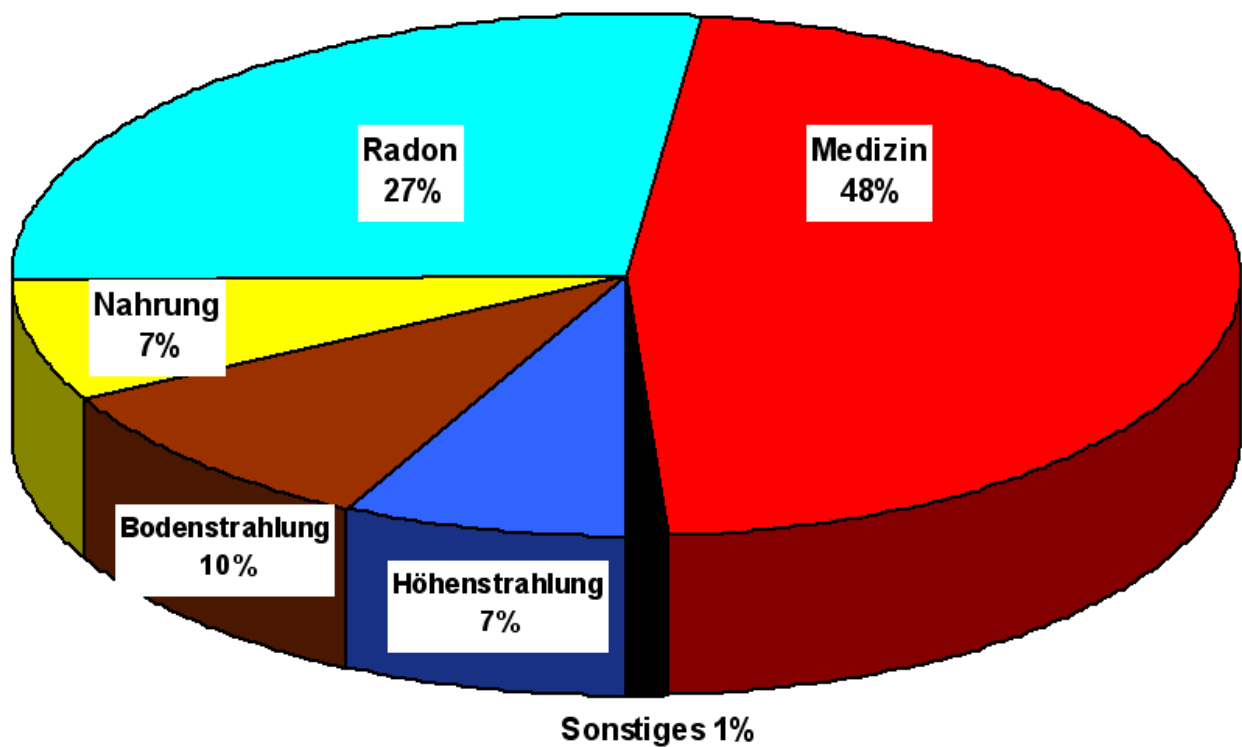


Die Strahlenexposition des Menschen

Winfried Koelzer



Herausgeber:

Informationskreis KernEnergie

Robert-Koch-Platz 4, 10115 Berlin, Tel. 030 49 85 55 30

© April 2009

INHALT	Seite	
1	NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION	1
1.1	Externe Strahlenexposition	1
1.1.1	Kosmische Strahlung	1
1.1.2	Terrestrische Strahlung	2
1.2	Interne Strahlenexposition	5
1.2.1	Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide	6
1.2.2	Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide	6
1.3	Zusammenfassung: Natürliche Strahlenexposition	7
2	ZIVILISATORISCHE STRAHLENEXPOSITION	8
2.1	Strahlenexposition in der Medizin	8
2.2	Ionisierende Strahlung von Röhren-Bildschirmen und Industrieprodukten	8
2.2.1	Röhren-Bildschirme	8
2.2.2	Leuchtzifferblätter	9
2.2.3	Phosphat-Industrie	9
2.3	Strahlenexposition bei Flügen und Raumflügen	10
2.4	Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen	12
2.4.1	Einleitung	12
2.4.2	Uranbergbau und Uranerzaufbereitung	13
2.4.3	Urananreicherung und Brennelementherstellung	13
2.4.4	Kernkraftwerke	13
2.4.5	Wiederaufarbeitung	14
2.4.6	Zusammenfassung: Strahlenexpositionen aus kerntechnischen Anlagen	14
2.5	Strahlenexposition durch fossile Energieträger	15
2.5.1	Kohle	15
2.5.2	Erdöl	16
2.5.3	Erdgas	16
2.5.4	Torf	16
2.5.5	Reduktion der Strahlenexposition durch fossile Energieträger	16
2.5.6	Zusammenfassung: Strahlenexposition durch fossile Energieträger	16
2.6	Strahlenexposition durch Kernwaffenexplosionen	17
2.7	Strahlenexposition durch Unfälle	18
2.7.1	Unfälle in Kernkraftwerken und kerntechnischen Anlagen	18
2.7.2	Satelliten-Abstürze und Unfälle mit radioaktiven Quellen	20
3	BERUFLICHE STRAHLENEXPOSITION	20
4	ZUSAMMENFASSUNG: STRAHLENEXPOSITION DES MENSCHEN	21
5	LITERATUR	23

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. Wechselwirkungsprozesse mit Atomkernen in den hohen Atmosphärenbereichen führen zu Sekundärteilchen und elektromagnetischer Strahlung, die zusammen die sogenannte sekundäre kosmische Strahlung bilden.

Die galaktische Strahlung besteht überwiegend aus sehr energiereichen Protonen, einem rund zehnprozentigen 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 zwischen 1 und 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.

Die ionisierende Komponente der kosmischen Strahlung führt in Meereshöhe in mittleren Breiten bei einem Aufenthaltsanteil von 20 % im Freien und 80 % in Häusern und einem Abschirmfaktor der Häuser von 0,8 zu einer effektiven Dosis von 0,24 mSv pro Jahr. Die Neutronenstrahlung trägt unter Berücksichtigung der Strahlungswichtungsfaktoren für das Neutronenenergiespektrum mit 0,03 mSv pro Jahr zur effektiven Dosis bei. Mit zunehmender Höhe über dem Meer steigt die Dosis durch kosmische Strahlung an (Abb. 1).

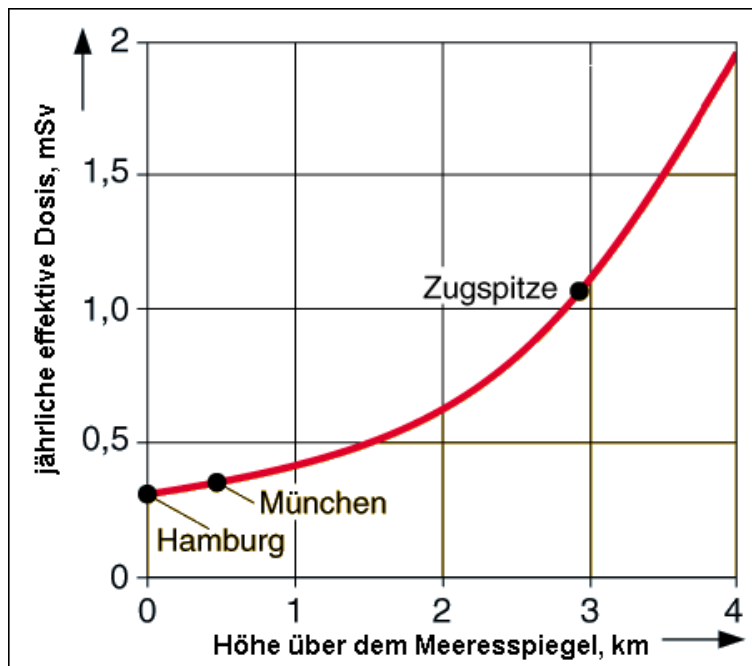


Abb. 1: Dosisleistung durch kosmische Strahlung, mittlere Breiten

Der Anteil der ionisierenden Komponente an der gesamten effektiven Dosis steigt dabei langsamer an als der Anteil durch die Neutronenkomponente. In 500 m Meereshöhe beträgt der Anteil der ionisierenden Komponente 0,26 mSv und der der Neutronenkomponente 0,05 mSv pro Jahr; für 1000 m entsprechend 0,31 mSv und 0,08 mSv pro Jahr. Ständiger Aufenthalt auf der Zugspitze führt mit über 1,1 mSv pro Jahr - davon 0,7 mSv pro Jahr durch die ionisierende Komponente 0,4 mSv pro Jahr durch die Neutronenkomponente - zu einer mehr als viermal höheren Exposition als auf Helgoland.

Zur Berechnung der Höhenabhängigkeit der effektiven Dosis durch die kosmische Strahlung können bis zu Höhen von einigen Kilometern die folgenden Formeln benutzt werden. Mit der Formel (1) lässt sich der Beitrag der ionisierenden Komponente, mit den Formeln (2) und (3) der der Neutronenkomponente berechnen. Die Höhe h ist in Kilometer anzugeben, die Rechnung liefert als Ergebnis die Effektivdosis in mSv pro Jahr. Die Formeln berücksichtigen für die ionisierende Komponente den Abschirmfaktor der Häuser unter Berücksichtigung einer Aufenthaltszeit von 80 % in Häusern.

$$E_{ion}(h) = 0,05 \cdot e^{-1,6 \cdot h} + 0,19 \cdot e^{0,45 \cdot h} \quad (1)$$

$$E_n(h) = 0,03 \cdot e^h \quad \text{für } h < 2 \text{ km} \quad (2)$$

$$E_n(h) = 0,06 \cdot e^{0,7 \cdot h} \quad \text{für } h > 2 \text{ km.} \quad (3)$$

UNSCEAR hat aus geographischen und demographischen Daten die jährliche kollektive Dosis der Weltbevölkerung durch die kosmische Strahlung zu $2 \cdot 10^6$ Personen-Sievert berechnet, das ergibt einen Mittelwert von 0,38 mSv pro Jahr pro Person. Dabei wird die Hälfte der Kollektivdosis von den drei Fünftel der Bevölkerung erhalten, die bis zu 500 m Meereshöhe lebt, während das eine Fünftel der Bevölkerung, das oberhalb von 3 km wohnt, überproportional mit einem Zehntel zur Kollektivdosis beiträgt. Die Tab. 1 enthält Daten der kosmischen Strahlenexposition für einige hochgelegene Großstädte.

