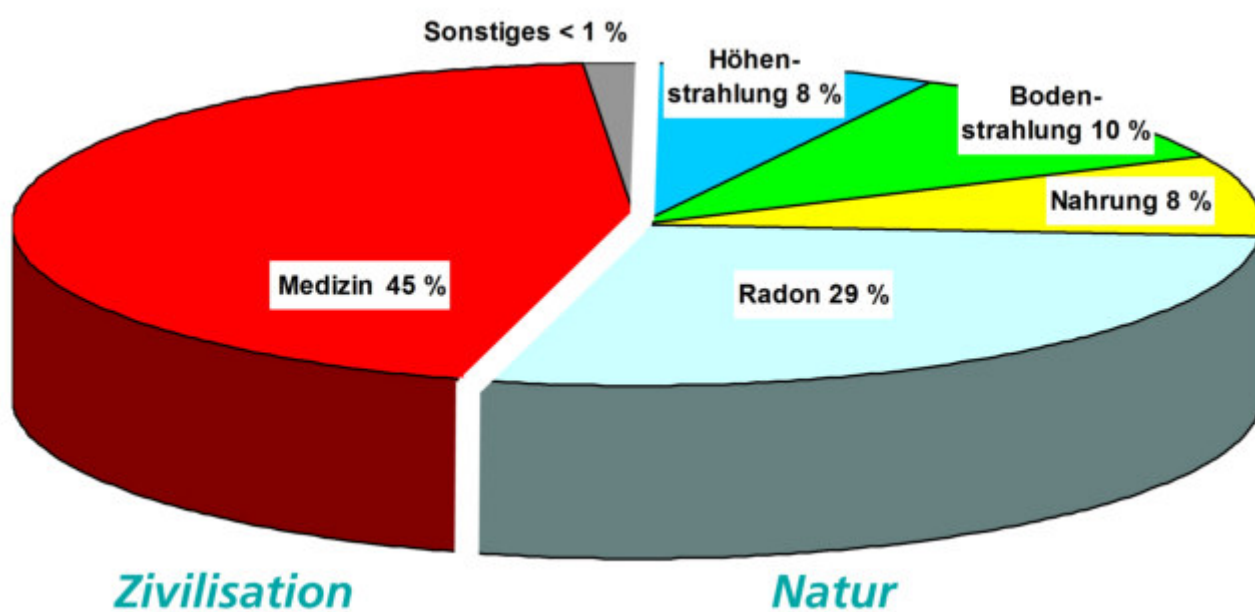


# Natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition des Menschen in Deutschland

Winfried Koelzer



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Externe Strahlenexposition</b>	<b>1</b>
1.1.1	Kosmische Strahlung	1
1.1.2	Terrestrische Strahlung	3
<b>1.2</b>	<b>Interne Strahlenexposition</b>	<b>7</b>
1.2.1	Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide	7
1.2.1.1	Kalium-40	7
1.2.1.2	Uran- und Thorium-Zerfallsreihen	7
1.2.1.3	Radon	7
1.2.2	Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide	8
1.2.2.1	Tritium	8
1.2.2.2	Beryllium-7	9
1.2.2.3	Kohlenstoff-14	9
1.2.2.4	Natrium-22	9
<b>1.3</b>	<b>Strahlendosis durch Sonnen-Neutrinos und Neutrinos aus der Erde</b>	<b>9</b>
1.3.1	Solare Neutrinos	9
1.3.2	Geo-Neutrinos	10
<b>1.4</b>	<b>Zusammenfassung: Natürliche Strahlenexposition</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>ZIVILISATORISCHE STRAHLENEXPOSITION</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Strahlenexposition in der Medizin</b>	<b>11</b>
2.1.1	Röntgendiagnostik	11
2.1.2	Nuklearmedizinische Diagnostik	14
<b>2.2</b>	<b>Radioaktivität in Industrieprodukten</b>	<b>15</b>
2.2.1	Tabak	15
2.2.2	Leuchtzifferblätter	15
2.2.3	Phosphat-Industrie	15
<b>2.3</b>	<b>Strahlenexposition bei Flügen und Raumflügen</b>	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen</b>	<b>18</b>
2.4.1	Einleitung	18
2.4.2	Uranbergbau und Uranerzaufbereitung	19
2.4.3	Urananreicherung und Brennelementherstellung	20
2.4.4	Kernkraftwerke	20
2.4.5	Wiederaufarbeitung	22
2.4.6	Zusammenfassung: Strahlenexpositionen aus kerntechnischen Anlagen	22
<b>2.5</b>	<b>Strahlenexposition durch fossile Energieträger zur Stromerzeugung</b>	<b>23</b>
2.5.1	Kohle	23
2.5.2	Erdöl	24
2.5.3	Erdgas	24
2.5.4	Reduktion der Strahlenexposition durch fossile Energieträger	24
2.5.5	Zusammenfassung: Strahlenexposition durch fossile Energieträger	24
<b>2.6</b>	<b>Strahlenexposition durch Kernwaffenexplosionen</b>	<b>25</b>
<b>2.7</b>	<b>Strahlenexposition durch Unfälle</b>	<b>26</b>
2.7.1	Unfälle in Kernkraftwerken	26
2.7.1.1	Windscale	26
2.7.1.2	Harrisburg	26
2.7.1.3	Tschernobyl	27
2.7.1.4	Fukushima	28
2.7.2	Satellitenabstürze, Unfälle in kerntechnischen Anlagen und mit radioaktiven Quellen	30
2.7.2.1	Satellitenabstürze	30
2.7.2.2	Unfälle in kerntechnischen Anlagen	30
2.7.2.3	Unfälle mit radioaktiven Quellen und Bestrahlungsanlagen	30
<b>3</b>	<b>BERUFLICHE STRAHLENEXPOSITION IN DEUTSCHLAND</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Überwachung mit Personendosimetern – Medizin und Technik</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Dosisüberwachung des fliegenden Personals</b>	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Arbeitsplätze mit erhöhter Exposition durch natürliche Strahlenquellen</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG: STRAHLENEXPOSITION DES MENSCHEN</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>37</b>

# 1 NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION

## 1.1 Externe Strahlenexposition

### 1.1.1 Kosmische Strahlung

Die energiereiche Strahlung, die aus dem Weltraum kommend in die Erdatmosphäre eindringt, bezeichnet man als primäre kosmische Strahlung oder primäre Höhenstrahlung, die entsprechend ihrem Entstehungsort in eine galaktische und eine solare Komponente unterteilt wird. Die galaktische Strahlung besteht überwiegend aus sehr energiereichen Protonen, einem rund fünfprozentigen Anteil von Heliumkernen und einem sehr viel kleineren Anteil von schweren Kernen, zusätzlich auch Photonen und Elektronen. Das Energiespektrum der Protonen reicht von wenigen Millionen Elektronvolt (MeV) bis zu mehr als  $10^{14}$  MeV mit einem Intensitätsmaximum bei  $10^2$  bis  $10^5$  MeV.

Die Protonenenergien der solaren Komponente der kosmischen Strahlung liegen überwiegend unter 100 MeV. Das Magnetfeld der Erde lenkt insbesondere die niederenergetischen geladenen Primärteilchen zurück in den Weltraum. Dieser Effekt ist abhängig von der geomagnetischen Breite, daher ist die Flussdichte der Protonen und anderer Kerne am äußeren Rand unserer Atmosphäre an den magnetischen Polen größer als in der Äquatorregion.

Wechselwirkungsprozesse mit Atomkernen in den hohen Atmosphärenbereichen führen zu Sekundärteilchen und elektromagnetischer Strahlung, die zusammen die sogenannte sekundäre kosmische Strahlung bilden. Die Strahlenexposition durch die sekundäre kosmische Strahlung wird in Meereshöhe überwiegend durch Myonen bewirkt (Abb. 1) [1].

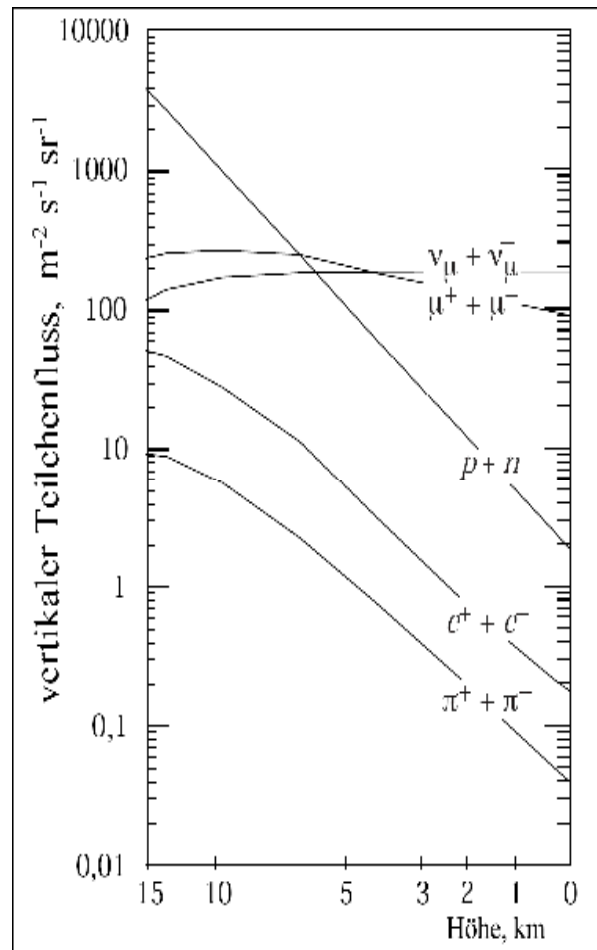
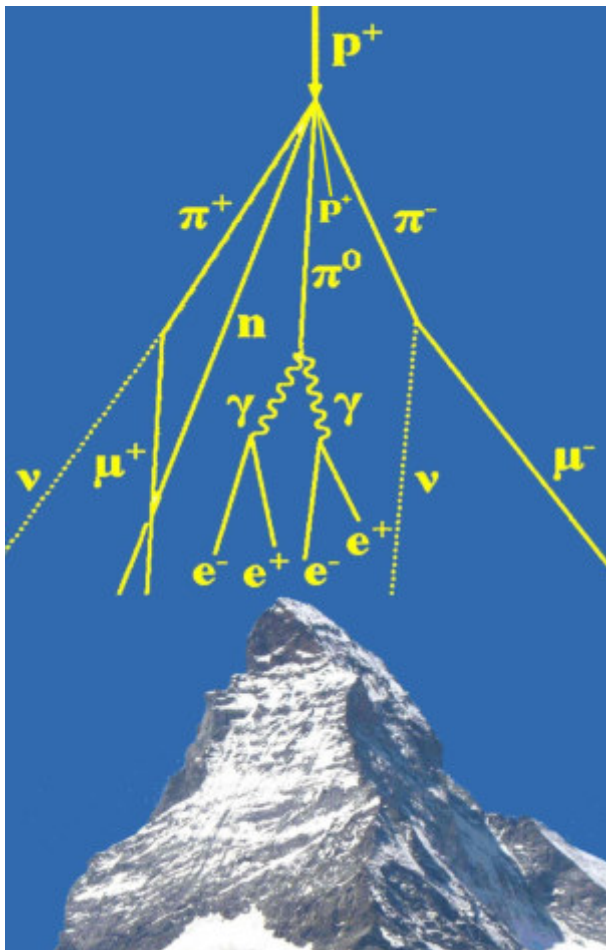


Abb. 1 Sekundäre kosmische Strahlung und Flussdichte deren Anteile als Funktion der Höhe

Die Breitenabhängigkeit der von der ionisierenden Komponente (überwiegend Myonen, Elektronen, Pionen und Photonen) der kosmischen Strahlung hervorgerufenen Dosis in Meereshöhe ist gering. In äquatorialen Breiten ist ihr Dosisbeitrag etwa 10 % geringer als in polaren geomagnetischen Breiten. Es besteht allerdings eine ausgeprägte Höhenabhängigkeit; entspricht doch die abschirmende Wirkung der Atmosphäre einer 10 m dicken Wasserschicht.

In einer geographischen Breite von 50° beträgt die Dosisleistung durch die ionisierende Komponente der kosmischen Strahlung in Meereshöhe im Freien 32 nSv/h. Bei der Berechnung der effektiven Jahresdosis wird üblicherweise ein Aufenthaltsanteil von 20 % im Freien und 80 % in Häusern mit einer Abschirmung von 20 % durch die Gebäude angenommen. Damit ergibt sich eine effektive Jahresdosis durch die ionisierende Komponente von 0,23 mSv.

Die Zunahme der Dosisleistung der ionisierenden Komponente mit der Höhe lässt sich bis zu Höhen von einigen Kilometern nach der folgenden Formel berechnen (UNSCEAR 2008 Vol I, S. 231 [2]):

$$E_{ion}(h) = E_{ion}(0) \cdot [0,21 \cdot e^{-1,649 h} + 0,79 e^{0,4528 h}].$$

Dabei ist  $E_{ion}(0)$  die Dosisleistung der ionisierenden Komponente in Meereshöhe und  $h$  die Höhe in km.

Der Dosisbeitrag durch die Neutronenkomponente der kosmischen Strahlung hat gegenüber der ionisierenden Komponente eine ausgeprägtere Breitenabhängigkeit und eine größere Höhenabhängigkeit. In Meereshöhe beträgt die Neutronendosisleistung in Breiten von 0° – 20° 3,7 nSv/h, bei 30° – 40° 5,3 nSv/h. Bei einer Breite von 50° beträgt sie bereits 9 nSv/h und bei 70° – 90° Breite 11 nSv/h. Die Höhenabhängigkeit des Dosisbeitrags durch die Neutronenkomponente lässt sich mit folgenden Formeln abschätzen [3]:

$$E_N(h) = E_N(0) \cdot e^{1,04 h} \quad \text{für } h < 2 \text{ km,}$$

$$E_N(h) = E_N(0) \cdot 1,98 \cdot e^{0,698 h} \quad \text{für } h > 2 \text{ km.}$$

$E_N(0)$  ist die Neutronendosisleistung in Meereshöhe und  $h$  die Höhe in km

In Meereshöhe und einer geographischen Breite von 50° folgt daraus - Aufenthaltsanteil von 20 % im Freien und 80 % in Häusern, Abschirmung von 20 % durch Gebäude - durch die Neutronenkomponente eine effektive Jahresdosis von 0,07 mSv.

Entsprechend den obigen Formeln steigt der Anteil der ionisierenden Komponente an der gesamten effektiven Dosis bei zunehmender Höhe langsamer an als der Anteil durch die Neutronenkomponente. Für eine geographische Breite von 50° und 500 m Meereshöhe errechnet sich für die ionisierende Komponente eine effektive Jahresdosis 0,25 mSv und für die Neutronenkomponente 0,11 mSv (bei diesen und den folgenden Angaben wurde der Aufenthaltsanteil im Freien und in Häusern und deren Abschirmung berücksichtigt); für 1000 m entsprechend 0,30 mSv und 0,18 mSv. Ständiger Aufenthalt auf der Zugspitze führt zu einer effektiven Jahresdosis von 1,8 mSv - davon 0,7 mSv durch die ionisierende und 1,1 mSv durch die Neutronenkomponente. Den Dosisanstieg mit der Höhe für eine Breite von 50° zeigt die Abb. 2.

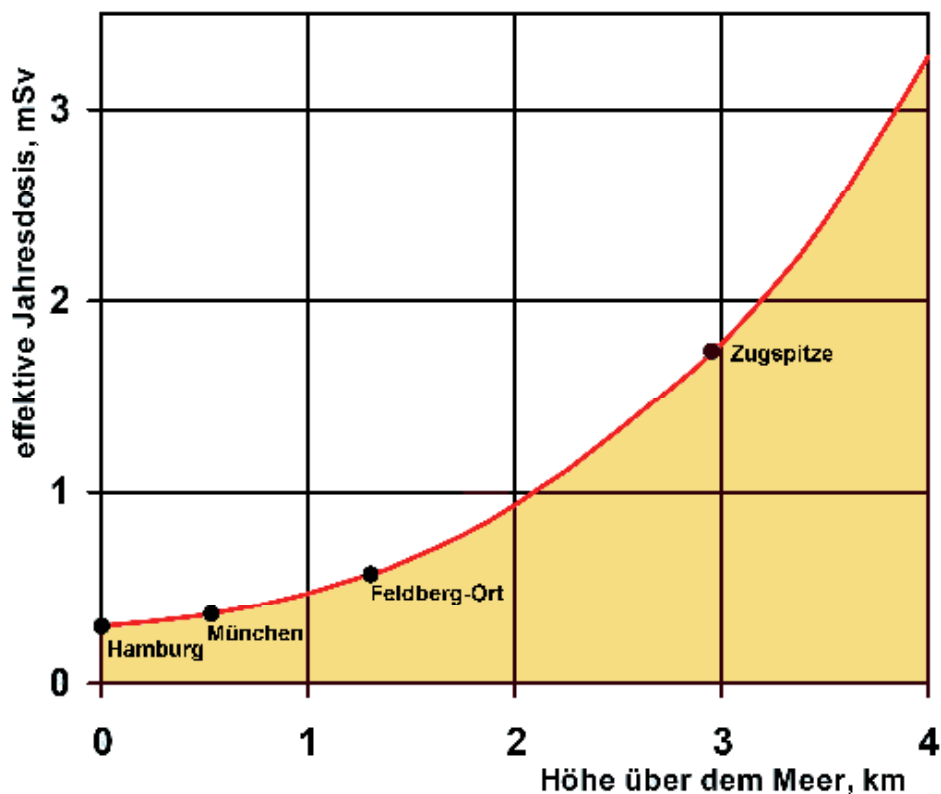


Abb. 2 Dosisleistung durch kosmische Strahlung, 50° geogr. Breiten

UNSCEAR hat unter Berücksichtigung der Verteilung der Weltbevölkerung nach geographischer Breite, Aufenthaltshöhe und Abschirmung durch Gebäude einen Mittelwert der effektiven Jahresdosis pro Person von 0,38 mSv errechnet. Die Jahresdosen für Einzelpersonen liegen dabei im Bereich von 0,3 bis über 3 mSv.

Die Abb. 3 enthält Daten der kosmischen Strahlenexposition für einige hochgelegene Städte.

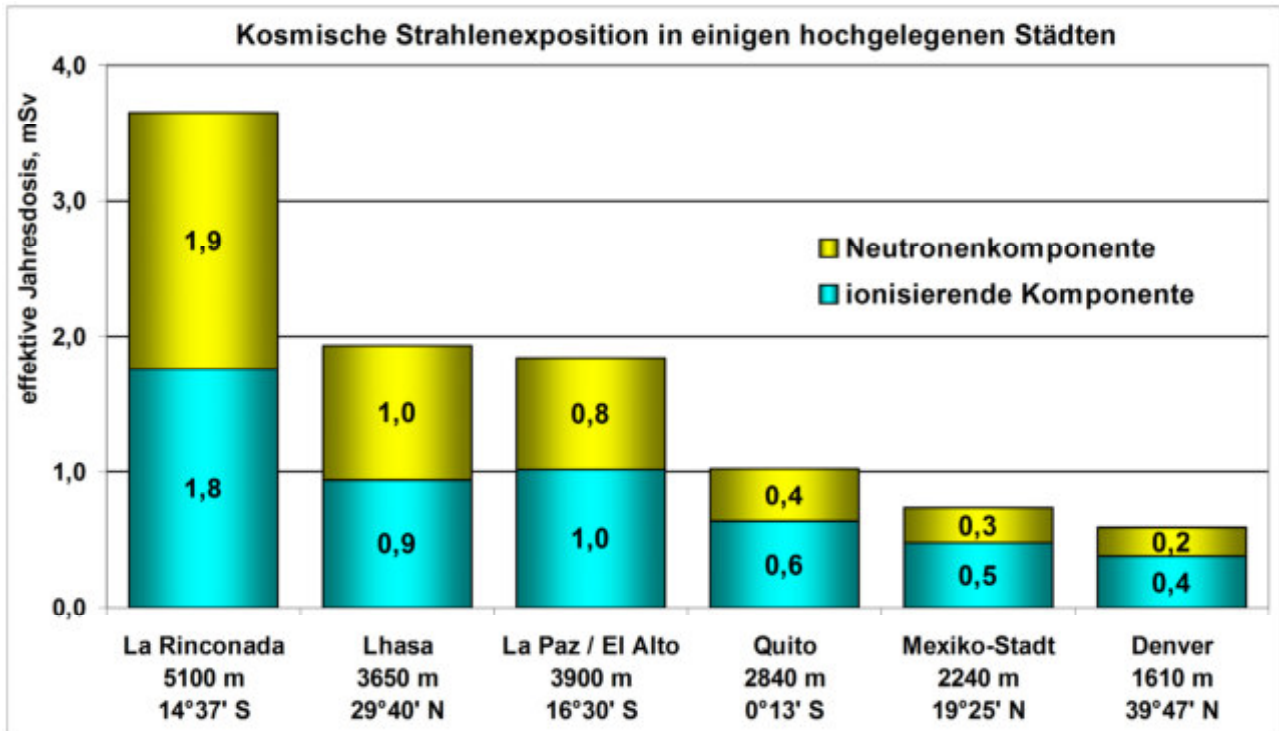


Abb. 3 Kosmische Strahlenexposition in hochgelegenen Städten, Aufenthalt: 20 % im Freien und 80 % in Gebäuden mit 20 % Abschirmung

Kurzzeitig erhöhte Dosisleistungen können insbesondere in größeren Höhen infolge starker Sonneneruptionen auftreten. Die Abb. 4 zeigt die Zunahme der Ortsdosisleistung während erhöhter Sonnenaktivität im September 1989, bei der hochenergetische Teilchen (SEP: Solar Energetic Particles) emittiert wurden [4].

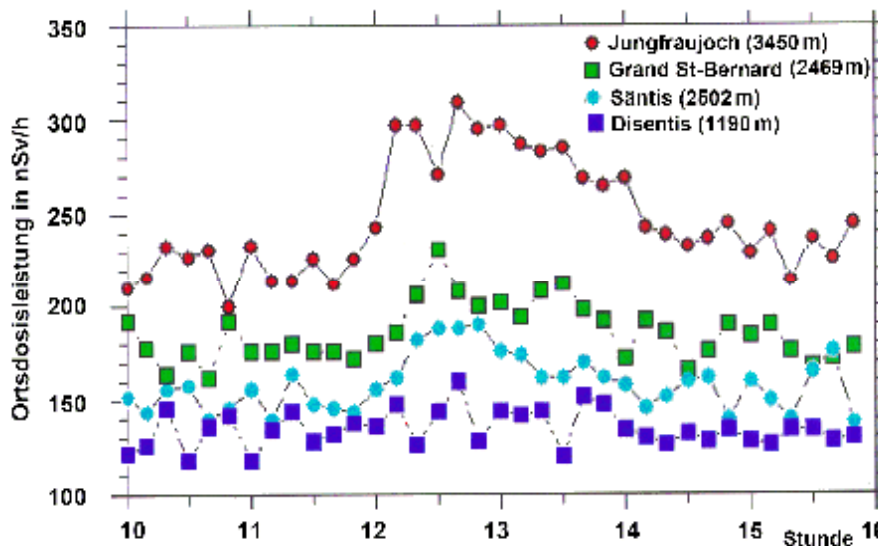


Abb. 4 Erhöhte Sonnenaktivität am 29.9.1989 und deren Einfluss auf die Ortsdosisleistung [4]

### 1.1.2 Terrestrische Strahlung

Die Erdkruste enthält in regional großer Variation natürlich radioaktive Stoffe. Die beim Zerfall emittierten ionisierenden Strahlen wird terrestrische Strahlung genannt. Viele der natürlich radioaktiven Stoffe entstammen einer der drei Zerfallsreihen, deren Anfangsglieder Uran-238 (Abb. 5), Uran-235 (Abb. 6) und Thorium-232 (Abb. 7) eine gegenüber der Zeit seit der Entstehung der Elemente lange Halbwertszeit besitzen.

