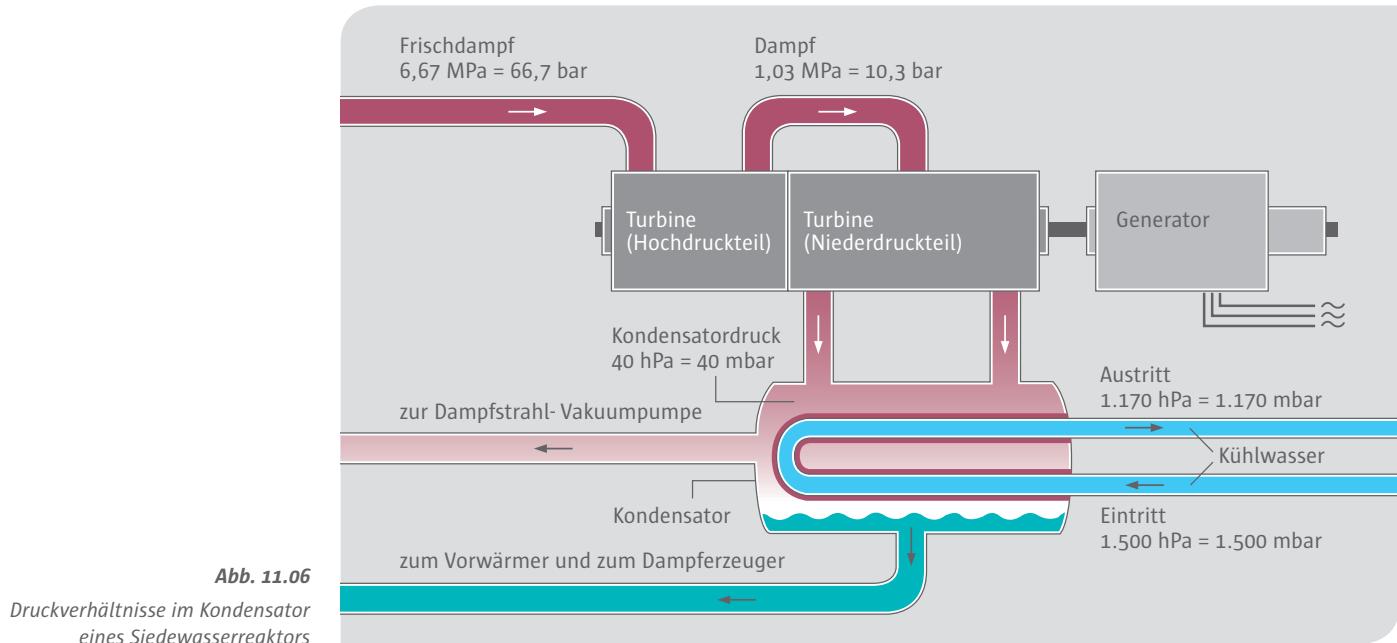


Abb. 11.06

Druckverhältnisse im Kondensator eines Siedewasserreaktors

Radioaktive Stoffe, die sich im Reaktorgebäude befinden, gelangen mit der Luft in die Unterdruckzonen und die Absaugvorrichtungen. Dort können sie kontrolliert weiterbehandelt werden. Bei Störungen in der Reaktoranlage ist es möglich, die Luft aus den Unterdruckzonen in den Sicherheitsbehälter zurückzupumpen. Personen- und Materialschleusen stellen darüber hinaus sicher, dass die Unterdruckzonen auch beim Begehen des Sicherheitsbehälters aufrechterhalten bleiben.

Druckdifferenzen als Sicherheitsbarrieren sind auch noch an anderen Stellen eines Kernkraftwerks vorhanden. Eine besonders wichtige Stelle bei einem Siedewasserreaktor ist der Turbinenkondensator, bei dem über einen Wärmetauscher Energie an die Umgebung abgegeben wird (Abb. 11.06). Das Kühlwasser, das beispielsweise einem Fluss entnommen wird, steht unter einem Druck $> 1.000 \text{ hPa} (> 1.000 \text{ mbar})$, während im Kondensator ein Druck von nur 40 hPa (40 mbar) herrscht. Bei einem angenommenen Riss im Wärmetauscher kann zwar Flusswasser in den Kondensator, aber kein radioaktiver Dampf in das Flusswasser gelangen.

11.3 Verringerung der Aktivität bei Abluft und Abwasser

Die in einem Kernkraftwerk entstehenden Radionuklide verbleiben zu mehr als 99,9 % in den Brennstäben. Es fallen aber durch Leckagen und Neutronenaktivierung gasförmige, flüssige und feste Reaktorbetriebsabfälle an, die soweit wie möglich zurückgehalten werden. Um die Aktivität der Abluft und des Abwassers zu verringern, gibt es zwei unterschiedliche Verfahren:

- Verzögerte Abgabe, damit die Aktivität von selbst geringer wird.
- Abtrennen der Radionuklide durch physikalische sowie chemische Verfahren und Lagerung dieser Radionuklide.

11.3.1 Behandlung gasförmiger Reaktorbetriebsabfälle

Einige der wichtigsten gasförmigen und leichtflüchtigen Radionuklide, die sich in der Luft des Kraftwerksgebäudes befinden, sind die durch

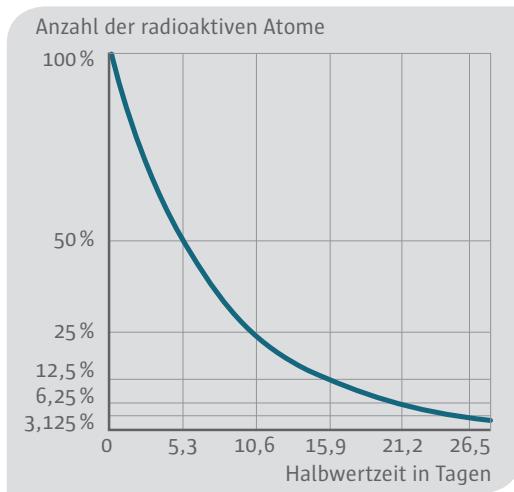
Leckagen entwichenen Spaltprodukte Xe-133, Kr-85 und I-131.