Ort	Einwohner Millionen	Höhe m	effektive Dosis mSv/a
La Paz	1,5	3900	2,0
Lhasa	0,4	3600	1,7
Quito	1,7	2840	1,1
Mexiko Stadt	19,5	2240	0,82
Nairobi	2,4	1660	0,58
Denver	2,7	1610	0,57
Teheran	10,7	1180	0,44

Tab. 1: Kosmische Strahlenexposition in hochgelegenen Städten

1.1.2 Terrestrische Strahlung

Die Erdkruste enthält in regional großer Variation natürlich radioaktiver Stoffe. Die beim Zerfall emittierten ionisierenden Strahlen wird terrestrische Strahlung genannt. Die meisten natürlich radioaktiven Stoffe entstammen einer der drei Zerfallsreihen, deren Anfangsglieder U-238 (Abb. 2), U-235 (Abb. 3) und Th-232 (Abb. 4) eine gegenüber der Zeit seit der Entstehung der Elemente lange Halbwertszeit besitzen.

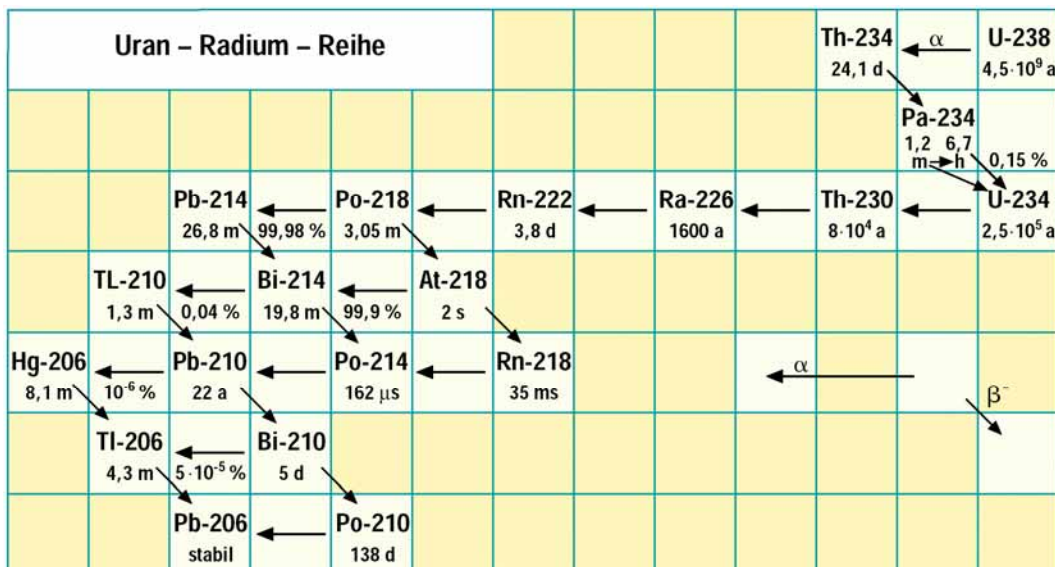


Abb. 2 Uran-Radium-Reihe

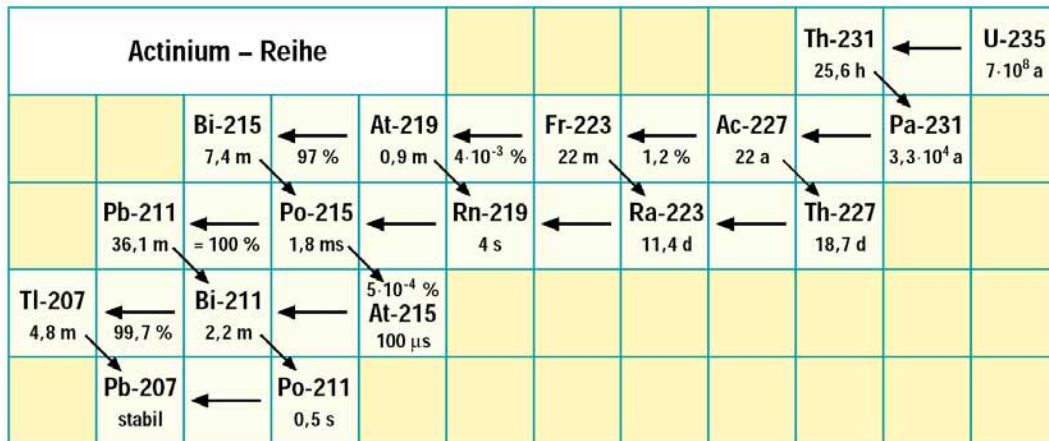


Abb. 3 Actinium-Reihe

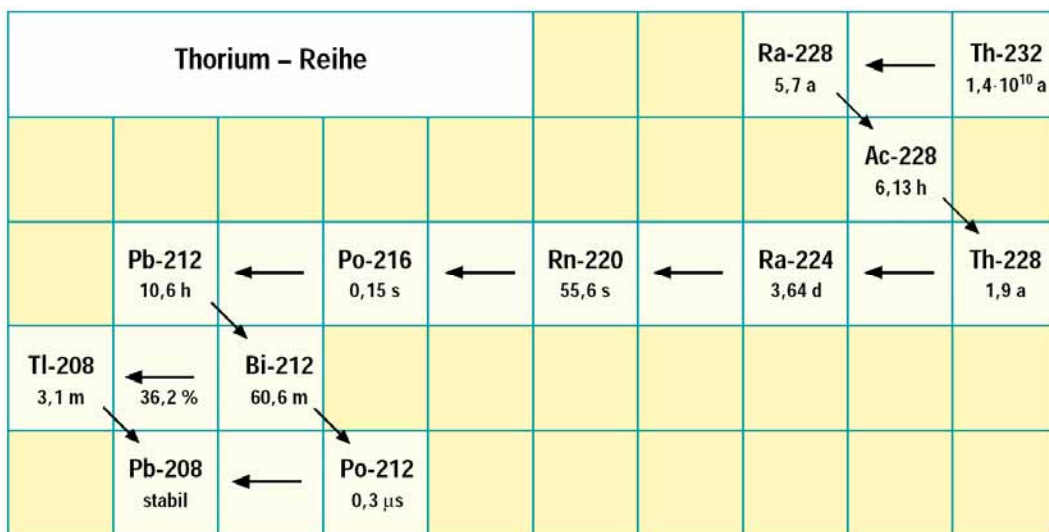


Abb. 4 Thorium-Reihe

Neben den 47 Radionukliden, die einer der drei Zerfallsreihen angehören, gibt es 26 primordiale ("von Anfang an" vorhandene) Radionuklide mit zum Teil extrem langen Halbwertszeiten (Tab. 2). 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
K-40	$1,3 \cdot 10^9$	In-115	$4,4 \cdot 10^{14}$	Gd-152	$1,1 \cdot 10^{14}$
V-50	$1,4 \cdot 10^{17}$	Te-123	$1,2 \cdot 10^{13}$	Lu-176	$2,6 \cdot 10^{10}$
Ge-76	$1,5 \cdot 10^{21}$	Te-128	$7,2 \cdot 10^{24}$	Hf-174	$2,0 \cdot 10^{15}$
Se-82	$1,0 \cdot 10^{20}$	Te-130	$2,7 \cdot 10^{21}$	Ta-180	$1,2 \cdot 10^{15}$
Rb-87	$4,8 \cdot 10^{10}$	La-138	$1,1 \cdot 10^{11}$	Re-187	$5,0 \cdot 10^{10}$
Zr-96	$3,9 \cdot 10^{19}$	Nd-144	$2,3 \cdot 10^{15}$	Os-186	$2,0 \cdot 10^{15}$
Mo-100	$1,2 \cdot 10^{19}$	Nd-150	$1,7 \cdot 10^{19}$	Pt-190	$6,5 \cdot 10^{11}$
Cd-113	$9,0 \cdot 10^{15}$	Sm-147	$1,1 \cdot 10^{11}$	Bi-209	$1,9 \cdot 10^{19}$
Cd-119	$2,6 \cdot 10^{19}$	Sm-148	$7,0 \cdot 10^{15}$		

Tab. 2: Primordiale Radionuklide

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 (vgl. Tab. 3).

Gesteinsart	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. 3: 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 variierten die Messwerte im Freien von 0,03 bis 3 mSv pro Jahr. Dabei lagen für 80 % der Bevölkerung die Dosisleistungswerte 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 ostdeutschen Bundesländer durchgeführt. Die Ergebnisse beider Messkampagnen sind in der Tab. 4 als Mittelwerte der Ortsdosisleistung im Freien für die einzelnen Bundesländer zusammengefasst. Als Mittelwert für Deutschland erhält man für die terrestrische Strahlenexposition im Freien einen Wert von 0,35 mSv pro Jahr.

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. 4: Ländermittelwerte der Ortsdosis im Freien

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 70er 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 für die Energiedosis in Häusern liegt bei 0,42 mSv/a, also um rund 20 % höher als im Freien. Tab. 5 gibt den zusätzlichen Betrag der effektiven Jahresdosis in Häusern für einige wichtige Baustoffe an.

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

Tab. 5: 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 effektive Dosis der Bevölkerung in Deutschland durch die terrestrische Strahlung zu 0,41 mSv pro Jahr (0,07 mSv/a durch den Aufenthalt im Freien und 0,34 mSv/a durch den Aufenthalt in Gebäuden). UNSCEAR hat für die Weltbevölkerung als Durchschnittswert der Exposition durch die terrestrische Strahlung 0,46 mSv pro Jahr ermittelt.

In einigen Gebieten der Erde sind infolge höherer Konzentrationen natürlich radioaktiver Stoffe die Strahlendosen wesentlich größer (Tab. 6). 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 μ 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 Jahres-Ortsdosiswerte bis zu 860 mSv ermittelt, die effektive Jahresdosis einzelner Personen beträgt bis zu 130 mSv.

Gebiet	mittlere effektive Jahresdosis, mSv	Jahres-Ortsdosis bis zu mSv
Deutschland	0,4	5
Indien: Kerala, Tamil Nadu	4	55
Brasilien: Espirito Santo	6	175
Iran: Ramsar	6	860

Tab. 6: 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. 7 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. 7: Natürlich radioaktive Stoffe im Menschen

1.2.1 Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide

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 4200 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.