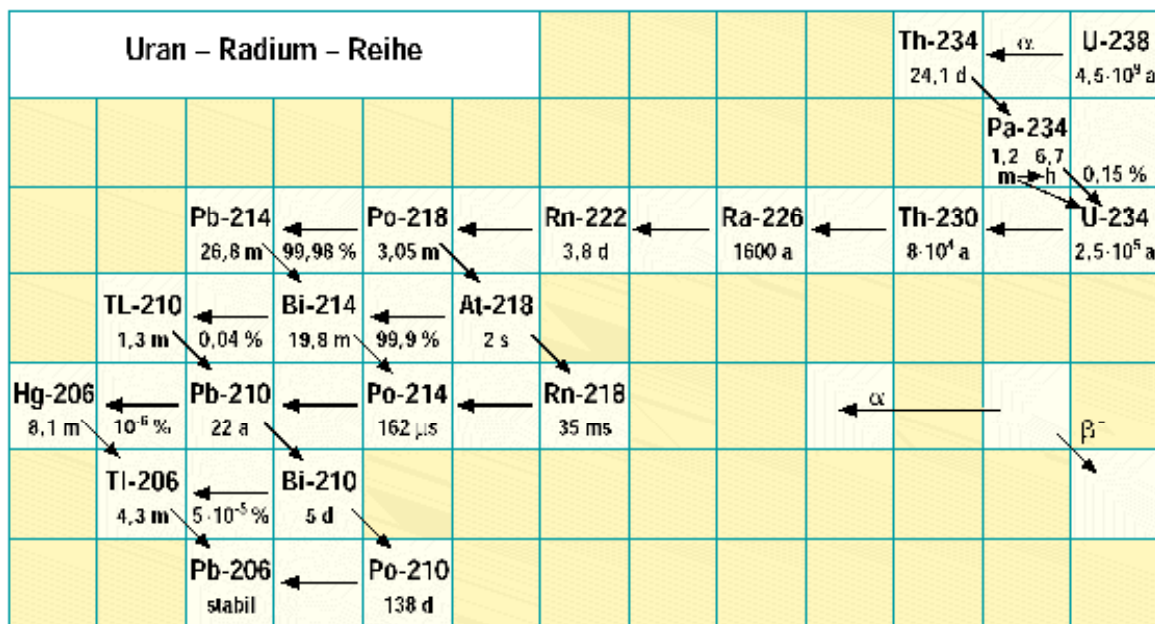


Abb. 5 Uran-Radium-Reihe

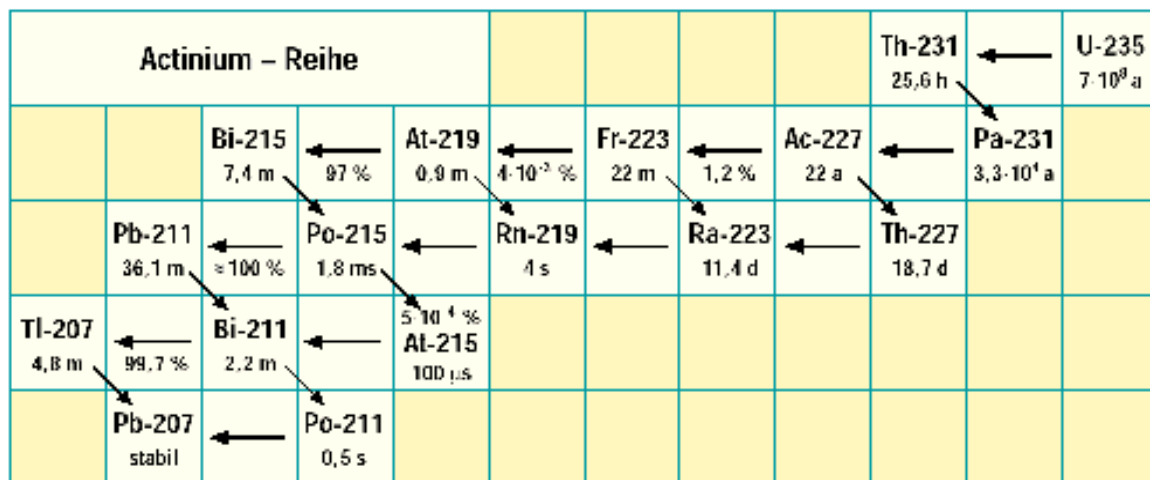


Abb. 6 Actinium-Reihe

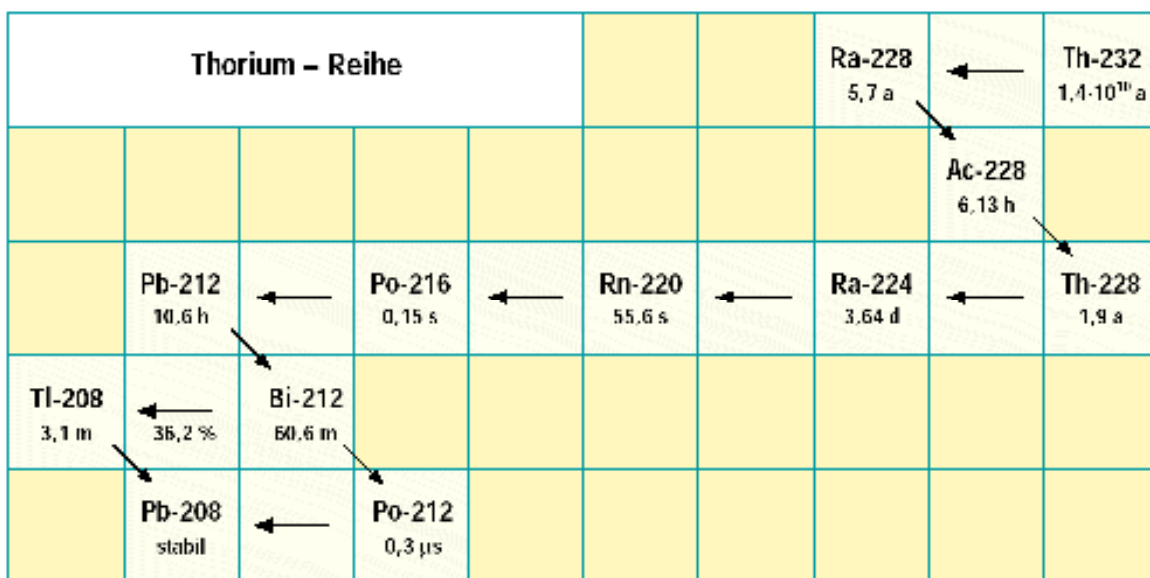


Abb. 7 Thorium-Reihe

Neben den 47 Radionukliden, die einer der drei Zerfallsreihen angehören, gibt es 40 primordiale ("von Anfang an" vorhandene) Radionuklide mit zum Teil extrem langen Halbwertszeiten (Tab. 1) {Daten: LiveChart of nuclides, IAEA; Karlsruher Nuklidkarte, 9. Aufl. 2015}. Von den primordialen Nukliden außerhalb von Zerfallsreihen kommt insbesondere dem Kalium-40 bezüglich der Strahlenexposition des Menschen Bedeutung zu.

Nuklid	Halbwertszeit, Jahre	Nuklid	Halbwertszeit, Jahre	Nuklid	Halbwertszeit, Jahre	Nuklid	Halbwertszeit, Jahre
K-40	$1,3 \cdot 10^9$	Cd-113	$8,0 \cdot 10^{15}$	La-138	$1,0 \cdot 10^{11}$	Lu-176	$3,8 \cdot 10^{10}$
Ca-48	$1,9 \cdot 10^{19}$	Cd-116	$2,8 \cdot 10^{19}$	Ce-136	$7,0 \cdot 10^{13}$	Hf-174	$2,0 \cdot 10^{15}$
V-50	$1,4 \cdot 10^{17}$	In-115	$4,4 \cdot 10^{14}$	Ce-138	$9,0 \cdot 10^{13}$	Ta-180	$1,2 \cdot 10^{15}$
Cr-50	$1,3 \cdot 10^{18}$	Te-123	$9,2 \cdot 10^{16}$	Ce-142	$5,0 \cdot 10^{16}$	W-180	$1,8 \cdot 10^{18}$
Zn-70	$3,8 \cdot 10^{18}$	Te-128	$7,7 \cdot 10^{24}$	Nd-144	$2,3 \cdot 10^{15}$	W-183	$6,7 \cdot 10^{20}$
Ge-76	$1,5 \cdot 10^{21}$	Te-130	$6,8 \cdot 10^{20}$	Nd-150	$9,1 \cdot 10^{18}$	Re-187	$4,3 \cdot 10^{10}$
Se-82	$9,2 \cdot 10^{19}$	Xe-124	$1,6 \cdot 10^{14}$	Sm-147	$1,1 \cdot 10^{11}$	Os-184	$5,6 \cdot 10^{13}$
Rb-87	$5,0 \cdot 10^{10}$	Xe-134	$5,8 \cdot 10^{22}$	Sm-148	$7,0 \cdot 10^{15}$	Os-186	$2,0 \cdot 10^{15}$
Zr-96	$2,3 \cdot 10^{19}$	Xe-136	$2,2 \cdot 10^{21}$	Eu-151	$1,7 \cdot 10^{18}$	Pt-190	$6,5 \cdot 10^{11}$
Mo-100	$7,3 \cdot 10^{18}$	Ba-132	$3,0 \cdot 10^{21}$	Gd-152	$1,1 \cdot 10^{14}$	Bi-209	$1,9 \cdot 10^{19}$

Tab. 1 Primordiale Radionuklide außerhalb der Zerfallsreihen

Die Strahlenexposition im Freien ist von der jeweiligen spezifischen Aktivität im Boden abhängig. Generell ist der Radioaktivitätsgehalt im Urgestein höher als in Sedimentgestein, wobei allerdings manche Schiefer ähnlich hohe spezifische Aktivitäten aufweisen wie Granit (Tab. 2).

Gesteinsart	typische spezifische Aktivität in Bq/kg		
	K-40	Th-232	Ra-226
Granit	1000	120	100
Tuff	1000	100	100
Gneis	900	45	75
Sandstein	500	25	20
Basalt	270	30	25
Kalkstein	90	5	25

Tab. 2 Typische spezifische Aktivitäten in Gesteinen

Infolge des geologischen Untergrundes und insbesondere durch die obersten Bodenschichten bedingt sind die Werte der terrestrischen Strahlung von Ort zu Ort sehr unterschiedlich. Bei einer in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 1972 bis 1974 durchgeführten Untersuchung [5] variierten die Messwerte im Freien von 0,03 bis 3 mSv pro Jahr. Dabei lagen für 80 % der Bevölkerung die Werte zwischen 0,2 und 0,5 mSv pro Jahr, 1 % der Bevölkerung war einer Exposition oberhalb 1 mSv pro Jahr ausgesetzt.

Um diese Ergebnisse auf Gesamtdeutschland ausweiten zu können, wurden in den Jahren 1994 bis 1996 Messungen der Ortsdosisleistung im Freien für das Gebiet der neuen Bundesländer durchgeführt. Die Ergebnisse beider Messkampagnen sind in Tab. 3 als Mittelwerte der effektiven Jahresdosis bei einem Daueraufenthalt im Freien zusammengefasst. Als Mittelwert für Deutschland erhält man für die terrestrische Strahlenexposition im Freien einen Wert für die jährliche effektive Dosis von 0,35 mSv.

Das zum Hausbau verwendete Baumaterial hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die durch natürlich radioaktive Stoffe hervorgerufene externe Strahlendosis. In der Bundesrepublik Deutschland wurde in den 1970er Jahren zur Ermittlung dieses Anteils ein umfassendes Messprogramm durchgeführt.

Zwar wirken Decken und Wände eines Gebäudes einerseits als Abschirmung gegenüber der Strahlung im Freien, andererseits kann der natürliche Radioaktivitätsgehalt in Baustoffen zu einer zusätzlichen externen Strahlenexposition führen. Der gewichtete Mittelwert der dadurch verursachten jährlichen effektiven Dosis in Häusern liegt bei 0,42 mSv, also um rund 20 % höher als im Freien. Tab. 4 gibt den zusätzlichen Betrag der effektiven Jahresdosis in Häusern für einige wichtige Baustoffe an.

Bundesland	effektive Jahresdosis durch terrestrische Strahlung, mSv	Bundesland	effektive Jahresdosis durch terrestrische Strahlung, mSv
Baden-Württemberg	0,38	Niedersachsen	0,29
Bayern	0,42	Nordrhein-Westfalen	0,36
Berlin	0,19	Rheinland-Pfalz	0,42
Brandenburg	0,18	Saarland	0,49
Bremen	0,26	Sachsen	0,35
Hamburg	0,35	Sachsen-Anhalt	0,27
Hessen	0,37	Schleswig-Holstein	0,32
Mecklenburg-Vorpommern	0,22	Thüringen	0,39

Tab. 3 Ländermittelwerte der effektiven Jahresdosis durch die terrestrische Strahlung im Freien

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

Tab. 4 Einfluss der Baumaterialien auf die Exposition in Wohngebäuden, Deutschland

Berücksichtigt man einen Aufenthalt von 20 % im Freien und 80 % in Häusern, so errechnet sich die mittlere jährliche effektive Dosis der Bevölkerung in Deutschland durch die terrestrische Strahlung zu 0,41 mSv (0,07 mSv durch den Aufenthalt im Freien und 0,34 mSv durch den Aufenthalt in Gebäuden). UNSCEAR (Report 2008 Vol I [2]) hat für die Weltbevölkerung als Durchschnittswert der jährlichen effektiven Dosis durch die terrestrische Strahlung 0,48 mSv ermittelt.

In einigen Gebieten der Erde sind infolge höherer Konzentrationen natürlich radioaktiver Stoffe die Strahlendosen wesentlich größer (Tab. 5). So z. B. an einem etwa 250 km langen Streifen an der indischen Süd- und Südwestküste in Tamil Nadu und Kerala. Die Ablagerungen dort sind reich an Monazitsanden, die zum Teil viel Thorium enthalten. Messungen mit Thermolumineszenzdosimetern bei über 8 500 Personen ergaben einen Mittelwert der Jahres-Personendosis von 4 mSv. 6 % der Einwohner erhalten eine Jahresdosis von über 9 mSv und 1 % von über 20 mSv.

An der Atlantikküste des brasilianischen Bundesstaats Espirito Santo ist ebenfalls thoriumhaltiger Monazit Ursache für hohe Strahlenexpositionen. In Guarapari wurden am Strand Dosisleistungen bis zu 20  $\mu$ Sv pro Stunde (175 mSv pro Jahr) gemessen. Messungen mit Thermolumineszenzdosimetern an rund 300 Einwohnern ergaben Werte der Jahresdosis zwischen 1 und 30 mSv, im Durchschnitt 6 mSv.

Bei Ramsar im Iran am Kaspischen Meer wurden Jahreswerte der Ortsdosis von mehr als 1000 mSv ermittelt. Die effektive Jahresdosis einzelner Personen beträgt bis zu 135 mSv [6].

Gebiet	mittlere effektive Jahresdosis mSv	Jahres-Ortsdosis bis zu mSv
Deutschland	0,4	5
Indien: Bereiche in Kerala und Tamil Nadu	4	55
Brasilien: Bereiche in Espirito Santo	6	175
Iran: Bereiche der Stadt Ramsar	6	1200

Tab. 5 Terrestrische Strahlung in verschiedenen Gebieten



## 1.2 Interne Strahlenexposition

Die im Durchschnitt im menschlichen Körper vorhandenen Aktivitäten natürlicher Radionuklide sind - bezogen auf eine Person von 75 kg Körpergewicht - in Tab. 6 angegeben.

Nuklid	Aktivität in Bq
H-3	25
Be-7	25
C-14	3800
K-40	4200
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

Tab. 6 Natürlich radioaktive Stoffe im Menschen

### 1.2.1 Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide

#### 1.2.1.1 Kalium-40

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 Körpergewicht; das entspricht einer Kalium-40-Aktivität im Gesamtkörper von 4 200 Bq. Das natürliche Radioisotop Kalium-40 führt durch seine interne Bestrahlung zu einer effektiven Dosis von 180 Mikrosievert pro Jahr. Hinzu kommt die Dosis durch externe Bestrahlung von 170 Mikrosievert pro Jahr. Rubidium-87 trägt zur internen effektiven Dosis mit 6 Mikrosievert pro Jahr bei.

#### 1.2.1.2 Uran- und Thorium-Zerfallsreihen

Die Uran- und Thorium-Zerfallsreihen (siehe Abb. 5 bis Abb. 7) enthalten insgesamt 47 Radionuklide. Naturgemäß sind nicht alle diese Radionuklide gleichermaßen an der Strahlendosis beteiligt. So kann der Beitrag von U-235 und seiner Folgeprodukte auf Grund des geringen Isotopenverhältnisses von nur 0,7 % U-235 in Uran vernachlässigt werden. Wesentlich für den jeweiligen Beitrag eines Nuklids zur gesamten Strahlenexposition sind sein metabolisches Verhalten im menschlichen Organismus und seine Zerfallsart. Mit der Nahrung aufgenommenen Radionuklide der Zerfallsreihen von Uran und Thorium bewirken eine effektive Dosis von < 0,1 mSv pro Jahr.

#### 1.2.1.3 Radon

Radon-222 und Radon-220 sind natürliche radioaktive, gasförmige Stoffe. Rn-222, kurz auch nur Radon genannt, entsteht beim Zerfall von Radium-226, Teil der Uran-Radium-Reihe. Rn-220 entsteht beim Zerfall von Radium-224 aus der Thorium-Reihe und wird deshalb auch mit Thoron bezeichnet. Von diesen beiden Radon-Isotopen verursacht insbesondere das Radon-222 durch seine kurzlebigen Folgeprodukte Po-218, Pb-214, Bi-214 und Po-214 den bei weitem größten Beitrag zur natürlichen Strahlenexposition des Menschen. Überall dort, wo Uran im Erdboden vorhanden ist, wird Radon freigesetzt und gelangt in die freie Atmosphäre und in die Häuser.

Die Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre unterliegt systematischen klimatischen und jahreszeitlichen Schwankungen. In Gebäuden hängt die Radonkonzentration wesentlich von den baulichen Gegebenheiten ab. Die Jahresmittelwerte der Radonkonzentration der bodennahen Luft in Deutschland überdecken den Bereich von 8 bis 30 Bq pro m<sup>3</sup>. Die Häufigkeitsverteilung der Radonkonzentrationswerte in den Wohnungen folgt weitgehend einer logarithmischen Normalverteilung mit einem Mittelwert von 50 Bq pro m<sup>3</sup>. Untersuchung deutet darauf hin, dass in 10 % der Wohnungen die Radonkonzentration über 80 Bq pro m<sup>3</sup> und in 1 % der Wohnungen über 200 Bq pro m<sup>3</sup> liegt.

Aus den Mittelwerten der Radonkonzentration im Freien in Deutschland von 15 Bq pro m<sup>3</sup> und in Häusern von 49 Bq pro m<sup>3</sup> lässt sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufenthaltsdauer und unter Verwendung der in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Regelungen zur Dosisermittlung durch Radon die mittlere

effektive Jahresdosis durch Radon und seine Zerfallsprodukte zu 1,1 mSv berechnen. Davon stammen 0,2 mSv durch den Aufenthalt im Freien und 0,9 mSv durch Aufenthalt in Gebäuden. Es ist davon auszugehen, dass bei Anwendung der von der Internationalen Strahlenschutzkommission vorgeschlagenen Berechnungsverfahren zur Ermittlung der effektiven Dosis durch Radoninhalation sich der Dosiswert etwa verdoppelt, also die Radonexposition mit 2,2 mSv zur mittleren effektiven Jahresdosis beträgt.

*Anmerkung zur Ermittlung der effektiven Dosis durch Radon:*

*Üblicherweise wird die durch eine externe oder interne Strahlenexposition für die einzelnen Organe und Gewebe ermittelte Organ-Äquivalentdosis unter Berücksichtigung der in strahlenepidemiologischen Untersuchungen festgestellten Strahlenempfindlichkeiten der Organe mittels des Gewebe-Wichtungsfaktors in effektive Dosis umgerechnet – „biokinetisches und dosimetrisches Modell“. Dieses Vorgehen führte aber im Fall einer Exposition durch Radon und seine kurzlebigen Folgeprodukte zu Inkonsistenzen mit den Befunden aus epidemiologischen Studien an Minenarbeitern, die einer Radonexposition ausgesetzt waren. Deshalb hat die Internationale Strahlenschutzkommission für die Ermittlung der mit einer Radonexposition verbundenen effektiven Dosis 1993 eine „Dosiskonvention“ vorgeschlagen. Dabei wurde das mit einer Radonexposition verbundene Krebsrisiko unmittelbar mit dem aus anderen Studien (z. B. Überlebende der Atombombenexplosionen von Hiroshima/Nagasaki) ermittelten Krebsrisiko verglichen und zur Umrechnung einer gemessenen Radonkonzentration in effektive Dosis benutzt. Diese Dosiskonvention ist in der deutschen Strahlenschutzverordnung zur Ermittlung der beruflichen Strahlenexposition durch Radon enthalten und wird auch zur Berechnung der Radon-Strahlendosis der Bevölkerung angewandt.*

*Aufgrund der Ergebnisse neuerer Untersuchungen stellte die ICRP fest, dass das nominale Krebsrisiko durch Radon und Radonfolgeprodukte etwa doppelt so groß ist wie in der ICRP Publ. 65 von 1993 angenommen (ICRP Publication 115). In der im Dezember 2013 vom EU-Rat beschlossenen neuen Richtlinie zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung wurden diese ICRP-Vorschläge zur Dosisbestimmung durch Radon übernommen. Bei Anwendung dieses Dosisberechnungsverfahrens ergibt sich in etwa eine Verdoppelung des bisherigen Beitrags der Radoninhalation zur effektiven Dosis.*

1.2.2 Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide

Viele kosmogene Radionuklide entstehen durch Kernreaktionen der energiereichen kosmischen Strahlung mit den Atomkernen der Erdatmosphäre. Ein weiterer Anteil auf der Erde vorhandener kosmogener Radionuklide stammt aus Kernreaktionen der kosmischen Strahlung mit extraterrestrischer Materie, die als in der Atmosphäre verglühende Meteore oder als feste Meteoriten die Erde erreicht hat. Einen Überblick über diese kosmogenen Radionuklide gibt Tab. 7. Von den kosmogenen Radionukliden hat nur Kohlenstoff-14 eine für die Strahlenexposition des Menschen gewisse geringe Bedeutung.

Radionuklid	Halbwertszeit	Radionuklid	Halbwertszeit	Radionuklid	Halbwertszeit
H-3	12,323 a	P-32	14,3 d	Ar-42	33 a
Be-7	53,3 d	P-33	25,34 d	Ca-41	1,0·10 <sup>5</sup> a
Be-10	1,6·10 <sup>6</sup> a	S-35	87,5 d	Ti-44	60,4 a
C-14	5730 a	S-38	2,8 h	Mn-53	3,7·10 <sup>6</sup> a
Na-22	2,60 a	Cl-34m	32 min	Mn-54	312 d
Na-24	15 h	Cl-36	3,0·10 <sup>5</sup> a	Fe-55	2,73 a
Mg-28	20,9 h	Cl-38	37,2 min	Ni-59	7,5·10 <sup>4</sup> a
Al-26	7,2·10 <sup>5</sup> a	Cl-39	56 min	Ni-63	100 a
Si-31	2,6 h	Ar-37	35,04 d	Kr-81	2,3 10 <sup>5</sup> a
Si-32	172 a	Ar-39	269 a	I-129	1,6 10 <sup>7</sup> a

Tab. 7 Kosmogene Radionuklide

1.2.2.1 Tritium

Die heutige Tritiumkonzentration in der Umwelt wird überwiegend durch künstliches Tritium aus Kernwaffentests (gesamte freigesetzte Tritiumaktivität 240·10<sup>18</sup> Bq) und aus kerntechnischen Anlagen (freigesetzte Tritiumaktivität zurzeit rund 0,02·10<sup>18</sup> Bq pro Jahr) bestimmt. Die natürliche Tritiumproduktion beträgt etwa 0,07·10<sup>18</sup> Bq pro Jahr, das weltweite Inventar an natürlichem Tritium rund 1·10<sup>18</sup> Bq. Vor der Entwicklung der Kerntechnik durchgeführte Messungen ergaben Tritiumkonzentrationen in Meerwasser von 100 Bq pro m<sup>3</sup> und in kontinentalen Oberflächengewässern von 400 Bq pro m<sup>3</sup>. Unter der Annahme, dass die spezifische

natürliche Tritiumkonzentration im Körpergewebe der von Oberflächenwässern entspricht, errechnet sich eine durch das natürliche Tritium bedingte effektive Jahresdosis von 0,01 Mikrosievert.

#### 1.2.2.2 Beryllium-7

Messungen der Be-7-Konzentration in Luft ergaben Werte zwischen 4 mBq pro m<sup>3</sup> im Frühjahr und 1,5 mBq pro m<sup>3</sup> im Spätherbst. Die Konzentration von Be-7 in Regenwasser beträgt im Mittel 700 Bq pro m<sup>3</sup>. Die Gesamtjahreszufuhr an Be-7 beträgt rund 1000 Bq pro Jahr. Daraus resultiert eine effektive Jahresdosis von 0,03 Mikrosievert.

