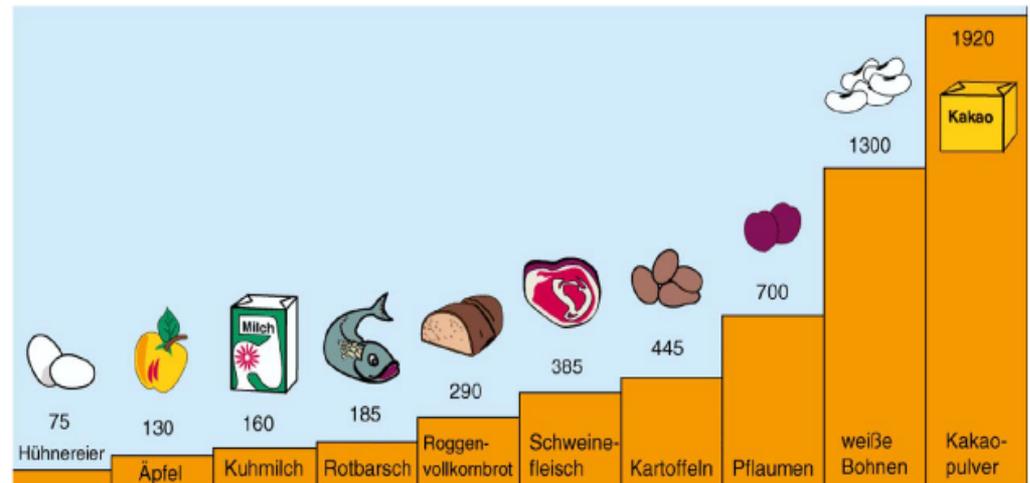


Begriffe

- Was ist „Strahlung“?
Sich ausbreitende Energie in Form von Teilchen oder elektromagnetischen Wellen/Photonen
- Was ist Radioaktivität?
Natürliche Eigenart bestimmter Materialien spontan Energie in Form von hochenergetischer und damit ionisierender Strahlung abzugeben
- Was ist ionisierende Strahlung?
Strahlung die von Atomen, mit denen sie wechselwirkt, Elektronen ablösen kann (typisch für hochenergetische Teilchen oder elektromagnetische Strahlung, UV-, X-Ray-, γ -Strahlung)
- Nicht-ionisierende Strahlung z.B. sichtbares Licht, Mikrowellen, Radiowellen

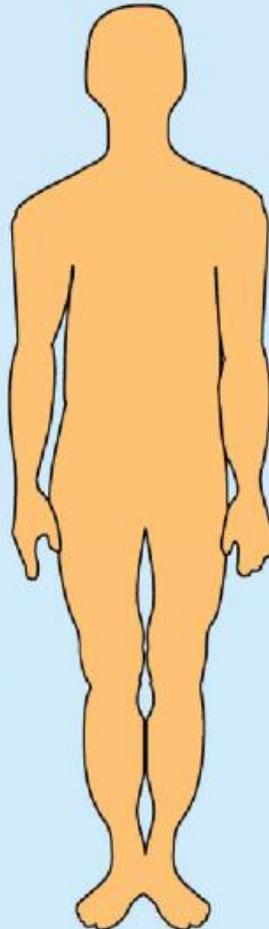
Natürliche Radioaktivität: Kalium

2 g Kalium pro kg Körpermasse bei Menschen sind lebensnotwendig, davon sind 0,0117% radioaktives ^{40}K , dieses verursacht etwa 4200 Bq im menschlichen Körper



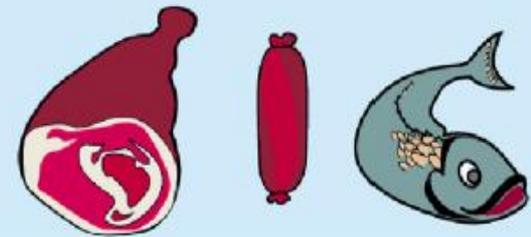
Natürliche Radioaktivität des Menschen

Radionuklid	Bq
^{40}K	4200
^{14}C	3800
^{87}Rb	650
$^{210}\text{Pb}, ^{210}\text{Bi}, ^{210}\text{Po}$	60
Rn + Zerfallsprod.	45
^3H	25
^7Be	25
Sonstige	10
Summe, ca.	9100