Die Uran- und Thorium-Zerfallsreihen (siehe Abb. 2 bis Abb. 4) 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 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.

Radon-222 und Radon-220 sind natürlich 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.

Daneben bestehen für die Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre systematische klimatische und jahreszeitliche 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 m³. Die Häufigkeitsverteilung der Radonkonzentrationswerte in den Wohnungen folgt weitgehend einer logarithmischen Normalverteilung mit einem Mittelwert von 50 Bq pro m³. Untersuchung deutet darauf hin, dass in 10 % der Wohnungen die Radonkonzentration über 80 Bq pro m³ und in 1 % der Wohnungen über 200 Bq pro m³ liegt. Aus den Mittelwerten der Radonkonzentration im Freien in Deutschland von 15 Bq pro m³ und in Häusern von 50 Bq pro m³ lässt sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufenthaltsdauer und unter Verwendung der in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Dosisfaktoren die mittlere effektive Dosis durch Radon und seine Zerfallsprodukte zu 1,1 mSv pro Jahr berechnen - 0,2 mSv pro Jahr durch den Aufenthalt im Freien und 0,9 mSv pro Jahr durch Aufenthalt in Gebäuden.

1.2.2 Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide

Neben den aufgrund ihrer großen Halbwertszeit noch vorhandenen primordialen Radionukliden oder den wegen ihrer Zugehörigkeit zu Zerfallsreihen ständig nachgebildeten Nukliden kürzerer Halbwertszeiten entstehen durch die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit den Atomen der Atmosphäre ständig neue Nuklide. Einen Überblick über diese kosmogenen Radionuklide gibt Tab. 8. Von diesen Radionukliden hat nur Kohlenstoff-14 eine für die Strahlenexposition des Menschen gewisse geringe Bedeutung.

Nuklid	Halbwertszeit	Nuklid	Halbwertszeit
H-3	12,3 a	P-32	14,3 d
Be-7	53,3 d	S-35	87,5 d
Be-10	1,6·10 ⁶ a	S-38	2,8 h
C-14	5730 a	Cl-34m	32 min
Na-22	2,6 a	Cl-36	3·10 ⁵ a
Na-24	15 h	Cl-38	37,2 min
Mg-28	20,9 h	Cl-39	56 min
Si-31	2,6 h	Ar-39	269 a
Si-32	101 a	Kr-85	10,7 a

Tab. 8: Kosmogene Radionuklide

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 heutzutage durch zwei gegenläufige Effekte beeinflusst. Die massive

Erzeugung und Freisetzung von CO₂ durch das Verbrennen fossiler und damit C-14-freier Energieträger führt zu einer Vergrößerung des C-12-Anteils und dadurch zu einer Verringerung der natürlichen Gleichgewichtskonzentration von C-12 zu C-14. 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 rund 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 0,012 Millisievert. 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 1945.

Die heutige Tritiumkonzentration in der Umwelt wird überwiegend durch künstliches Tritium aus Kernwaffentests (gesamte freigesetzte Tritiumaktivität $240 \cdot 10^{18}$ Bq) und aus kerntechnischen Anlagen (freigesetzte Tritiumaktivität zurzeit rund $0,02 \cdot 10^{18}$ Bq pro Jahr) bestimmt. Die natürliche Tritiumproduktion beträgt etwa $0,07 \cdot 10^{18}$ Bq pro Jahr, das weltweite Inventar an natürlichem Tritium rund $1 \cdot 10^{18}$ Bq. Vor der Entwicklung der Kerntechnik durchgeführte Messungen ergaben Tritiumkonzentrationen in Meerwasser von 100 Bq pro m³ und in kontinentalen Oberflächengewässern von 400 Bq pro m³. 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.

Messungen der Be-7-Konzentration in Luft ergaben Werte zwischen 4 mBq pro m³ im Frühjahr und 1,5 mBq pro m³ im Spätherbst. Die Konzentration von Be-7 in Regenwasser beträgt im Mittel 700 Bq pro m³. Die Gesamtjahreszufuhr an Be-7 beträgt rund 1000 Bq pro Jahr. Daraus resultiert eine effektive Jahresdosis von 0,03 Mikrosievert.

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 Zusammenfassung: Natürliche Strahlenexposition

Die effektive Jahresdosis aus allen natürlichen Strahlenquellen ergibt sich mit 0,7 mSv zu einem Drittel aus externer und mit 1,4 mSv zwei Drittel aus interner Strahlenexposition (Tab. 9). Individuelle, lokale und regionale Abweichungen von diesen mittleren Werten können erheblich sein. In Deutschland wird für die meisten Einwohner die effektive Jahresdosis im Bereich von 1 bis 10 mSv liegen mit einem typischen Wert von 2,1 mSv. Die mittlere natürliche effektive Jahresdosis der Weltbevölkerung wird von UNSCEAR mit 2,4 mSv angegeben. 25 % der Weltbevölkerung hat eine effektive Jahresdosis von weniger als 1 mSv und 10 % von mehr als 3 mSv.

Exposition durch	jährliche effektive Dosis in mSv		
	Bestrahlung von außen	Bestrahlung von innen	gesamt
kosmische Strahlung in Meereshöhe ionisierende Komponente Neutronen	0,24 0,03		} 0,27
kosmogene Radionuklide		0,02	0,02
primordiale Radionuklide K-40	0,18	0,17	0,35
U-238-Reihe U-238 → Ra-226 Rn-222 → Po-214 Pb-210 → Po-210	} 0,12	0,02 1,1 0,05	} 1,3
Th-232-Reihe Th-232 → Ra-224 Rn-220 → Tl-208	} 0,14	0,01 0,05	} 0,15
Summe	0,7	1,4	2,1

Tab. 9: Mittlere natürliche Strahlenexposition in Deutschland

2 ZIVILISATORISCHE STRAHLENEXPOSITION

2.1 Strahlenexposition in der Medizin

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	10 - 25
Brustkorb	6 - 10
Wirbelsäule	2 - 11
Kopf	2 - 4
Untersuchung mit Aufnahmen und Durchleuchtung	
Arteriographie	10 - 30
Darm	10 - 18
Magen	6 - 12
Harntrakt	2 - 5
Gallenblase	1 - 8
Untersuchung mit Aufnahme	
Lendenwirbelsäule	0,8 - 1,8
Beckenübersicht	0,5 - 1,0
Mammographie	0,2 - 0,6
Brustkorb	0,02 - 0,08
Halswirbelsäule	0,1 - 0,3
Zahn	≤ 0,01

Tab. 10: Typische Werte der effektive Dosis für einige Röntgenuntersuchungen

In den Jahren 1996 - 2005 ist die Anzahl der Röntgenuntersuchungen in Deutschland zwar von jährlich 1,8 Röntgenuntersuchen pro Einwohner auf etwa 1,6 leicht zurückgegangen, von Bedeutung ist aber die Zunahme der besonders dosisintensiven Computer-Tomographie-Untersuchungen um fast 50 % in diesem Zeitraum. 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 1,8 mSv pro Jahr. Die durch die Röntgendiagnostik bewirkte jährliche Strahlenexposition ist in anderen Industrieländern zum Teil wesentlich geringer; sie beträgt in Großbritannien 0,38 und in der Schweiz 1,2 mSv, sie ist aber auch – wie in den USA mit 2,5 mSv – in einigen Ländern größer.

Der Dosisbeitrag durch die Anwendung radioaktiver Stoffe zur Diagnose ist gegenüber dem durch die Röntgendiagnostik vergleichsweise gering. In der nuklearmedizinischen Diagnostik wurden in Deutschland im Jahr 2005 im Mittel etwa 4,2 Millionen Radionuklidapplikationen jährlich durchgeführt. Das entspricht einer Anwendungshäufigkeit von 50 Untersuchungen pro 1000 Einwohner. Am häufigsten wurden bei den ambulanten Patienten Szintigraphien der Schilddrüse und des Skeletts durchgeführt. Die mittleren effektiven Dosen nuklearmedizinischer Untersuchungen waren bei den Entzündungsuntersuchungen mit 8,2 mSv am höchsten, gefolgt von der Herzsintigraphie mit 7,4 mSv und den Tumorsintigraphien mit 6,5 mSv. Die am häufigsten angewendete Schilddrüsenszintigraphie weist eine relativ niedrige effektive Dosis von 0,7 mSv auf. Im Mittel ergab sich für die Jahre 1996 bis 2005 eine jährliche kollektive effektive Dosis von 11 500 Personen-Sievert. Rechnerisch ergibt sich damit eine mittlere jährliche effektive Dosis pro Einwohner von 0,13 mSv.

Werte der effektiven Dosis durch die Strahlentherapie sind nicht berechenbar, da das Effektivdosiskonzept auf therapeutische Bestrahlungen nicht anwendbar ist.

2.2 Ionisierende Strahlung von Röhren-Bildschirmen und Industrieprodukten

2.2.1 Röhren-Bildschirme

Die weitverbreitete Einführung von Bildschirmarbeitsplätzen entfachte die Diskussion über die von Bildröhren ausgehende Röntgenstrahlung und die dadurch hervorgerufene Strahlenexposition. Im Forschungszentrum Karlsruhe wurden an einer Vielzahl von Schwarz-Weiß- und Farb-Monitoren sowie an Untersuchungen

durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tab. 11 zusammen mit Messwerten über die Strahlenexposition durch Zeitschriften infolge der natürlich radioaktiven Stoffe im Papier zusammengefasst.

Natürliche Umgebungsstrahlung (im Mittel)	100 000	pSv/h
Röhren-Bildschirmgerät (Arbeitsabstand 0,5 m)		
- betriebsbedingte Röntgenstrahlung	6	pSv/h
- Gammastrahlung natürlich radioaktiver Stoffe in Bildröhre und Leuchtstoffen	1 200	pSv/h
Fernseher mit Bildröhre (Betrachtungsabstand 3 m)		
- betriebsbedingte Röntgenstrahlung	2	pSv/h
- Gammastrahlung natürlich radioaktiver Stoffe in Bildröhre und Leuchtstoffen	100	pSv/h
Zeitschriften (Leseabstand 0,35 m)		
- Gammastrahlung von Ra- und Th-Folgeprodukten	30	pSv/h
Mensch (Abstand 0,5 m)		
- Gammastrahlung von K-40	50	pSv/h

pSv: Piko-Sievert, 1pSv = 10^{-12} Sv

Tab. 11: Strahlenexposition durch Röhrenbildschirme, Fernsehgeräte etc.