#### 1.2.2.3 Kohlenstoff-14

Natürlicher Kohlenstoff-14 entsteht durch Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung in der oberen Atmosphäre über einen (n,p)-Prozess an Stickstoff-14 (N-14 (n,p) C-14). Die natürliche spezifische C-14-Konzentration in der Atmosphäre ist zurzeit durch zwei gegenläufige Effekte beeinflusst. Die massive Erzeugung und Freisetzung von CO<sub>2</sub> durch das Verbrennen fossiler und damit C-14-freier Energieträger führt zu einer Vergrößerung des C-12-Anteils. Mitte der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts ergab sich durch diesen sogenannten Suess-Effekt eine Reduktion der spezifischen C-14-Konzentration in der Atmosphäre um fünf Prozent. Messungen an Holz von Bäumen aus dem 19. Jahrhundert ergaben 227 Bq Kohlenstoff-14 pro kg Kohlenstoff. Mit diesem Wert errechnet sich aus dem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt in den verschiedenen Körpergeweben eine effektive Jahresdosis von 12 Mikrosievert. Die Jahresaktivitätszufuhr an natürlichem C-14 beträgt rund 20 kBq. Durch die Kernwaffentests in der Atmosphäre wurde die Menge an C-14 in der Atmosphäre erhöht. Bis heute ist das Verhältnis von C-14 zu C-12 noch rund 10 % größer als vor 1945.

#### 1.2.2.4 Natrium-22

Die Produktionsrate von Natrium-22 und die Konzentration in der Atmosphäre sind zwar deutlich niedriger als die von natürlich erzeugtem Tritium, aber das metabolische Verhalten von Natrium-22 im Körper und die größere Zerfallsenergie ergeben einen höheren Dosisbeitrag. Die Jahreszufuhr an Natrium-22 mit Wasser und Nahrungsmitteln wird zu 50 Bq angenommen. Daraus berechnet sich eine resultierende effektive Jahresdosis von 0,15 Mikrosievert.

### 1.3 Strahlendosis durch Sonnen-Neutrinos und Neutrinos aus der Erde

#### 1.3.1 Solare Neutrinos

Die Sonne gewinnt den größten Teil ihrer Energie aus einem Ablauf von Reaktionen, die sich zusammenfassen lassen in der Gesamtreaktion  $4 p \rightarrow \text{He-4} + 2 e^+ + 2 \nu_e + 26,73 \text{ MeV}$ . Die bei der Reaktion frei werdende Energie entfällt zu etwa 2 % auf die kinetische Energie der Neutrinos, rund 26 MeV werden als Photonenenergie von der Sonne abgestrahlt - also 13 MeV pro erzeugtem Neutrino. Die mittlere Solarkonstante  $E_0$  (Strahlungsleistung pro m<sup>2</sup> senkrecht zur einfallenden Strahlung) bei mittlerem Abstand Erde-Sonne außerhalb der Atmosphäre beträgt 1367 W m<sup>-2</sup> oder unter Umrechnung in die bei kernphysikalischen Prozessen übliche Einheit MeV

$$E_0 = 1367 \text{ W m}^{-2} = 1367 \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-2} = 8,5 \cdot 10^{15} \text{ MeV s}^{-1} \text{ m}^{-2} = 8,5 \cdot 10^{11} \text{ MeV s}^{-1} \text{ cm}^{-2}.$$

Die solare Neutrinoflussdichte  $\Phi_\nu$  im Erdabstand senkrecht zur einfallenden Strahlung beträgt

$$\Phi_\nu = \frac{\text{Solarkonstante}}{13 \text{ MeV}} = \frac{8,5 \cdot 10^{11} \text{ MeV s}^{-1} \text{ cm}^{-2}}{13 \text{ MeV}} \approx 6,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

Die mittlere Flussdichte  $\Phi_\nu$  bezogen auf die Erdoberfläche ist wegen der Kugelform der Erde und ihren Tages- und Jahreszeiten-Bewegungen geringer. Tag und Nacht spielen keine Rolle, denn die Neutrinoflussdichte ist auf der Nachtseite der Erde wegen der extrem geringen Wechselwirkung selbst beim Durchgang durch die ganze Erde gleich groß wie auf der Tagseite. Andererseits ergibt sich aus dem Effekt der Neutrino-Oszillation (teilweise Umwandlung der ursprünglichen Elektron-Neutrinos  $\nu_e$  in Myon-Neutrinos  $\nu_\mu$ ) etwa eine Halbierung der Flussdichte der Elektron-Neutrinos auf rund  $\Phi_{\nu_e} \approx 3,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Die Reaktionsrate  $R$  mit einem Körper ergibt sich zu  $R = \Phi_\nu \sigma_\nu N$ , wobei  $\Phi_\nu$  die Neutrinoflussdichte,  $\sigma_\nu$  den Wirkungsquerschnitt und  $N$  die Zahl der Elektronen im Bezugskörper sind. Der überwiegende Anteil der solaren Neutrinos hat eine mittlere Energie von 200 keV. Für die Neutrinodosis ist die Streuung der Elektron-Neutrinos an Elektronen [ $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ ] relevant. Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma_\nu$  für diese Reaktion beträgt rund  $2 \cdot 10^{-46} \text{ cm}^2$ .

Für die Dosisberechnung wird der menschliche Körper durch die ICRU-Kugel approximiert. Danach beträgt die Masse rund 14 kg und die Elektronenzahl in dieser Masse  $4,7 \cdot 10^{27}$ . Die Reaktionsrate für diesen dosisrelevanten Bereich beträgt

$$R = 3,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 2 \cdot 10^{-46} \text{ cm}^2 \times 4,7 \cdot 10^{27} = 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} = 1 \text{ a}^{-1}.$$

Bei der Neutrino-Elektron-Streuung  $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$  wird etwa die Hälfte der Neutrinoenergie auf das Elektron übertragen, also 100 keV pro Reaktion. Die Dosis pro Neutrinoreaktion  $H_{\nu_e} = \frac{\Delta E}{m} w_R$  ergibt sich für die Masse der den Körper repräsentierenden ICRU-Kugel von 14 kg und dem Strahlungs-Wichtungsfaktor  $w_R = 1$  für Elektronen zu

$$H_{\nu_e} = \frac{100 \text{ keV}}{14 \text{ kg}} \times 1 = \frac{100 \text{ keV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ J keV}^{-1}}{14 \text{ kg}} \approx 1 \cdot 10^{-15} \text{ Sv} .$$

Bei der zu erwartenden einen Neutrinoreaktion im Körper pro Jahr ergibt sich daher eine Dosis von rund  $1 \cdot 10^{-12}$  mSv/Jahr.

### 1.3.2 Geo-Neutrinos

Geo-Neutrinos sind Elektron-Antineutrinos aus dem  $\beta^-$ -Zerfall natürlicher Radionuklide in der Erde, überwiegend von Nukliden der Zerfallsreihen von Th-232 und U-238 sowie dem K-40-Zerfall. Die resultierende Antineutrinoflussdichte beträgt etwa  $5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Der Dosisbeitrag dieser Elektron-Antineutrinos ist daher um etwa vier Größenordnungen kleiner als der durch die solaren Neutrinos.

## 1.4 Zusammenfassung: Natürliche Strahlenexposition

Die effektive Jahresdosis aus allen natürlichen Strahlenquellen in Höhe von 2,1 mSv ergibt sich mit 0,7 mSv zu einem Drittel aus externer und mit 1,4 mSv zu zwei Drittel aus interner Strahlenexposition (Tab. 8).

Exposition durch	jährliche effektive Dosis in mSv		
	Bestrahlung von außen *	Bestrahlung von innen	gesamt
kosmische Strahlung in Meereshöhe ionisierende Komponente Neutronen	0,23 0,07		} 0,3
kosmogene Radionuklide		0,02	0,02
primordiale Radionuklide			
K-40	0,15	0,17	0,3
U-238-Reihe			
U-238 → Ra-226		0,01	
Rn-222 → Po-214	} 0,1	1,1 **	} 1,3
Pb-210 → Po-210		0,12	
Th-232-Reihe			
Th-232 → Ra-224		0,02	
Rn-220 → Tl-208	} 0,15	0,05	} 0,2
<b>Summe</b>	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>	<b>2,1 **</b>

\* Aufenthalt: 20 % im Freien und 80 % in Gebäuden mit 20 % Abschirmung

\*\* Bei Anwendung des „ICRP Statements on Radon“ von 2009 ergibt sich eine effektive Jahresdosis durch Radon von 2,2 mSv und eine gesamte effektive Jahresdosis von 3,2 mSv.

Tab. 8 Mittlere natürliche jährliche Strahlenexposition in Deutschland

Die Tab. 9 gibt einen Überblick über die mittlere natürliche effektive Jahresdosis für verschiedene Altersgruppen. Lokal und regional treten Abweichungen vom Mittelwert auf; die Werte in Klammern geben den Dosisbereich an, innerhalb dessen 95 % aller auftretenden Jahresdosiswerte liegen. Über alle Altersklassen gewichtet gemittelt ergibt sich die schon genannte mittlere natürliche effektive Jahresdosis von 2,1 mSv. Der 95 %-Häufigkeitsbereich beträgt 1,2 bis 4,6 mSv.

Die mittlere natürliche effektive Jahresdosis der Weltbevölkerung wird von UNSCEAR (Report 2008 Vol I [2]) mit 2,4 mSv angegeben.

Altersklasse Exposition	≤ 1 Jahr	> 1 – ≤ 2 Jahre	> 2 – ≤ 7 Jahre	> 7 – ≤ 12 Jahre	> 12 – ≤ 17 Jahre	> 17 Jahre
extern	0,7 mSv (0,5 – 1,0)	0,7 mSv (0,5 – 1,0)	0,7 mSv (0,5 – 1,0)	0,7 mSv (0,5 – 1,0)	0,7 mSv (0,5 – 1,0)	0,7 mSv (0,5 – 1,0)
Inhalation	0,2 mSv (0,0 – 0,5)	0,3 mSv (0,1 – 1,0)	0,6 mSv (0,1 – 1,6)	1,0 mSv (0,2 – 2,9)	1,3 mSv (0,3 – 3,8)	1,4 mSv (0,3 – 4,1)
Ingestion	0,8 mSv (0,5 – 1,6)	0,4 mSv (0,3 – 0,9)	0,4 mSv (0,3 – 0,7)	0,4 mSv (0,3 – 0,6)	0,4 mSv (0,3 – 0,7)	0,2 mSv (0,2 – 0,3)
gesamt	1,8 mSv (1,2 – 2,6)	1,5 mSv (1,0 – 2,3)	1,6 mSv (1,1 – 2,7)	2,1 mSv (1,2 – 3,9)	2,4 mSv (1,3 – 4,8)	2,4 mSv (1,2 – 5,1)

Tab. 9 Natürliche effektive Jahresdosis in mSv für verschiedene Altersgruppen in Deutschland, Werte in Klammern: 95%-Vertrauensbereiche (R. Michel [7])

## 2 ZIVILISATORISCHE STRAHLENEXPOSITION

### 2.1 Strahlenexposition in der Medizin

#### 2.1.1 Röntgendiagnostik

Von allen Anwendungsgebieten ionisierender Strahlen trägt die Röntgendiagnostik den bei weitem größten Beitrag zur zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung bei. Die Tab. 10 gibt den Bereich typischer Werte der effektiven Dosis für häufige Röntgenuntersuchungen wieder.

Untersuchungsart	effektive Dosis in mSv
Computertomographie	
Bauchraum	8,8 – 16,4
Lendenwirbelsäule	4,8 – 8,7
Brustkorb	4,2 – 6,7
Hirnschädel	1,7 – 2,3
Untersuchung mit Aufnahmen und Durchleuchtung	
Arteriographie und Intervention	10 - 30
Darm	5 - 12
Magen	4 - 8
Harntrakt	2 - 5
Gallenblase	1 - 8
Untersuchung mit Aufnahme	
Lendenwirbelsäule	0,6 - 1,1
Beckenübersicht	0,3 – 0,7
Mammographie beidseits	0,2 - 0,4
Halswirbelsäule	0,1 - 0,2
Brustkorb	0,02 - 0,04
Zahn	≤ 0,01

Tab. 10 Typische Werte der effektive Dosis für einige Röntgenuntersuchungen (BMU, 2009 [9])

Die Variationsbreite der effektiven Dosis bei Röntgenuntersuchungen wird in Tab. 11 beispielhaft für verschiedene zahnärztliche Untersuchungsarten und bildgebende Techniken (analoge oder digitale Bildaufzeichnung) wiedergegeben. Die Tab. 12 enthält beispielhaft Angaben der Dosis verschiedener Kopfbereiche bei Zahnstatus- und Panoramaschichtaufnahmen [10].

Untersuchung	effektive Dosis
Einzelröntgen (2 – 4 Zähne)	analog: 5 $\mu$ Sv digital: 3 $\mu$ Sv
14-Bild Zahnfilm-Status	analog: 80 $\mu$ Sv digital: 40 $\mu$ Sv
Panoramaschichtaufnahme	analog: 55 $\mu$ Sv digital: 45 $\mu$ Sv
Digitale Volumentomographie (DVT)	100 – 400 $\mu$ Sv
Computertomographie	400 – 1000 $\mu$ Sv

Tab. 11 Typische effektive Dosis bei verschiedenen dentalen Röntgenverfahren

Organ	Zahnfilm-Status (14-Bilder)		Panoramaschichtaufnahme	
	analog, Dosis in $\mu$ Sv	digital, Dosis in $\mu$ Sv	analog, Dosis in $\mu$ Sv	digital, Dosis in $\mu$ Sv
Augenlinse	100	70	17	19
Gehirn	25	10	7	7
Hypophyse	130	60	55	50
Kieferhöhle	2220	1150	230	330
Knochenmark	220	100	175	160
Ohrspeicheldrüse	900	150	300	300
Schilddrüse	125	50	75	85
Speiseröhre	175	55	100	55
Unterkieferspeicheldrüse	1850	1000	100	100
effektive Dosis	80	40	55	45

Tab. 12 Strahlenexposition von analogen und digitalen Zahnstatus- und Panoramaschichtaufnahmen, Werte der Organ-Äquivalentdosis und effektiven Dosis in Mikrosievert

In den Jahren 2007 bis 2014 ist die Häufigkeit von Röntgenuntersuchungen in Deutschland geringfügig angestiegen. Sie lag im Jahr 2014 bei etwa 1,7 Röntgenuntersuchungen pro Einwohner und Jahr. Von Bedeutung für die Strahlendosis ist aber, dass die dosisintensiven Computer-Tomographie-Untersuchungen in diesem Zeitraum um etwa 40 % zugenommen haben. Die Abb. 8 zeigt die Anzahl der Röntgenuntersuchungen pro Einwohner und Jahr und die Abb. 9 die durch die jeweiligen Untersuchungsverfahren anteilig bewirkte effektive Dosis für die Bevölkerung.

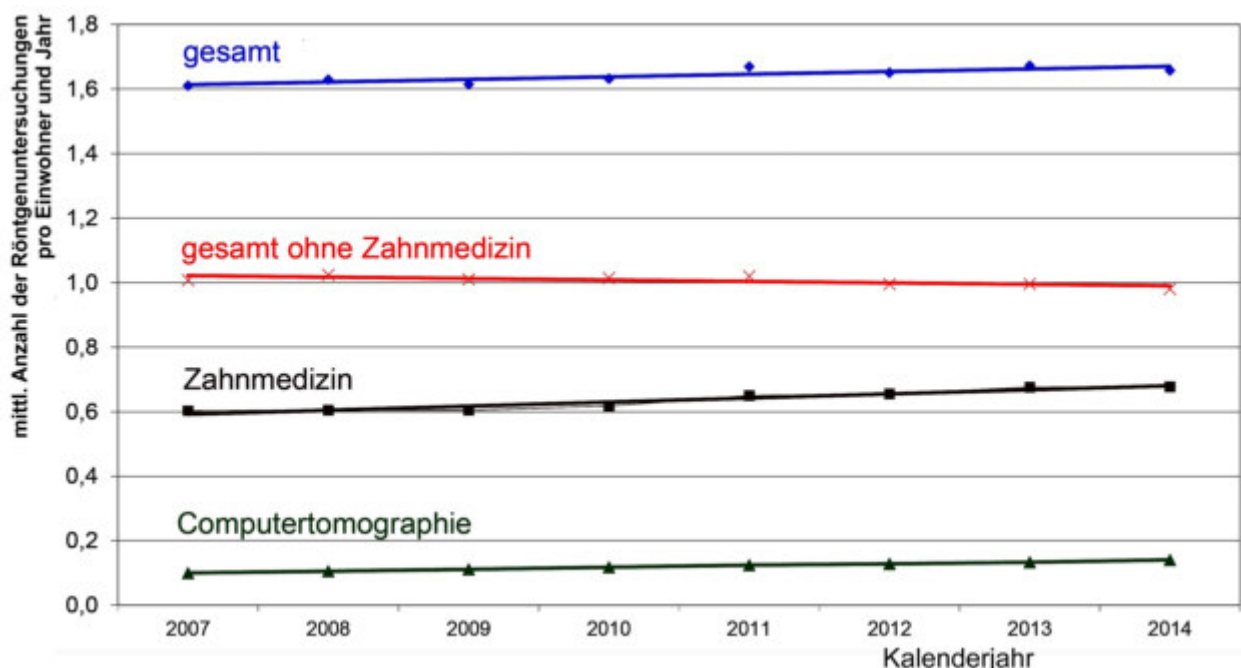


Abb. 8 Mittlere Anzahl der Röntgenuntersuchungen pro Einwohner und Jahr in Deutschland, [9]

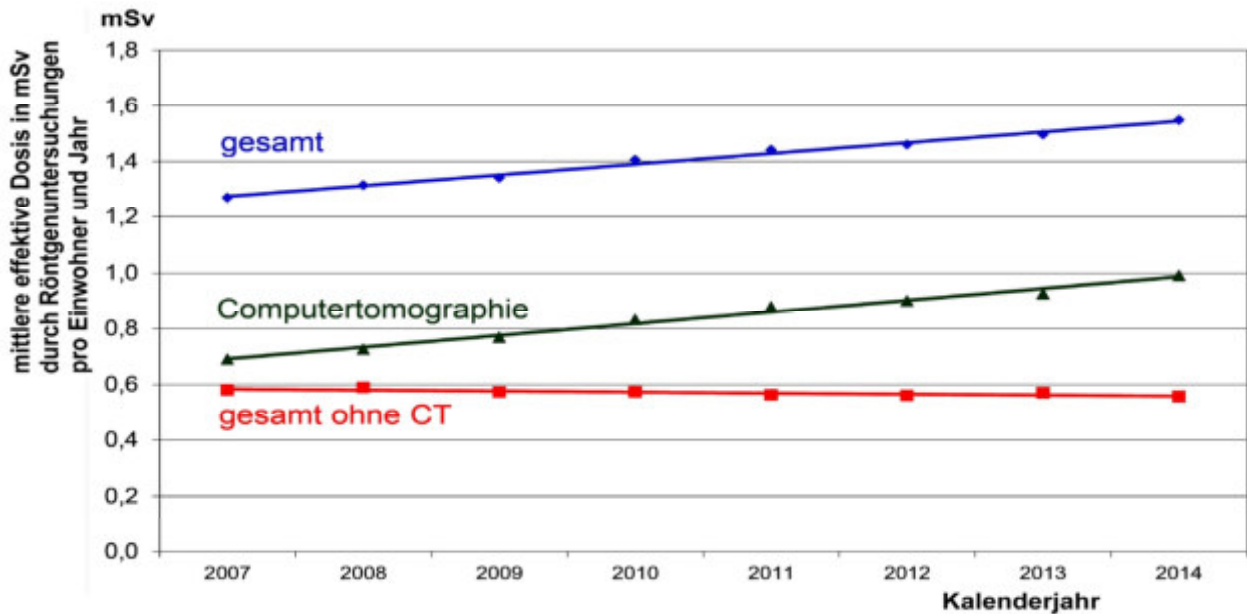


Abb. 9 Beiträge der klassischen Röntgendiagnostik und der Computertomographie zur effektiven Dosis der Bevölkerung in Deutschland, [9]

Die Abb. 10 zeigt die prozentuale Häufigkeit der verschiedenen Röntgenuntersuchungen und ihren jeweiligen Beitrag zur kollektiven Dosis durch die Röntgendiagnostik in Deutschland für das Jahr 2014.

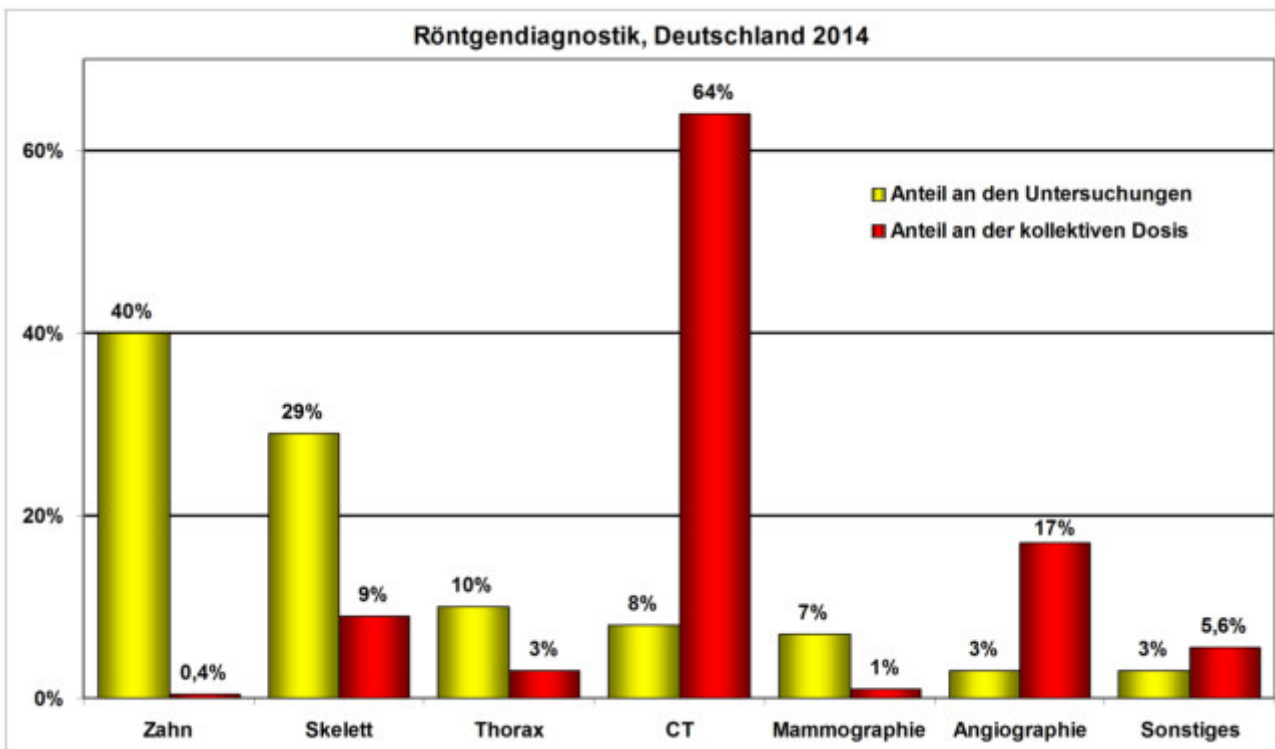


Abb. 10 Röntgendiagnostik; Häufigkeit der verschiedenen Untersuchungsarten und deren Beitrag zur Dosis, Deutschland 2014 (Daten BT-Drucksache 19/5350 [8])

Jährlich werden in Deutschland rund 135 Millionen Röntgenuntersuchungen durchgeführt. Die mittlere effektive Dosis pro Einwohner in Deutschland durch die Röntgendiagnostik errechnet sich zurzeit zu etwa 1,6 mSv pro Jahr. Die durch die Röntgendiagnostik bewirkte jährliche effektive Strahlendosis ist in anderen Industrieländern zum Teil wesentlich geringer; sie beträgt im Vereinigten Königreich 0,4 und in Schweden 0,55 mSv, sie ist aber auch – wie in den USA mit 2,25 mSv – in einigen Ländern größer (Abb. 11)

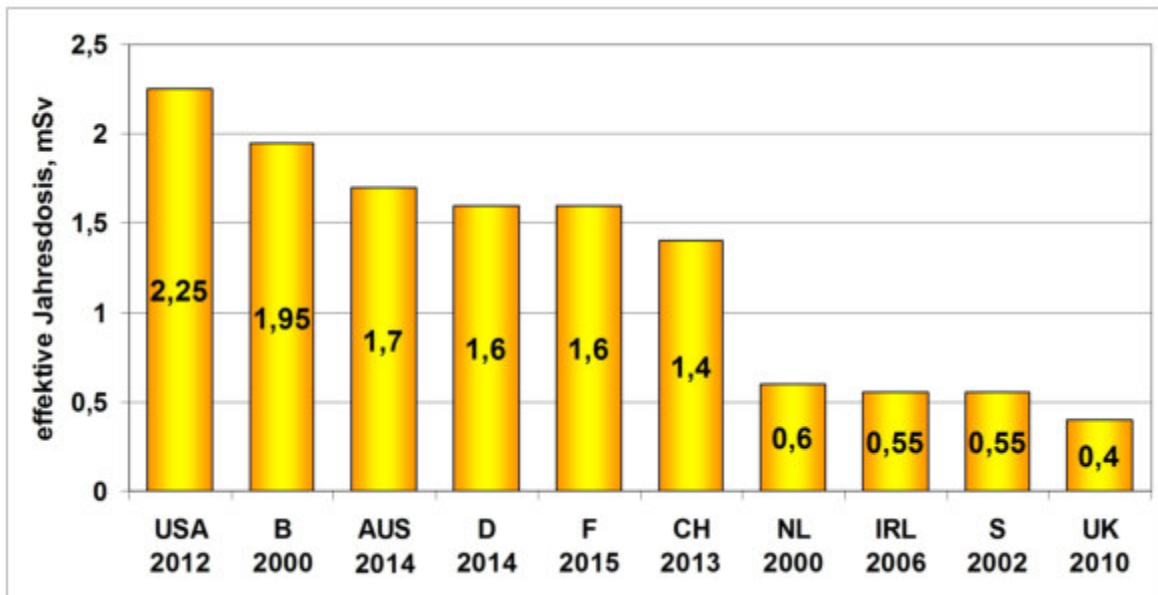


Abb. 11 Strahlenexposition durch Röntgendiagnostik in verschiedenen Ländern

### 2.1.2 Nuklearmedizinische Diagnostik

Der Dosisbeitrag durch die Anwendung radioaktiver Stoffe zur Diagnose ist in Deutschland gegenüber dem durch die Röntgendiagnostik vergleichsweise gering. In der nuklearmedizinischen Diagnostik wurden in Deutschland im Zeitraum 2010 bis 2014 jährlich etwa 2,5 Millionen Radionuklidapplikationen durchgeführt. Das entspricht einer Anwendungshäufigkeit von 31 Untersuchungen pro 1000 Einwohner. Am häufigsten wurden Szintigraphien der Schilddrüse und des Skeletts durchgeführt. Die mittleren effektiven Dosiswerte nuklearmedizinischer Untersuchungen waren bei Entzündungsuntersuchungen mit 7,8 mSv am höchsten, gefolgt von Herzsintigraphien mit 7,4 mSv und Tumorszintigraphien mit 6,5 mSv. Die am häufigsten angewendete Schilddrüsenszintigraphie bewirkt eine effektive Dosis von durchschnittlich 0,9 mSv pro Untersuchung.