Standardmensch
20–30 Jahre
70 kg
ca. 9112 Bq

Mittelwert:
ca. 130 Bq / kg



Pflanzliche
und
tierische
Nahrungsmittel

Mittelwert:
ca. 40 Bq / kg

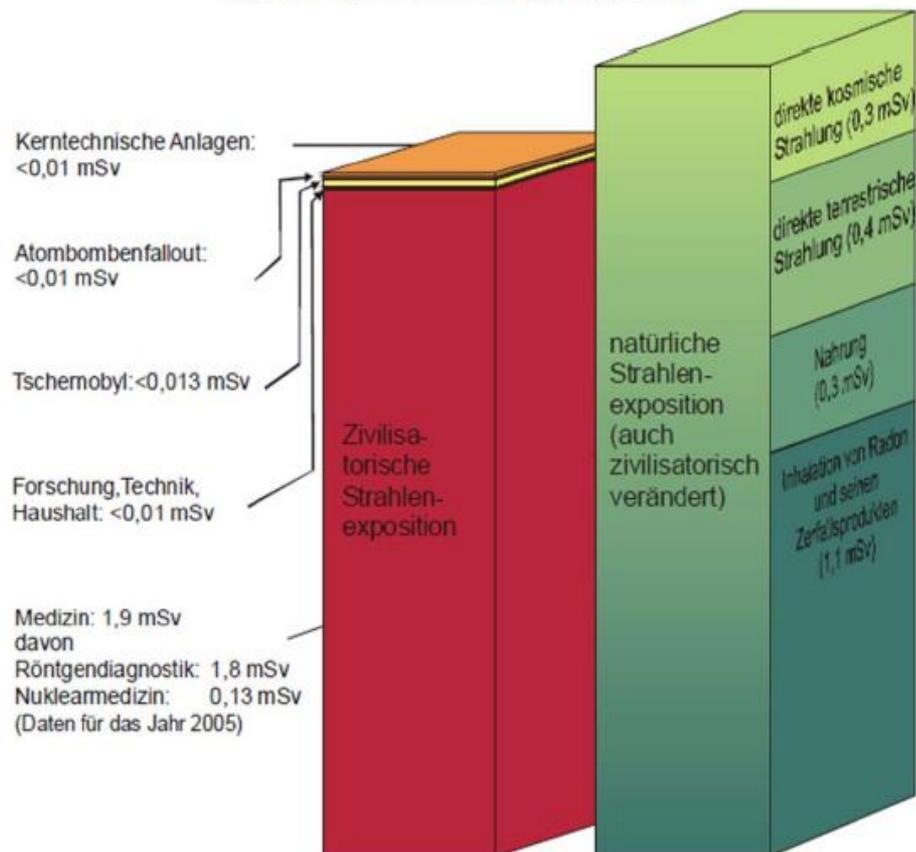


Vergleichswert:
15 944 Bq / kg

Extremwerte für einzelne Radionuklide:
Rentierleber (Winter) Paranüsse
 Po-210 Ra-226
bis 222 Bq / kg bis 132 Bq / kg

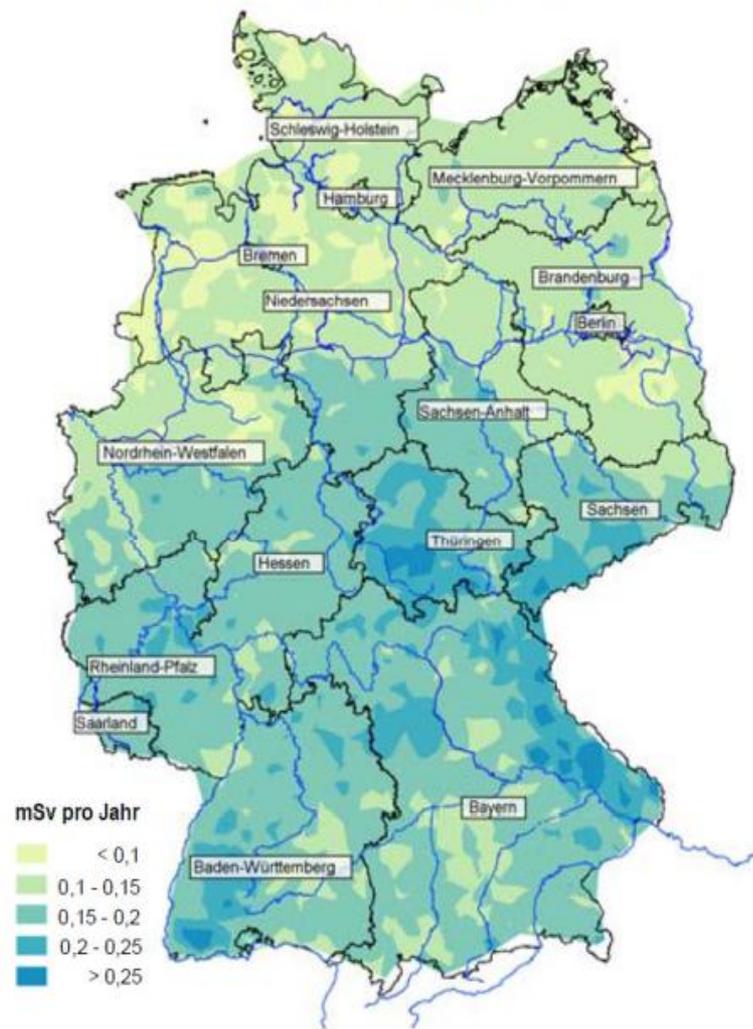
Uns umgebende Strahlendosis

Mittlere effektive Jahresdosis durch ionisierende Strahlung im Jahr 2007
(gemittelt über die Bevölkerung Deutschlands)



Mittlere Jahrespersonendosis beruflich strahlenexponierter Personen in Deutschland im Jahr 2007 in bestimmten Tätigkeitsbereichen

Externe Strahlenexposition im Jahr 2007 in Deutschland durch Aufenthalt von täglich 5 Stunden im Freien



Daten aus IMIS

Bundesamt für Strahlenschutz

Kennwerte

- **Aktivität** Anzahl zerfallender Kerne / s 1 Bq (Becquerel) = 1/s
- **Aktivitätskonzentration** Aktivität / Masse oder / Vol Bq/kg oder Bq/l
- **Energiedosis D** absorbierte Energie / Masse 1 Joule/kg=1 Gray (Gy)
- **Dosisleistung** absorbierte Energiedosis / s 1Gy/s

Da die ionisierende Wirkung verschiedener Strahlungsarten und unterschiedlicher Energien stark variiert, führt man einen Bewertungs- bzw. Qualitätsfaktor **q** ein, der dies berücksichtigt: (z.B. 1 Gy Alphastrahlung schädigt mehr als 1 Gy Röntgenstrahlung)

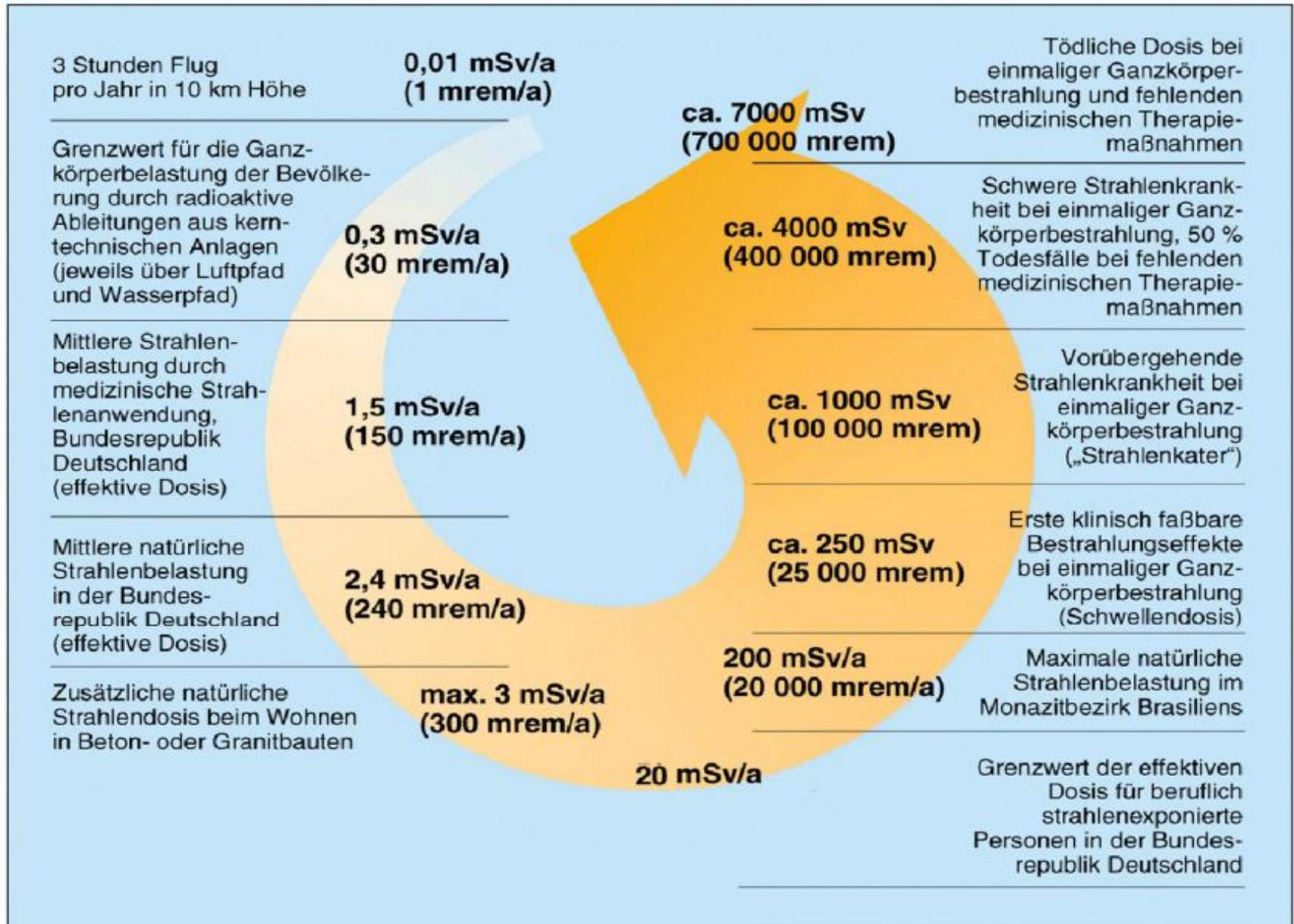
- **Äquivalentdosis** $H=q \cdot D$ 1 Sv (Sievert) = 1J/kg