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 Gammastrahlung emittiert wird. Diese Strahlung trägt zur Lichtemission wenig, zur Strahlendosis aber viel bei. Nachdem durch die kerntechnische Entwicklung geeigneter Radionuklide zur Verfügung standen, wurde Radium in Leuchtfarben durch Promethium-147 und überwiegend durch Tritium ersetzt. Die Ra-226-Aktivität in den früher üblichen Leuchtfarben lag zwischen 4 und 100 kBq pro Armbanduhr. Bei 16stündiger Tragedauer pro Tag konnten Gonadendosen von 1,5 mSv pro Jahr auftreten. Promethium-147 ist ein reiner Betastrahler mit einer maximalen Energie der Betastrahlung von 224 keV. Die Energie dieser Betateilchen reicht nicht aus, um Uhrgehäuse oder Uhrglas zu durchdringen. Bei der üblicherweise eingesetzten Pm-Aktivität von 1,5 MBq pro Uhr lässt sich die jährliche Gonadendosis zu 2 Mikrosievert abschätzen.

Wird Tritium als fluoreszenzanregende Substanz in der Leuchtfarbe benutzt, dann ist aufgrund der sehr geringen Beta-Energie des Tritiums von maximal 18 keV die äußere Strahlenexposition völlig vernachlässigbar. Der allmähliche Austritt von Tritium aus dem Leuchtstoff kann eine Tritiuminkorporation zur Folge haben. Erhebungen in der Schweiz haben ergeben, dass eine Tritiumaktivität von 40 MBq pro Uhr in der Leuchtfarbe vorhanden ist. Dies führt dann zu einer jährlichen effektiven Dosis von 0,3 Mikrosievert.

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 beträgt der Abbau von Phosphormineralien zur Herstellung von Phosphatdünger rund 130 Millionen Tonnen, überwiegend in China, Marokko, GUS und USA. Weltweit werden etwa 30 Mio. Tonnen P_2O_5 als Phosphatdünger eingesetzt. Der mittlere Einsatz beträgt in den Entwicklungsländern 3,5 kg pro Hektar und in den Industrieländern 11 kg pro Hektar landwirtschaftlicher Fläche. 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_2O_5 . Durch das Einbringen des Phosphatdüngers erhöht sich geringfügig der Gehalt des Bodens an Nukliden der U-238-Reihe. Die zusätzliche Dosis resultiert überwiegend von Pb-210. Aus der weltweiten 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 kollektive 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. 5 und Abb. 6 dargestellt. Der aus dem Weltall stammende Anteil der primären kosmischen Strahlung wird zudem noch durch das im 9 bis 12 jährigen Zyklus variierende Magnetfeld der Sonne beeinflusst. Dieses Magnetfeld hatte Jahr 2007 sein Minimum. Die dadurch bewirkte Ablenkung ist daher zurzeit gering, und somit der Anteil der galaktischen Strahlung zu unserer kosmischen Strahlendosis größer.

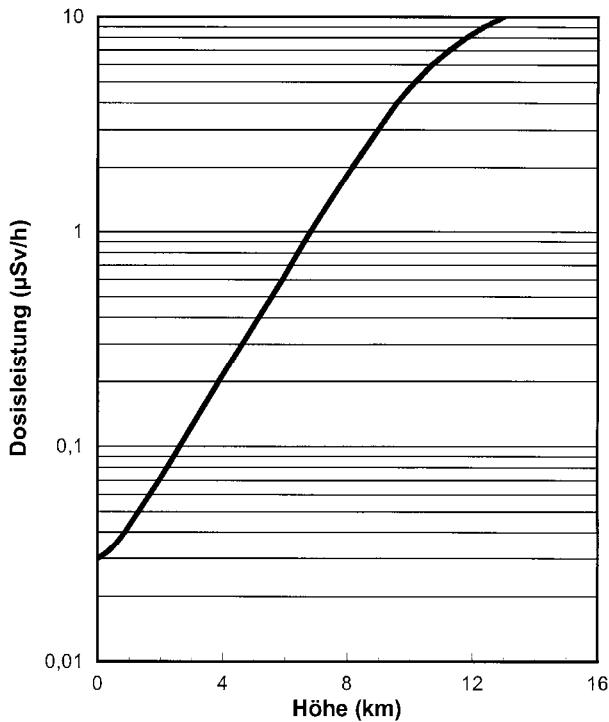


Abb. 5: Dosisleistung für verschiedene Flughöhen in mittleren Breiten

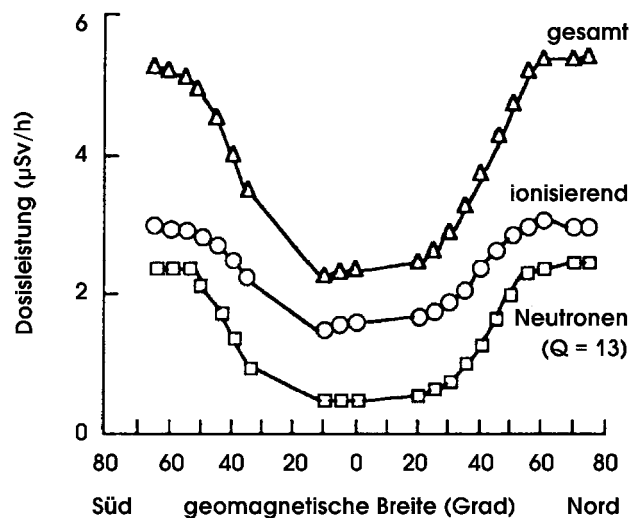


Abb. 6: Beitrag der Komponenten der kosmischen Strahlung zur Gesamtdosisleistung in Abhängigkeit von der geomagnetischen Breite

Die Tab. 12 und die Abb. 7 enthalten 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 97 Mikrosievert gegenüber nur 30 Mikrosievert auf dem Flug nach Sao Paulo.

Strecke	Dauer, h:min	Dosis, µSv (April 2009)
Frankfurt - London	1:40	5
Frankfurt - Palma de Mallorca	2:05	7
München - Las Palmas	4:45	16
München - New York	9:10	72
Frankfurt - Vancouver	10:05	89
Frankfurt - Johannesburg	9:50	23
Frankfurt - San Francisco	11:10	97
Frankfurt - Sao Paulo	11:45	30

Tab. 12: Strahlenexposition auf verschiedenen Flugstrecken, einfacher Flug

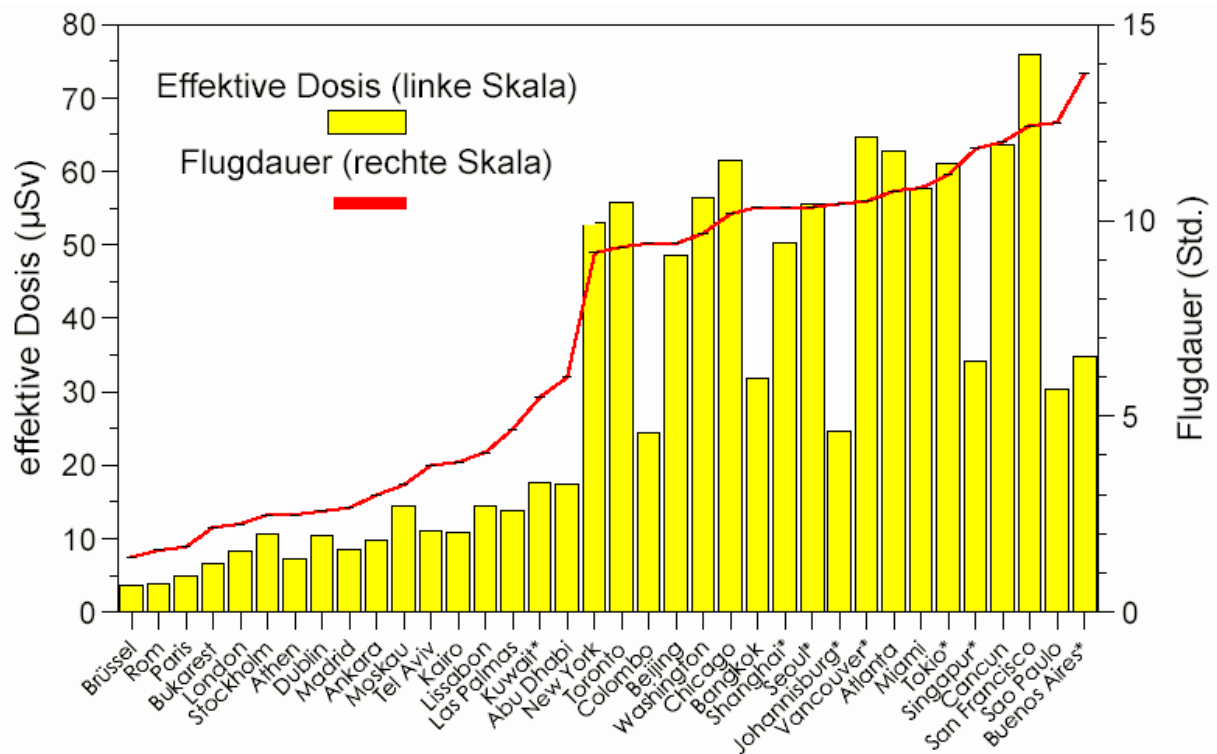


Abb. 7 Strahlenexposition auf verschiedenen Flugstrecken (einfacher Flug) ab München/*Frankfurt

Im kommerziellen Personenluftverkehr werden zurzeit rund $2 \cdot 10^{12}$ Passagierkilometer pro Jahr geflogen. Daraus errechnet sich eine Gesamtdosis von rund 10 000 Personen-Sievert. Der größte Teil entfällt auf die nordamerikanische und westeuropäische Bevölkerung, für die sich die mittlere Strahlenexposition durch Flugreisen auf 10 und 5 Mikrosievert pro Jahr abschätzen lässt. Die effektive Dosis der Besatzung von Flugzeugen durch kosmische Strahlung bei Flugrouten in geomagnetischen Breiten von 50° N und mehr, Flugzeiten von 600 h pro Jahr und durchschnittlichen Flughöhen von 10 km beträgt etwa 3 bis 4 mSv pro 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 8 000 und 50 000 km Entfernung umgeben und als Van-Allen-Gürtel bezeichnet werden, ausgesetzt. So ist ein großer Anteil der gesamten Strahlendosis bei den in Tab. 13 aufgelisteten Mondflügen auf den Dosisbeitrag aus diesen Strahlungsgürteln zurückzuführen. Messungen hinter einer Aluminiumabschirmung von 3 mm ergaben im inneren Van-Allen-Gürtel bis zu 0,2 Gy/h und im äußeren Strahlungsgürtel bis zu 0,05 Gy/h. 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.