Für die Jahre 2010 bis 2014 ergab sich eine gemittelte jährliche effektive Dosis von rund 0,1 mSv pro Einwohner. Die Abb. 12 zeigt die prozentuale Häufigkeit der verschiedenen nuklearmedizinischen Untersuchungen und ihren jeweiligen Beitrag zur kollektiven Dosis durch die Nuklearmedizin für Deutschland im Jahr 2014.

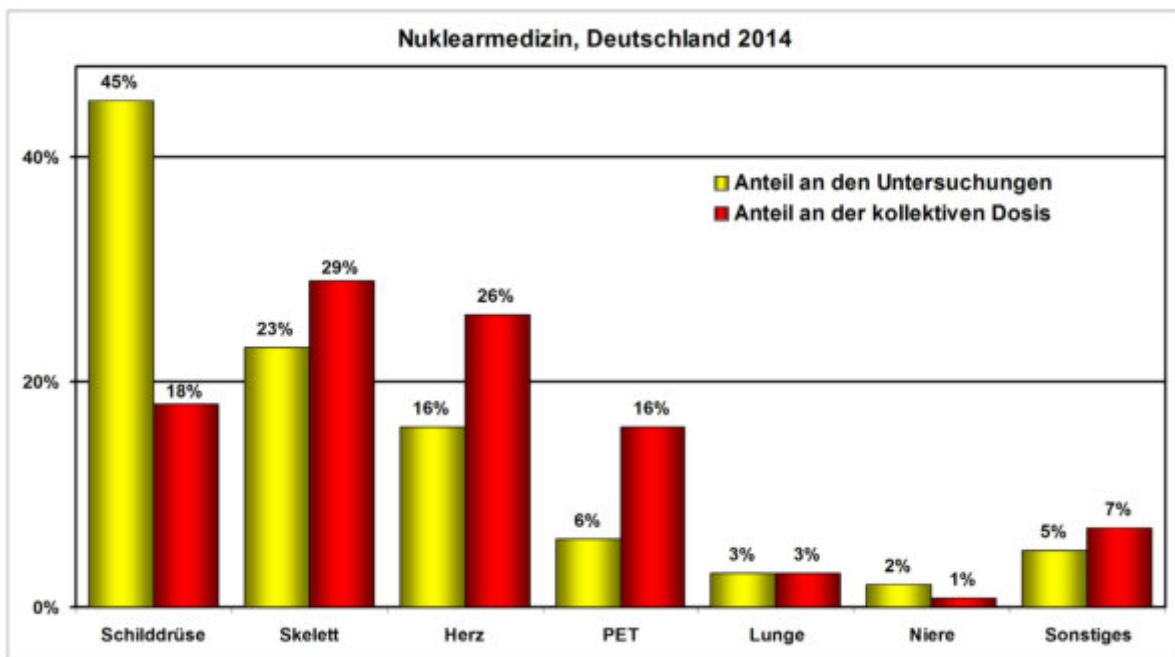


Abb. 12 Nuklearmedizinischen Untersuchungen; Häufigkeit der verschiedenen Untersuchungsarten und deren Beitrag zur Dosis, Deutschland 2014 (Daten BT-Drucksache 19/5350 [8])



Werte der effektiven Dosis durch die Strahlentherapie sind nicht berechenbar, da das Effektivdosis-Konzept auf solche Bestrahlungen nicht anwendbar ist.

Bei einer Bewertung der medizinischen Strahlenexposition ist zu berücksichtigen, dass strahlendiagnostische Untersuchungen überwiegend an älteren Personen erfolgen. Für diese Personen ist die Wahrscheinlichkeit einer strahlenbedingten Krebserkrankung deutlich geringer als für jüngere Menschen. Angaben zur Altersverteilung der untersuchten Personen sind allerdings von den Krankenversicherungen nicht erhältlich.

## 2.2 Radioaktivität in Industrieprodukten

### 2.2.1 Tabak

Tabak enthält je nach Herkunft in unterschiedlichen Mengen natürliche Radionuklide. Wichtig für eine Strahlenexposition sind hier insbesondere Pb-210 und Po-210 (Tab. 13).

Herkunft des Tabaks	spezifische Aktivität, Bq/kg	
	Pb-210	Po-210
Ägypten	16	13
Brasilien	11 – 27	4 – 16
Griechenland	7 – 18	4 – 17
USA		18
verschiedene Länder		3 - 37

Tab. 13 Spezifische Pb-210- und Po-210-Aktivität in Tabak (NCRP 160, 2009 [11])

Messungen der Rückhaltung radioaktiver Stoffe im Zigarettenfilter und der Aktivität des Tabakrauchs ergeben durch die Inhalation des Tabakrauchs eine typische Aufnahme von je 14 mBq von Pb-210 und Po-210 pro Zigarette. Daraus resultiert durch das Rauchen von einer Zigarette pro Tag eine jährliche effektive Dosis von etwa 20 µSv.

### 2.2.2 Leuchtzifferblätter

Radium wurde lange Zeit als fluoreszenzanregende Substanz für die Leuchtfarben von Zifferblättern und Zeigern eingesetzt. Ra-226 hat den Nachteil, dass durch seine Folgeprodukte ein größerer Anteil Gamma-Strahlung emittiert wird. Diese Strahlung trägt zur Lichtemission wenig, zur Strahlendosis aber viel bei. Die Ra-226-Aktivität in den früher üblichen Leuchtfarben lag zwischen 4 und 100 kBq pro Armbanduhr. Wird Tritium als fluoreszenzanregende Substanz in der Leuchtfarbe benutzt, dann ist die äußere Strahlenexposition aufgrund der sehr geringen Beta-Energie des Tritiums von maximal 18 keV völlig vernachlässigbar.

### 2.2.3 Phosphat-Industrie

Der typische Gehalt an U-238 im Phosphormineral liegt mit 1 500 Bq/kg deutlich höher als in üblichen Gesteinen. Weltweit werden etwa 30 Mio. Tonnen P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> als Phosphatdünger eingesetzt. Die spezifische Aktivität des Düngers variiert abhängig von der Herkunft des Ausgangsmaterials in weiten Bereichen. Insbesondere der Anteil der Nuklide der U-238-Reihe ist gegenüber normalem Boden stark erhöht. Typische Werte für U-238 und Ra-226 sind 4 000 bzw. 1 000 Bq/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Durch das Einbringen des Phosphatdüngers erhöht sich der Gehalt des Bodens an Nukliden der U-238-Reihe.

Die zusätzliche Dosis resultiert überwiegend von Pb-210. Aus der Phosphatdüngerproduktion und Annahmen über den Transfer in Pflanzen lässt sich pro Jahr der Düngernutzung die kollektive effektive Folgedosis zu 10 000 Personen-Sievert abschätzen. Da die Nutzung von Phosphatdünger schon seit längerer Zeit erfolgt, entspricht dieser Wert in etwa der jährlichen Dosis, die sich damit zu 2 Mikrosievert pro Person errechnet. Als Nebenprodukt der Phosphatdüngerherstellung entstehen rund 100 Mio. t Gips, der Ra-226 mit einer typischen spezifischen Aktivität von 1 kBq pro kg enthält. Der größte Teil des Gipses wird als Abfall gelagert oder über Flüsse ins Meer geleitet. Etwa 1 bis 5 % wird im Hausbau eingesetzt.

Durch den Einsatz im Hausbau ergibt sich eine erhöhte externe und über Radon und Folgeprodukte eine interne Exposition. Abschätzungen über die aus diesem jährlichen Einsatz von Gips im Hausbau resultierenden Strahlendosen führen zu einer kollektiven effektiven Folgedosis von 60 000 – 300 000 Personen-Sievert. Es ist anzumerken, dass der Dosisbeitrag durch die Verwendung der Nebenprodukte im Hausbau aus Modellrechnungen hergeleitet wurde und noch einer messtechnischen Verifizierung bedarf.

### 2.3 Strahlenexposition bei Flügen und Raumflügen

Eine erhöhte Strahlenexposition durch die kosmische Strahlung tritt bei Flügen in größeren Höhen auf. Der generelle Verlauf der Höhen- und Breitenabhängigkeiten der Dosisleistung der kosmischen Strahlung ist in Abb. 13 wiedergegeben. In der Abb. 14 ist der jeweilige Beitrag der verschiedenen Strahlungskomponenten dargestellt.

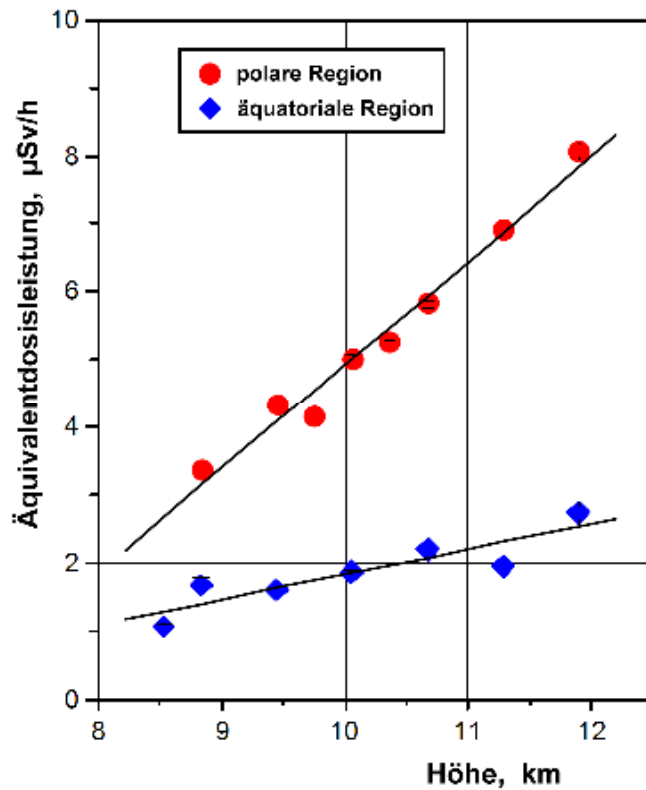


Abb. 13 Dosisleistung als Funktion der Flughöhe und der geographischen Breite, [12]

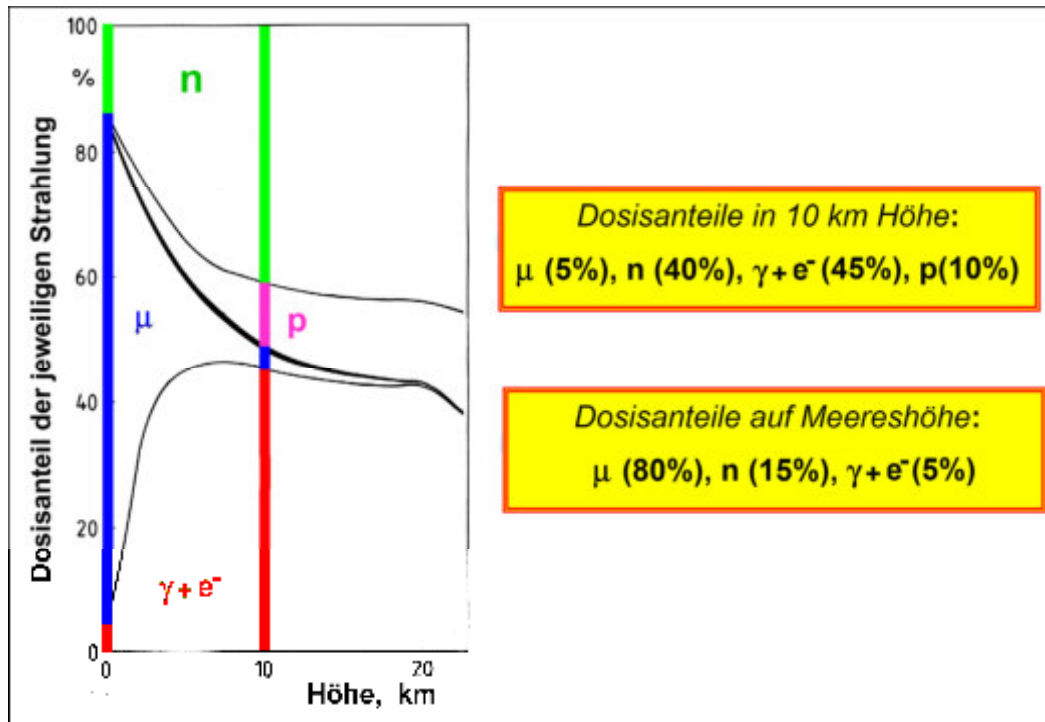


Abb. 14 Beitrag der Komponenten der kosmischen Strahlung zur Gesamtdosis in Abhängigkeit von der Höhe, [12]

Die Tab. 14 enthält Angaben zur Strahlenexposition auf verschiedenen Flugstrecken. Die Breitenabhängigkeit der Strahlendosis wird z. B. im Vergleich der Flüge Frankfurt – San Francisco und Frankfurt – Sao Paulo deutlich. Bei vergleichbarer Flugzeit ergibt sich auf dem Flug nach San Francisco eine Dosis von 110 Mikrosievert gegenüber nur 33 Mikrosievert auf dem Flug nach Sao Paulo.

Strecke	Dauer, h:min	Dosis, µSv (Jan. 2019)
Frankfurt - Palma de Mallorca	2:15	7
Frankfurt - Las Palmas	4:40	17
Frankfurt - New York	8:15	67
Frankfurt - Vancouver	10:10	93
Frankfurt - Johannesburg	10:45	28
Frankfurt - San Francisco	12:10	110
Frankfurt - Sao Paulo	12:00	33

Tab. 14 Strahlenexposition auf verschiedenen Flugstrecken, einfacher Flug (www.sievert-system.org)

Der aus dem Weltall stammende Anteil der primären kosmischen Strahlung wird zudem noch durch die im etwa 11-jährigen Zyklus variierende Sonnenfleckenanzahl und die damit einhergehenden Emissionen von Plasmawolken beeinflusst. Die dadurch bewirkte Ablenkung der galaktischen Strahlung war daher gering, und somit ihr Anteil zu unserer kosmischen Strahlendosis größer (Abb. 15, UNSCEAR 2008 [2]).

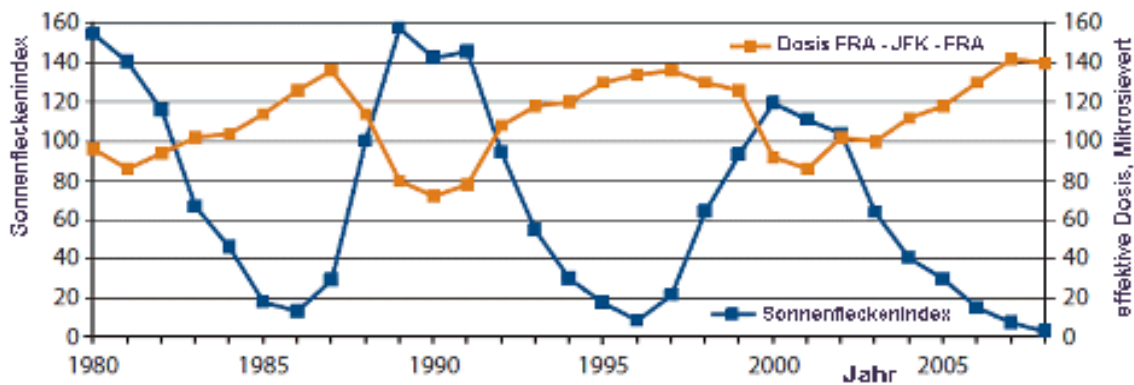


Abb. 15 Einfluß der Sonnenflecken auf die Strahlenexposition, Flug Frankfurt - New York – Frankfurt

Im kommerziellen Personenluftverkehr werden zurzeit rund  $8 \cdot 10^{12}$  Passagierkilometer pro Jahr geflogen. Daraus lässt sich eine Gesamtdosis von rund 35 000 Personen-Sievert abschätzen. Etwa die Hälfte der Passagierkilometer und damit auch die Hälfte der Gesamtdosis entfallen auf Passagiere aus Nordamerika und Westeuropa. Daraus ergibt sich für die Bevölkerung in diesen Regionen eine mittlere Strahlenexposition durch Flugreisen von etwa 20 Mikrosievert pro Person und Jahr.

Bei Weltraumflügen sind die Astronauten sowohl der primären galaktischen Strahlung und der solaren Strahlung als auch der intensiven Strahlung in den beiden Strahlungsgürteln, die die Erde äquatorial in etwa 5 000 und 20 000 km Entfernung umgeben und als Van-Allen-Gürtel bezeichnet werden, ausgesetzt. Ein großer Anteil der gesamten Strahlendosis bei den in Tab. 15 aufgelisteten Mondflügen ist auf den Dosisbeitrag aus diesen Strahlungsgürteln zurückzuführen.

Flug		Flugdauer Stunden	Dosis 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. 15 Strahlenexposition bei Raumflügen

So war beispielsweise die höhere Dosis beim Flug von Apollo XIV – verglichen mit dem Flug von Apollo XI – weitgehend durch den Verlauf der Flugbahn durch die Strahlungsgürtel bedingt. Messungen hinter einer Aluminiumabschirmung von 3 mm ergaben im inneren Van-Allen-Gürtel bis zu 0,2 Sv/h und im äußeren Strahlungsgürtel bis zu 0,05 Sv/h (Abb. 16). Die Abb. 17 zeigt im Vergleich zur Jahresdosis durch die kosmische Strahlung in Meereshöhe die Dosis bei einem Halbjahresaufenthalt in der Internationalen Raumstation in 400 km Höhe und berechnete Werte beim Flug zum Mars und einem Marsaufenthalt von knapp 1½ Jahren.

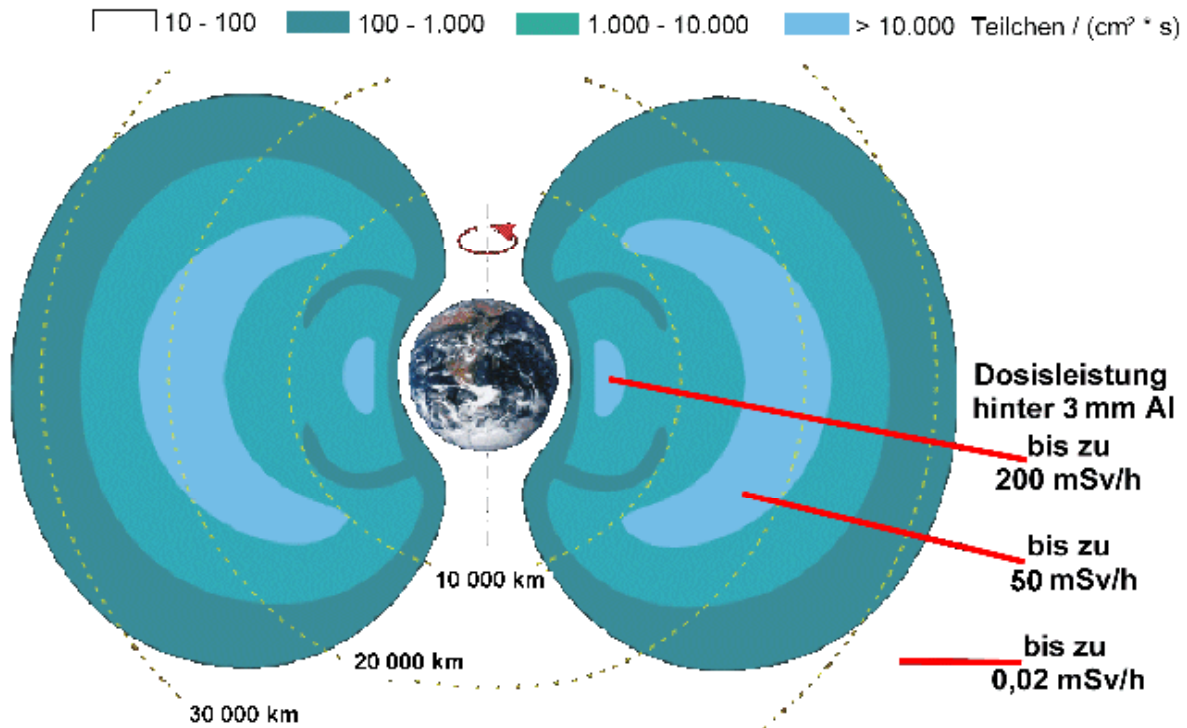


Abb. 16 Teilchendichte und Dosisleistung im erdnahen Weltraum

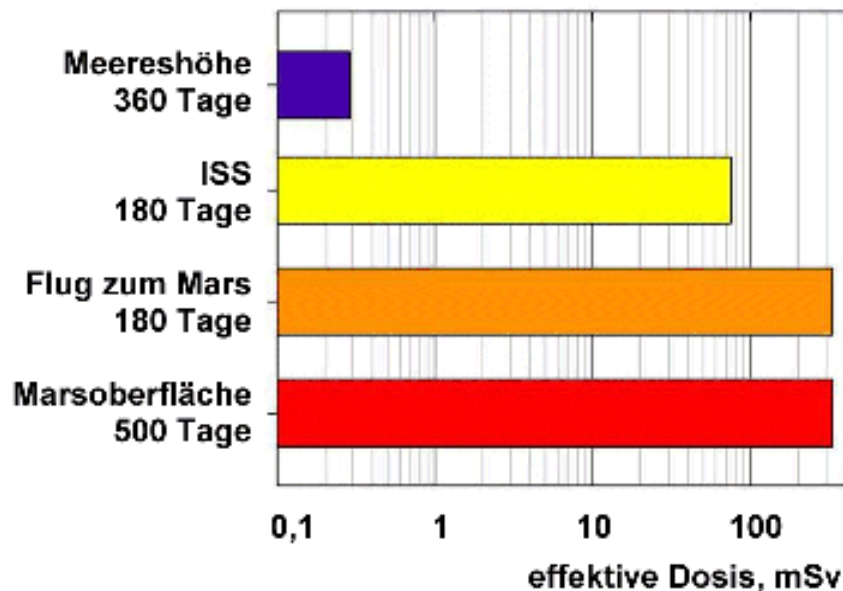


Abb. 17 Strahlenexposition durch kosmische Strahlung

## 2.4 Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen

### 2.4.1 Einleitung

Kernkraftwerke sind ein, wenn auch der bekannteste Teil einer ganzen Reihe von kerntechnischen Anlagen des Brennstoffkreislaufs, die in ihrer Aufeinanderfolge die Nutzung der Kernenergie ermöglichen (Abb. 18).

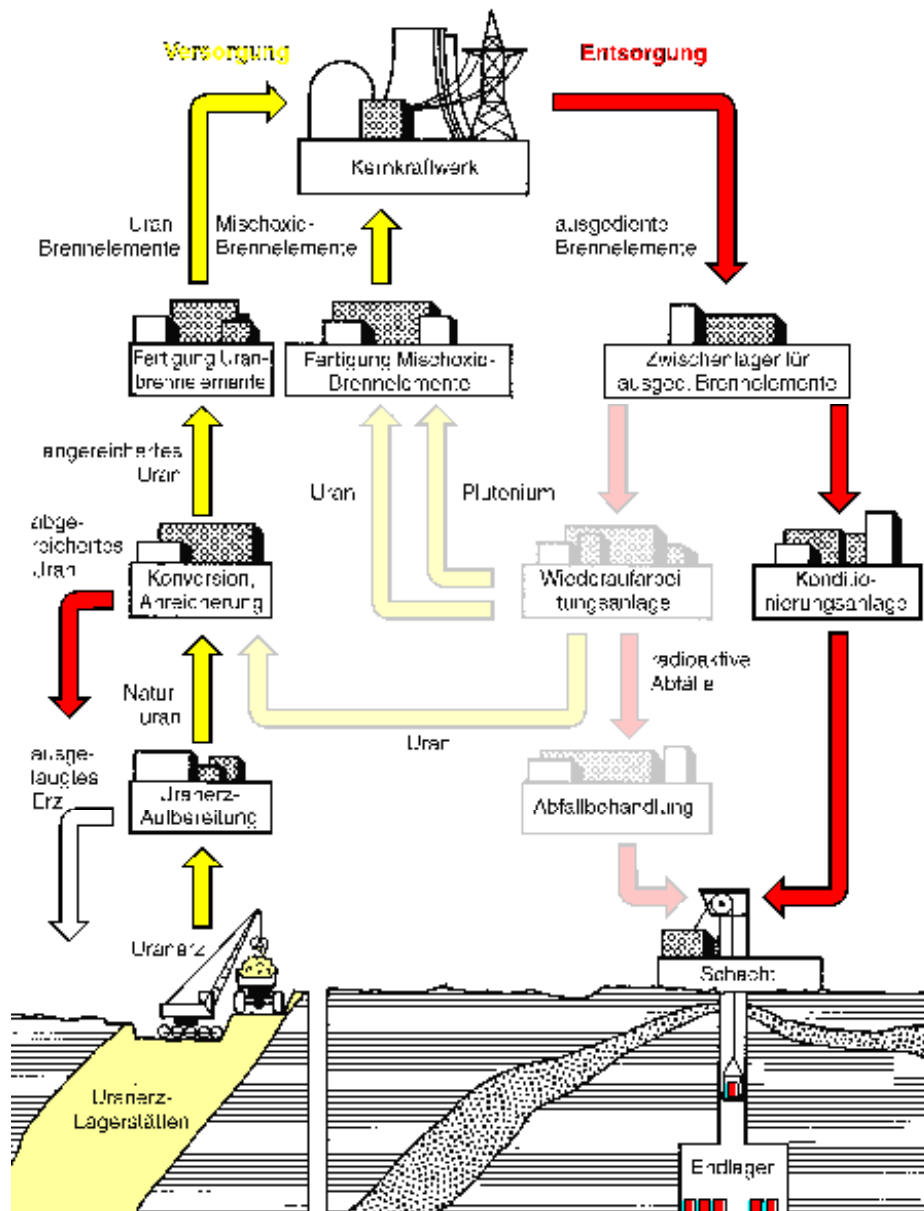


Abb. 18 Kernbrennstoffkreislauf

Die nachfolgend angegebenen Daten zur Strahlenexposition durch Uranbergbau und Erzaufbereitung sind den Berichten des „Wissenschaftlichen Komitees der Vereinten Nationen über die Effekte ionisierender Strahlung“, UNSCEAR, entnommen. Da einige der von den Anlagen emittierten radioaktiven Stoffe aufgrund ihrer Halbwertszeit und ihres Verhaltens in der Umwelt längere Zeit in unserer Biosphäre verbleiben, werden neben den typischen Jahresdosiswerten für Einzelpersonen in der Umgebung der Anlage auch Werte der kollektiven effektiven Folgedosis angegeben. Folgedosis ist die Dosis, die eine Person als Folge der Emission radioaktiver Stoffe integriert über einen „unendlich“ langen Zeitraum erhält. Dieser „unendliche“ Zeitraum wird einerseits durch den radioaktiven Zerfall und andererseits durch die Transfermöglichkeit des radioaktiven Stoffes in der Umwelt begrenzt. Normiert wird dabei auf die mit der zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 Gigawatt-Jahr (1 GWa = 8,76 Milliarden kWh) verbundene Emission radioaktiver Stoffe.

#### 2.4.2 Uranbergbau und Uranerzaufbereitung

Uranbergbau ist mit dem Abbau großer Erzmengen, die zwischen einem zehntel Prozent bis zu einigen Prozenten  $U_3O_8$  enthalten, verbunden. An radioaktiven Stoffen sind dabei neben Uran auch alle Folgeprodukte der Uran-Zerfallsreihe vorhanden. Der Uranbergbau ist mit der Emission großer Radon-Aktivitätsmengen verbunden. Ein typischer Mittelwert aus Untertage- und Übertage-Bergbau ist die Freisetzung von 300 GBq Radon pro Tonne  $U_3O_8$ . Bei einem Uranbedarf von rund 250 t pro GWa ergibt sich eine Radon-Emission von 75 TBq pro GWa. Aus dieser Freisetzung errechnet sich eine kollektive Dosis für die regionale Bevölkerung von 0,2 Personen-Sievert (Tab. 16).

Tätigkeit	normierte kollektive effektive Folgedosis Personen-Sievert pro GWa
Bergbau	0,2
Aufbereitung	0,01
Halden	0,04* (7,5*)
Summe, gerundet	0,25

\* über 5 Jahre integriert

\* über 10<sup>4</sup> Jahre integriert

Tab. 16 Normierte Folgedosis der regionalen Bevölkerung durch Uranbergbau, Erzaufbereitung und Rückstandshalden

Die Aufbereitung des Uranerzes ist mit der Emission von U-238, Th-230, Ra-226, Pb-210 als luftgetragene Stoffe und Radon verbunden. Typische Werte einer Anlage, die 2 000 t Erz pro Tag verarbeitet sind 0,2 bis 2·10<sup>9</sup> Bq der erstgenannten Nuklide und einige 10<sup>12</sup> Bq an Rn-222. Aus den Freisetzungen der Erzaufbereitung errechnet sich eine kollektive effektive Folgedosis der regionalen Bevölkerung von 0,05 Personen-Sievert pro GWa aus dem produzierten Uran gewinnbarer elektrischer Energie (Tab. 16).

Da eine Tonne Erz bei einem Gehalt von 0,2 % U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> bei radioaktivem Gleichgewicht von jedem Nuklid der Hauptreihe der Uranzerfallsreihe je 2·10<sup>7</sup> Bq, insgesamt also knapp 3·10<sup>8</sup> Bq enthält, ergibt sich eine nicht unerhebliche Aktivität in den Rückständen der Uranaufbereitung. Abhängig von der Abdeckung dieser Aufhaldungen ergeben sich um Größenordnungen unterschiedliche Freisetzungen an Rn-222. Typische Freisetzungsraten führen zu einer Emission von 20·10<sup>12</sup> Bq Rn-222 pro GWa aus dem Uran erzeugter elektrischer Energie. Die Freisetzungen von Radon aus den Absetzbecken und Aufhaldungen tragen zur kollektiven effektiven Folgedosis der regionalen Bevölkerung in den ersten fünf Betriebsjahren nochmals mit 0,04 Sv pro GWa bei (siehe Tab. 16).

Wegen des Vorhandenseins von Ra-226 und Th-230 in den Rückständen und das dadurch über lange Zeit mögliche Freisetzen von Radon können - über Jahrtausende integriert - höhere Folgedosen auftreten, z. B. bei Integration über 10<sup>4</sup> Jahre total 7,5 Sv pro GWa. Dieser Wert ist allerdings in hohem Maße spekulativ, da er eine unveränderte Radon-Freisetzung über die gesamte Zeitdauer voraussetzt.

#### 2.4.3 Urananreicherung und Brennelementherstellung

Die Ableitungen radioaktiver Stoffe aus Konversions-, Anreicherungs- und Brennelementfabrikationsanlagen sind gering. In Deutschland stehen Fabrikationsstätten zur Urananreicherung in Gronau und zur Brennelementherstellung in Lingen. Aus den gemessenen Aktivitätsableitungen lassen sich Jahresdosiswerte von weniger als 0,1 Mikrosievert für die höchstexponierten Stellen in der Umgebung ermitteln. UNSCEAR hat für die Ableitungen einer Modellanlage (Konversion, Anreicherung, Brennelementfertigung) – bezogen auf einen Urandurchsatz zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 GWa – die normierte kollektive effektive Dosis zu 0,003 Personen-Sievert berechnet.

#### 2.4.4 Kernkraftwerke

Der für die kerntechnische Sicherheit und den Strahlenschutz zuständige Bundesminister veröffentlicht jährlich die Aktivitätsabgaben aller deutschen Kernkraftwerke und die daraus unter Anwendung der nach der Strahlenschutzverordnung zu berücksichtigenden Expositionspfade berechneten Strahlendosen. Die Abb. 19 zeigt die wichtigsten zu berücksichtigenden Expositionspfade.

Die Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung im Jahr 2016 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft ([8]) ergab als größten Wert der effektiven Dosis für Erwachsene 0,001 mSv für die Kernkraftwerke Grohnde und Neckarwestheim; dies ist weniger als 1 % des Grenzwertes nach der Strahlenschutzverordnung. Für Kleinkinder ergab sich für die effektive Dosis ein Wert von 0,002 mS für dieselben Standorte. Der größte berechnete Wert der Schilddrüsendosis für Kleinkinder ergibt sich mit 0,002 mSv (weniger als 1 % des entsprechenden Dosisgrenzwerts) ebenfalls für die Standorte Grohnde und Neckarwestheim.

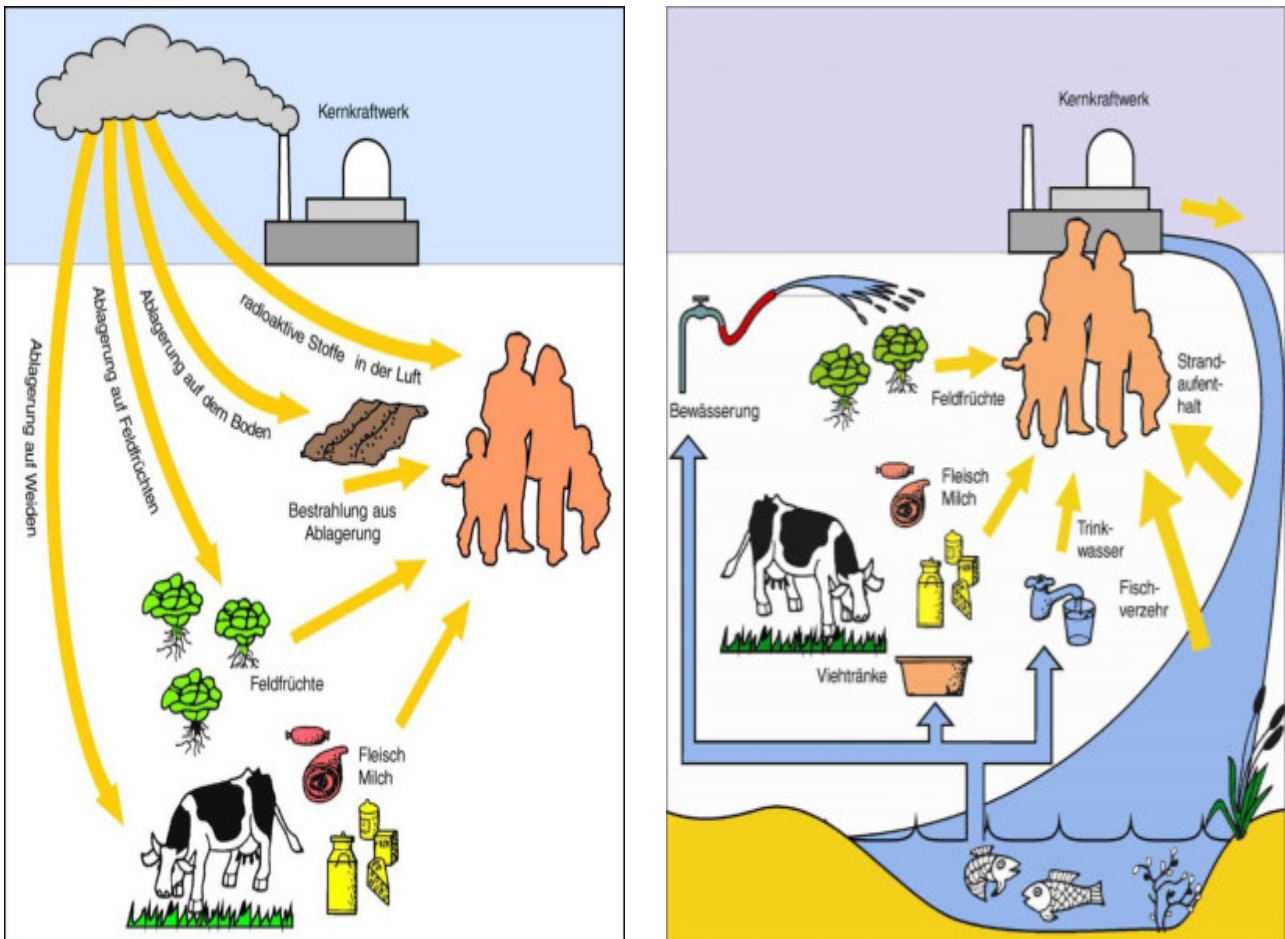


Abb. 19 Expositionspfade zur Ermittlung der Strahlenexposition durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft (links) und dem Abwasser (rechts)

Zur Berechnung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser werden in den Berechnungen ebenfalls ungünstige Verzehrs- und Lebensgewohnheiten angenommen, so z. B. ein hoher Konsum an Fischen, die unmittelbar unterhalb der Ableitung des Kernkraftwerkes gefangen wurden, und ein Aufenthalt von 1000 Stunden am Flussufer unterhalb der Anlage. Der größte berechnete Wert der effektiven Dosis betrug für Erwachsene 0,0005 mSv und für Kleinkinder 0,0008 mSv jeweils am Standort des Kernkraftwerkes Emsland. Dies entspricht etwa 0,3 % des Dosisgrenzwertes.

Die Strahlenexposition am Unterlauf der Flüsse wurde näher betrachtet, wobei jeweils sämtliche Emittenten berücksichtigt wurden. Für das Mündungsgebiet des Neckars wurde eine effektive Jahresdosis von 0,0006 mSv für Erwachsene und 0,001 mSv für Kleinkinder berechnet. Für den Main wurde für Erwachsene und Kleinkinder eine effektive Jahresdosis von je 0,0001 mSv und für die Weser 0,0001 mSv für Erwachsene und 0,0002 mSv für Kleinkinder berechnet. Für die Donau wurden 0,0003 bzw. 0,0005 mSv und für den Rhein 0,0001 mSv ermittelt. Zu den Werten trägt vor allem die äußere Bestrahlung auf Überschwemmungsgebieten bei, die im Wesentlichen durch Ablagerungen aus früheren Jahren bedingt ist.

Die Abb. 20 zeigt die für den ungünstigsten Punkt in der Umgebung der Anlage die aus den Emissionen des Jahres 2016 berechneten Strahlendosen.

Diesen Dosisberechnungen liegen die Modelle und Parameter der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV zu Grunde. Sie wurden entwickelt, um im Rahmen des Genehmigungsverfahrens einer kerntechnischen Anlage nachzuweisen, dass die Grenzwerte der Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung durch die geplanten Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser eingehalten werden. Daher enthalten diese Berechnungsverfahren viele konservative Annahmen über das der fiktiven Bezugsperson, z. B. ständiger Aufenthalt am Ort höchster Exposition, alle Nahrungsmittel vom Ort höchster Exposition.

Solche Modelle sind für die im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens erforderlichen prognostischen Dosisabschätzungen zum sicheren Nachweis der Einhaltung gesetzlicher Dosisgrenzwerte zweckmäßig. Sie sind aber zur diagnostischen Bestimmung der tatsächlichen Strahlenexposition einer realen Person wenig geeignet, da die Berücksichtigung der realen Lebensgewohnheiten durchaus zu einer um eine Größenordnung kleineren Dosis führen kann.

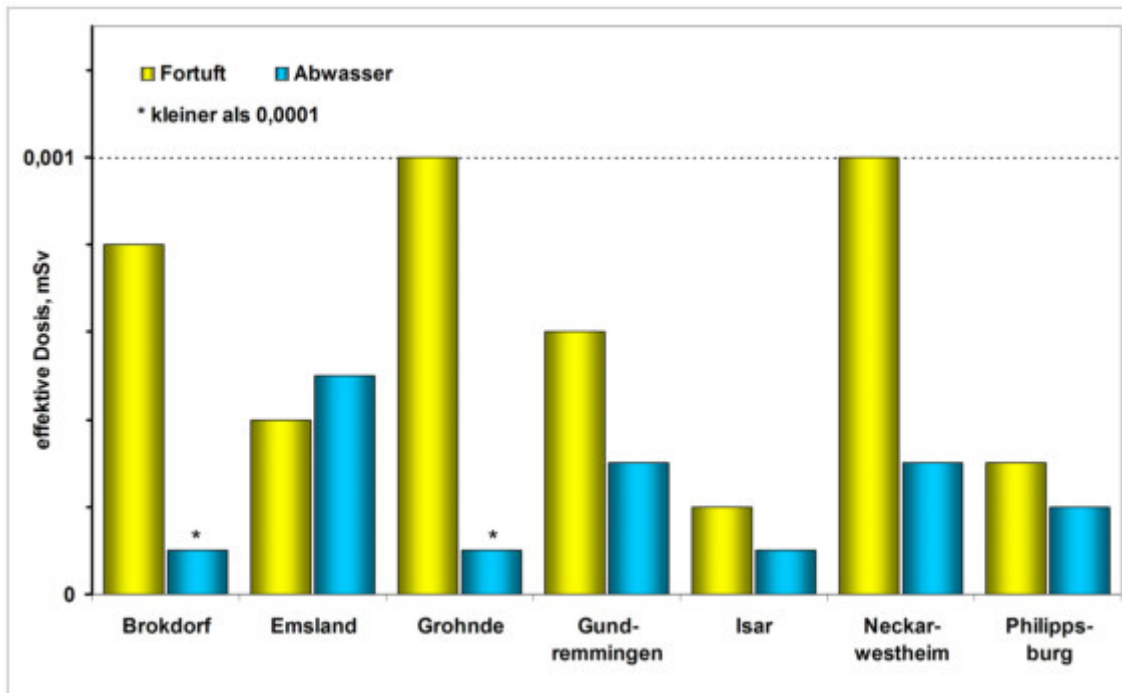


Abb. 20 Effektive Dosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Jahr 2016 (Daten aus BT-Drucksache 19/5350 [8])

Die Tab. 17 zeigt Ergebnisse aus einem Vergleich der in Deutschland, Großbritannien und Frankreich anzuwendenden Berechnungsverfahren. Bei den Dosisberechnungen wurde einheitlich eine Aktivitätsemission des nach deutschen Vorschriften anzuwendenden Modellgemisches unterstellt. Die konservativen Annahmen über die „Referenzperson“ (Aufenthaltszeit und -ort, Verzehrgeohnheiten) im deutschen Berechnungsmodell gegenüber der im britischen und französischen Modell zu berücksichtigen „kritischen Gruppe“ führen zu deutlich höheren Dosisabschätzungen.

Dosis	Jahresdosis in %, (D = 100 %)		
	Deutschland	Großbritannien	Frankreich
effektiv	100 %	17 %	34 %
Schilddrüse	100 %		35 %

Tab. 17 Berechnete Strahlenexposition bei Vorgabe der Emission des Modellgemisches der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV unter Berücksichtigung der länderspezifischen Berechnungsvorschriften (BMU 2005-674)

Im Vergleich zu den Daten in Kap 1.3 ein Hinweis auf die Antineutrinos aus Kernkraftwerken. Im Mittel werden pro Spaltungsvorgang durch den  $\beta$ -Zerfall der Spaltprodukte sechs Elektron-Antineutrinos emittiert. Bei einer thermischen Reaktorleistung von 1 GW entspricht das einer Produktion von  $1,8 \cdot 10^{20} \bar{\nu}_e \text{ s}^{-1}$ . Daraus errechnet sich z. B. für Block 2 des Kernkraftwerks Philippsburg ( $3,95 \text{ GW}_{\text{th}}$ ) in einem Abstand von 1 km eine Antineutrino-Flussdichte von  $6 \cdot 10^9 \bar{\nu}_e \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , etwa 20 % der der solaren Elektron-Neutrinos. Die resultierende Dosis entspricht damit in diesem Abstand etwa  $0,2 \cdot 10^{-12} \text{ mSv/Jahr}$ .

#### 2.4.5 Wiederaufarbeitung

Kommerzielle Wiederaufarbeitungsanlagen werden in Sellafield (Großbritannien) und La Hague (Frankreich) betrieben. Aus den Aktivitätsableitungen lässt sich die daraus resultierende kollektive regionale Strahlendosis zu 0,11 Personen-Sievert bezogen auf die Wiederaufarbeitung einer Kernbrennstoffmenge zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 GWh berechnen.

#### 2.4.6 Zusammenfassung: Strahlenexpositionen aus kerntechnischen Anlagen

Die Tab. 18 fasst die von UNSCEAR ermittelten Daten der Strahlenexposition durch die Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs für die regionale Bevölkerung zusammen. Die Dosis wurde dabei auf den Durchsatz an



Kernbrennstoff, der zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 Gwa (entspricht 8,76 Milliarden kWh) erforderlich ist, und die damit verbundene Aktivitätsfreisetzung bezogen.

Tätigkeit	normierte kollektive effektive Folgedosis Personen-Sievert pro Gwa
Bergbau	0,2
Erzaufbereitung	0,008
Halden	0,04
Brennelementfertigung	0,003
Reaktorbetrieb	0,3 (0,04 bei deutscher Anlagen)
Wiederaufarbeitung	0,11

Tab. 18 Normierte kollektive effektive Folgedosis für die regionale Bevölkerung durch die Emissionen radioaktiver Stoffe von kerntechnischen Anlagen, bezogen auf eine erzeugte elektrische Energie von 1 Gwa

## 2.5 Strahlenexposition durch fossile Energieträger zur Stromerzeugung

### 2.5.1 Kohle

Steinkohle und Braunkohle enthalten je nach Art und Herkunft in unterschiedlichen Konzentrationen natürlich radioaktive Stoffe, die bei der Verbrennung in die Biosphäre freigesetzt werden und so durch externe Bestrahlung und durch Inkorporation zu einer zusätzlichen, durch zivilisatorische Einflüsse bedingten Strahlenexposition durch natürliche Radioaktivität führen. Für die Verhältnisse in Deutschland lässt sich für eine erzeugte elektrische Energie von 1 Gwa die emittierte Aktivität langlebiger alphastrahlender Aerosole auf  $10^{10}$  Bq bei einem Steinkohlekraftwerk und auf  $10^9$  Bq bei einem Braunkohlekraftwerk abschätzen. Für ein Steinkohlekraftwerk ergibt sich für eine erzeugte elektrische Energie von 1 Gwa am ungünstigsten Ort in der Umgebung eine effektive Dosis von insgesamt 1 bis 4 Mikrosievert. Aufgrund der geringeren Emission und einer anderen Nuklidzusammensetzung ist der entsprechende Wert für Braunkohlekraftwerke geringer.

UNSCEAR hat Berechnungen über die Strahlenexposition durch die Kohlenutzung veröffentlicht. Bei einer weltweiten Betrachtung der Strahlenexposition durch die Stromerzeugung in Kohlekraftwerken ist zu berücksichtigen, dass ein großer Teil des Stroms in Kraftwerken mit nicht sehr effizienter Flugascherückhaltung erzeugt wird. Bezogen auf eine erzeugte elektrische Energie von 1 Gwa beträgt die Dosis in der unmittelbaren Nähe solcher Anlagen 40 Mikrosievert pro Jahr. Für moderne Anlagen wurden 2 Mikrosievert pro Jahr berechnet. Die kollektive effektive Folgedosis ermittelt sich für moderne Kraftwerke zu 0,5 Sv pro Gwa, für „alte“ Anlagen zu 6 Sv pro Gwa.

Die mittlere spezifische Aktivität der Asche beträgt für U-238 und Th-232 jeweils rund 150 Bq pro kg. Kraftwerksasche wird u. a. für die Zementproduktion eingesetzt. Da rund 5 % der jährlich anfallenden Asche über Zement und Beton zum Hausbau verwendet werden, errechnet sich pro Jahr der Verwendung solcher Baustoffe global eine kollektive effektive Dosis von 50 000 Personen-Sievert.

UNSCEAR schätzt, dass durch den Kohleeinsatz im privaten Bereich global die kollektive effektive Folgedosis 2 000 bis 40 000 Personen-Sievert pro Jahr beträgt. Die gesamte Strahlenexposition durch Kohlenutzung in Industrie und Haushalt einschließlich der Dosis durch die industrielle Nutzung der Nebenprodukte ist in der Tab. 19 zusammengefasst. Es ist zu berücksichtigen, dass die Dosisangaben infolge der Kohlenutzung im Haushalt und der resultierenden Exposition der Umwelt aus Modellrechnungen ermittelt wurden und mit Unsicherheiten verbunden sind, die durch Messungen bereinigt werden müssten.

Quelle	kollektive effektive Folgedosis pro Jahr der Nutzung, Sievert
Kohlebergbau	0,5 bis 10
Kohlekraftwerke	8 000
Nutzung der Asche	50 000
Kohle, häuslicher Bereich	2 000 bis 40 000

Tab. 19 Schätzungen der kollektiven Folgedosis der Bevölkerung aus dem jährlichen Kohleeinsatz (UNSCEAR, Report 1993 [2])

### 2.5.2 Erdöl

Die aus der Emissionen natürlich radioaktiver Stoffen aus Erdölkraftwerken resultierende jährliche effektive Dosis für Personen in der Umgebung eines solchen Kraftwerks beträgt etwa 1 Mikrosievert. Die kollektive effektive Folgedosis durch die Verbrennung von Erdöl zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 GWh beträgt 0,5 Personen-Sievert. Im Jahre 2013 wurden weltweit etwa 100 GWh elektrische Energie aus Erdöl gewonnen. Daraus folgt sich eine kollektive effektive Folgedosis von 50 Personen-Sievert.

### 2.5.3 Erdgas

Die Radon-Konzentration in Erdgas variiert von nicht nachweisbaren Werten bis zu 50 kBq pro m<sup>3</sup>. Ein typischer Wert ist 1 kBq pro m<sup>3</sup>. Da zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 GWh rund 2·10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> Erdgas verbrannt werden müssen, beträgt die Radon-Emission entsprechend 2·10<sup>12</sup> Bq pro GWh. Dies ergibt eine zusätzliche effektive Dosis durch Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten in der Nähe eines solchen Kraftwerks von 0,2 bis 1 Mikrosievert pro Jahr. Die kollektive effektive Folgedosis durch die Verbrennung von Erdgas zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 GWh beträgt 0,03 Personen-Sievert. Im Jahre 2013 wurden weltweit etwa 600 GWh elektrische Energie aus Erdgas gewonnen. Daraus folgt sich eine kollektive effektive Folgedosis von 20 Personen-Sievert.

### 2.5.4 Reduktion der Strahlenexposition durch fossile Energieträger

Es ist anzumerken, dass durch die Verbrennung von Kohle und anderen fossilen Brennstoffen die spezifische Aktivität des natürlichen C-14 reduziert wird. Natürlicher Kohlenstoff-14 entsteht durch Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung in der Atmosphäre mit einer Aktivität von rund 1·10<sup>15</sup> Bq pro Jahr. Messungen an Holz von Bäumen aus dem 19. Jahrhundert ergaben 227 Bq Kohlenstoff-14 pro kg Kohlenstoff. Benutzt man diesen Wert, so errechnet sich aus dem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt in den verschiedenen Körpergeweben eine effektive Jahresdosis durch C-14 von 12 Mikrosievert.

Die Freisetzung von CO<sub>2</sub> durch das Verbrennen fossiler und damit C-14-freier Energieträger führt zu einer Vergrößerung des C-12-Anteils in der Biosphäre und dadurch zu einer Verringerung der Gleichgewichtskonzentration von C-12 zu C-14. Mitte der 1970er Jahre ergab sich durch diesen sogenannten Suess-Effekt eine Reduktion der spezifischen C-14-Konzentration in der Atmosphäre um rund fünf Prozent.

Zur Erzeugung von 1 GWh elektrischer Energie müssen rund 3·10<sup>9</sup> kg Kohle verbrannt werden. Würde diese Kohle den natürlichen C-14-Gehalt aufweisen, so ergäbe das eine Freisetzung von knapp 6·10<sup>11</sup> Bq C-14. Daraus errechnet sich eine kollektive effektive Folgedosis von 70 Sv pro GWh. Da aber diese Aktivität nicht freigesetzt wird, reduziert sich wegen der Verringerung der spezifischen C-14-Aktivität die Folgedosis entsprechend. Zu berücksichtigen ist, dass diese Reduktion sich erst im Verlauf von einigen zehntausend Jahren auf den genannten Wert aufaddiert.

### 2.5.5 Zusammenfassung: Strahlenexposition durch fossile Energieträger

In Tab. 20 sind die Dosiswerte durch die Nutzung nicht-nuklearer Energieträger zur Stromerzeugung zusammengefasst, Werte für Kernkraftwerke zum Vergleich.

Energieträger	effektive Dosis in der Umgebung μSv pro GWh	dosisrelevante Radionuklide
Braunkohle	0,5 bis 2	U-238, Th-232 und Folgeprodukte (insbesondere Pb-210, Ra-226, Po-210)
Steinkohle	1 bis 4	
Erdöl	1	
Torf	2 bis 4	
Erdgas	0,2 bis 1	Rn-222 und Folgeprodukte
<i>Kernenergie</i>	<i>0,2 bis 1</i>	<i>Spalt- und Aktivierungsprodukte</i>

Tab. 20 Typische Werte der effektiven Dosis der Bevölkerung in der Umgebung von Kraftwerken zur Stromerzeugung pro erzeugter elektrischer Energie von 1 GWh

## 2.6 Strahlenexposition durch Kernwaffenexplosionen

Kernwaffenexplosionen erzeugen sehr große Radioaktivitätsmengen an Spalt- und Aktivierungsprodukten. Neben diesen Spalt- und Aktivierungsprodukten haben für die Strahlenexposition auch die bei der Explosion aus dem Uran-238 entstehenden Plutoniumisotope sowie der Teil des ungespalten gebliebenen Bombenmaterials eine Bedeutung. Bis zum 1.1.2019 wurden oberirdisch, d. h. mit einer Freisetzung der radioaktiven Stoffe in die Atmosphäre, 504 Kernwaffen mit einer Sprengkraft von 440 Megatonnen TNT-Äquivalent gezündet. Die nach Zahl und Sprengkraft größten Versuchsserien wurden in den Jahren 1961/62 durchgeführt. Die Zahl der unterirdischen Explosionen beträgt 1 882 mit einer Sprengkraft von 90 Mt. Diese unterirdischen Explosionen sind mit keiner relevanten Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre verbunden. (Daten nach UNSCEAR-Report 2008 [2], aktualisiert.)

Die Strahlenexposition der Bevölkerung durch den radioaktiven Fallout folgt aus einer externen Bestrahlung durch die auf dem Boden abgelagerte Radioaktivität und durch die interne Strahlendosis infolge Inhalation oder den Verzehr von kontaminierten Nahrungsmitteln. Den zeitlichen Verlauf der Exposition in Mitteleuropa gibt Abb. 21 wieder. Die Abb. 22 zeigt die Ergebnisse von Messungen des Cs-137-Gehalts im Körper, die an einer Referenzpersonengruppe im Ganzkörperzähler des Forschungszentrums Karlsruhe - seit 2009 Karlsruher Institut für Technologie KIT - ermittelt wurden.

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. Die globale kollektive effektive Folgedosis (berechnet für einen Zeitraum von 10 000 Jahren und eine Weltbevölkerung von 10 Milliarden Menschen) wird auf rund 22 Millionen Personen-Sievert geschätzt (Tab. 21). Neben der Strahlenexposition durch den weltweiten Fallout haben die Kernwaffentests in den Testgebieten zu regionalen Expositionen geführt. Ihr Beitrag zur kollektiven weltweiten Folgedosis ist gering, die Individualdosen der Bevölkerung waren aber zum Teil hoch. Regional führten die Aktivitätsableitungen aus den Kernwaffenproduktionsanlagen (Hanford, USA; Tscheljabinsk, UdSSR) zu erheblichen Strahlenexpositionen (Tab. 21).

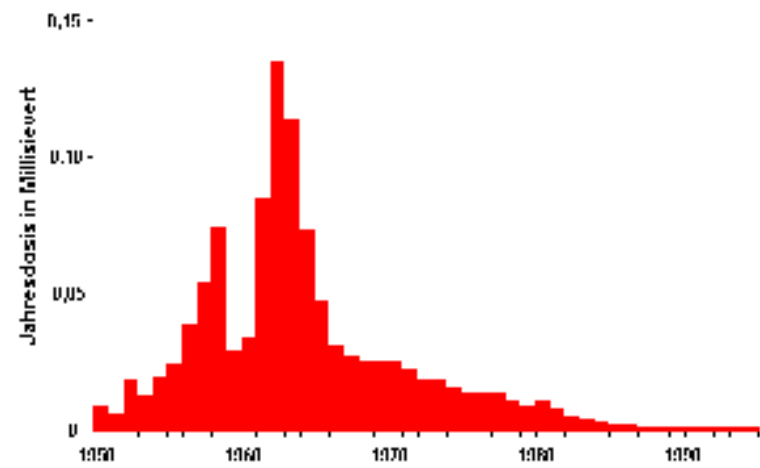


Abb. 21 Jährliche Dosis durch Kernwaffentests, mittlere Werte für Mitteleuropa

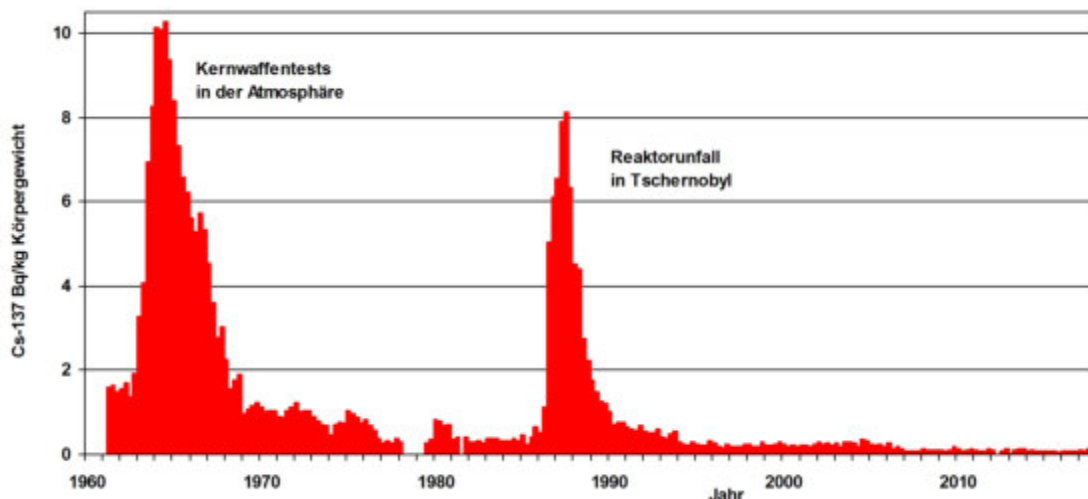


Abb. 22 Cs-137-Körperaktivität der Karlsruher Referenzgruppe, 1961 - 2017

Tätigkeit	kollektive effektive Dosis in den nächsten 10 000 Jahren in Personen-Sievert	
	regional	global
Kernwaffentests		
Semipalatinsk, UdSSR	4 600	22 300 000
Australien	700	
Nevada, USA	500 *	
Pazifik	160 *	
Kernwaffenproduktion		
Hanford, USA	8 000 **	10 000
Tscheljabinsk, UdSSR	15 000	
Radon aus Halden	30 000	

\* nur externe Dosis    \*\* nur Dosis durch I-131

Tab. 21 Kollektive effektive Folgedosis durch Kernwaffen (Test und Produktion), Daten nach UNSCEAR-Report 2000 [2]

## 2.7 Strahlenexposition durch Unfälle

### 2.7.1 Unfälle in Kernkraftwerken

Bisher sind weltweit in Kernkraftwerken vier Unfälle mit z. T. erheblichen Auswirkungen auf die Umwelt eingetreten. Wie sehr die Freisetzungen bei diesen Reaktorunfällen variierten, zeigt die Tab. 22 für die Reaktorunfälle von Windscale [13], Harrisburg (UNSCEAR Report 2008 [2]), Tschernobyl (UNSCEAR Report 2008 [2]) und Fukushima (UNSCEAR Report 2013 [2], IAEA [14]).

Nuklid	freigesetzte Aktivität in $10^{15}$ Bq			
	Windscale Okt. 1957	Harrisburg März 1979	Tschernobyl April 1986	Fukushima März 2011
Sr-90	0,0008	-	10	0,2
I-131	1,8	0,0006	1 760	124
Cs-134	0,1	-	47	9
Cs-137	0,2	-	85	9
Xe-133	26	370	6 500	7 300

Tab. 22 Aktivitätsfreisetzungen in die Atmosphäre bei Reaktorunfällen

#### 2.7.1.1 Windscale

Im Plutonium-Produktionsreaktor Windscale (England) kam es am 10. Oktober 1957 durch einen Graphitbrand zur Überhitzung der Brennelemente und Zerstörung. I-131 führte lokal zu Schilddrüsendosen bis zu 10 mSv für Erwachsene und bis zu 100 mSv für Kleinkinder. Die gesamte effektive Dosis in Europa - überwiegend in Großbritannien - wurde zu 2 000 Personen-Sievert abgeschätzt. Später veröffentlichte Untersuchungen ergaben, dass etwa  $42 \cdot 10^{12}$  Bq Po-210 aus den Isotopenproduktionskanälen des Reaktors freigesetzt wurden, was zu einer ähnliche hohen effektiven Dosis wie die Iod-Freisetzung geführt haben kann.

#### 2.7.1.2 Harrisburg

Am 28. März 1979 ereignete sich ein Unfall im Block 2 des Kernkraftwerks Three Mile Island, in der Nähe von Harrisburg, Pennsylvania, USA. Infolge unzureichender Kühlung schmolz ein Teil des Reaktorkerns. Der Sicherheitsbehälter der Anlage verhinderte weitgehend eine Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung. Die mittlere Strahlendosis der Bevölkerung im Umkreis von 10 Meilen (16 km) betrug 0,08 mSv, die höchste Dosis einzelner Personen wurde zu 1 mSv ermittelt.

### 2.7.1.3 Tschernobyl

Bei dem Reaktorunfall von Tschernobyl am 26. April 1986 kam es zu einem Schmelzen der Brennelemente. Der Moderator Graphit geriet in Brand. Aus dem zerstörten Reaktorgebäude gelangten Radionuklide ins Freie. Ein Großteil der Radionuklide hat zu einer hohen Kontamination der Umwelt in einer 30-km-Zone um den Reaktor geführt. Durch die Brände wurden radioaktive Stoffe in Höhen von über 5 km transportiert und über weite Gebiete verteilt.

Die Abb. 23 zeigt die durch die durch die Wetterbedingungen verursachte sehr unterschiedliche Verteilung der Cs-137-Kontamination in Europa (Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident, EU 1998).



Abb. 23 Cs-137-Bodenkontamination durch den Tschernobyl-Unfall

Der UNSCEAR-Bericht 2008 enthält eine Übersicht über die unfallbedingte Strahlenexposition besonders betroffener Personengruppen (Tab. 23).

Gruppe	Personenzahl (in Tausend)	unfallbedingte mittlere effektive Dosis 1986 - 2005 (mSv)	unfallbedingte effektive Kollektivdosis 1986 - 2005 (Personen-Sv)
Aufräumarbeiter („Liquidatoren“)	530	117*	61 200
evakuierte Personen	115	31**	3 600
Bewohner kontaminierter Gebiete*** in Belarus, Russland, Ukraine	6 400	9**	58 900 ****
Bewohner anderer Gebiete in Belarus, Russland, Ukraine	98 000	1,3**	125 000 ****

\* nur externe Strahlenexposition

\*\* ohne Schilddrüsendosis, Lebenszeitdosis etwa 25 % höher

\*\*\* Cs-137-Kontamination > 37 kBq m<sup>-2</sup>

\*\*\*\* Lebenszeitdosis etwa 25 % höher

Tab. 23 Strahlenexposition verschiedener Personengruppen infolge des Tschernobyl-Unfalls

In Deutschland sind die abgelagerten Aktivitätsmengen im Norden und Westen deutlich geringer als im Süden und Südosten. Berechnet man die sich für die nächsten 50 Jahre ergebende Gesamtdosis, so ergeben sich 0,4 mSv für die Gebiete nördlich der Donau und bis zu 2,1 mSv für das Voralpengebiet. Für Einzelpersonen mit extremen Lebens- und Verzehrsgewohnheiten können sich maximale Dosiswerte bis zum Zweifachen oder Dreifachen dieser Werte ergeben.

#### 2.7.1.4 Fukushima

Der durch das Erdbeben vom 11. März 2011 ausgelöste Tsunami zerstörte sicherheitstechnisch wichtige Anlagen der Blöcke 1 bis 4 des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi. Die Reaktoren 1 bis 3 konnten zwar abgeschaltet werden (Block 4 war wegen Revision nicht in Betrieb), aber durch den vollständigen Ausfall der Stromversorgung, auch aller Notstromanlagen, war die erforderliche Kühlung der Brennelemente zur Abfuhr der Nachwärme nicht zu gewährleisten. Die Überhitzung führte zum partiellen Schmelzen der Brennstäbe und zu Wasserstoffexplosionen in drei Blöcken mit Freisetzung radioaktiver Stoffe. Infolge der Küstenlage und durch vorherrschend westliche Winde wurde der überwiegende Teil der freigesetzten radioaktiven Stoffe auf den Pazifik geweht.

Die Abb. 24 zeigt die Ortsdosisleistung in Tokio. Das dunkle Band im unteren Teil des Bildes gibt die Schwankungsbreite der natürlichen  $\gamma$ -Dosisleistung im Freien durch die kosmische und terrestrische Strahlung an. Die durch den Fukushima-Unfall bedingte effektive Dosis der Bevölkerung in Tokio aus externer Bestrahlung und Inhalation betrug etwa 0,1 mSv.

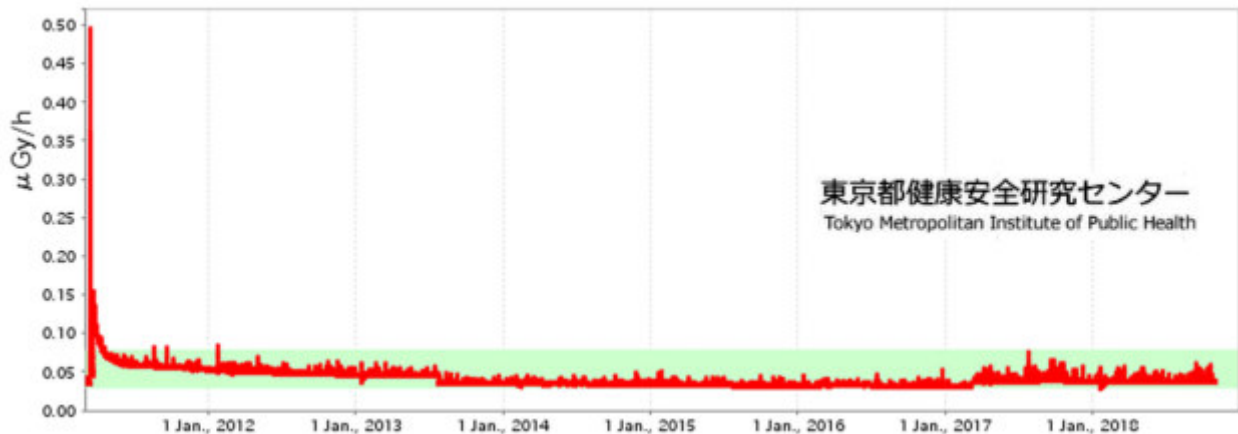


Abb. 24 Ortsdosisleistung im Freien, Tokio, 13.3.2011 bis 1.11.2018

Das Gebiet von 30 km (zuerst 20 km) um die Anlage wurde evakuiert. Besonders betroffen ist ein etwa 600 km<sup>2</sup> großes Gebiet in nordwestlicher Richtung des Kernkraftwerks und hier insbesondere die Ortschaft Iitate (rd. 7 000 Einwohner). Die Verteilung der Bodenkontamination durch Cs-137 zeigt die Abb. 25.

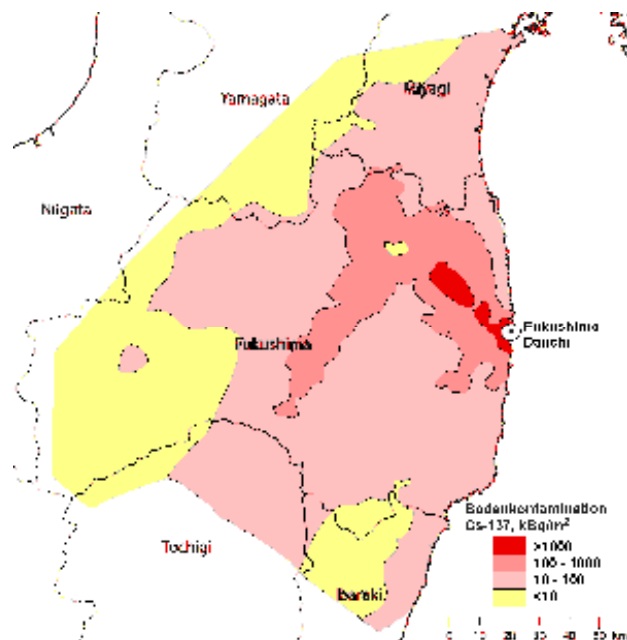


Abb. 25 Bodenkontamination durch Cs-137, UNSCEAR 2013, Vol. I

Der UNSCEAR-Report 2013 enthält ausführliche Daten über die Freisetzung und Verteilung radioaktiver Stoffe durch den Unfall und Abschätzungen für die zu erwartende Strahlenexposition verschiedener Bevölkerungsgruppen in Japan (Tab. 24). Die effektive Dosis für Personen in den Nachbarstaaten wird mit kleiner als 0,01 mSv für das erste Jahr angegeben. Die von verschiedenen Staaten aufgrund eigener nationaler Berechnungen ermittelten geschätzten Dosiswerte sind in der Tab. 25 wiedergegeben.

Altersgruppe (Alter zur Unfallzeit)	effektive Dosis, mSv		
	Präfektur Fukushima	benachbarte Präfektoren	übriges Japan
Dosis bis zum 80. Lebensjahr			
Erwachsene	1,1 – 11	0,2 – 4,0	0,1 – 0,6
Kinder, 10 Jahre	1,4 – 16	0,3 – 5,5	0,1 – 0,8
Kleinkinder, 1 Jahr	2,1 – 18	0,4 – 6,4	0,2 – 0,9

Tab. 24 Effektive Dosis für Personen in verschiedenen Gebiete Japans, die zum Zeitpunkt des Unfalls Erwachsene, Kinder und Kleinkinder, waren, UNSCEAR 2013, Vol. I

Land	effektive Dosis, Erwachsene, mSv	Land	effektive Dosis, Erwachsene, mSv
Deutschland	$3 \cdot 10^{-5}$	Kuba	$2 \cdot 10^{-3}$
Frankreich	$2 \cdot 10^{-4}$	Niederlande	$< 1 \cdot 10^{-5}$
Griechenland	$1,1 \cdot 10^{-6}$	Portugal	$4,6 \cdot 10^{-5}$
Italien	$3,5 \cdot 10^{-2}$	Rumänien	$8,5 \cdot 10^{-5}$
Korea	$1,4 \cdot 10^{-4}$	Serbien	$7,2 \cdot 10^{-3}$

Tab. 25 Effektive Dosis im ersten Jahr nach dem Fukushima-Unfall nach nationalen Berechnungen, UNSCEAR Report 2013

Anmerkung: Die z. T. sehr großen Unterschiede in den berechneten Werten ergeben sich aus verschiedenen Modellannahmen bei der Umrechnung der Aktivitätskonzentration von Einzelproben auf einen mittleren Dosiswert für das ganze Land. Die von einigen Ländern vorgenommene Angabe von zwei signifikanten Stellen suggeriert eine tatsächlich nicht vorhandene Genauigkeit der Daten.

Ab dem 25. März 2011 konnten in Deutschland Spuren der in Fukushima freigesetzten Radioaktivität in der Luft gemessen werden, so an der Messstelle des Bundesamtes für Strahlenschutz auf dem Schauinsland im Schwarzwald, s. Abb. 26. Eine Strahlendosis ist durch diese Aktivitätskonzentrationen nicht gegeben. Das Bundesamt für Strahlenschutz errechnete aus diesen Messwerten eine effektive Dosis von 0,000 03 mSv.

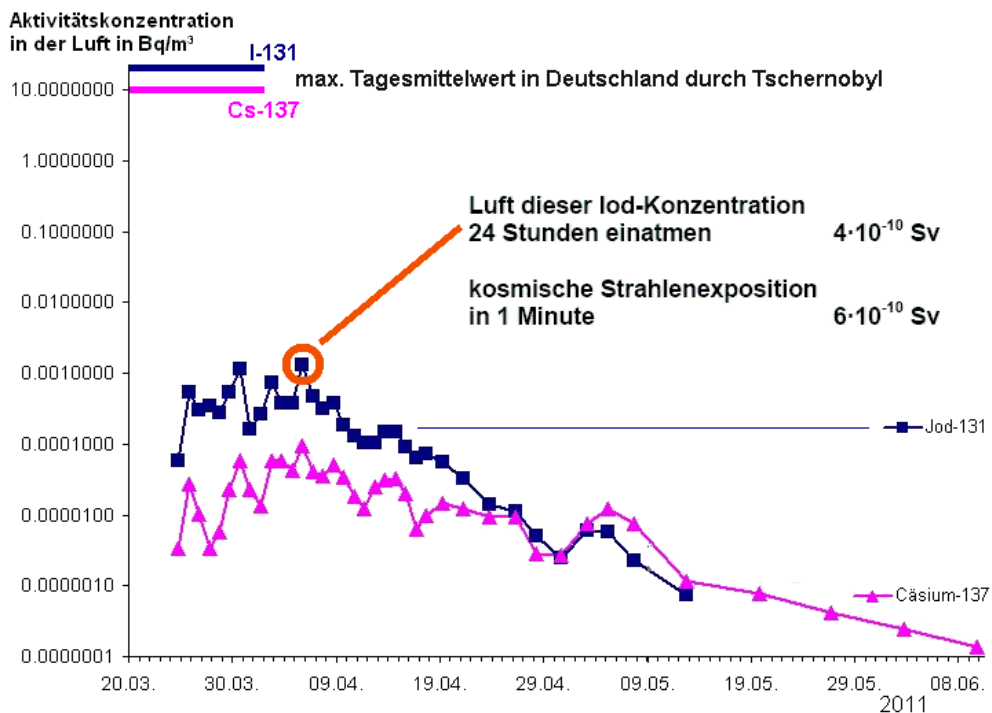


Abb. 26 Aktivitätskonzentrationen radioaktiver Stoffe in der Luft, Messstelle des Bundesamtes für Strahlenschutz auf dem Schauinsland im Schwarzwald

## 2.7.2 Satellitenabstürze, Unfälle in kerntechnischen Anlagen und mit radioaktiven Quellen

### 2.7.2.1 Satellitenabstürze

- Nach einem Fehlstart am 21. April 1964 verglühte beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre ein Satellit für das ehemalige Satellitennavigationssystem Transit der US-Navy über Madagaskar, der zur Stromversorgung einen Radionuklidgenerator mit  $6 \cdot 10^{14}$  Bq Pu-238 an Bord hatte. Für die Bewohner der südlichen Hemisphäre errechnet sich aus dem Aktivitätseintrag in die Atmosphäre eine effektive Folgedosis durch Inhalation von 1,6 Mikrosievert, für die Bewohner der nördlichen Hemisphäre von 0,4 Mikrosievert. Die effektive Kollektivdosis ergibt sich zu 2 100 Personen-Sievert.
- Am 24. Januar 1978 stürzte über Kanada der militärische sowjetische Satellit Kosmos 954 mit einem 100-kW<sub>th</sub>-Reaktor ab. Die dabei überwiegend in der nördlichen Hemisphäre freigesetzten Radionuklide führen zu einer kollektiven effektiven Folgedosis von 20 Personen-Sievert.

### 2.7.2.2 Unfälle in kerntechnischen Anlagen

- Am 21. August 1945 ereignete sich im Los Alamos Laboratory, New Mexiko, USA beim Experimentieren mit einer Pu-Anordnung ein Kritikalitätsunfall. Der Experimentator erhielt eine Dosis von 5,1 Sv und starb nach 28 Tagen.
- Am 21. Mai 1946 ereignete sich im Los Alamos Laboratory, New Mexiko, USA beim Experimentieren mit derselben Pu-Anordnung ein weiterer Kritikalitätsunfall. Der Experimentator erhielt eine Dosis von 21 Sv und starb nach neun Tagen. Sieben weitere Personen erhielten Strahlendosen von 3,6 bis 0,37 Sv.
- Am 29. September 1957 überhitzte sich in der militärischen Plutonium-Produktionsanlage Majak bei Kyshtym, Südrural nach Kühlungsausfall ein Lagertank mit 80 t hochaktivem Flüssigabfall und explodierte. Die durch die radioaktive Wolke betroffene Fläche wurde auf rund 20 000 km<sup>2</sup> abgeschätzt mit einer betroffenen Bevölkerung von etwa 270 000 Personen. Rund 10 000 Personen wurden evakuiert. Die gesamte effektive Kollektivdosis wird auf 2 500 Personen-Sievert geschätzt.
- Am 15. Oktober 1958 ereignete sich im Institut für Nuklearwissenschaften „Boris Kidrič“, Vinča, Jugoslawien ein Kritikalitätsunfall an einem Forschungsreaktor, bei dem sechs Personen Strahlendosen zwischen 2 und 4,2 Sv erhielten, eine Person starb.
- Am 30. Dezember 1958 ereignete sich im Los Alamos Scientific Laboratory, New Mexiko, USA bei der Durchmischung von Plutonium-Lösungen in einem ungeeigneten Tank ein Kritikalitätsunfall. Eine Person, die den Mischvorgang beobachtete, erhielt eine Dosis am Oberkörper von 120 Sv. Sie starb nach 36 Stunden.
- Am 3. Januar 1961 ereignete sich am SL-1 Reaktor, einem 3 MW<sub>th</sub>-Prototypreaktor, in der National Reactor Testing Station, Idaho, USA bei der Vorbereitung des Reaktorstarts durch Herausziehen des zentralen Steuerstabs ein Kritikalitätsunfall. Der Reaktor wurde überkritisch. Durch die Energiefreisetzung kam es zu einer Dampfexplosion, durch die die drei Personen des Betriebspersonals starben.
- Am 4. Juli 1961 – 70 Seemeilen vor der Insel Jan Mayen im Arktischen Ozean – führte ein Leck im Primärkreislauf eines Reaktors des sowjetischen Atom-U-Boots K-19 zum Ausfall der Reaktorkühlung. Es drohte eine Kernschmelze. In einer Notreparatur wurde eine provisorische Kühlung hergestellt. Bei diesen Arbeiten erhielten acht Personen Strahlendosen von 50 bis 60 Sv. Sie starben innerhalb von sechs bis 19 Tagen. 31 weitere Personen erhielten Dosen von mehr als 1 Sv.
- Am 26. Mai 1971 ereignete sich an der SF-3-Anlage im Kurtschatow-Institut Moskau bei Versuchen zur Bestimmung der Anzahl von Brennstäben aus hoch angereichertem U-235 zum Erreichen einer kritischen Anordnung durch ein mechanisches Versagen der Versuchsanordnung ein Kritikalitätsunfall, bei dem zwei Experimentatoren Strahlendosen von 60 und 20 Sv erhielten und nach fünf bzw. 15 Tagen starben. Zwei weitere Personen mit Dosen von 7 bis 8 Sv überlebten.
- Am 30. September 1999 ereignete sich in einer Uranverarbeitungsanlage in Tōkai-mura, Ibaraki, Japan ein Kritikalitätsunfall bei der Handhabung von angereichertem Uran. In einen Behälter wurde Uran in einer Menge und mit einem Anreicherungsgrad eingefüllt, für den der Behälter nicht zugelassen war. Zwei der beteiligten Arbeiter erhielten Strahlendosen von 10 bzw. 20 Sv und starben nach 210 bzw. 82 Tagen.

### 2.7.2.3 Unfälle mit radioaktiven Quellen und Bestrahlungsanlagen

- Am 21. März 1962 fand in Mexiko-Stadt ein 10-jähriger Junge eine industrielle Radiographiequelle mit  $0,2 \cdot 10^{12}$  Bq Co-60, trug sie einige Tage in seiner Hosentasche und legte sie dann zu Hause in den Küchenschrank. Der Junge starb am 29. April, drei weitere Familienmitglieder bis zum 15. Oktober. Eine



Strahlenexposition wurde bei keiner dieser Personen als Todesursache diagnostiziert. Spätere Dosisabschätzungen ergeben Werte zwischen 30 und 50 Gy.

- Am 11. Januar 1963 wurde in Sanlian, China eine Co-60-Quelle einer industriellen Bestrahlungsanlage aus einem Abfalllager von einem Kind „mitgenommen“ und nach Hause gebracht. Mehrere Familienmitglieder erhielten Strahlendosen von 2 bis 80 Sv. Zwei Kinder - Dosis von 40 und 80 Sv - starben nach elf und zwölf Tagen.
- Von 1974 bis 1976 wurden an einer Co-60-Therapiebestrahlungsanlage des Riverside Methodist Hospital in Columbus, Ohio, USA Kalibrierungen fehlerhaft durchgeführt, die bis zu einer fünfzigprozentigen Überexposition bei Therapiebestrahlungen führten. Zehn Personen starben aufgrund der Überexposition. Für weitere Personen kann die Überexposition mitverursachend für ihren Tod gewesen sein.
- Im Oktober 1982 wurden in Baku, Aserbeidschan durch eine Cs-137-Quelle, die eine Person in ihrer Kleidung trug, 18 Personen einer Strahlenexposition ausgesetzt. Fünf Personen starben.
- Am 6. Dezember 1983 wurde von einem Schrotthändler in Ciudad Juárez, Mexiko eine gebrauchte medizinische Bestrahlungsanlage zerlegt, die noch  $17 \cdot 10^{12}$  Bq Co-60 in Form von rund 6 000 Pellets von je 1 mm Größe enthielt. Die radioaktiven Pellets verteilten sich auf dem Schrottplatz. Durch Schrottrezyklierung gelangte Radioaktivität in neue Stahlprodukte. Die Kontamination wurde erst am 16. Januar 1984 erkannt, als ein mit diesen kontaminierten Stahlprodukten beladener LKW am Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA sich verfahren hatte und dabei die Strahlungssensoren der Forschungseinrichtung Strahlenalarm auslösten. Einzelne Personen erhielten eine Dosis bis zu 3 Sv; die Gesamtdosis der rund tausend bestrahlten Personen wurde auf 150 Personen-Sievert abgeschätzt.
- Im März 1984 ging in Mohammedia, Marokko eine Ir-192-Quelle für industrielle Radiographie mit einer Aktivität von  $0,6 \cdot 10^{12}$  Bq verloren. Der Finder bewahrte sie zu Hause auf. Acht Personen starben an einer Überexposition mit Dosen von 8 bis 25 Sv.
- Im September 1987 wurde in Goiânia, Brasilien eine medizinische Bestrahlungsanlage mit  $51 \cdot 10^{12}$  Bq Cs-137 gestohlen, an einen Schrotthändler verkauft und dort zerlegt. Über 100 Personen wurden kontaminiert. Vier Personen mit Strahlendosen von 4,5 bis 7 Gy starben bis Ende Oktober 1987. Eine fünfte Person - Dosis etwa 7 Gy - starb im Mai 1994 an Leberversagen aufgrund der damaligen Exposition.
- Im Dezember 1990 ereignete sich ein Fehler bei der Kalibrierung eines Linearbeschleunigers für die klinische Strahlentherapie der Universitätsklinik Saragossa, Spanien. Insgesamt 27 Patienten erhielten eine zu hohe Strahlendosis bei der Behandlung. Zehn Personen starben bis Ende März 1991. Für weitere acht Personen kann die Überexposition mitverursachend für ihren Tod gewesen sein.
- Am 22. August 1996 wurde in der Therapiebestrahlungsanlage des San Juan de Dios Hospital in San José, Costa Rica eine neue Co-60-Quelle eingebaut. Bei der Kalibrierung der Quelle erfolgte eine fehlerhafte Berechnung der Dosisleistung, die zu Überexpositionen bei der Strahlenbehandlung von bis zu 60 % führte. Die Zuordnung der Sterbefälle auf diese Überexposition oder auf die originäre Erkrankung ist nicht möglich. Abschätzungen liegen zwischen drei und sieben Personen.
- Am 13. September 1999 versuchten sechs Personen radioaktives Material aus einer Chemiefabrik in Grosny, Russland zu stehlen. Sie öffneten einer der 28 Behälter, die jeweils neun Stäbe mit je  $1 \cdot 10^{15}$  Bq Co-60 enthielten. Drei Personen starben an der Exposition, eine davon innerhalb von 30 Minuten.
- 1999 wurde an einer Bushaltestelle in Kingissepp, Bezirk St. Petersburg, Russland die Strahlenquelle eines thermoelektrischen Radionuklidgenerator gefunden. Die Dosisleistung an der Oberfläche betrug über 10 Gy/h. Der Radionuklidgenerator, der zur Stromerzeugung für einen Leuchtturm diente, war von drei Männern gestohlen worden, um ihn als Metallschrott zu verkaufen. Alle drei Personen starben aufgrund der Strahlenexposition.
- Am 24. Januar 2000 wurde aus einer Anlage in Samut Prakarn, Thailand eine Teletherapiequelle mit  $16 \cdot 10^{12}$  Bq Co-60 an einen Altmetallhändler verkauft. Bei der Zerlegung fiel die Strahlenquelle unbemerkt aus der Abschirmung. Erst nach Tagen wurden die Krankheitssymptome bei einigen Arbeitern als Strahlenkrankheit erkannt. Drei Personen starben nach einigen Wochen. Ihre Ganzkörperdosis wurde auf 2 Gy abgeschätzt, zudem sehr hohe lokale Dosen.
- Im Mai 2000 fand ein Bauer aus Meet Halfa, Ägypten eine Ir-192-Radiographiequelle und nahm sie mit nach Hause. Im Verlauf der nächsten Wochen verstarben zwei Personen; fünf weitere Familienmitglieder erkrankten, ohne dass die Ursache korrekt diagnostiziert wurde. Erst zwei Wochen später wurde eine Einwirkung ionisierender Strahlung vermutet und die Quelle geborgen. Die Personendosen wurden auf 4 bis 8 Gy abgeschätzt.

- Eine im August 2000 erfolgte Änderung der computergestützten Bestrahlungsplanung zur Strahlentherapie im Instituto Oncologico Nacional von Panama City, Panama führte zu Überexpositionen von Patienten. Der Fehler wurde im März 2001 durch das vermehrte Auftreten von Symptomen einer akuten Strahlenüberdosis an den bis dahin behandelten Personen entdeckt. Von den bis zum August 2003 insgesamt verstorbenen 21 Patienten werden 17 Sterbefälle der Überexposition bei der Behandlung zugeordnet.
- Im Februar 2010 wurde beim "Frühjahrsputz" in der Universität von Delhi, Indien eine ehemals für Forschungszwecke eingesetzte und seit 1985 nicht mehr benutzte Gammabestrahlungseinheit an einen Schrotthändler versteigert. Im März/April 2010 erkrankten mehrere Personen. Nach der Einweisung in Krankenhäuser wurde Strahlenkrankheit diagnostiziert. Eine Person starb Ende April 2010. Die Dosis wurde auf etwas über 3 Gy abgeschätzt.

### 3 BERUFLICHE STRAHLENEXPOSITION IN DEUTSCHLAND

Die Strahlenschutzverordnung fordert, dass für Personen, die sich in Kontrollbereichen aufhalten (Ausnahmen bestehen für Personen, an denen in Ausübung der Heilkunde oder Zahnheilkunde radioaktive Stoffe oder ionisierende Strahlen angewendet werden) und für Personen, bei denen infolge ihrer Beschäftigung die aus natürlichen Strahlungsquellen resultierende Exposition eine effektive Dosis von 6 mSv im Kalenderjahr überschreiten kann, die Körperdosis zu ermitteln ist. Weiterhin ist von den Luftverkehrsgesellschaften die effektive Dosis, die das fliegende Personal durch kosmische Strahlung während des Fluges erhält, zu ermitteln, soweit diese Dosis 1 mSv im Kalenderjahr überschreiten kann.

Für die erste Personengruppe erfolgt die Dosisermittlung grundsätzlich durch Messung der Personendosis durch amtlich festgelegte Messstellen. Für die zweite Personengruppe erfolgt die Dosisermittlung durch die Messung der Konzentration radioaktiver Stoffe in der Luft (Radon-222). Die Dosis für das fliegende Personal wird mittels zugelassener Rechenprogramme aus den Flugrouten und den Einsatzzeiten des Personals berechnet. Im Jahr 2016 wurde für rund 418 000 Personen eine Dosisüberwachung durchgeführt. Nur bei rund 25 % dieser Personen wurde eine messbare Jahrespersonendosis festgestellt.

Die Abb. 27 enthält die Ergebnisse der Personendosisüberwachung dieser drei Gruppierungen für das Jahr 2016 [8].

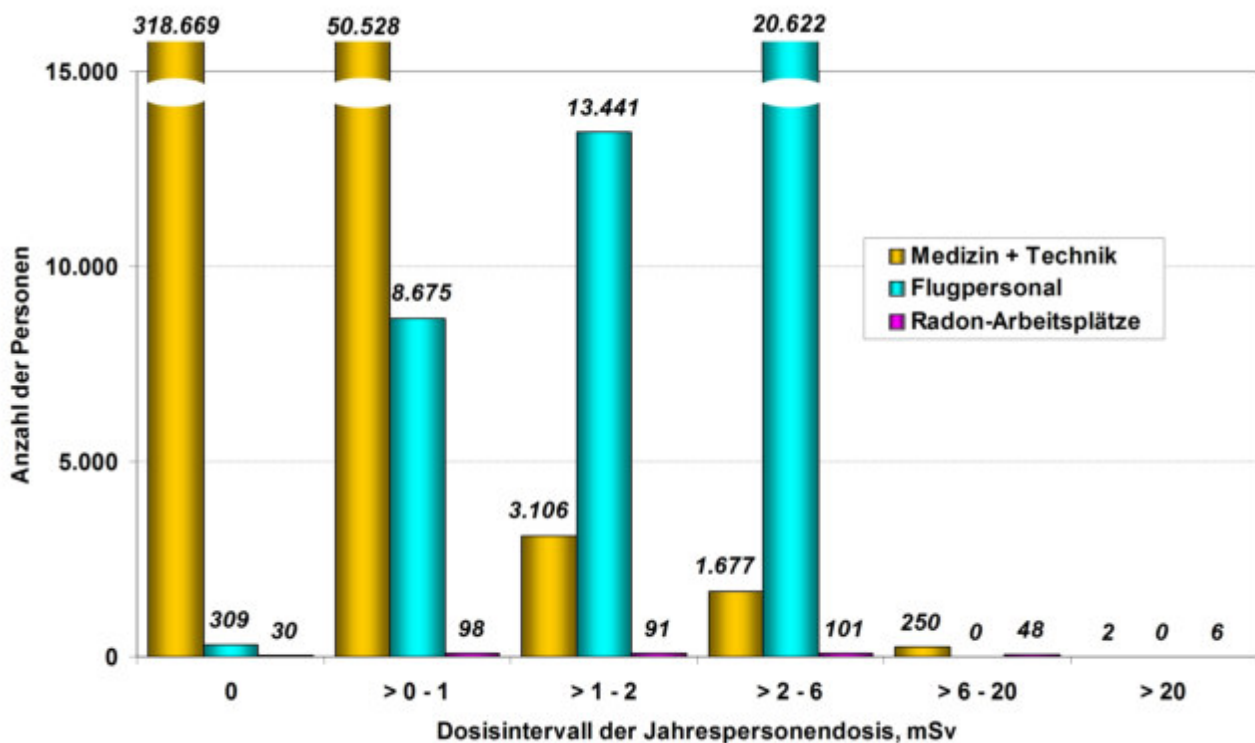


Abb. 27 Personendosis aller beruflich überwachter Personen in Deutschland für das Jahr 2016. Die Zahlen oberhalb der Balken geben die Gruppengröße an.

Die Abb. 28 zeigt für verschiedene Beschäftigungsbereiche die Personenzahl, die eine messbare Dosis erhalten hat, und die mittlere Jahrespersonendosis dieser Personen. (Daten aus [9]).

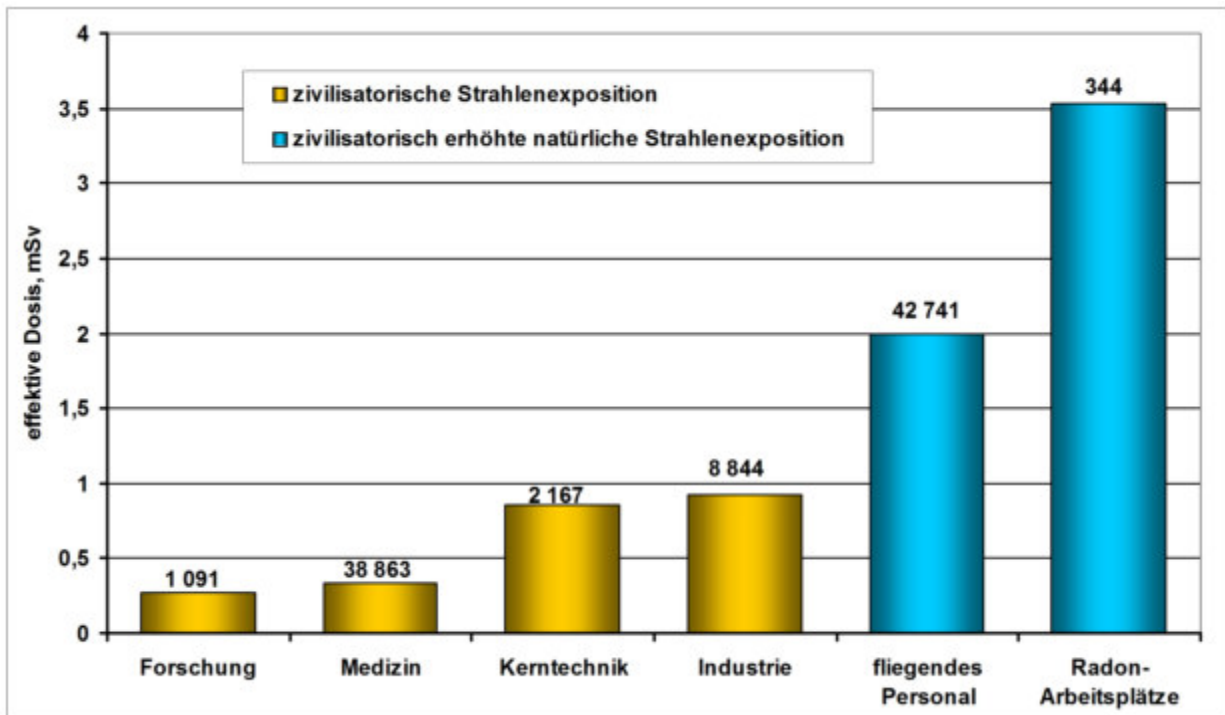


Abb. 28 Mittlere Jahres-Personendosis der strahlenüberwachten Personen in Deutschland, für die eine Jahresdosis größer Null ermittelt wurde, in verschiedenen Beschäftigungsbereichen für das Jahr 2016. Die Zahlen oberhalb der Balken geben die Gruppengröße an.

### 3.1 Überwachung mit Personendosimetern – Medizin und Technik

Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 374 232 Personen während ihrer beruflichen Tätigkeit mit Personendosimetern überwacht (Abb. 29). Davon waren rund 82 % im medizinischen Bereich tätig. Die Summe der Jahresdosis aller mit Personendosimetern überwachten Personen im Jahr 2016 betrug 22 Personen-Sievert. Die mittlere Jahres-Personendosis aller Überwachten ist damit nur rund 0,06 mSv.

Bei 87 % der mit Personendosimetern überwachten Personen lagen die ermittelten Werte unter der kleinsten feststellbaren Dosis von 0,05 mSv im Jahr. Für die Personen mit einer von Null verschiedenen Jahresdosis ergibt sich eine mittlere Jahres-Personendosis von 0,47 mSv. Der Grenzwert von 20 mSv wurde im Jahr 2016 von zwei Personen überschritten. Bezogen auf die Gesamtzahl der Überwachten sind dies 0,0005 %.. Beide Überschreitungen traten bei Tätigkeiten im Bereich der Radiografie auf (Daten aus [8]).