- 0,1 Gy natürlich und angepasst, z.B. Fichtelgebirge > 1mSv/a, Radon-Bad etc
- 0,25 Sv Strahlenkrankheit / ab 4 Sv mit 50 % **Wahrscheinlichkeit tödlich** (entspricht der Aufheizung des Körpers um 0,001 Grad = Energieinhalt von 0,01 g Schokolade) / 7 Sv **Tod**

Strahlungswichtungsfaktoren q nach ICRP	
Photonen	1
Elektronen und Myonen	1
Neutronen	Eine stetige Funktion der Neutronen-E
Protonen	2
Alphateilchen, Spaltfragmente, Schwerionen	20

- **Äquivalentdosisleistung** Ä.-Dosis / Zeit Sv/Stunde, Sv/Jahr etc.
- **Effektive Dosis** berücksichtigt zusätzlich Empfindlichkeit bestimmter Organe

Strahlenwirkung auf den Menschen



Schadenstypen und nat. Strahlenexposition



Deterministische Strahlenschäden

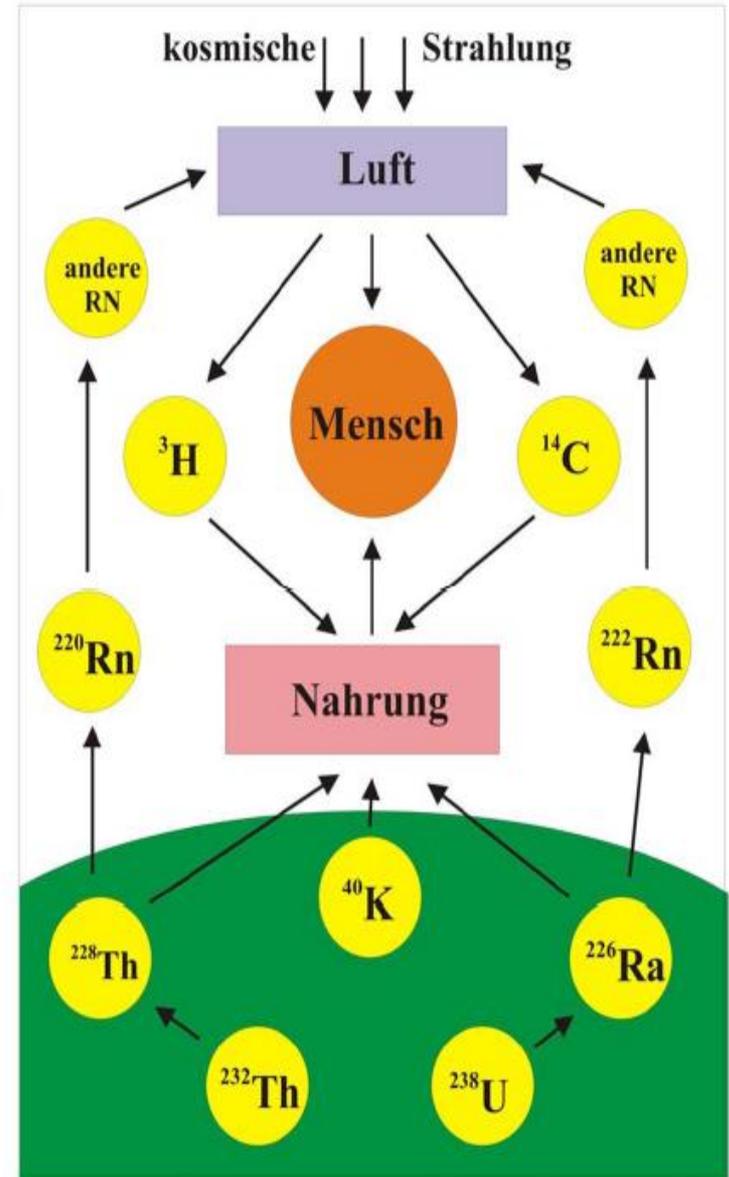
- unmittelbarer Schaden
- Schwere des Schadens abhängig von der Dosis
- Ursache: Abtötung von Zellen
- Schwellenwert (~250 mSv)