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. 13: Strahlendosis bei Raumflügen

2.4 Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen

2.4.1 Einleitung

Kernkraftwerke sind nur ein, wenn auch der bekannteste Teil einer ganzen Reihe von kerntechnischen Anlagen des Brennstoffkreislaufs, die in ihrer Aufeinanderfolge die Nutzung der Kernenergie ermöglichen. Dazu gehören (Abb. 8): Uranbergbau und Uranerzaufbereitung, Urananreicherung, Brennelementherstellung, Kernkraftwerk, Wiederaufarbeitung oder endlagergerechte Konditionierung der Brennelemente, Endlagerung radioaktiver Abfälle oder konditionierter Brennelemente. Soweit durch deutsche Anlagen Erfahrungen vorliegen, werden die daraus resultierenden Dosiswerte neben den international gemittelten Werten angegeben.

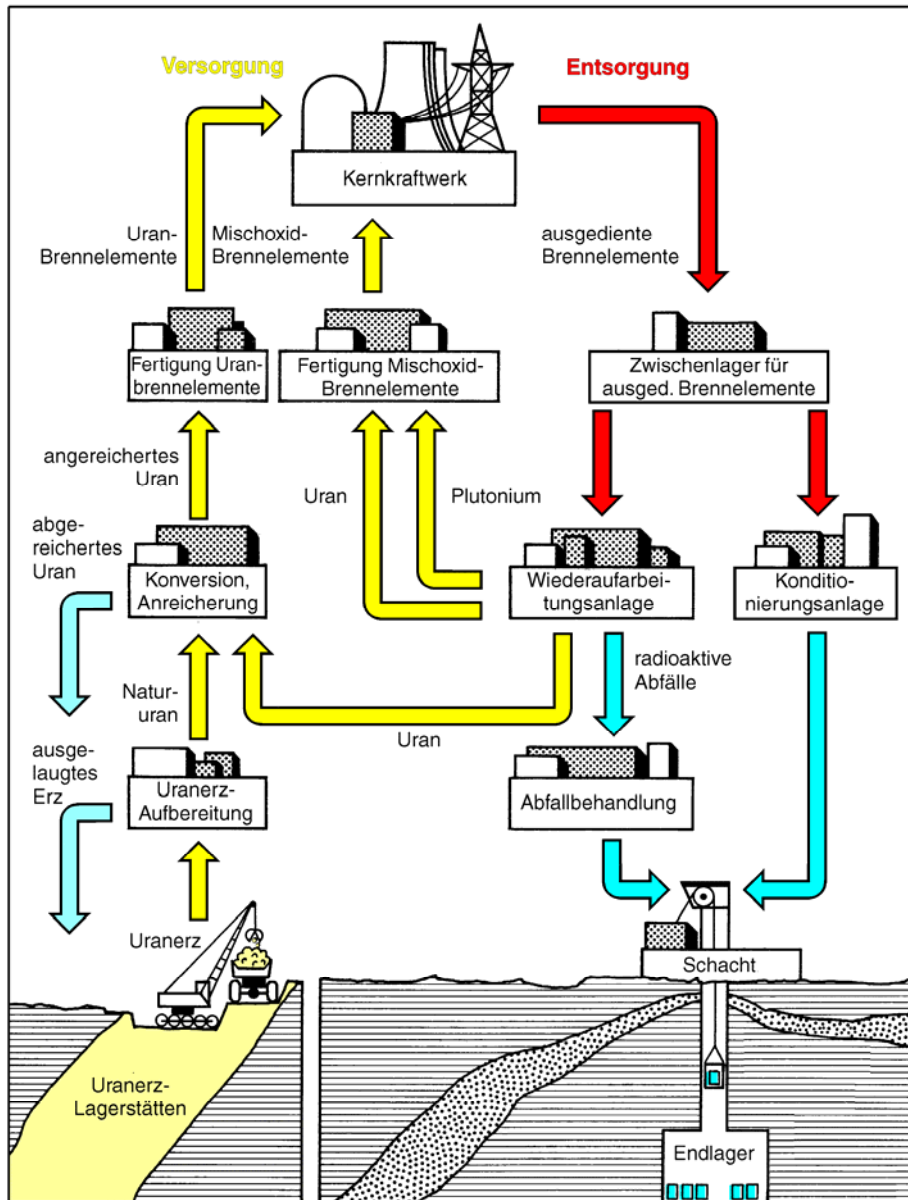


Abb. 8: Kernbrennstoffkreislauf

Zur Vergleichbarkeit der Beiträge der Stationen des Brennstoffkreislaufes untereinander und zu den Strahlenexpositionen durch nicht-nukleare industrielle Tätigkeiten wird auf Daten der Berichte des „Wissenschaftlichen Komitees über die Effekte ionisierender Strahlung der Vereinten Nationen“, UNSCEAR, Bezug genommen. 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 und der resultierenden Folgedosis. 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. Die kollektive Folgedosis ist die über die jeweilige Bevölkerungsgruppe summierte Dosis.

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. 14).

Tätigkeit	normierte kollektive effektive Folgedosis Personen-Sievert pro Gwa
Bergbau	0,2
Aufbereitung	0,008
Halden	0,04* (7,5*)
Summe, gerundet	0,25

* über 5 Jahre integriert

* über 10^4 Jahre integriert

Tab. 14: 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 $2 \cdot 10^9$ Bq der erstgenannten Nuklide und einige 10^{12} 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. 14).

Da eine Tonne Erz bei einem Gehalt von 0,2 % U_3O_8 bei radioaktivem Gleichgewicht von jedem der 19 Mitglieder der Uranzerfallsreihe je $2 \cdot 10^7$ Bq, insgesamt also knapp $4 \cdot 10^8$ 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 $20 \cdot 10^{12}$ 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. 14).

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 10^4 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 im Bereich 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. Aus den Ableitungen der deutschen Reaktoren errechnen sich unter Anwendung der nach der Strahlenschutzverordnung zu berücksichtigenden Expositionspfade (die Abb. 9 zeigt die wichtigsten Pfade) für den ungünstigsten Punkt in der Umgebung für das Jahr 2007 die in Abb. 10 wiedergegeben Strahlendosen.

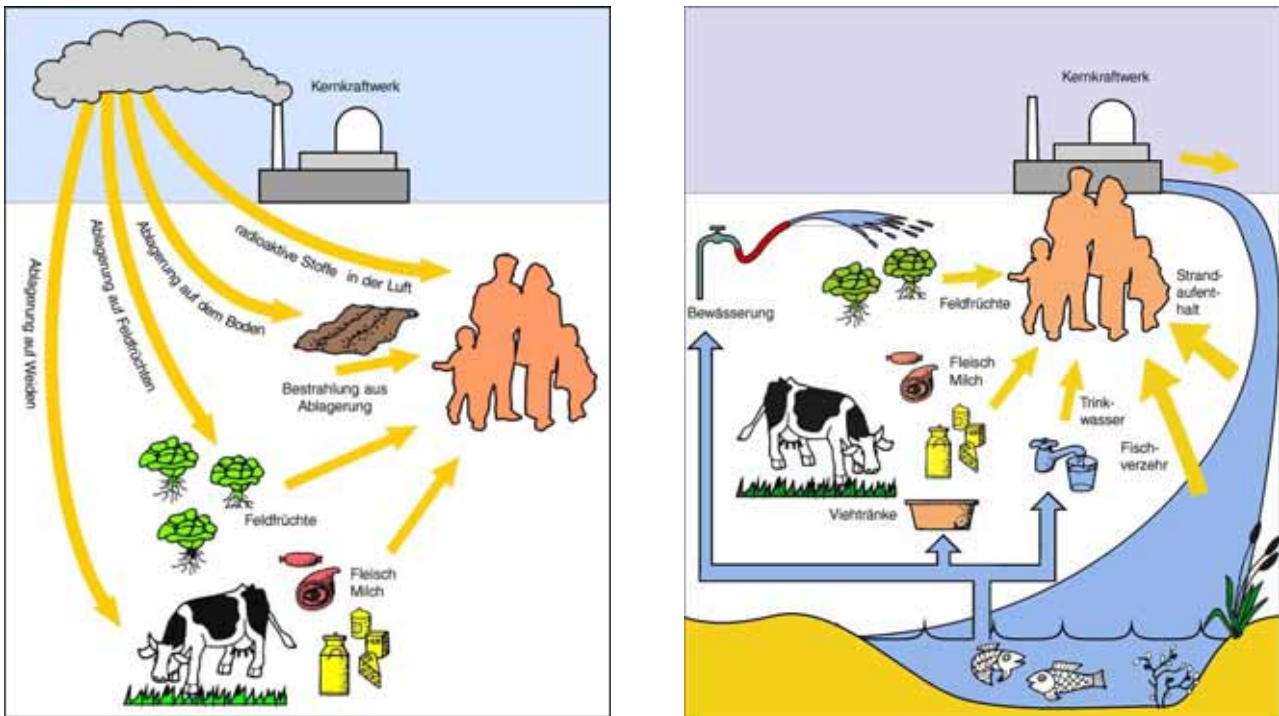


Abb. 9: Expositionspfade zur Ermittlung der Strahlenexposition durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft (links) und dem Abwasser (rechts)