Xe-133 hat eine Halbwertszeit von 5,25 d. Es wird in einer Verzögerungsstrecke bis zu 60 d zurückgehalten. Da dann mehr als zehn Halbwertszeiten verstrichen sind, ist die ursprüngliche Aktivität auf weniger als 0,1 % abgeklungen (Abb. 11.07).



Verzögerungsstrecken bestehen z. B. aus Aktivkohlefiltern. Das Gas wird zunächst in der ersten Filterschicht adsorbiert (Gasmoleküle lagern sich an der Oberfläche von Kohlenstoffpartikeln an). Im Laufe der Zeit bewegen sie sich durch Austausch langsam durch die Kohlefilterstrecke bis zum Abluftkamin. Das Spaltprodukt Krypton-85 hat eine Halbwertszeit von 10,76 a. Da es als Edelgas keine chemischen Verbindungen eingeht

und sich im Organismus nicht anreichert, besitzt es nur eine geringe Radiotoxizität. Es wird deshalb in genehmigten Mengen und unter laufender Kontrolle in die Atmosphäre geleitet.



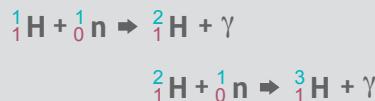
Der Anteil des I-131 in der Gebäudeluft ist gering. Da dieses Element aber im Gegensatz zu den Edelgasen chemische Verbindungen eingehen kann, wird es durch mehrere hintereinander angeordnete Filter zurückgehalten. Eine Rückhaltung zu mehr als 99,99 % wird dadurch erreicht, dass die Filter zusätzlich mit Silbernitrat getränkt sind. Bei Kontakt mit Iod entsteht dann Silberiodid, das in den Filtern verbleibt. In ähnlicher Weise verfährt man mit den Aerosolen, bei denen sich radioaktive Teilchen an Staubpartikel oder Wassertröpfchen angelagert haben.

11.3.2 Behandlung flüssiger Reaktorbetriebsabfälle

Aus Undichtigkeiten des Kühlmittelkreises austretendes Wasser sowie Wasser aus Labors, Dekontaminationsanlagen und Waschräumen sowie von Reinigungsarbeiten bilden die flüssigen Reaktorbetriebsabfälle. Auch bei der Ableitung von radioaktiven Flüssigkeiten an die Umgebung gilt, die Strahlenexposition der Menschen durch innere Strahleneinwirkung auch unterhalb der Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung so gering wie möglich zu halten.

Die wichtigste Maßnahme besteht darin, der Flüssigkeit die radioaktiven Stoffe zu entziehen. Das

geschieht durch Eindampfen (Abdestillieren der Flüssigkeit), Ionenaustausch, Filtration oder chemische Fällung. Eine Sonderstellung nimmt das Tritium (H-3) ein. Es entsteht bei einem geringen Prozentsatz der Kernspaltungen als drittes Teilchen und durch Neutronenbestrahlung des Kühlmittels sowie anderer Materialien. Beispiele:



Das Tritium liegt im Wesentlichen als HTO vor (Wassermolekül, dessen Wasserstoffatome die Isotope H-1 und H-3 = T sind). Wegen der relativ langen Halbwertszeit von 12,323 a können keine Verzögerungsstrecken eingesetzt werden. Da die maximale Energie der vom Tritium ausgesandten Betateilchen aber nur 0,018 MeV beträgt und keine Gammaquanten auftreten, entsteht durch die Ableitung des Tritium an die Umgebung nur eine geringe zusätzliche Strahlenexposition der Bevölkerung.

11.3.3 Behandlung fester Reaktorbetriebsabfälle

Radioaktive Reaktorbetriebsabfälle fallen z. B. in Form von Filtern, Ionenaustauschern, Putzlapppen, kontaminierten Kleidung, Abfällen von Reparaturen an. Sie werden in der Regel verbrannt oder verdichtet, um ihr Volumen zu verkleinern. Anschließend schließt man sie in Behältern sicher ein. Bei einem Siedewasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 1.300 MW fallen pro Betriebsjahr etwa folgende Rohabfallmengen an:

250 m³ Papier, Kunststoffe, Bauschutt
 20 m³ Konzentrate aus der Abwasser-
 aufbereitung
 7 m³ Ionenaustauscherharze aus der
 Kühlmittelreinigung
 6 m³ Metallteile
 3 m³ Schlämme und Öle

Abb. 11.07
Abklingen der Aktivität bei Xenon-133

Kontrollierte Ableitung radioaktiver Stoffe 11.4

Bei der Ableitung von Radionukliden mit Abluft und Abwasser unterscheidet man zwischen Genehmigungswerten und Abgabewerten. Die Genehmigungswerte legt die Aufsichtsbehörde fest. Sie dürfen auch unter ungünstigen Verhältnissen nicht überschritten werden. Die Genehmigungswerte garantieren, dass die Bevölkerung keiner

unzulässigen Strahlenexposition ausgesetzt ist. Der Genehmigungswert wird aufgrund gesetzlicher Vorschriften, von Betriebserfahrungen bei anderen Kernkraftwerken und von Berechnungen für die neue Anlage festgelegt. Die tatsächlichen Abgabewerte ergeben meist nur wenige Prozent der Genehmigungswerte. Welche Mengen

radioaktiver Stoffe letztlich an die Umgebung abgegeben werden, ist vom Reaktortyp, der Reaktorleistung und der Betriebsweise abhängig. In der Tab. 11.01 sind beispielhaft die Genehmigungswerte und die tatsächlichen Abgabewerte gegenübergestellt.

Radionuklidgruppe	Genehmigungs-wert in Bq/a	Abgabewert in Prozent des Genehmigungs-wertes
Abluft:		
Edelgase	$1 \cdot 10^{15}$	0,048
Radioaktive Aerosole (ohne I-131)	$1 \cdot 10^{10}$	0,00034
Iod-131	$6 \cdot 10^9$	0,0028
Abwasser:		
Tritium	$3,5 \cdot 10^{13}$	63
Sonstige Radionuklide	$5,55 \cdot 10^{10}$	0,0038

Tab. 11.01

Genehmigungs- und Abgabewerte eines Druckwasserreaktors (Brokdorf, 2010)

Die gasförmigen und leichtflüchtigen Radionuklide gelangen kontrolliert über den Abluftkamin ins Freie. Welche Radionuklidkonzentration am Boden auftritt, hängt von mehreren Faktoren ab: freigesetzte Menge, Höhe des Abluftkamins, Entfernung zum Kraftwerk, Wetterbedingungen und Art der Ablagerung (trockene oder nasse Ablagerung). Das Konzentrationsmaximum der Ablagerung auf dem Boden liegt etwa 1 bis 2 km in Hauptwindrichtung vom Kernkraftwerk entfernt.

Abwässer werden in großen Behältern gesammelt und die Gesamtaktivität sowie die Aktivität einzelner Radionuklide bestimmt. Wenn die spezifische Aktivität bestimmte Werte nicht überschreitet, wird der Abfluss freigegeben. Bei Überschreiten der zulässigen Werte schließt sich der Abfluss automatisch. Beim Druckwasserreaktor wird die höhere Tritiumabgabe durch Borsäure verursacht, die dem Kühlmittel des Reaktors zur Langzeitregelung zugesetzt ist. Die aus den Ableitungen resultierenden Strahlendosiswerte sind selbst an der ungünstigsten Stelle in der Umgebung des Kernkraftwerks sehr gering und liegen im Bereich von wenigen Mikrosievert (siehe Kapitel 9.7).

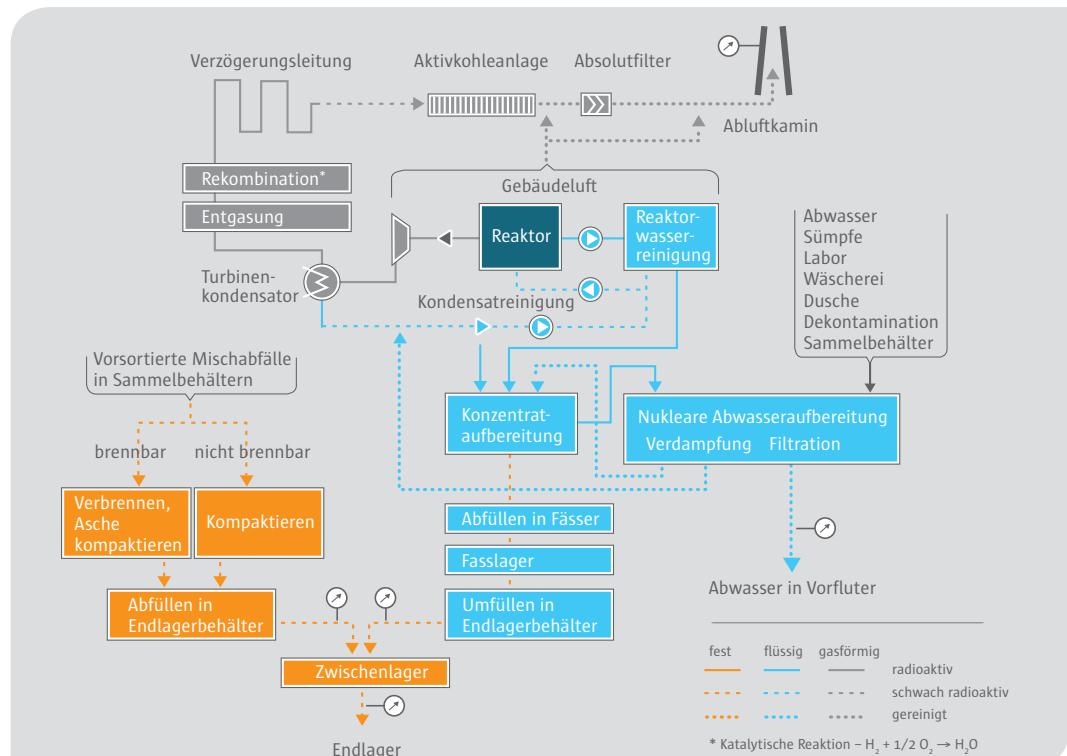


Abb. 11.08

Aktivitätsflusschema eines Kernkraftwerks mit Siedewasserreaktor

11.5 Umgebungsüberwachung

Jeder Betreiber eines Kernkraftwerks oder einer anderen kerntechnischen Einrichtung ist entsprechend behördlicher Auflagen verpflichtet, in der Umgebung Überwachungsmessungen durchzuführen. Die Messwerte werden von der Überwachungsbehörde nachgeprüft und teilweise durch

eigene Messungen ergänzt. Durch die Umgebungsüberwachung wird die Radionuklidkonzentration in Luft, Wasser, auf dem Boden und in den Nahrungsketten ermittelt. Dabei beginnt man bereits vor Inbetriebnahme des Kernkraftwerks, um geeignete Vergleichswerte zu besitzen.

Strahlenschutz für Personen in einem Kernkraftwerk

12

12.1 Dosisgrenzwerte

Personen, die in einem Kernkraftwerk tätig sind, sind vor einer Gefährdung durch ionisierende Strahlung zu schützen. In der Strahlenschutzverordnung sind daher Dosisgrenzwerte festgelegt, die nicht überschritten werden dürfen. Diese Grenzwerte schließen die natürliche und die medizinische Strahlenexposition nicht ein.