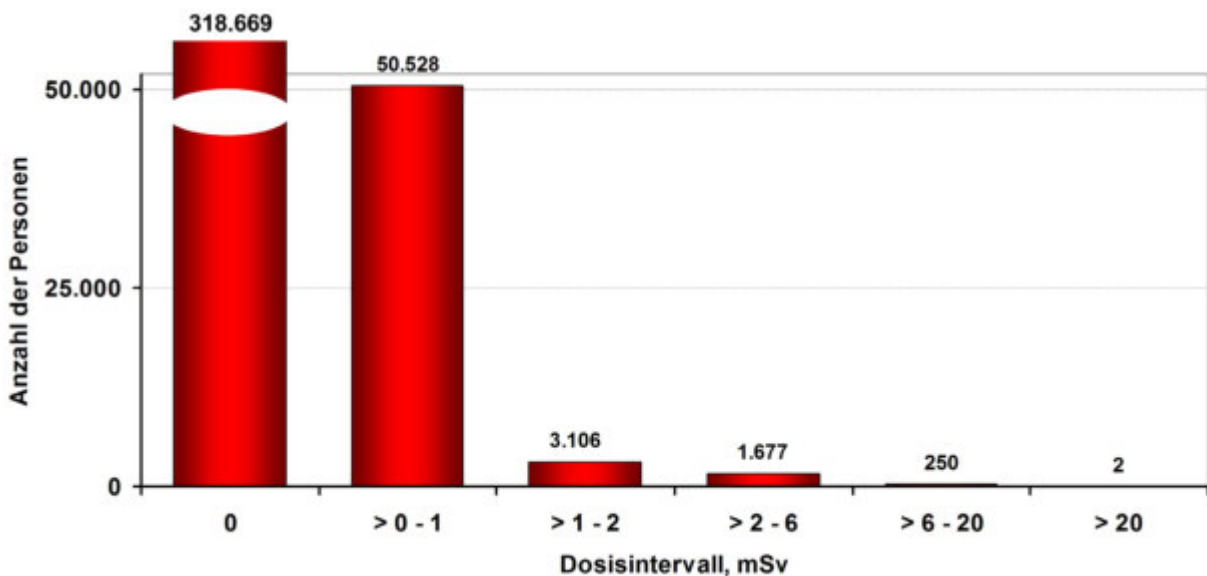


Abb. 29 Personendosis der mit Personendosimetern überwachten Personen im Jahr 2016. Die Zahlen oberhalb der Balken geben die Gruppengröße an.

Den Verlauf der mittleren Personendosis für alle mit Personendosimetern überwachten Personen in den Jahren 1986 bis 2016 (vor 1991 nur Daten aus den alten Bundesländern) gibt die Abb. 30 wieder. Die Dosis des fliegenden Personals ist nicht enthalten, da dessen Dosiermittlung erst seit 2004 und nicht mit Personendosimetern sondern mittels Rechenverfahren erfolgt.

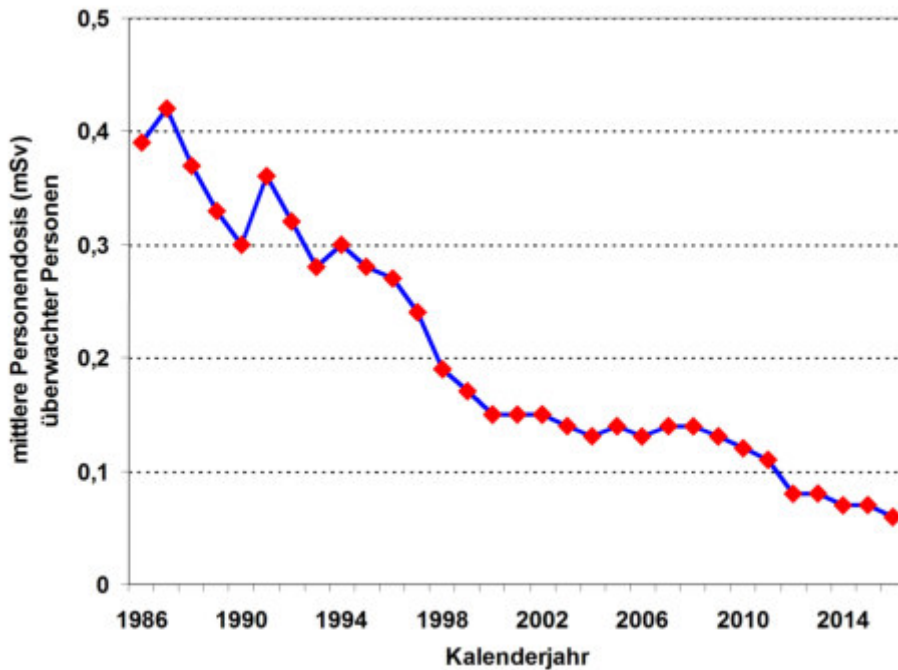


Abb. 30 Mittlere Personendosis der mit Personendosimetern überwachten Personen; Deutschland 1986 bis 2016 (vor 1991 nur alte Bundesländer)

### 3.2 Dosisüberwachung des fliegenden Personals

Die Betreiber von Flugzeugen müssen die durch die erhöhte kosmische Strahlung verursachte Strahlenexposition des fliegenden Personals mit amtlich zugelassenen Rechenprogrammen ermitteln. Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 43 047 Personen überwacht (Abb. 31). Die Kollektivdosis dieser Personen betrug 86 Sievert. Daraus errechnet sich eine mittlere Jahresdosis von 2 mSv pro Person. Das fliegende Personal ist, wenn man von der sehr kleinen Gruppe der Radon-Arbeitsplätze absieht, die am höchsten strahlenexponierte Berufsgruppe in Deutschland, Daten aus [8]).

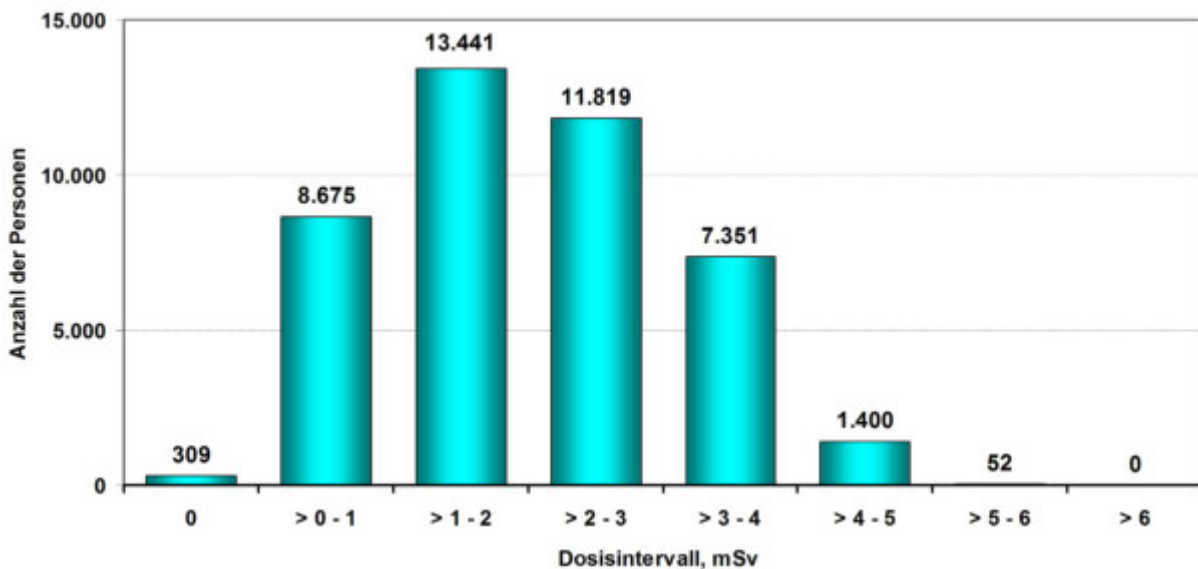


Abb. 31 Effektive Dosis des fliegenden Personals bei deutschen Luftverkehrsgesellschaften, 2016 Die Zahlen oberhalb der Balken geben die Gruppengröße an.

Der Einfluss der sich im 11-jährigen Zyklus der Sonnenfleckenzahl ändernden Intensität des galaktischen Anteils der Höhenstrahlung (s. Kap. 2.3) ist im Jahresverlauf der mittleren Dosis des fliegenden Personals deutlich zu erkennen (Abb. 32 und Abb. 33).

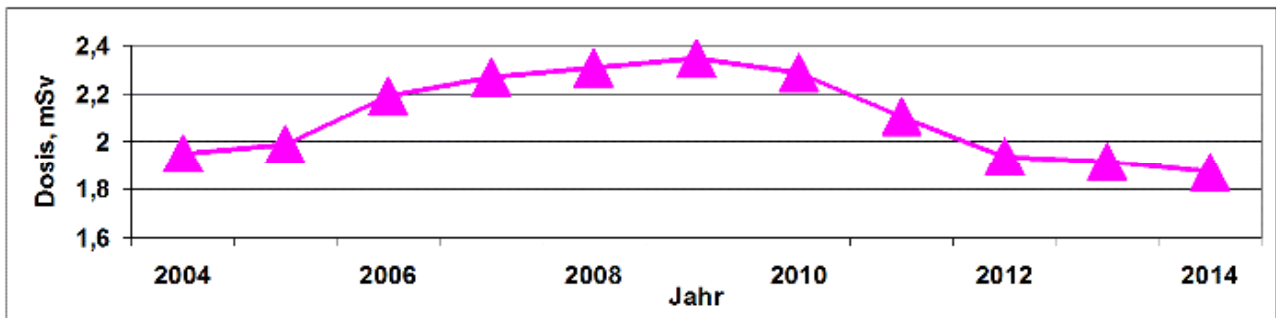


Abb. 32 Mittlere effektive Dosis des fliegenden Personals bei deutschen Luftverkehrsgesellschaften

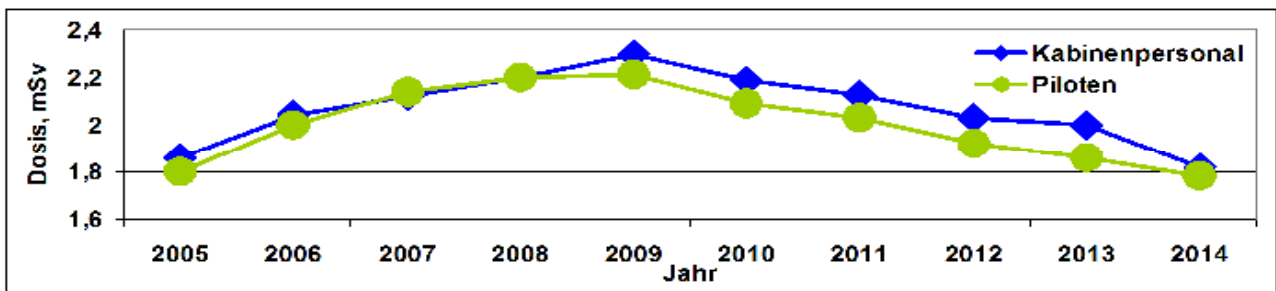


Abb. 33 Mittlere effektive Dosis des fliegenden Personals der Air France

### 3.3 Arbeitsplätze mit erhöhter Exposition durch natürliche Strahlenquellen

In diesen Bereich fallen Arbeitsplätze in den Sanierungsbetrieben der Wismut GmbH zur Stilllegung und Sanierung der Betriebsanlagen und Betriebsstätten des Uranerzbergbaus sowie in Wasserwerken, Schauhöhlen und Heilbäder. Für Beschäftigte der Wismut GmbH werden die durch Inhalation von Radionukliden der Uranzerfallsreihe und die durch Gammastrahlung verursachte Körperdosen individuell ermittelt. Für Beschäftigte, die Arbeiten in anderen Betrieben ausführen, wird die durch Inhalation von Radonzerfallsprodukten verursachte Körperdosis durch repräsentative Messungen an den Arbeitsplätzen ermittelt. Im Jahr 2016 wurden für 374 Personen Dosiswerte an das Strahlenschutzregister übermittelt. Die Kollektivdosis dieser Beschäftigten betrug 1,2 Sievert, die mittlere Jahresdosis 3,2 mSv pro Person. Es gab sechs Überschreitungen des Grenzwertes von 20 mSv. Die Dosisverteilung zeigt die Abb. 34 (Daten aus [8]).

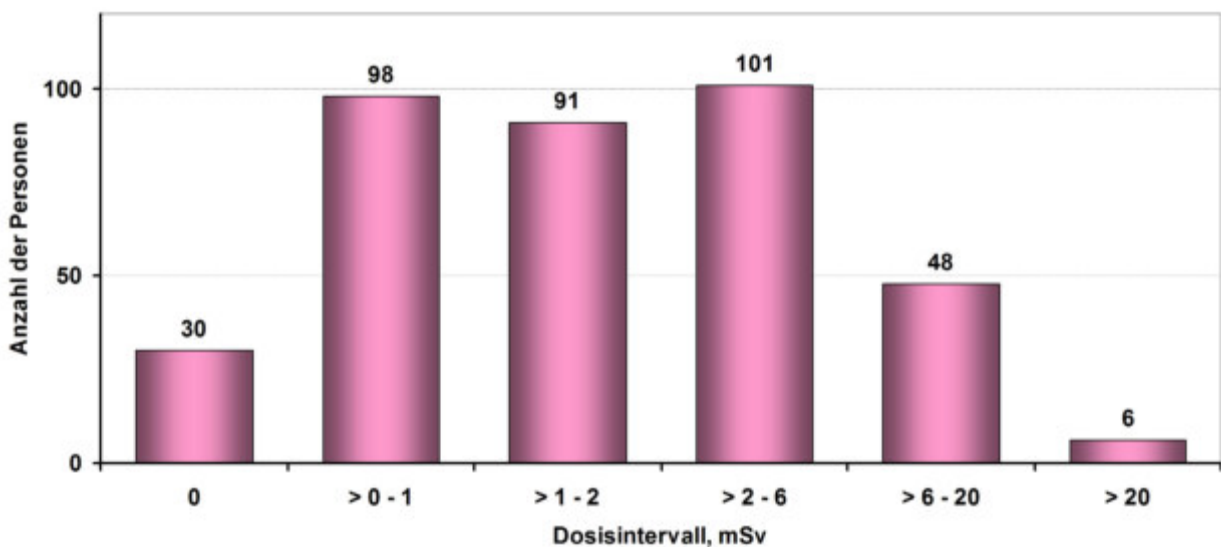


Abb. 34 Dosis der Beschäftigten an Arbeitsplätzen mit erhöhter natürlicher Exposition, 2016

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG: STRAHLENEXPOSITION DES MENSCHEN

Die natürliche Strahlenexposition des Menschen setzt sich aus der externen Exposition durch die kosmische und terrestrische Strahlung und der internen Exposition durch inkorporierte Radionuklide zusammen. Die mittlere effektive Dosis durch die natürliche Strahlenexposition beträgt in Deutschland 2,1 mSv pro Jahr. Die große Variation der terrestrischen Komponente und insbesondere der Exposition durch Radon und seine Folgeprodukte führt zu lokal/regional großen Unterschieden der Dosis, typischerweise im Bereich von 1 bis 10 mSv pro Jahr.

Die zivilisatorische Strahlenexposition wird fast ausschließlich durch die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin – überwiegend durch die Röntgendiagnostik – bestimmt. Weitere Beiträge stammen von Kernwaffentests, dem Tschernobyl-Unfall, Flugreisen, beruflicher Strahlenexposition, Kernkraftwerken, fossilen Energieträgern und Industrieprodukten. Die mittlere effektive Dosis durch die zivilisatorische Strahlenexposition beträgt in Deutschland 1,7 mSv pro Jahr.

Ursache der Strahlendosis	effektive Dosis in mSv/Jahr	
	typischer Wert für die Bevölkerung	Wertebereich für exponierte Einzelpersonen
<b>Natur</b>		
kosmische Strahlung	0,3	0,3 bis 0,5
terrestrische Strahlung	0,4	0,2 bis 3
innere Bestrahlung	1,4	0,5 bis 10
<b>Natur gesamt</b>	<b>2,1</b>	1 bis über 10
<b>Zivilisation</b>		
Medizin (Daten für 2014)	1,7	0,01 bis über 50
Flugreisen	0,02	0,01 bis 6
Tschernobyl-Unfall	< 0,005	< 0,002 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 0,005
Kernkraftwerke	< 0,001	< 0,001 bis 0,005
Beruf	0,26*	0,05* bis 20*
<b>Zivilisation gesamt</b>	<b>1,7</b>	0,01 bis über 50
<b>Summe</b>	<b>3,8</b>	

\* nur auf die beruflich strahlenüberwachten Personen bezogen

Tab. 26 Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland, 2016

Die effektive Dosis aus allen Strahlenquellen beträgt für einen Einwohner in Deutschland im Mittel 3,8 mSv im Jahr (Tab. 26). Diese Dosis stammt fast ausschließlich aus der natürlichen und der medizinischen Exposition. Gegenüber diesen Beiträgen zur Strahlendosis und insbesondere unter Berücksichtigung der nicht unerheblichen Streuung sind alle anderen Dosisbeiträge faktisch zu vernachlässigen.

In der Abb. 35 sind Werte der mittleren natürlichen und zivilisatorischen Strahlenexpositionen für Großbritannien [16], Australien [17], Deutschland [8], Frankreich [18], Schweiz [15], USA [11] und die Welt (UNSCEAR Report 2008 [2]) wiedergegeben.

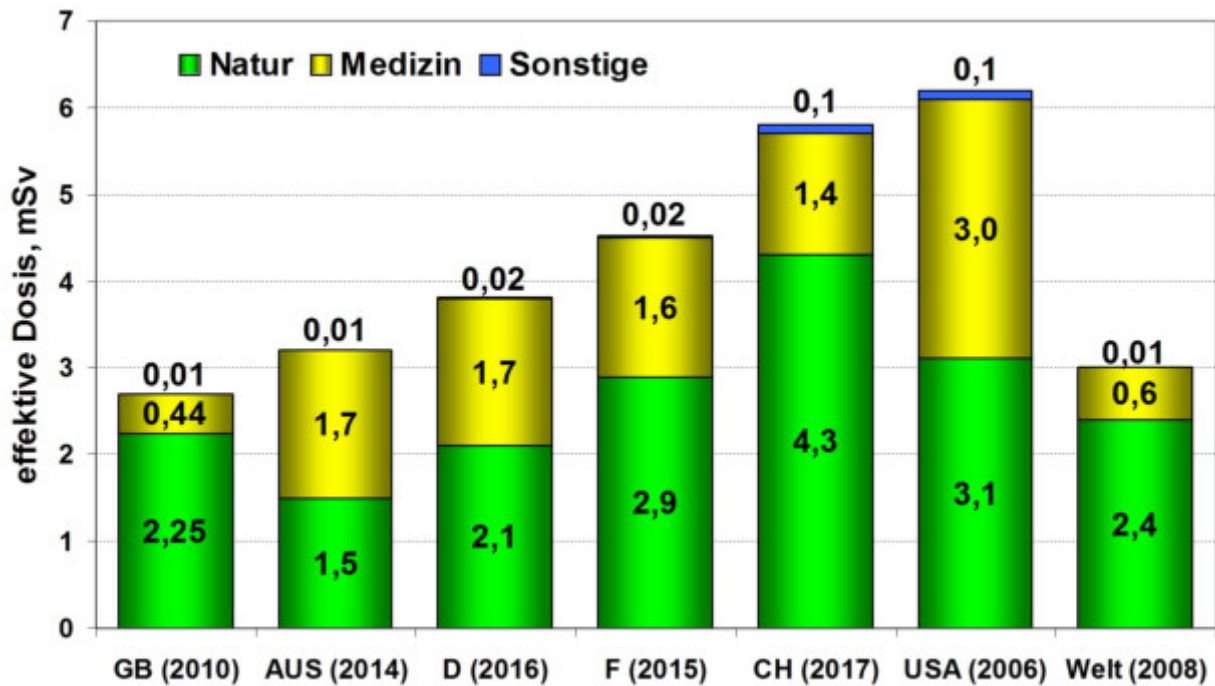


Abb. 35 Strahlenexposition in verschiedenen Ländern  
 (Hinweis: Die Schweiz berücksichtigt bereits die neuen ICRP-Empfehlungen zur Dosisberechnung durch Radon; dadurch ist der Wert der natürlichen Strahlendosis gegenüber anderen Ländern um 1,6 mSv erhöht.)

## 5 LITERATUR

- [1] M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018), p 426  
<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.98.030001>
- [2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR),  
[www.unscear.org/unscear/en/publications.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications.html)
- [3] A. Bouville, W. M. Lowder, Human population exposure to cosmic radiation,  
 Radiat Prot Dosimetry, (1988) 24 (1-4) 293-299  
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a080290>
- [4] H. Völkle, Die kosmische Strahlung, Bull. Soc. Frib. Sc. Nat. Vol. 100 (2010)  
[www.unifr.ch/sfsn/pdf/kosmische%20Strahlung.pdf](http://www.unifr.ch/sfsn/pdf/kosmische%20Strahlung.pdf)
- [5] Die Strahlenexposition von außen in der Bundesrepublik Deutschland durch natürliche radioaktive Stoffe im Freien und in Wohnungen unter Berücksichtigung des Einflusses von Baustoffen. Der Bundesminister des Innern, Hrsg., Bonn 1978
- [6] M. Sohrabi, A. R. Esmaili, New public dose assessment of elevated natural radiation areas of Ramsar (Iran) for epidemiological studies; Elsevier, International Congress Series, Volume 1225, February 2002, p 15–24
- [7] Natürliche Strahlenexposition: Horrorszenario oder alles ganz normal?, R. Michel *et al.* in: Strahlenschutz-Aspekte bei natürlicher Radioaktivität, 38. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, TÜV Media, Köln, 2006; ISBN-13: 978-3-8249-1024-3
- [8] Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung 2016, BT-Drucksache 19/5350  
<http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/19/053/1905350.pdf>
- [9] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung; Jahresberichte 1997 - 2016,  
<http://www.bfs.de/DE/mediathek/berichte/umweltradioaktivitaet/umweltradioaktivitaet.html>
- [10] Strahlenexposition von analogen und digitalen Zahnstaten und Panoramaschichtaufnahmen, H. Kiefer, J. Lambrecht, J. Roth; Schweiz. Monatsschr. Zahnmedizin Vol. 114 (2004), S. 687–693  
[https://www.sso.ch/fileadmin/upload\\_sso/2\\_Zahnaerzte/2\\_SDJ/SMfZ\\_2004/SMfZ\\_07\\_2004/smfz-04-07-forschung-2.pdf](https://www.sso.ch/fileadmin/upload_sso/2_Zahnaerzte/2_SDJ/SMfZ_2004/SMfZ_07_2004/smfz-04-07-forschung-2.pdf)

- [11] National Council on Radiation Protection & Measurements, Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States, NCRP Report No. 160, 2009
- [12] Dosimetrie der Umgebungsstrahlung bis in Flughöhen  
F. Wissmann; 171. PTB-Seminar, Braunschweig, Juni 2002
- [13] Atmospheric emissions from the Windscale accident of October 1957  
J.A. Garland, R. Wakeford; Atmospheric Environment 41 (2007) 3904–3920
- [14] The Fukushima Daiichi Accident, Technical Vol 4, Radiological Consequences; IAEA, Vienna, 2015,  
<http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/10962/The-Fukushima-Daiichi-Accident>
- [15] Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität in der Schweiz, Ergebnisse 2017  
Bundesamt für Gesundheit, 2018  
<https://www.bag.admin.ch/dam/bag/de/dokumente/str/strahlung-und-gesundheit/jahresberichte-strahlenschutz/jahresbericht-strahlenschutz-2017.pdf.download.pdf/jahresbericht-strahlenschutz-2017.pdf>
- [16] Ionising Radiation Exposure of the UK Population: 2010 Review, Public Health England, Chilton,  
<https://www.gov.uk/government/publications/ionising-radiation-exposure-of-the-uk-population-2010-review>
- [17] Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA),  
<http://www.arpansa.gov.au/pubs/factsheets/IonisingRadiationandHealth.pdf>
- [18] Exposition de la population française aux rayonnements ionisants,  
Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, Rapport IRSN/2015-00001,  
[www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_expertise/radioprotection-homme/Pages/Exposition-population-francaise-rayonnements-ionisants-2015.aspx](http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/radioprotection-homme/Pages/Exposition-population-francaise-rayonnements-ionisants-2015.aspx)