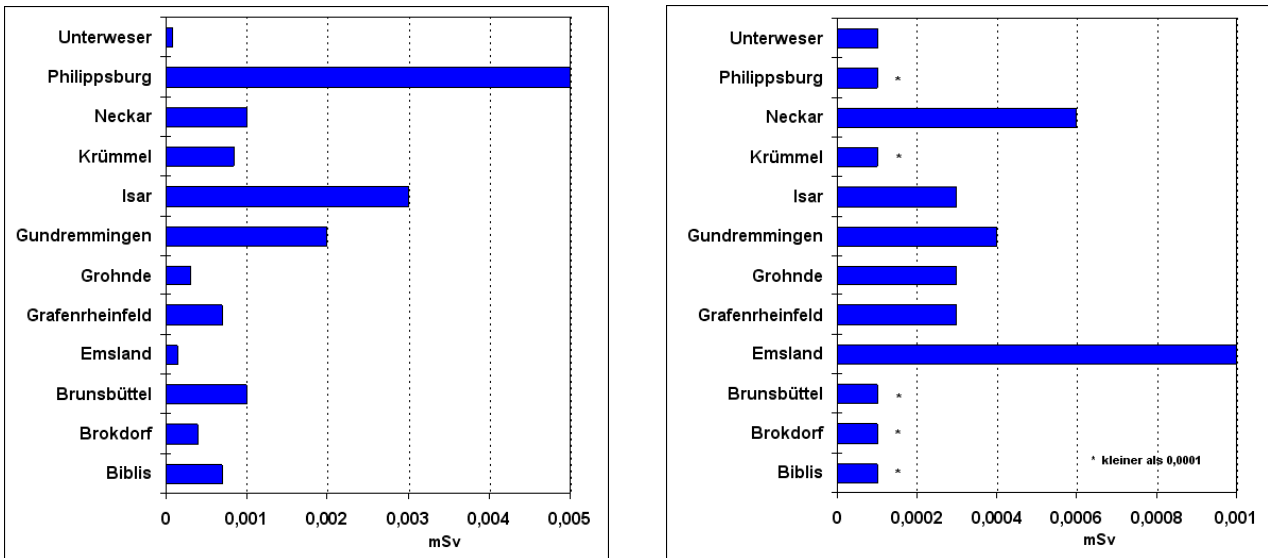


Abb. 10: Strahlendosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Jahr 2007 mit der Abluft (links) und dem Abwasser (rechts)

2.4.5 Wiederaufarbeitung

Kommerzielle Wiederaufarbeitungsanlagen werden in Sellafield (Großbritannien) und La Hague (Frankreich) betrieben. UNSCEAR-Berichte enthalten Angaben über Aktivitätsableitungen aus Wiederaufarbeitungsanlagen, aus denen die daraus resultierende kollektive regionale Strahlendosis zu 0,6 Personen-Sievert bezogen auf die Wiederaufarbeitung einer Kernbrennstoffmenge zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 GWa.

2.4.6 Zusammenfassung: Strahlenexpositionen aus kerntechnischen Anlagen

Die Tab. 15 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	0,43 (0,05 bei deutscher Technik)
Wiederaufarbeitung	0,6

Tab. 15: 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

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 radioaktiver Stoffe 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. 16 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. 16: Schätzungen der kollektiven Folgedosis der Bevölkerung aus dem jährlichen Kohleeinsatz (UNSCEAR)

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. Da rund 15 % der jährlichen Erdölproduktion von $3 \cdot 10^{12}$ kg in Kraftwerken zur Stromerzeugung eingesetzt werden und für 1 GWh rund $2 \cdot 10^9$ kg Öl erforderlich sind, ergibt sich dadurch eine gesamte kollektive effektive Folgedosis von 100 Personen-Sievert.

2.5.3 Erdgas

Die Radon-Konzentration in Erdgas variiert von nicht nachweisbaren Werten bis zu 50 kBq pro m^3 . Ein typischer Wert ist 1 kBq pro m^3 . Da zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 GWh rund $2 \cdot 10^9 m^3$ Erdgas verbrannt werden müssen, beträgt die Radon-Emission entsprechend $2 \cdot 10^{12}$ 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 weltweite Erdgasproduktion beträgt etwa $10^{12} m^3$. Bei einem geschätzten Einsatz von 15 % dieser Menge zur Stromerzeugung in Kraftwerken lässt sich die dadurch bedingte kollektive effektive Folgedosis zu 3 Personen-Sievert abschätzen.

2.5.4 Torf

Torf wird in einigen Ländern zur Stromerzeugung eingesetzt. In Finnland wurden in dem für die Stromerzeugung eingesetzten Torf spezifische Aktivitäten von 16 Bq U-238/kg, 30 Bq Pb-210/kg und 5 Bq Ra-228/kg gemessen. Mengenmäßig ist die Torfverbrennung zur Stromerzeugung ohne Bedeutung. Rechnerisch ergeben sich aus den genannten spezifischen Aktivitäten effektive Individualdosen in der Kraftwerkumgebung von 2 bis 4 Mikrosievert für eine erzeugte elektrische Energie von 1 GWh. Die kollektive effektive Folgedosis errechnet sich pro Jahr der Nutzung zu 2 Personen-Sievert pro GWh.

2.5.5 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 $1 \cdot 10^{15}$ 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_2 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 70er 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 $3 \cdot 10^9$ kg Kohle verbrannt werden. Würde diese Kohle den natürlichen C-14-Gehalt aufweisen, so ergäbe das eine Freisetzung von knapp $6 \cdot 10^{11}$ 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.

2.5.6 Zusammenfassung: Strahlenexposition durch fossile Energieträger

In Tab. 17 sind die Dosiswerte durch die Nutzung nicht-nuklearer Energieträger zur Stromerzeugung zusammengefasst, Werte für Kernkraftwerke zum Vergleich.

Energieträger	Individualdosis in der Umgebung, μ Sv pro GWh
Steinkohle	1 bis 4
Braunkohle	0,5 bis 2
Erdöl	1
Erdgas	0,2 bis 1
Torf	2 bis 4
Kernenergie	0,2 bis 5

Tab. 17: 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 heute wurden 504 Kernwaffen (+ 39 Sicherheitstests) mit einer Sprengkraft von 440 Megatonnen TNT-Äquivalent oberirdisch. Die nach Zahl und Sprengkraft größten Versuchsserien wurden in den Jahren 1961/62 durchgeführt. Die Zahl der unterirdischen Explosionen beträgt 1877 (alle Daten nach UNSCEAR) mit einer Sprengkraft von 90 Mt. Diese unterirdischen Explosionen sind mit keiner relevanten Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre verbunden (Abb. 11).

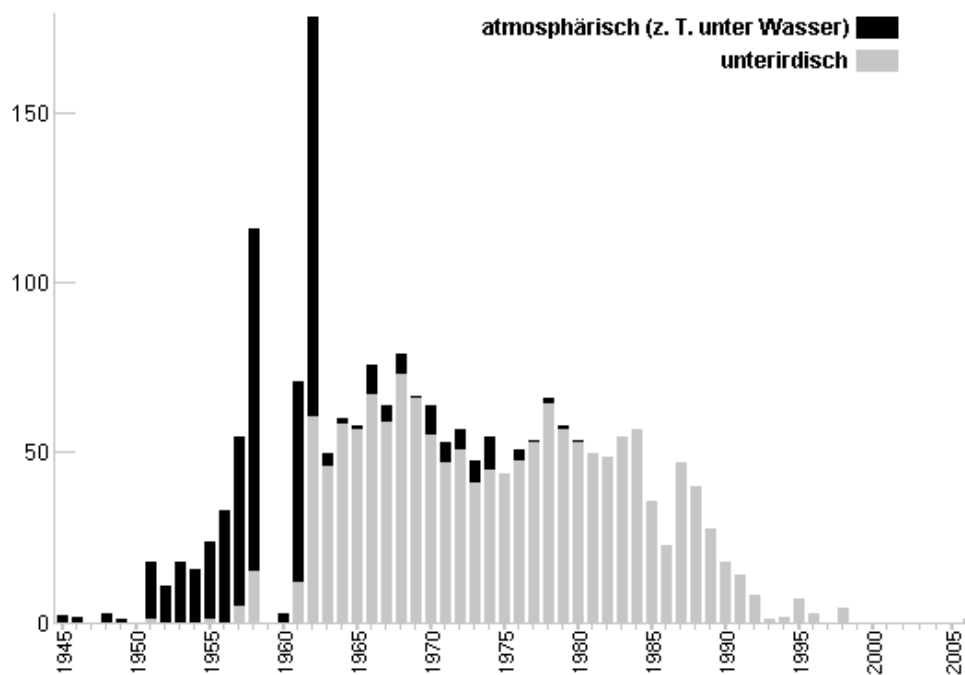


Abb. 11: Kernwaffenexplosionen, nach Jahr

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. 12 wieder. Die Abb. 13 zeigt die Ergebnisse von Messungen des Cs-137-Gehalts im Körper, die an einer Referenzpersonengruppe im Ganzkörperzähler des Forschungszentrums Karlsruhe ermittelt werden.

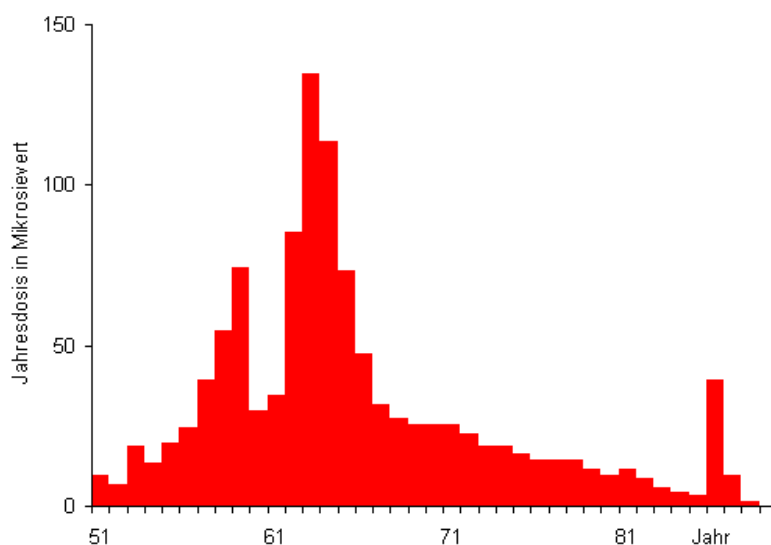


Abb. 12: Jährliche Dosis durch Kernwaffentests und Tschernobyl

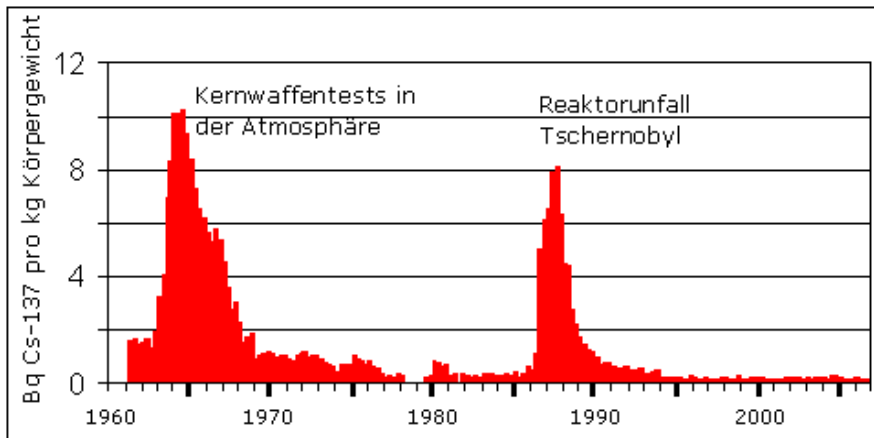


Abb. 13: Cs-137-Körperaktivität der Karlsruher Referenzgruppe

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. 18).