Die Strahlenschutzverordnung unterscheidet zwischen beruflich strahlenexponierten Personen und der übrigen Bevölkerung. Als beruflich strahlenexponiert gelten alle Personen, die bei ihrer Berufsausübung im Kalenderjahr eine höhere effektive Dosis als 1 mSv erhalten können. Der Grenzwert der effektiven Dosis beträgt 20 mSv im Kalenderjahr. Neben dem Grenzwert für die effektive Dosis bestehen zusätzlich noch Grenzwerte für einzelne Organe (Tab. 12.01). Für bestimmte Personengruppen – Jugendliche unter 18 Jahren, gebärfähige Frauen – sind niedrigere oder zusätzliche Grenzwerte festgelegt. Für besondere Notsituationen und für die Durchführung lebensrettender Maßnahmen bei Unfällen bestehen Sonderregelungen.

Tab. 12.01

Grenzwerte der Dosis im Kalenderjahr für beruflich strahlenexponierte Personen

Bezugsorgan	Grenzwert im Kalenderjahr in mSv
effektive Dosis	20
Gebärmutter, Keimdrüsen, Knochenmark (rot)	50
Augenlinsen, Bauchspeichel-drüse, Blase, Brust, Dick-darm, Dünndarm, Gehirn, Leber, Lunge, Magen, Milz, Muskel, Nebenniere, Niere, Speiseröhre, Thymusdrüse	150
Knochenoberfläche, Schilddrüse	300
Haut, Hände, Füße, Knöchel, Unterarme	500

Die Betreiber von Kernkraftwerken haben von sich aus häufig niedrigere Werte als so genannte „Interventionswerte“ festgelegt. Werden diese Werte erreicht, werden zusätzliche Strahlenschutzmaßnahmen geplant, um in jedem Fall unter den gesetzlichen Grenzwerten zu bleiben.

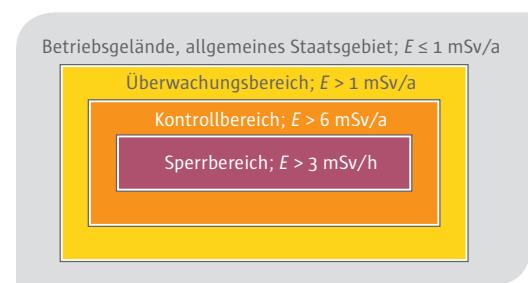
12.2 Strahlenschutzbereiche

Je nach der Dosis, die eine Person in einem Bereich durch äußere und innere Strahlenexposition erhalten kann, sind bestimmte Strahlenschutzbereiche festzulegen: Überwachungsbereich, Kontrollbereich oder Sperrbereich (Abb. 12.01). Bei der Festlegung von Überwachungsbereich und Kontrollbereich ist allgemein von einer Aufenthaltsdauer pro Person von 2.000 Stunden im Jahr auszugehen.

- **Überwachungsbereich:**
Überwachungsbereiche sind die betrieblichen Bereiche, bei denen Personen eine höhere effektive Dosis als 1 mSv im Kalenderjahr erhalten können.
- **Kontrollbereich:**
Kontrollbereiche sind die betrieblichen Bereiche, in denen Personen eine höhere effektive Dosis als 6 mSv im Kalenderjahr erhalten können. Er darf nur zur Durchführung oder Aufrechterhaltung der vorgesehenen Betriebsvorgänge betreten werden. Besucher haben nur mit behördlicher Erlaubnis Zutritt zu einem Kontrollbereich. Der Kontrollbereich ist abzugrenzen und deutlich sichtbar zu kennzeichnen. Bei Personen, die sich in Kontrollbereichen aufhalten, sind die Körperdosen – üblicherweise mit einem amtlichen Dosimeter

Abb. 12.01

Bereichseinteilung entsprechend den möglichen Werten der effektiven Dosis E



– zu bestimmen. Vor erstmaligem Zutritt und dann mindestens jährlich ist eine Unterweisung insbesondere über die anzuwendenden Strahlenschutzmaßnahmen durchzuführen.

- **Sperrbereich:**
Sperrbereiche sind Bereiche innerhalb eines Kontrollbereichs, in denen die Ortsdosleistung höher als 3 mSv/h sein kann. Personen darf der Aufenthalt in einem Sperrbereich nur erlaubt werden, wenn sie unter der Aufsicht einer beauftragten fachkundigen Person zur Durchführung vorgesehener Betriebsvorgänge oder aus zwingendem Grund tätig werden müssen. Sperrbereiche sind abzugrenzen und deutlich sichtbar zu kennzeichnen.

Bereiche, die keine Strahlenschutzbereiche sind 12.3

Nicht zu den „Strahlenschutzbereichen“ gehört das außerhalb dieser Bereiche befindliche aber noch zum Betrieb gehörende Betriebsgelände. Für dieses „Betriebsgelände“ gilt ebenso wie für das außerhalb des Betriebs liegende „allgemeine Staatsgebiet“ ein Grenzwert der effektiven Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr. Der Unterschied besteht darin, dass auf dem Betriebsgelände die Aufenthaltszeit administrativ geregelt (begrenzt) werden kann und daher nicht von einem Dauer-aufenthalt bei der Berechnung der Dosis ausgegangen werden muss.

Für die Planung, die Errichtung und den Betrieb von Kernkraftwerken sowie anderen kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen gelten spezielle Grenzwerte der durch die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser aus diesen Anlagen oder Einrichtungen jeweils bedingten Strahlenexpositionen des Menschen. Der Grenzwert für die effektive Dosis beträgt für jeden dieser Ableitungspfade 0,3 mSv im Kalenderjahr. Dabei ist die Strahlenexposition für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen unter Berücksichtigung von Expositionspfaden, Lebensgewohnheiten und den in Kapitel 7.1 genannten Verzehrgewohnheiten zu ermitteln.

Kontrolle der Strahlenexposition 12.4

Im Jahr 2010 wurden in Deutschland 341.008 Personen während ihrer beruflichen Tätigkeit mit Personendosimetern überwacht. Davon waren rund 78 % im medizinischen Bereich tätig. Die Summe der Jahresdosis aller mit Personendosimetern überwachten Personen im Jahr 2010 betrug 40 Personen-Sievert. Die mittlere Jahres-Personendosis aller Überwachten betrug 0,12 mSv. Bei etwa 84 % der mit Personendosimetern überwachten Personen lagen die ermittelten Werte unter der kleinsten feststellbaren Dosis von 0,05 mSv im Jahr. Für die rund 61.000 Personen mit einer von Null verschiedenen Jahresdosis ergibt sich eine mittlere Jahres-Personendosis von 0,66 mSv.

Entsprechend den Vorschriften der Strahlenschutzverordnung müssen die Betreiber von Flugzeugen die durch die erhöhte kosmische Strahlung verursachte Strahlenexposition des fliegenden Personals mit amtlich zugelassenen Rechenprogrammen ermitteln, denn die für die Dosisermittlung im medizinischen und kerntechnischen Bereich entwickelten Personendosimeter sind hier nicht einsetzbar. In Deutschland wurden im Jahr 2010 auf diese Weise rund 36.800 Personen überwacht. Die Kollektivdosis dieser Personen betrug 83 Personen-Sievert. Damit ergibt sich eine mittlere Jahresdosis von 2,25 mSv. Das fliegende Personal ist damit die am höchsten strahlenexponierte Berufsgruppe in Deutschland.

Ergänzend zur gesetzlich erforderlichen Ermittlung und Überwachung der Personendosis durch eine amtlich bestimmte Messstelle werden, insbesondere in Bereichen, in denen stark wechselnde und höhere Strahlenpegel auftreten können, die Dosisleistungen ermittelt, um das Personal bei Überschreitungen von betrieblich festgelegten Ortsdosisleistungswerten zu warnen.

Um die innere Strahlendosis zu überwachen, werden einzeln oder kombiniert

- die Konzentrationen radioaktiver Stoffe in der Luft oder die Kontamination des Arbeitsplatzes,
- die Körperaktivität mit einem Ganzkörperzähler,
- die Aktivität in den Ausscheidungen gemessen.

Die aus äußerer und innerer Exposition resultierenden Dosiswerte sind aufzuzeichnen und mindestens noch 30 Jahre nach Beendigung der Beschäftigung aufzubewahren.

12.5 Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten im Kontrollbereich

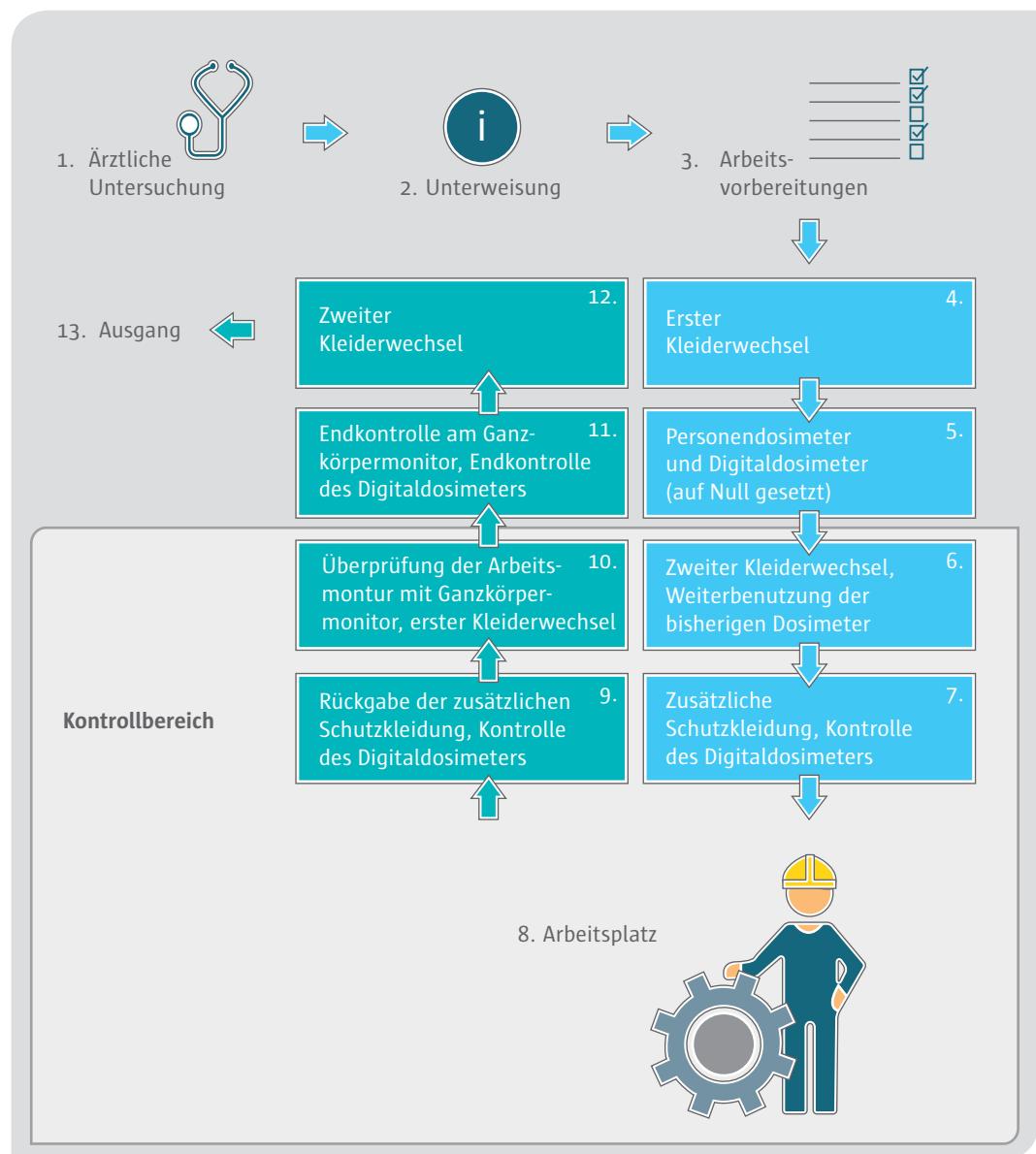


Abb. 12.02

Strahlenschutzmaßnahmen bei Zugang und Verlassen eines Kontrollbereichs

Eine regelmäßig wiederkehrende Tätigkeit im Kontrollbereich eines Kernkraftwerks ist z. B. der Austausch von Brennelementen. Dazu wird der Reaktor durch Einfahren der Regelstäbe abgeschaltet und anschließend das Reaktordruckgefäß geöffnet. Zum Schutz vor Direktstrahlung aus dem Reaktor und zur Kühlung flutet man den Raum oberhalb des Reaktordruckgefäßes. Dann können die abgebrannten Brennelemente von der Brennelementwechselmaschine unter Wasser entnommen und unter Wasser in ein seitlich angeordnetes und mit Wasser gefülltes Lagerbecken transportiert werden.

Die Schutzmaßnahmen, die bei Tätigkeiten von Personen im Kontrollbereich angewandt werden, lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

- Maßnahmen zum Schutz der Person.

- Maßnahmen, um ein Verschleppen radioaktiver Stoffe nach draußen zu verhindern.

Jede Schutzmaßnahme wird mehrfach realisiert, um ihre Wirksamkeit zu erhöhen.

Abb. 12.02 beschreibt in vereinfachter Form den Weg in den und aus dem Kontrollbereich und gibt die jeweiligen Strahlenschutzmaßnahmen an.

1. Eine ärztliche Untersuchung stellt fest, ob ein Mitarbeiter für den Einsatz im Kontrollbereich geeignet ist. Die Untersuchungen werden jährlich wiederholt.
2. Die im Kontrollbereich tätigen Personen werden mindestens einmal jährlich in die Grundzüge der Betriebskunde eingeführt sowie im Arbeits-, Strahlen- und Brandschutz unterwiesen.

3. Im Zuge der Arbeitsvorbereitung werden der Arbeitsablauf geplant, die erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen festgelegt und zum Schluss der Arbeitsauftrag erteilt. Nach Freigabe der Arbeit durch den Schichtleiter kann der Kontrollbereich betreten und mit der Arbeit begonnen werden.
4. In einem Umkleideraum außerhalb des Kontrollbereichs wird die Privatkleidung bis auf die Unterwäsche ausgezogen und ein Kittel sowie ein Paar Badesandalen angezogen.
5. Vor dem Kontrollbereichseingang werden zwei Dosimeter übergeben: ein amtliches Dosimeter zur monatlichen amtlichen Auswertung und ein Digitaldosimeter zur werksinternen Dosiskontrolle (geeignet zur Selbstablesung und mit einer akustischen Dosisleistungswarnschwelle versehen). Das zuletzt genannte Dosimeter wird vor dem Betreten des Kontrollbereichs durch einen Rechner auf Null gesetzt und der jeweiligen Person zugeordnet.
6. Durch eine Tür, die den Kontrollbereich lüftungstechnisch vom übrigen Bereich des Kraftwerks abtrennt, gelangt man in einen zweiten Umkleideraum. Dort werden Kittel und Badesandalen gegen eine komplette Arbeitskleidung ausgetauscht: Overall, Sicherheitsschuhe, Helm, evtl. Handschuhe und Atemschutzmaske. Die beiden Dosimeter werden an der Brusttasche des Overalls positioniert.
7. Ist bei den durchzuführenden Tätigkeiten im Kontrollbereich mit einer Freisetzung radioaktiver Stoffe zu rechnen, befindet sich am Arbeitsplatz ein weiterer Umkleideraum. Dort wird ein zweiter Overall über den ersten gestreift, Überschuhe und Stoffhandschuhe angezogen und bei Bedarf zusätzlich ein Atemschutzgerät ausgegeben. Das Digitaldosimeter wird in einem solchen Fall vor Arbeitsbeginn erneut vom Rechner ausgelesen, sodass nach Beendigung der Tätigkeit eine arbeitsplatzbezogene Dosis bestimmt werden kann. So kann zwischen der Dosis im Kontrollbereich insgesamt und der Arbeitsplatzdosis unterschieden werden. Bei Arbeitsvorgängen an Objekten, von denen Betastrahlen oder Neutronenstrahlen hoher Intensität ausgehen, werden spezielle, zusätzliche Dosimeter getragen.
8. Am Arbeitsplatz dürfen nur die im Auftrag genannten Tätigkeiten ausgeführt werden. Bei einer Tätigkeit an kontaminierten Bauteilen wird ein weiterer Wechsel von Überschuhen und ein Anlegen von Gummihandschuhen erforderlich.
9. Nach Beendigung des Arbeitsauftrags findet der umgekehrte Kleidertausch wie bei 7. statt. Der Rechner liest das Digitaldosimeter aus und ermittelt, welche Strahlendosis am Arbeitsplatz erhalten wurde.
10. Am Ganzkörpermonitor (Abb. 12.03) wird überprüft, ob die Arbeitskleidung kontaminiert ist. Anschließend wird die Arbeitskleidung wieder gegen Kittel und Badesandalen getauscht.



Abb. 12.03
Prüfung auf radioaktive Kontamination am Ganzkörpermonitor

11. Im Kittel und in Badesandalen wird der Kontrollbereich verlassen. An einem Endmonitor wird überprüft, ob eine Kontamination des Körpers vorliegt. Bei einer Kontamination der Haut muss diese gründlich mit Wasser und flüssiger Seife gereinigt werden. Das Digitaldosimeter wird vom Rechner ausgewertet. Damit ist die im Kontrollbereich insgesamt erhaltene Dosis ermittelt. Das amtliche Dosimeter wird am Monatsende der amtlichen Auswertestelle zur Auswertung übersandt. Die Dosimeter bleiben während der Nichtbenutzung in der Dosimeterzentrale.
12. Im Umkleideraum außerhalb des Kontrollbereichs werden Kittel und Badesandalen wieder gegen die eigene Kleidung getauscht.

Sachwortverzeichnis

Ableitung radioaktiver Stoffe	45, 74f, 89f, 93	Elektrometer	38
Abluft.	75, 88ff	Elektron	9ff, 13ff, 18ff, 22, 24ff, 28ff, 31f, 34, 37f, 43f, 59f, 79, 81f
Abschirmung	37, 59, 63, 79ff	Elektroneneinfang	16, 79
Abschirmung von Alphastrahlen	80	Elektronenhülle	16, 43
Abschirmung von Betastrahlen	81	Elementarladung.	10, 11, 14
Abschirmung von Gammastrahlen.	82	Element, chemisches	7ff
Abschirmung von Neutronenstrahlen	83	Endkern	15, 27
Abstandsgesetz	80	Energiebilanz der Kernspaltung	20
Abwasser.	75, 88ff	Energie der Teilchenstrahlen.	18
Aktivierung.	27, 74, 86f	Energiedosis	31f, 47, 68
Aktivität	34ff, 51f, 54, 56ff, 59ff, 68ff, 74, 78, 88ff, 93	Energie, thermische	18
Aktivität des Menschen	56	Energieniveau	14, 18, 24f, 28, 43
Aktivitätsbestimmung	35	Energieverteilung beim Beta ⁻ -Zerfall	19
Alphastrahlen	13, 25, 32, 80f	Energieverteilung, kontinuierliche .	19, 22, 25f
Alphateilchen .	13, 15, 18ff, 24ff, 32, 39, 80f, 86	Energie von Alphateilchen .	18ff, 24, 28, 32, 80
Alphazerfall	13, 19	Energie von Betateilchen	19ff, 25, 27, 36, 81, 89
Anregung.	20ff, 28, 32, 43, 72, 81	Energie von Neutronen	18ff, 26, 32, 83
Anreicherung von Radionukliden	50	Faktorenabhängigkeit der Strahlenwirkungen	46
Antineutrino	14f, 19	Filmdosimeter	38
Atom	9ff	Folgedosis	33, 57, 75
Atomhülle	9f, 16, 24ff, 28, 34, 43	Frühschaden	43ff
Atomkern.	11, 13ff, 18, 22, 25f, 28f, 59, 72, 82	Gammaenergie.	36f
Atommasse.	10f	Gammaquant.	14f, 17ff, 24, 26ff, 31, 34, 36f, 44f, 72, 79f, 82f, 89
Atommodell	10	Gammaspektroskopie	30
Ausgangskern	15	Gammastrahlen	13f, 21, 28, 38, 75, 79, 82ff, 86
Bahn	10, 24f, 72	Ganzkörpermonitor	94f
Baustoffe.	63f	Geiger-Müller-Zählrohr	34
Becquerel	35	Gewebe-Wichtungsfaktor	33
Beruflich strahlenexponierte Person.	45, 92	Gray	32, 45
Bestrahlung, äußere	38, 43, 50, 57, 65	Grenzwerte.	45, 75, 89, 92f
Bestrahlung, innere	33, 43, 57, 65, 76	Halbleiterdetektor	36f
Bestrahlungseffekt, biologischer	44f	Halbwertschicht	82f
Betastrahlen	13, 25, 32, 73, 81, 95	Halbwertszeit, biologische.	53ff, 79
Beta ⁻ -Teilchen	13, 19, 79	Halbwertszeit, effektive	54f
Betazerfall	13f, 19f, 22	Halbwertszeit, physikalische. .	16, 27, 35, 54, 59ff, 68, 70, 72, 79, 88f
Bremsstrahlung	22, 25, 29, 81	Helium	8f, 11, 13, 25f, 83
Brennstab	84, 86ff	Heliumkern.	13, 15, 59
Cäsium	8, 14, 16, 50, 52ff, 74	Hüllenelektron	11, 13, 16, 24f, 28, 81f
Chromosomenmutation	42f	Impulsrate	34ff
Comptoneffekt	28f, 37, 82	Ingestion	52
Comptonelektron	28f	Inhalation	50, 52, 70
Comptonstreuung	28	Iod	8, 16, 36f, 53, 69, 73, 86, 89f
Curie	35	Ion	10, 24ff, 28f
Deuterium	11, 83	Ionendosis	31
Deuteron	11	Ionenpaar	24ff, 34
DNS.	41ff, 47	Ionisation	24ff, 28f, 31f, 34, 38f, 43, 63, 81
Dosimeter	38, 92ff	Ionisationskammer.	31, 38
Dosis	31ff, 38, 44ff, 57, 63ff, 67ff, 75f, 78ff, 90	Ionisierungsenergie	24
Dosis, effektive	33, 45, 57, 63ff, 67ff, 75f	Isotop.	9, 11, 16, 60f, 63, 65, 68, 70, 72f, 89
Dosisfaktor	57		
Dosisgrenzwert.	92		
Durchflusszähler	34		

Jahresverbrauch an Nahrungsmitteln	49
Kalium	8f, 16, 50ff, 60, 65
K-Einfang	16, 22, 60
Kernkräfte	9, 13
Kernkraftwerk	11, 15, 27, 67, 72, 74ff, 78, 83ff
Kernladungszahl	8, 11, 13f, 16, 28, 61
Kernphotoeffekt	19
Kernreaktor	20, 72, 86
Kernspaltung	15, 20, 70, 72f, 89
Kernumwandlung	12ff, 18, 21, 35, 56
Kernwaffentests	70, 76
Kontrollbereich	34, 92, 94f
kosmische Strahlung	11, 59f, 62f, 65, 71, 76, 93
Ladung, elektrische .	10f, 14f, 19, 24, 26, 31, 37
Massenzahl	11, 13f, 16, 73
Metastabil	14, 18
Mol	10
Mutation	42f, 46
Nachzerfallswärme	84
Nahrungskette	49f, 52, 90
Neutrino	14f, 19f, 60
Neutron	9ff, 13ff, 18ff, 26f, 39, 59, 61, 64f, 72, 74, 79, 83
Neutronen, epithermische	20
Neutronen, schnelle	20, 26, 39, 72, 83
Neutronen, thermische . .	18, 20, 26f, 39, 72, 83
Neutroneneinfang	26f, f, 83
Neutronenemission	73
Neutronenquelle	20, 26
Neutronenschild	83
Neutronenstrahlen	15, 83f, 95
Neutronenzahl	11
Nuklearmedizin	68, 79
Nuklid	11, 13f, 16, 18f, 22, 28, 33, 35f, 48ff, 59ff, 68ff, 72f, 75, 78f, 81f, 84, 86ff
Organdosis	32f
Paarbildung	28f, 37, 82
Photoeffekt	28f, 37, 44, 82
Photoelektron	28f
Photon	14, 21, 24f, 28, 32, 59
Pu-Be-Quelle	20
Plutonium	8, 16, 20, 60f, 70
Positron	14, 16, 19, 29, 82
Proton	8ff, 13ff, 21, 26, 32, 59, 83
Protonenzahl	8, 11
Punktmutation	42f
Quant	14, 17
Quantenenergie	28f, 82
Rad	32
Radioaktivität	12f, 51, 56, 64
Radionuklid	13f, 16, 18f, 28, 33, 35f, 48ff, 59ff, 65, 68, 70, 73, 75, 78f, 81f, 84, 86ff
Radionuklidbestimmung	36
Radiotoxizität	48
Radium	8, 13, 49, 51, 56, 60ff
Radon	8, 13, 16, 49, 51, 61ff, 65, 75
Reaktorbetriebsabfall	88f
Reaktionskette, strahlenbiologische	43
Rem	32
Reichweite von Alphateilchen	25, 80f
Reichweite von Betateilchen	25, 69, 81
Resonanzeinfang	26
Resorption	52
Röntgen	16, 22, 31f
Röntgenaufnahme	67
Röntgenfluoreszenzstrahlung	28
Röntgenbremsstrahlung	22, 25
Röntgenquant	22, 28
Röntgenröhre	22, 78
Röntgenstrahlung	16, 21f, 67, 78
Rückstoßkern	26
Schaden, genetischer	43f, 46
Schaden, somatischer	43ff
Schalen (Atomhülle)	10, 28
Schwellendosis	44f
Sekundärionisation	24
Sekundärstrahlung	28, 59, 83
Sicherheitsabstand	78, 80, 86
Sicherheitsbarrieren	88
Sicherheitsbehälter	84, 87f
Sievert	32f, 45, 70, 75, 90, 93
Spaltneutronen	20
Spaltprodukte	15, 20f, 70, 73f, 86, 88
Spätschaden	33, 43ff
Speicherorgan	52, 57
Sperrbereich	92
Stabdosimeter	38
Standardmensch	9, 49f, 53, 56, 60, 65
Stoß, elastischer	26
Stoß, unelastischer	26
Strahlenempfindlichkeit	33, 46f
Strahlenexposition, natürliche	45, 59f, 63ff, 71, 75f, 92f
Strahlenexposition, zivilisatorische	45, 67ff, 72, 75f, 89, 92
Strahlenexposition, externe	57, 63f, 76, 80, 92
Strahlenexposition, interne	54, 57, 65, 76, 92
Strahlenmessung	30f
Strahlenquellen, künstliche	66, 72, 75, 78f, 81
Strahlenquellen, natürliche	58, 65
Strahlenschaden	44f, 47, 78
Strahlenschutzbereiche	92f
Strahlungsquant	24f, 28, 35
Strahlungs-Wichtungsfaktor	32, 46
Streuung	25, 28, 75, 81f
Strontium	8, 50, 52f
Szintigramm	68f

Taschendosimeter	38
Terrestrische Strahlung	64, 76
Thorium-Zerfallsreihe	56
Totzeit (Zählrohr).	34
Tschernobyl-Reaktorunfall	67, 69f, 76
Transportwege für radioaktive Stoffe	52
Triton	11
Tritium	11, 16, 53, 59, 89f
Überwachungsbereich	92
Umgebungsüberwachung	90
Umwandlungsschema	18f
Uran	8, 11, 15f, 18, 21, 39, 51, 55, 59, 61, 63, 65, 70, 72ff, 82f
Uran-Actinium-Zerfallsreihe	60f, 65
Uran-Radium-Zerfallsreihe	56, 60f, 65
Verzehrgewohnheiten	49, 69, 93
Verweilzeit von Radionukliden im Körper.	33, 53f
Verzögerungsstrecke	88f
Wasserstoff.	8ff, 16, 19, 26, 59, 73, 83, 89
Wasserstoff, schwerer	11, 19
Wasserstoff, überschwerer. .	11, 16, 53, 59, 89f
Wechselwirkungen. .	23ff, 28f, 31, 43, 60, 75, 80
Wellenstrahlung	14, 21
Zählrohr	34ff, 39
Zehntelwertschicht	82f
Zelle	32, 40ff, 51, 53, 68, 75
Zellkern.	41f, 44, 47
Zellteilung	42, 44, 46
Zerfall, radioaktiver	13ff, 18ff, 27, 33
Zerfallsreihe	55f, 60f, 63, 65, 73
Zerstrahlung	82
Zwischenkern	15, 72



DAtF | Kernenergie
im Dialog

Herausgeber:
Deutsches Atomforum e.V.
Robert-Koch-Platz 4
10115 Berlin

info@
www.kernenergie.de