Haarausfall
Hautrötung
Blutbildveränderung
Tod
Übelkeit



Stochastische Strahlenschäden

- Spätschaden
- Schadensrisiko abhängig von der Dosis
- Ursache: Veränderung der Zellinformation



Dosis Mensch

Äquivalentdosis in Sievert	Symptome			Langzeitwirkung	erhöhtes Krebsrisiko
	nach 3h	nach 24h	nach 3d		
1	-	-	-	-	
2	Übelkeit	ev. Erbrechen		mehrere Wochen Arbeitsunfähigkeit	
4	Übelkeit, Erbrechen	Erbrechen	ev. Fieber, Durchfall	mehrere Monate Arbeitsunfähigkeit	
6	Schock, Apathie, Erbrechen	Erbrechen, ev. Fieber	Fieber, Erythem, Durchfall	Tod	



Zusammenfassung ionisierende Strahlung

- **Radioaktivität wirkt** über die ausgesandte Strahlung der α -, β - oder γ -Strahlung
- α - und β -Strahlung haben im Gewebe **kurze** Reichweiten
- γ -Strahlung **durchdringt Gewebe**
- Die relevante Größe ist die im Gewebe deponierte Energie (**Dosis**)
- α -Strahlung deponiert ihre Energie in einem kleinen Volumen; sie ist für das Gewebe damit **schädigender** als β - oder γ -Strahlung
- Es gibt „**natürliche**“ z. B. kosmische Strahlung und „**künstliche**“ **Quellen** (Medizin, radioaktive Abfälle aus Testreaktoren...) der Radioaktivität
- Über einen **Bewertungs- bzw. Qualitätsfaktor q** werden die verschiedenen Strahlungsarten zur Bestimmung der Äquivalentdosis gewichtet
- **Biologische Systeme** können bei nicht zu großer Strahlungsdosis „**positive**“ **Effekte** zeigen.
- Nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung und der Radioaktivität standen zunächst mehr die „biopositiven“ **Aspekt** im Vordergrund.
- Die Erzeugung **maligner Karzinome** wurde wegen der großen Latenzzeiten **erst später** offenbar.

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).

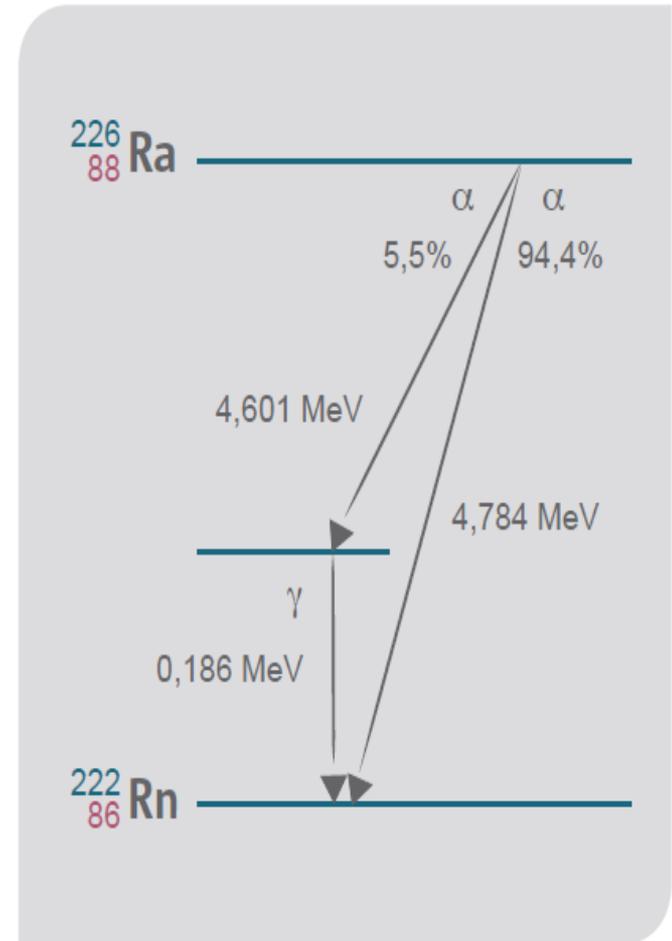
3.2.1 Energie von Alphateilchen

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



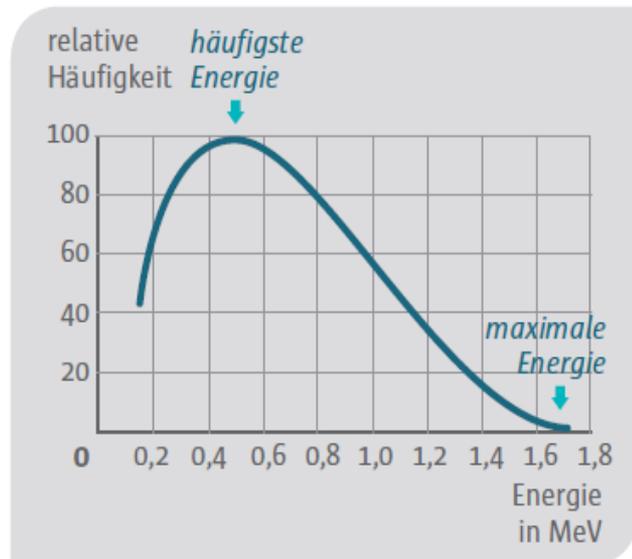
angeregten Kerns wird in Form eines Gammaquants abgegeben. Beispiele für die Energie von Alphateilchen einiger Radionuklide sind in Tab. 3.01 angegeben.

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



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, Umwandlungssche-

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).

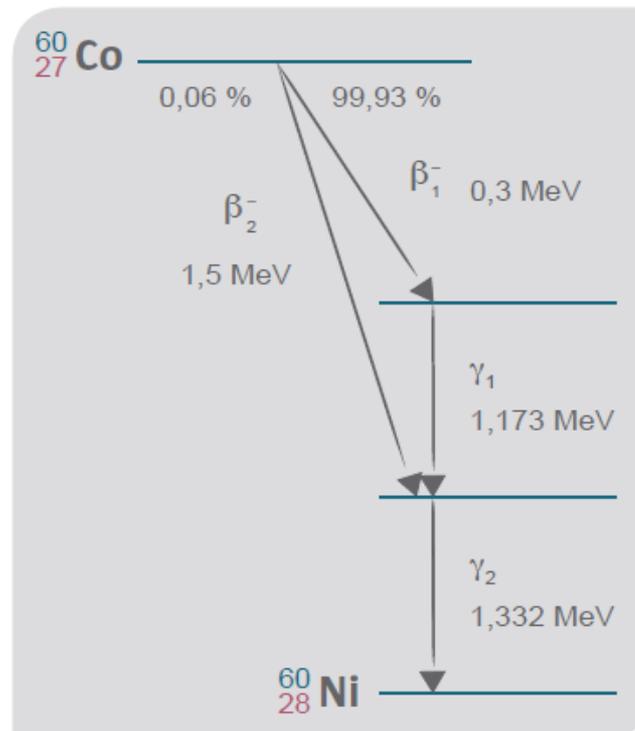


Abb. 3.03 (links)
Energieverteilung
beim Beta⁻-Zerfall des P-32

Abb. 3.04
Umwandlungsschema für Co-60,
vereinfacht

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

Abb. 3.08

Beziehung zwischen Frequenzen, Wellenlänge und Energie elektromagnetischer Wellen

3.5 Energie und Wellenlänge bei Röntgenstrahlen

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

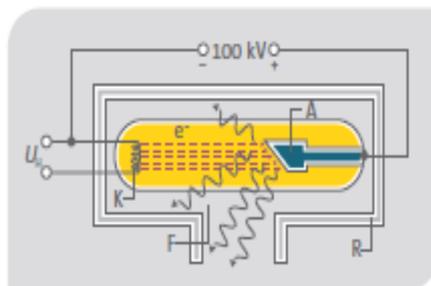


Abb. 3.11
Erzeugung von Bremsstrahlung durch Abbremsung eines Elektrons im elektrischen Feld eines Atoms (Modelldarstellung)

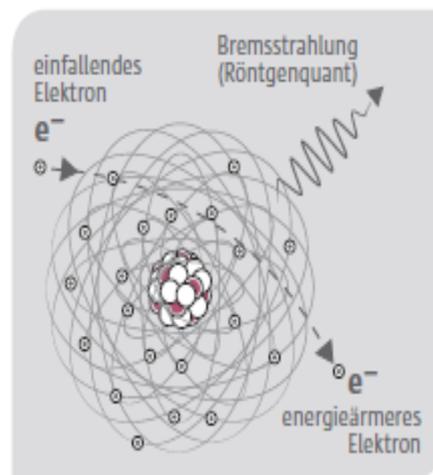
In einer Röntgenröhre entsteht überwiegend Röntgenbremsstrahlung. Ihre Entstehung kann man sich im Modell folgendermaßen vorstellen: Ein beschleunigtes Elektron dringt in ein Atom des Anodenmaterials ein und wird dabei ganz oder teilweise abgebremst. Die verloren gegangene Bewegungsenergie wird in Form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

Diese Quanten bilden die Röntgenbremsstrahlung mit kontinuierlicher Energieverteilung (Abb. 3.12). Je höher die Beschleunigungsspannung ist, desto mehr Röntgenquanten 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

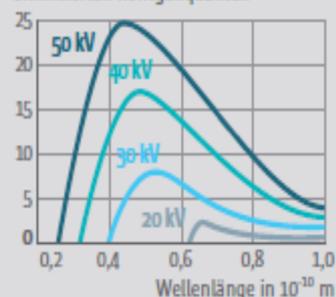
Abb. 3.12
Röntgenbremspektren bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen

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).

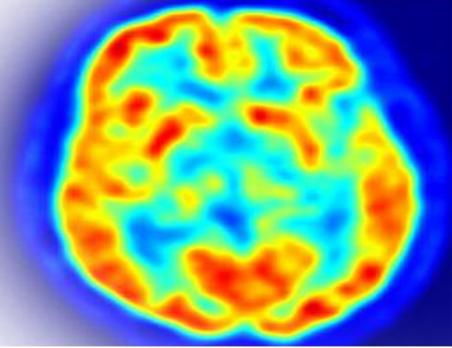


relative Anzahl der emittierten Röntgenquanten



PET

Positronen-Emissions-Tomographie



Bilder durch Strahlung

Bei der PET bekommt man als Patient ein radioaktives Arzneimittel. Dieses zerfällt im Körper. Die freiwerdende Strahlung wird gemessen. So können Bilder erzeugt werden. Für Patienten ist die Strahlenbelastung vergleichsweise gering.



Eine PET/CT-Aufnahme des Brustkorbs: Ein hellgelb leuchtender Fleck im rechten oberen Lungenlappen deutet auf einen Tumor hin. ©Molecular Imaging/DKFZ

Was ist das CyberKnife® System?

Das robotergesteuerte Radiochirurgiesystem CyberKnife® ist bei der Behandlung von Tumoren in allen Körperregionen eine erprobte Alternative zur operativen Therapie.

Die Behandlung – bei der hohe Strahlendosen äußerst gezielt an die Tumoren abgegeben werden – bietet neue Hoffnung für Patienten, die inoperable oder schwer zu operierende Tumoren haben oder die eine Alternative zur Operation suchen.

Das CyberKnife-System verwendet Bildführung und computergesteuerte Robotik zur Abgabe mehrfacher hochenergetischer Strahlenbündel an den Tumor aus fast jeder Richtung. Das CyberKnife-System ist darauf ausgelegt, Tumoren in jeder Körperregion submillimetergenau zu bestrahlen. Es ortet den Tumor und die Patientenbewegungen und korrigiert automatisch die Strahlenabgabe. Dieses Verfahren erfordert weder Betäubung noch invasive Stabilisierungsrahmen.

Die Vorteile für Patienten

Die meisten Patienten brauchen nur eine sehr geringe Erholungszeit und können fast sofort nach der Behandlung ihren gewohnten Aktivitäten nachgehen.

Weitere Vorteile für den Patienten:

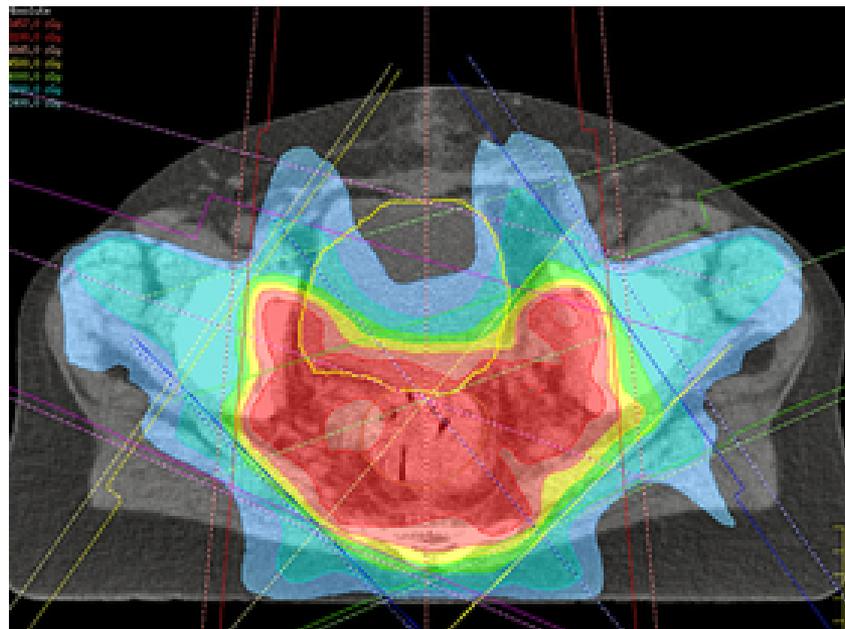
- schmerzfrei
- nicht invasiv
- keine Betäubung
- keine invasiven Kopf- oder Körperrahmen
- kein Atemanhalten während der Behandlung
- hohe Präzision der Bestrahlung
- automatische Verfolgung des Tumors durch das Bestrahlungsgerät auch bei Bewegungen des Patienten
- sofortige Rückkehr in den Alltag



Das CyberKnife®-System
(Computergrafik)

Intensitätsmodulierte Strahlentherapie

Durch immer bessere Gerätetechnik und hochpräzise und schnelle Blendensysteme ist es heute möglich die Form des Bestrahlungsfeldes während der Bestrahlung ständig zu ändern. D.h. die Intensität der Strahlung kann räumlich verändert werden (Intensitätsmodulation). Dadurch kann die Strahlenmenge (Dosis) optimal an geometrisch komplizierte Formen angepasst werden. Im Prinzip handelt es sich um eine Bestrahlung aus vielen Raumrichtungen und gleichzeitig wird der Strahl aus jeder Richtung in viele kleine Bestrahlungsfelder zerlegt. So werden heute ohne weiteres Bestrahlungen mit über 50 Bestrahlungsfeldern durchgeführt. Im Vergleich dazu waren bis vor kurzem 3- bis 6-Felder-Techniken üblich.



Das Bild zeigt eine IMRT-Planung und demonstriert, wie durch viele Bestrahlungsrichtungen und viele vom Computer optimierte Bestrahlungsfelder pro Bestrahlungsrichtung eine optimale Dosisanpassung erreicht wird. Der rote Bereich entspricht dem Zielvolumen, das eine hohe Dosis erhalten soll, die grünen und blauen Areale erhalten eine deutlich niedrigere Dosis. Entsprechend wird dort gesundes Gewebe optimal geschont.

Ionenstrahlen im Kampf gegen Krebs

Am GSI



Helmholtzzentrum wurde eine bahnbrechende neue Krebstherapie entwickelt. Grundlage hierfür waren langjährige Forschungsarbeiten und die große Beschleunigeranlage für Ionenstrahlen des GSI.

Mit großem Erfolg wurden bei GSI von 1997 bis 2008 über 440 Patienten mit Tumoren im Kopf- und Halsbereich mit Ionenstrahlen behandelt. Der Vorteil der neuen Therapie liegt darin, dass der Ionenstrahl seine größte Wirkung im Tumor erzielt und das umliegende gesunde Gewebe schont.