Neben der Strahlenexposition durch den weltweiten Fallout haben die Kernwaffentests in den jeweiligen Testgebieten zu regionalen Expositionen geführt. Ihr Beitrag zur kollektiven weltweiten Folgedosis ist zwar gering, die Individualdosen der Bevölkerung waren aber zum Teil sehr hoch. Regional führten auch die Aktivitätsableitungen aus den Kernwaffenproduktionsanlagen (Hanford, USA; Chelyabinsk, UdSSR) zu erheblichen Strahlenexpositionen (siehe Tab. 18).

Tätigkeit	kollektive effektive Dosis in den nächsten 10 000 Jahren in Personen-Sievert	
	regional	global
Kernwaffentests		
Semipalatinsk	4.600	22.300.000
Australien	700	
Nevada	500 *	
Pazifik	160 *	
Kernwaffenproduktion		
Hanford	8.000 **	10.000
Chelyabinsk	15.000	
Radon aus Halden	30.000	
zum Vergleich: Dosis durch natürliche Strahlenexposition in 10 000 Jahren		240.000.000.000

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

Tab. 18: Kollektive effektive Folgedosis durch Kernwaffenproduktion und Kernwaffentests

2.7 Strahlenexposition durch Unfälle

2.7.1 Unfälle in Kernkraftwerken und kerntechnischen Anlagen

Bisher sind in Kernkraftwerken weltweit drei Unfälle mit erheblichen Auswirkungen auf die Umwelt eingetreten. Wie sehr die Freisetzungen bei diesen Reaktorunfällen variieren, zeigt die Tab. 19 für die Reaktorunfälle von Windscale, Harrisburg und Tschernobyl.

Nuklid	freigesetzte Aktivität in 10 ¹⁵ Bq		
	Windscale	Harrisburg	Tschernobyl
Sr-90	0,00007	-	8
I-131	0,74	0,001	330
Cs-134	0,01	-	35
Cs-137	0,02	-	70
Edelgase	12,5	310	1.750

Tab. 19: Aktivitätsfreisetzungen bei Reaktorunfällen

Im Plutonium-Produktionsreaktor Windscale (England) kam es im Oktober 1957 zu einer partiellen Kernschmelze. I-131 führte trotz des sofortigen Verzehrverbots für Milch 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.

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

Der Reaktorunfall von Tschernobyl am 26. April 1986 wurde durch Fehlbedienungen der Reaktorregelung ausgelöst. Dabei kam es zu einem so großen Temperaturanstieg in den Brennelementen, dass diese schmolzen. Der dadurch entstehende sehr hohe Wasserdampfdruck ließ die Druckrohre, in denen sich auch die Brennelemente befanden, platzen. Der Moderator Graphit geriet in Brand. Aus dem zerstörten Reaktor 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 2 km transportiert und z. T. über weite Gebiete verteilt.

Durch meteorologische Einflüsse bedingt sind die aus dem Tschernobyl-Unfall abgelagerten Aktivitätsmengen in den Regionen der Bundesrepublik sehr unterschiedlich - 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 in das Voralpengebiet. Für Einzelpersonen mit extremen Lebens- und Verzehrgewohnheiten können sich maximale Dosiswerte bis zum Zwei- oder Dreifachen dieser Werte ergeben.

In den durch den Unfall besonders betroffenen Gebieten Weißrusslands, Russlands und der Ukraine zeigte sich bei Kindern und Jugendlichen ein deutlicher Anstieg der Schilddrüsenkrebskrankungen, der auf die Strahlenexposition zurückzuführen ist. Verantwortlich dafür ist vor allem die Aufnahme von Iod-131 über die Nahrungskette, das zu höheren Strahlendosen in der Schilddrüse führte. In den betroffenen Ländern werden insgesamt bis zu 4 000 Schilddrüsenkrebsfälle erwartet. Eine starke Zunahme der Sterblichkeit ist bei rechtzeitiger Diagnose nicht zu erwarten. Bis 2002 sind z. B. in Weißrussland 8 von insgesamt 1152 betroffenen Kindern an ihrer Erkrankung verstorben. Einen Überblick über die durchschnittliche Gesamtdosis in diesen Gebieten im Zeitraum von 1986 bis 2056 gibt Tab. 20.

Region	Bevölkerung	mittlere Individualdosis 1986 - 2056		
		bis 1995	bis 2005	bis 2056
Weißrussland	1.900.000	8 mSv	9,8 mSv	12 mSv
Russland	2.000.000	6,8 mSv	8,3 mSv	10 mSv
Ukraine	1.300.000	18 mSv	12,9 mSv	16 mSv

Tab. 20: Unfallbedingte zusätzliche Dosis (ohne Schilddrüsendosis) in den durch den Tschernobyl-Unfall mit mehr als 37 kBq/m² Cs-137 kontaminierten Regionen

In der militärischen Plutonium-Produktionsanlage Kyshtym (Südrural) überhitzte sich 1957 nach Kühlungs- ausfall ein Lagertank mit 70 bis 80 t hochaktivem Flüssigabfall und explodierte. Die durch die radioaktive Wolke betroffene Fläche wurde auf rund 20 000 km² abgeschätzt mit einer betroffenen Bevölkerung von etwa 270 000 Personen. Rund 10 000 Personen wurden evakuiert. Die mittlere effektive Individualdosis der –

evakuierten - Bevölkerung aus den höchstbelasteten Gebieten wurde auf rund 500 mSv, die gesamte effektive Kollektivdosis auf 2 500 Personen-Sievert geschätzt.

2.7.2 Satelliten-Abstürze und Unfälle mit radioaktiven Quellen

Zwei Satelliten-Abstürze mit Radionuklidbatterien bzw. Kernreaktoren als Energiequelle führten zu einer geringen globalen Strahlenexposition. 1964 verglühte über der südlichen Hemisphäre beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre ein US-militärischer SNAP-9A-Satellit mit $6 \cdot 10^{14}$ Bq Pu-238. Daraus errechnet sich eine effektive Dosis durch Inhalation für die Bewohner der südlichen Hemisphäre von 1,6 Mikrosievert, für die der nördlichen von 0,4 Mikrosievert. Die effektive Kollektivdosis ergibt sich zu 2 100 Personen-Sievert. Im Januar 1978 stürzte über Kanada der militärische sowjetische Satellit Kosmos 954 mit einem 100-kW-Reaktor ab. Die dabei überwiegend in der nördlichen Hemisphäre freigesetzten Radionuklide führten überwiegend durch Cs-137 und Pu-239 zu einer kollektiven effektiven Dosis von 20 Personen-Sievert.

Unfälle mit Bestrahlungsquellen führten lokal und regional zu hohen Individualdosen und Kontaminationen von über tausend Personen (Tab. 21). 1983 wurde in Ciudad Juarez (Mexiko) eine medizinische Bestrahlungsanlage mit $17 \cdot 10^{12}$ Bq Co-60 an einen Schrotthändler verkauft. Einzelne Personen erhielten eine Dosis bis zu 3 Sv; die Gesamtdosis der rund tausend bestrahlten Personen wurde auf 150 Personen-Sievert abgeschätzt. 1984 ging in Mohammedia (Marokko) eine Ir-192-Quelle für industrielle Radiographie verloren. Der Finder bewahrte sie zu Hause auf. Acht Personen - die ganze Familie - starben an einer Überexposition mit Dosen von 8 bis 25 Sv. In Goiânia (Brasilien) wurde 1987 eine medizinische Bestrahlungsanlage mit $50 \cdot 10^{12}$ Bq Cs-137 gestohlen, an einen Schrotthändler verkauft und dort zerlegt. Über 100 Personen wurden kontaminiert, vier Personen starben. Die Gesamtdosis wurde auf 60 Personen-Sievert abgeschätzt

Tätigkeit	kollektive effektive Dosis in den nächsten 10.000 Jahren, Personen-Sievert	
	regional	global
Kernwaffenproduktion		
Kyshtym (1957)	2.500	
Windscale (1957)	2.000	
Kernkraftwerke		
Three Mile Island (1979)	40	
Tschernobyl (1986)		600.000
Satellitenabstürze		
SNAP 9A (1964)		2.100
Kosmos 954 (1978)		20
Radionuklidquellen		
Ciudad Juarez (1983)	150	
Mohammedia (1984)	80	
Goiânia (1987)	60	
zum Vergleich:		
Dosis durch natürliche Strahlenexposition in 10 000 Jahren		240.000.000.000

Tab. 21: Kollektive effektive Folgedosis durch Unfälle

3 BERUFLICHE STRAHLENEXPOSITION

Im Jahr 2007 wurden in Deutschland etwa 317 000 Personen während ihrer beruflichen Tätigkeit mit Personendosimetern überwacht. Davon waren rund 77 % im medizinischen Bereich tätig. Die Summe der Jahresdosis aller mit Personendosimetern überwachten Personen im Jahr 2007 betrug 45 Personen-Sievert. Die mittlere Jahres-Personendosis aller Überwachten betrug 0,14 mSv. Bei etwa 82 % der mit Personendosimetern überwachten Personen lagen die ermittelten Werte unter der kleinsten feststellbaren Dosis von 0,05 mSv im Jahr (Abb. 14). Für die 57 000 Personen mit einer von Null verschiedenen Jahresdosis ergibt sich eine mittlere Jahres-Personendosis von 0,79 mSv. Entsprechend den Vorschriften der Strahlenschutzverordnung müssen die Betreiber von Flugzeugen die durch die erhöhte kosmische Strahlung verursachte Strahlenexposition des fliegenden Personals mit amtlich zugelassenen Rechenprogrammen ermitteln. In

Deutschland wurden im Jahr 2007 auf diese Weise 34 000 Personen überwacht, die Kollektivdosis dieser Personen betrug 76 Personen-Sievert. Damit ergibt sich eine mittlere Jahresdosis von 2,2 mSv. Das fliegende Personal ist damit eine der am höchsten strahlenexponierte Berufsgruppe in Deutschland (Abb. 15).

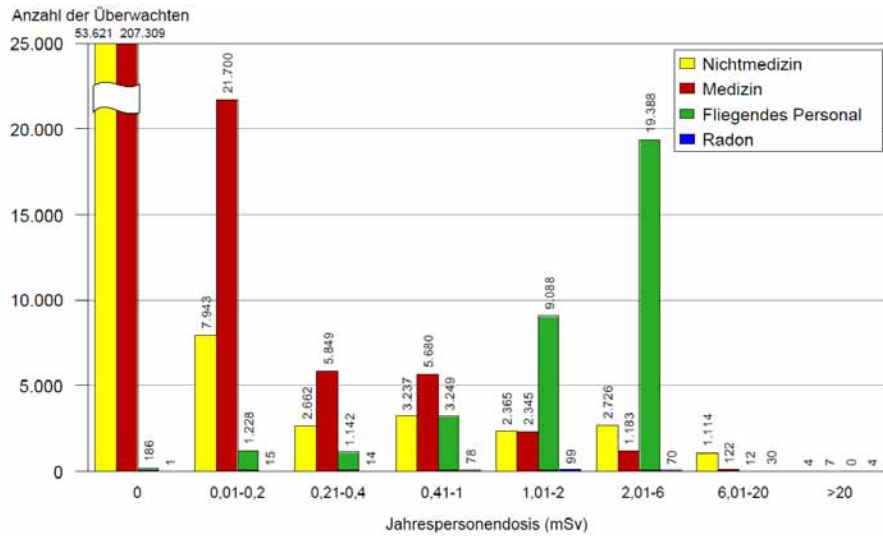


Abb. 14: Verteilung der Personendosis beruflich Strahlenexponierter im Jahr 2007

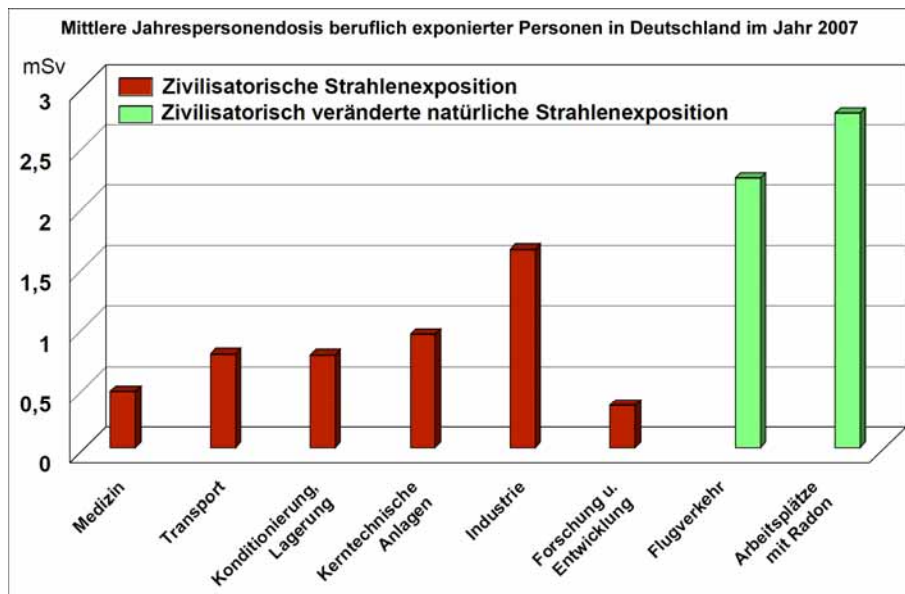


Abb. 15: Mittlere Jahres-Personendosis strahlenexponierter Personen in Deutschland im Jahr 2007 in den verschiedenen Bereichen

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 1,9 mSv pro Jahr. Die effektive Dosis aus allen Strahlenquellen beträgt für einen Einwohner in Deutschland im Mittel 4 mSv im Jahr (Tab. 22). Diese Dosis stammt zu fast gleichen Anteilen 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.

Ursache der Strahlendosis	effektive Dosis in mSv/Jahr	
	typischer Wert für die Bevölkerung	Wertebereich für exponierte Einzelpersonen
Natur		
kosmische Strahlung	0,3	0,3 bis 0,5
terrestrische Strahlung	0,4	0,2 bis 3
innere Bestrahlung	1,4	0,5 bis 8
Natur gesamt	2,1	1 bis 10
Zivilisation		
Medizin	1,9	0,1 bis 20
Tschernobyl-Unfall	0,01	0,005 bis 0,02
Kernwaffentests	0,005	0,002 bis 0,01
Flugreisen	0,005	0,01 bis 3
fossile Energieträger	0,001	0,001 bis 0,01
Kernkraftwerke	0,001	0,001 bis 0,01
Industrieprodukte	0,001	0,001 bis 0,1
Beruf*	0,14*	0,1 bis 20*
Zivilisation gesamt	1,9	-
gesamt	4	

* nur beruflich exponierte Personen

Tab. 22: Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland, 2007

In den Abb. 16 bis Abb. 19 sind die mittleren natürlichen und zivilisatorischen Strahlenexpositionen in Deutschland, der Schweiz, den USA und Großbritannien dargestellt.

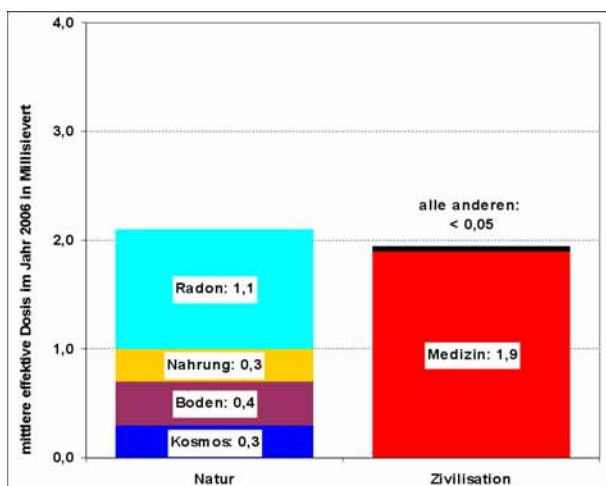


Abb. 16: Mittlere Strahlenexposition in Deutschland

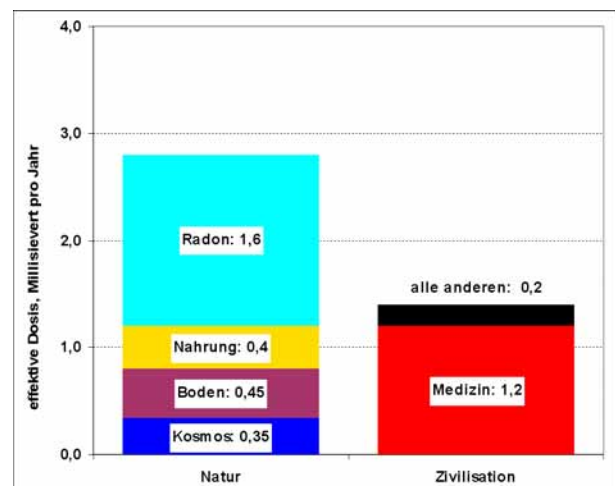


Abb. 17: Mittlere Strahlenexposition in der Schweiz

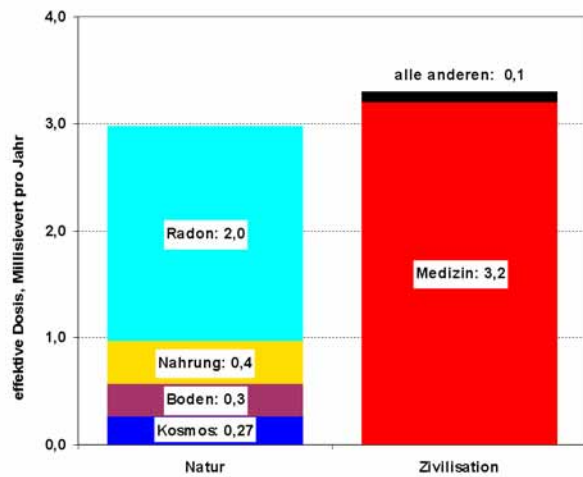


Abb. 18: Mittlere Strahlenexposition in den USA

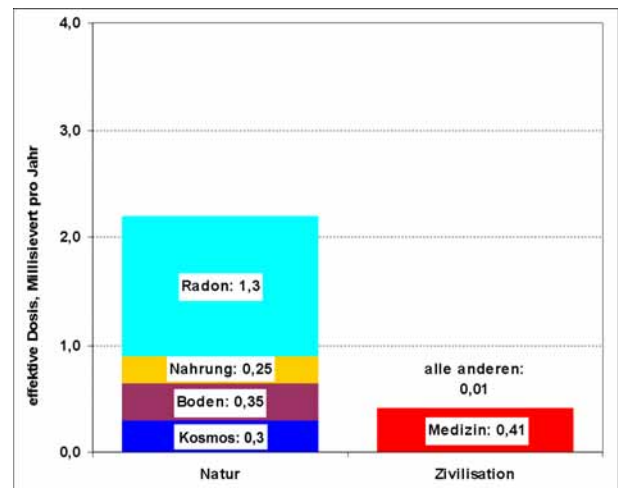


Abb. 19: Mittlere Strahlenexposition in Großbritannien

5 LITERATUR

- Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; Report to the General Assembly, UNSCEAR 1988, United Nations, New York, 1988
- Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly
 UNSCEAR 1993, United Nations, New York, 1993
 UNSCEAR 1994, United Nations, New York, 1994
 UNSCEAR 1996, United Nations, New York, 1996
 UNSCEAR 2000, United Nations, New York, 2000
- Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresberichte 1996 bis 2007, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit