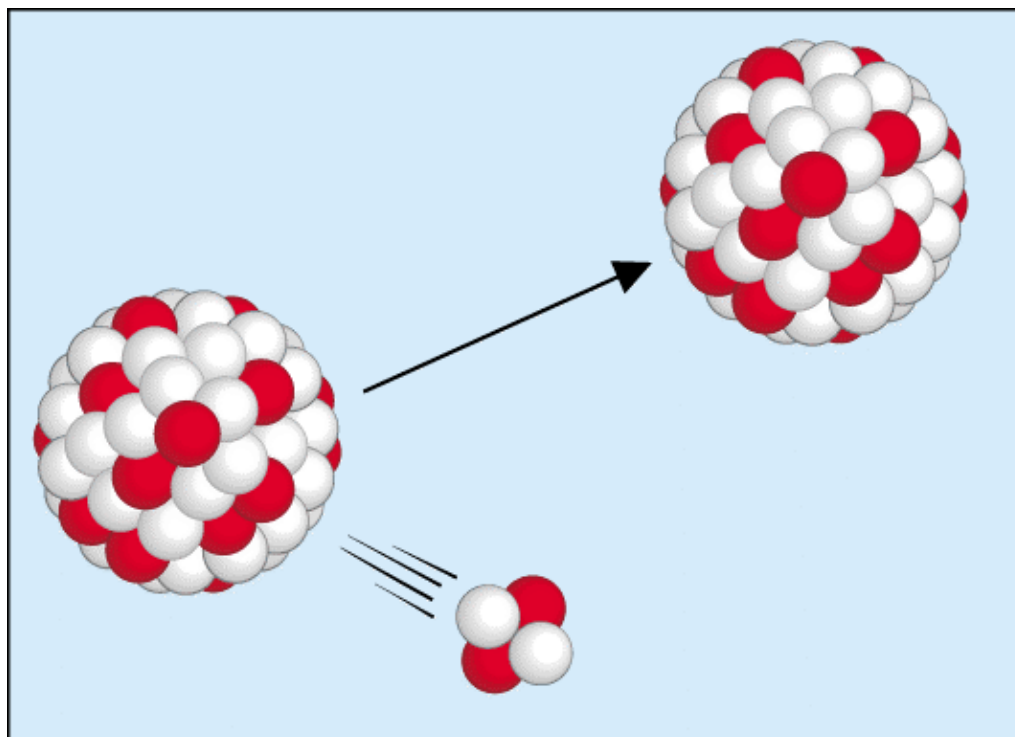


Radioaktivität

Strahlenexposition

Strahlenwirkung

Winfried Koelzer



Informationskreis KernEnergie
Robert-Koch-Platz 4, 10115 Berlin

© November 2004

Inhalt

1	Natürliche Radionuklide und Strahlenexpositionen	1
1.1	Die Entdeckung der Radioaktivität	1
1.2	Natürliche Radionuklide	2
1.3	Natürliche Strahlenexposition	5
2	Künstliche radioaktive Stoffe und zivilisatorische Strahlenexposition	7
2.1	Entdeckung der künstlichen Aktivität und der Kernspaltung	7
2.2	Strahlenexposition durch Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin	8
2.3	Berufliche Strahlenexposition	9
2.4	Strahlenexposition bei Flügen und Raumflügen	10
2.5	Ionisierende Strahlung von Bildschirmen und Leuchtzifferblättern	10
2.6	Strahlenexposition durch Kernwaffentests	11
2.7	Freisetzung von Radionukliden beim Betrieb von Kernkraftwerken und resultierende Strahlenexposition	11
2.8	Strahlenexposition durch Unfälle in kerntechnischen Anlagen und mit radioaktiven Quellen	12
2.9	Strahlenexposition durch fossile Energieträger	13
2.10	Zivilisatorische Strahlenexposition der Bevölkerung	13
2.11	Gesamte Strahlenexposition des Menschen	14
3	Biologische Wirkungen ionisierender Strahlen	14
3.1	Arten von Strahlenschäden	14
3.2	Bewertung des Strahlenrisikos	16
3.3	Risikowerte	17
3.4	Gesamtbewertung der Schädigungsmöglichkeiten und Festlegung von Dosisgrenzwerten	19
4	Literatur	19

1 Natürliche Radionuklide und Strahlenexpositionen

1.1 Die Entdeckung der Radioaktivität

Entdeckt wurde die Radioaktivität am 1. März 1896 durch Antoine-Henri Becquerel (1852 - 1908). Diese Entdeckung war zwar zufällig in dem Sinne, dass nicht nach der Eigenschaft "Radioaktivität" gesucht wurde, aber doch das Ergebnis gezielter Untersuchungen über Fluoreszenz und Phosphoreszenz an Uran.

Es war schon lange bekannt, dass Kathodenstrahlen, die in einer Entladungsröhre auf der gegenüberliegenden Glaswand auftreffen, das Glas zu grüner Fluoreszenz anregen. Als im Januar 1896 die Entdeckung Röntgens vor den Mitgliedern der Pariser Académie des Sciences vorgetragen wurde, zog Becquerel in Erwähnung, ob nicht ein direkter Zusammenhang zwischen der Fluoreszenz und den Röntgenstrahlen besteht.

Becquerel prüfte diese Vermutung, indem er auf lichtdicht verpackte Fotoplatten das im Sonnenlicht stark fluoreszierende Kaliumuranyl-sulfat aufbrachte. Er setzte die Versuchsanordnung der Sonne aus und fand erwartungsgemäß eine Schwärzung der Fotoschicht. Damit schien die Vermutung bestätigt, dass die Fluoreszenz von einer durchdringenden Strahlung begleitet sei.

Am 26. Februar 1896 bereitete Becquerel einen neuen Versuch vor, der aber wegen des bedeckten Himmels am 26. und des nur kurzen Sonnenscheins am 27. nicht vollständig durchgeführt wurde. Die Fotoplatte mit Uran wurde in eine Schublade zur späteren Versuchsfortführung gelegt.

Als am 1. März die Sonne wieder schien, wurden die Versuche fortgesetzt, vorher aber - um einwandfreie Versuchsbedingungen zu schaffen - die Fotoplatte gewechselt. Die Entwicklung zeigte nun trotz der Lagerung im Dunkeln an den Stellen der Fotoplatte, auf denen das Uran gelegen hatte, eine Schwärzung, die erstaunlicherweise sogar stärker war als bei den vorhergehenden Versuchen mit Sonnenlicht.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Schwärzung der Fotoplatten unabhängig davon war, ob phosphoreszierende oder nichtphosphoreszierende Verbindungen benutzt wurden, solange sie nur Uran enthielten. Becquerel vermutete, dass vom Uran eine eigene, bisher nicht bekannte Strahlung ausginge [1, 2]. Diese Strahlung wurde "Rayons uraniques" oder "Rayons de Becquerel" genannt. Becquerel wies bereits im März 1896 die durch diese Strahlung erfolgende Ionisation von Gasen nach.

Im Sommer 1897 begann Marie Curie die Untersuchung der Ionisationswirkung der "Uranstrahlen"

verschiedener Uranverbindungen und uranhaltiger Erze. Sie konnte zeigen, dass die Strahlungsintensität proportional der Uranmenge und unabhängig von der verwendeten Uranverbindung ist. Auch einen Einfluss von Licht und Temperatur konnte sie ausschließen.

Überraschend war dabei aber die Feststellung, dass selbst reines Uranmetall eine geringere Strahlenintensität zeigte als manche Uranerze, die einen geringeren Urangehalt hatten. Insbesondere die Pechblende aus Johanngeorgenstadt und Joachimsthal zeigte eine sehr hohe Strahlungsintensität. Marie Curie schloss daraus, dass mindestens ein weiterer anderer strahlender Stoff in der Pechblende vorhanden sein müsste.

Die Suche nach einem noch unbekanntem, strahlenden Element, das in der Pechblende enthalten sein musste, war im Sommer 1898 erfolgreich. Das Ehepaar Pierre und Marie Curie schlug den Namen Polonium vor, "du nom du pays d'origine de l'un de nous", wie es wörtlich in der Veröffentlichung über die Entdeckung heißt. Und am 26.12.1898 konnten sie die Entdeckung einer weiteren strahlenden Substanz, des Radiums, mitteilen.

Diese Entdeckungen regten zahlreiche Forscher an, radioaktive Mineralien genauer chemisch zu analysieren. Bereits 1904 waren über ein Dutzend radioaktive Stoffe bekannt. In einer umfassenden Arbeit stellte Rutherford sie in - zum Teil spekulativen - Zerfallsreihen zusammen (Abb. 1).

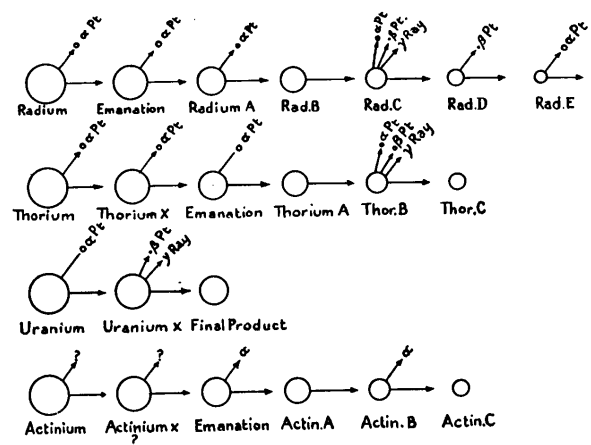


Abb. 1: Zerfallsreihen nach E. Rutherford, 1904

Bis 1913 war die Anzahl der bekannten "Radioelemente" auf fast 40 angestiegen (Tab. 1), und es bestand das Problem, sie auf die nur sieben freien Elementplätze des Periodensystems zwischen Wismut, Thorium und Uran einzuordnen. Soddy löste diese Schwierigkeiten durch die Übertragung des von ihm 1909 eingeführten Isotopenbegriffs auf diese "Radioelemente".

1.2 Natürliche Radionuklide

Die meisten natürlich radioaktiven Stoffe entstammen einer der drei Zerfallsreihen, deren Anfangsglieder eine gegenüber der Zeit seit der Entstehung der Elemente lange Halbwertszeit besitzen.

- Uran-Radium-Reihe, ausgehend vom Uran-238 (Halbwertszeit: 4,5 Milliarden Jahre), Abb. 2,
- Actinium-Reihe, ausgehend vom Uran-235 (Halbwertszeit: 0,7 Milliarden Jahre), Abb. 3,

- Thorium-Reihe, ausgehend vom Thorium-232 (Halbwertszeit: 14 Milliarden Jahre), Abb. 4.

Neben den 47 natürlichen Radionukliden, die einer dieser Zerfallsreihen angehören, gibt es 25 weitere natürliche Radionuklide überwiegend mittlerer Massenzahl mit zum Teil extrem langen Halbwertszeiten - sogenannte primordiale, "von Anfang an vorhandene" Radionuklide (Tab. 2).

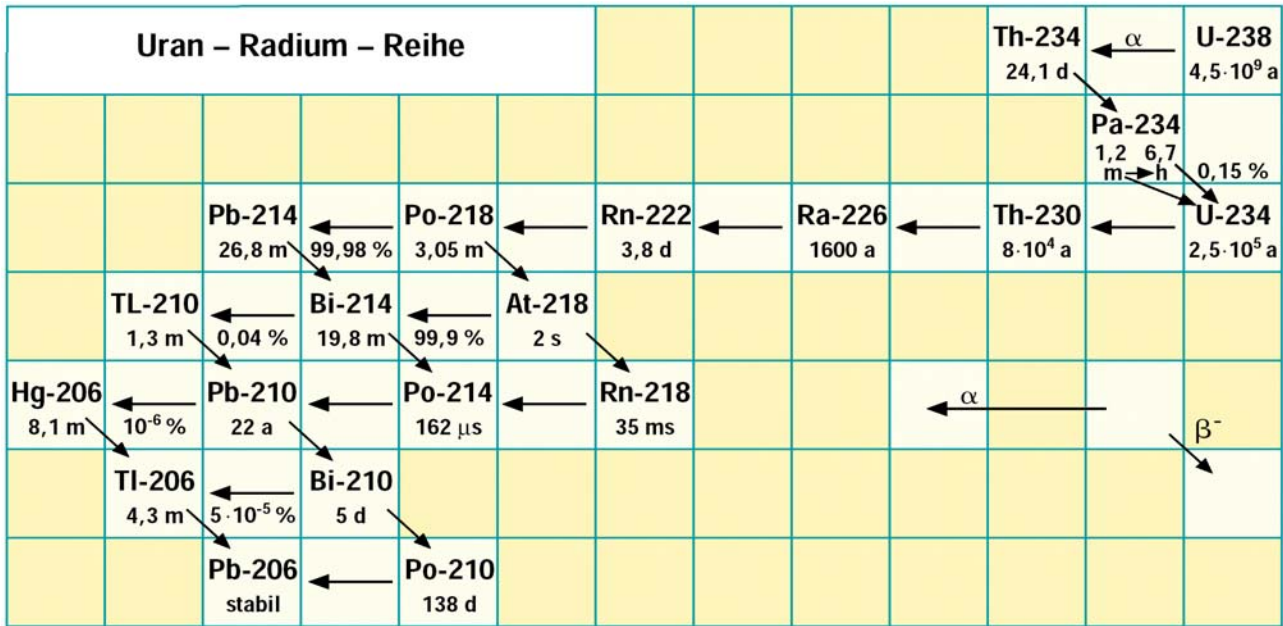


Abb. 2: Uran-Radium-Zerfallsreihe

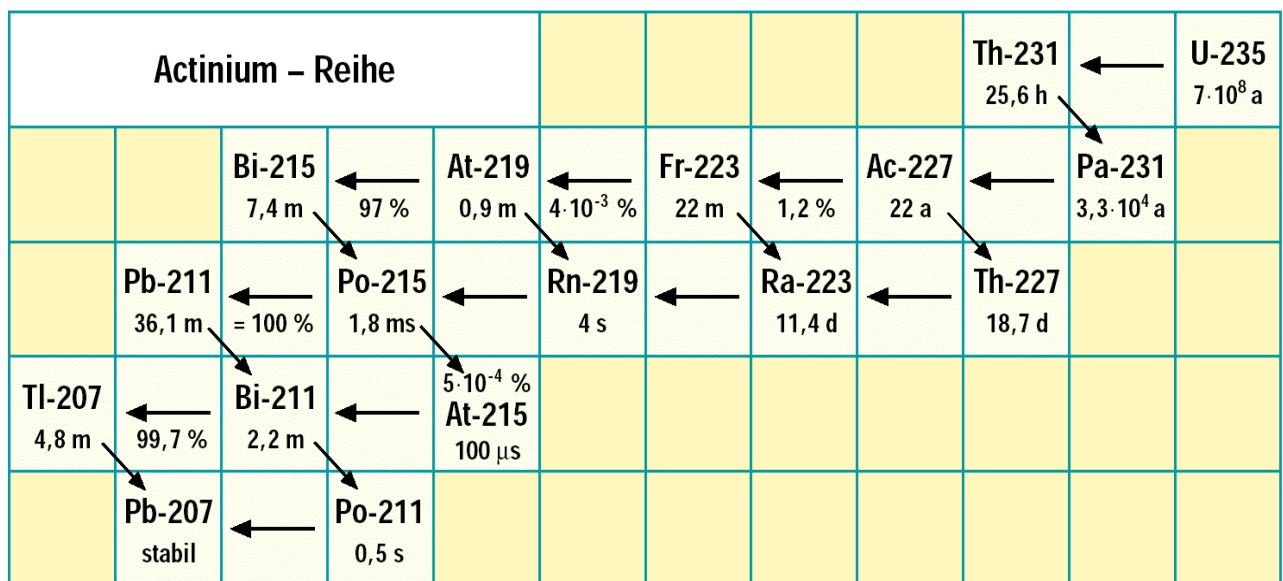


Abb. 3: Actinium-Zerfallsreihe

Thorium - Reihe									
								Ra-228 5,7 a	← Th-232 1,4 · 10 ¹⁰ a
									Ac-228 6,13 h
	Pb-212 10,6 h	←	Po-216 0,15 s	←	Rn-220 55,6 s	←	Ra-224 3,64 d	←	Th-228 1,9 a
Tl-208 3,1 m	← 36,2 %		Bi-212 60,6 m						
	Pb-208 stabil	←	Po-212 0,3 μs						

Abb. 4: Thorium-Zerfallsreihe

Neben den 47 natürlichen Radionukliden, die einer dieser Zerfallsreihen angehören, gibt es 25 weitere natürliche Radionuklide überwiegend mittlerer Massenzahl mit zum Teil extrem langen Halbwertszeiten - sogenannte primordiale, "von Anfang an vorhandene" Radionuklide (Tab. 2).

Jahr	Entdecker	Historischer Name	Heutige Bezeichnung
1896	Becquerel	Uran	
	Schmidt	Thorium	
1898	Curie	Polonium/RaF	Po-210
		Radium	Ra-226
	Debiere	Actinium	Ac-227
1899	Rutherford/Owens	Emanation (Thoron)	Rn-220
1900	Dorn	Emanation (Radon)	Rn-222
1902	Rutherford/Soddy	Thorium X	Ra-224
1903	Giesel	Emanation (Actinon)	Rn-219
1904	Rutherford	Radium B	Pb-214
		Radium C	Bi-214
		Thorium B	Pb-212
		Thorium C	Bi-212
	Debiere	Actinium B	Pb-211
	Brooks/Rutherford	Actinium C	Bi-211
	Giesel	Actinium X	Ra-223
1905	Bragg/Kleeman	Radium A	Po-218
	Hahn	Radiothor	Th-228
	Rutherford	Radium E	Bi-210
1906	Hahn	Boltwood	Ionium
		Thorium C'	Po-212
		Radium D	Pb-210
		Radioactinium	Th-227
1907	Hahn	Mesothor I	Ra-228
		Mesothor II	Ac-228

Jahr	Entdecker	Historischer Name	Heutige Bezeichnung
1908	Hahn/Meitner	Actinium C'	Tl-207
		Radium C'	Po-214
1909	Hahn/Meitner	Radium C''	Tl-210
		Thorium C''	Tl-208
1910	Geiger/Rutherford	Uran I	U-238
		Uran II	U-234
	Geiger/Marsden	Thorium A	Po-216
		Actinium A	Po-215
1911	Antonoff	Uran Y	Th-231
1913	Fajans/Göhring	Uran X ₁	Th-234
		Uran X ₂	Pa-234 (1,2 min)
		Marsden/Wilson	Actinium C'
1918	Hahn/Meitner	Protactinium	Pa-231
		Hahn	Uran Z
			Pa-234 (6,7 h)
1935	Dempster	Actinium-Uran	U-235
1939	Perey	Actinium K	Fr-223
1943	Karlik, Bernert	-	At-218
1944	Karlik, Bernert	-	At-215
1953	Hyde, Ghiorso	-	At-219

Tab. 1: Zeittafel der Entdeckung natürlicher Radionuklide aus den Zerfallsreihen von Uran und Thorium

Von diesen Nukliden kommt insbesondere dem Kalium-40 bezüglich der Strahlenexposition des Menschen eine Bedeutung zu. Von allen anderen Nukliden verdient in dieser Hinsicht nur noch Rubidium-87 Beachtung.

Neben den 47 natürlichen Radionukliden, die einer dieser Zerfallsreihen angehören, gibt es 25 weitere natürliche Radionuklide überwiegend mittlerer Massenzahl mit zum Teil extrem langen Halbwertszeiten - sogenannte primordiale, "von Anfang an vorhandene" Radionuklide (Tab. 2).

an vorhandene" Radionuklide (Tab. 2). Von diesen Nukliden kommt insbesondere dem Kalium-40 bezüglich der Strahlenexposition des Menschen eine Bedeutung zu. Von allen anderen Nukliden verdient in dieser Hinsicht nur noch Rubidium-87 Beachtung.

Nuklid	Halbwertszeit Jahre	Nuklid	Halbwertszeit Jahre
K-40	$1,3 \cdot 10^9$	La-138	$1,1 \cdot 10^{11}$
V-50	$1,4 \cdot 10^{17}$	Nd-144	$2,3 \cdot 10^{15}$
Ge-76	$1,5 \cdot 10^{21}$	Nd-150	$1,7 \cdot 10^{19}$
Se-82	$1,0 \cdot 10^{20}$	Sm-147	$1,1 \cdot 10^{11}$
Rb-87	$4,8 \cdot 10^{10}$	Sm-148	$7,0 \cdot 10^{15}$
Zr-96	$3,9 \cdot 10^{19}$	Gd-152	$1,1 \cdot 10^{14}$
Mo-100	$1,2 \cdot 10^{19}$	Lu-176	$2,6 \cdot 10^{10}$
Cd-113	$9,0 \cdot 10^{15}$	Hf-174	$2,0 \cdot 10^{15}$
Cd-119	$2,6 \cdot 10^{19}$	Ta-180	$1,2 \cdot 10^{15}$
In-115	$4,4 \cdot 10^{14}$	Re-187	$5,0 \cdot 10^{10}$
Te-123	$1,2 \cdot 10^{13}$	Os-186	$2,0 \cdot 10^{15}$
Te-128	$7,2 \cdot 10^{24}$	Pt-190	$6,5 \cdot 10^{11}$
Te-130	$2,7 \cdot 10^{21}$		

Tab. 2: Primordiale 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. 3. Von diesen Radionukliden hat nur Kohlenstoff-14 eine für die Strahlenexposition des Menschen gewisse, aber 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	$1,6 \cdot 10^6$ a	S-38	2,8 h
C-14	5730 a	Cl-34m	32 min
Na-22	2,6 a	Cl-36	$3 \cdot 10^5$ 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. 3: Kosmogene Radionuklide

Der Radioaktivitätsgehalt in den Gesteinsarten ist sehr verschieden. Im Urgesteinen sind die spezifischen Aktivitäten höher als in den meisten Sedimentgestein (Tab. 4).

Gesteinsart	spezifische Aktivität in Bq/kg		
	K-40	Th-232	U-238
Granit	1000	80	60
Tonschiefer	700	50	40
Diorit	700	30	20
Sandstein	350	10	20
Basalt	250	10	10
Kalkstein	90	7	30

Tab. 4: Typische spezifische Aktivitäten in Gesteinen

Erläuterungen zu den Begriffen „Aktivität“ und „Dosis“

Aktivität ist die Zahl der je Sekunde in einer Substanz zerfallenden Atomkerne eines bestimmten Radionuklids. Die Maßeinheit für die Aktivität ist die reziproke Sekunde (s^{-1}) mit dem besonderen Einheitennamen Becquerel – Kurzzeichen Bq. 1 Becquerel entspricht dem Zerfall eines Atomkerns pro Sekunde. Die früher geltende Einheit der Aktivität war Curie (Kurzzeichen Ci). 1 Curie = 37 000 000 000 Becquerel.

Der reine Zahlenwert der Aktivität gestattet keine Aussage über die radiologischen Risiken. Die Berechnung einer Strahlenexposition aus einem Aktivitätswert ist nur bei genauer Kenntnis der Umstände des Einzelfalls möglich (Art des Radionuklids, externe/interne Bestrahlung, Abstand/Abschirmung/Aufenthaltszeit bei externer Bestrahlung, chemische Form des Radionuklids/Alter der Person bei interner Bestrahlung, usw.). Anmerkung: „Aktivität“ ist die physikalische Größe für die Anzahl der Zerfälle pro Zeit, „Radioaktivität“ bezeichnet die Eigenschaft bestimmter Nuklide, sich umzuwandeln.

Im Strahlenschutz werden zur Angabe der Strahlenexposition - der **Dosis** – verschiedene Größen benutzt. Die zentrale Größe ist die **Energiedosis**. Strahlung bewirkt durch Ionisations- und Anregungsprozesse eine Energiedeposition in der bestrahlten Materie. Die Energiedosis ist definiert als die in einem kleinen Volumenelement auf die Materie übertragene Energie, dividiert durch die Masse dieses Volumenelements. Die Maßeinheit der Energiedosis ist das Gray - Einheitenkurzzeichen Gy. Ein Gray entspricht einer Energieabsorption von 1 Joule pro Kilogramm, z. B. einem Kilogramm Gewebe.

Beim Vergleich verschiedener Strahlenarten miteinander zeigte sich, dass z. B. Alphastrahlen bei gleicher Energiedosis biologisch wesentlich wirksamer sein können als Beta- oder Gammastrahlen. Das Ausmaß einer biologischen Strahlenwirkung ist daher nicht nur vom

Betrag der Energiedosis sondern auch der Strahlenqualität abhängig. Für die Abschätzung von Strahlenrisiken ist es daher erforderlich, neben der Energiedosis auch die Strahlenart und ggf. deren Energie zu berücksichtigen.

Für Zwecke des Strahlenschutzes wurde dazu die **Organdosis** eingeführt. Die Organdosis ergibt sich aus der berechneten oder gemessenen Energiedosis durch Multiplikation mit einem von der Strahlenqualität abhängigen Bewertungsfaktor (Strahlungs-Wichtungsfaktor), der die unterschiedlichen biologischen Risiken bei den verschiedenen Strahlenqualitäten berücksichtigt. Die Organdosis wird in der Einheit Sievert - Kurzzeichen Sv - angegeben. Im Strahlenschutz ist 1 Sievert ein hoher Wert, daher erfolgt die Angabe der Strahlenexposition überwiegend in der Einheit Millisievert (mSv) $1 \text{ mSv} = 0,001 \text{ Sv}$. Die früher benutzte Einheit der Organdosis (damals Äquivalentdosis genannt) war "rem". $1 \text{ Sievert} = 100 \text{ rem}$.

Wegen der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeit einzelner Gewebe und Organe für die Induktion von Krebs, Leukämie und vererbba- ren Defekten wurde zur Erfassung des gesamten Strahlenrisikos insbesondere bei inhomogener Bestrahlung des Körpers als weitere Größe die **effektive Dosis** eingeführt. Für die verschiedenen Gewebe und Organe sind dazu Bewertungsfaktoren (Gewebe-Wichtungsfaktoren) festgelegt worden. Zur Ermittlung der effektiven Dosis werden die Organdosen der einzelnen Gewebe und Organe mit diesen Bewertungsfaktoren multipliziert und dann diese Produkte addiert. Die effektive Dosis wird wie die Organdosis in der Einheit Sievert angegeben.

1.3 Natürliche Strahlenexposition

In den Jahren 1972 bis 1974 wurden in der Bundesrepublik Deutschland und in den Jahren 1994 bis 1996 für das Gebiet der ostdeutschen Bundesländer Messungen der durch die natürlichen Radionuklide im Erdboden hervorgerufenen Ortsdosisleistung im Freien durchgeführt. Infolge des unterschiedlichen geologischen Untergrundes sind die Werte der terrestrischen Strahlung von Ort zu Ort sehr unterschiedlich.

Die Ergebnisse beider Messkampagnen sind in der Tab. 5 als Mittelwerte der effektiven Dosis durch die terrestrische Strahlung im Freien für die einzelnen Bundesländer zusammengefasst. Der Mittelwert der effektiven Dosis im Freien durch die terrestrische Strahlung beträgt für Deutschland rund $0,34 \text{ mSv/Jahr}$.

Bundesland	effektive Dosis mSv/Jahr	Bundesland	effektive Dosis mSv/Jahr
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. 5: Ländermittelwerte der effektiven Dosis durch terrestrische Strahlung im Freien

Das zum Hausbau verwendete Baumaterial hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die durch natürlich radioaktive Stoffe hervorgerufene externe Strahlendosis. 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 Strahlenexposition führen.

Die Tab. 6 gibt den zusätzlichen Betrag der Jahresdosis in Häusern für einige wichtige Baustoffe an.

Baustoff	zusätzliche effektive Dosis mSv/Jahr
Holz	0
Kalkstein, Beton	0,12
Ziegel, Klinker	0,15
Schlackenstein, Bims	0,25

Tab. 6: Einfluss der Baumaterialien auf die Exposition in Gebäuden

Als Mittelwert der Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland durch die terrestrische Strahlung im Freien und in Häusern ergibt sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufenthaltszeiten eine effektive Dosis von rund $0,4 \text{ Millisievert pro Jahr}$.

In einigen Gebieten der Erde sind infolge höherer Konzentrationen natürlich radioaktiver Stoffe die Strahlendosen wesentlich größer (siehe Tab. 7).

Gebiet	mittlere effektive Dosis der Bevölkerung mSv/Jahr	maximale Ortsdosis im Freien mSv/Jahr
Deutschland	0,4	5
Indien: Kerala, Madras	4	55
Brasilien: Espirito Santo	6	175
Iran: Ramsar	6	860

Tab. 7: Terrestrische Strahlung in verschiedenen Gebieten

Von besonderer Bedeutung ist hier ein etwa 250 km langer Streifen an der indischen Südküste 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 in diesen Bereichen ergaben einen Mittelwert der Personendosis von 4 Millisievert pro Jahr. Sechs Prozent der Einwohner erhalten eine Dosis von über 9 Millisievert pro Jahr und ein Prozent sogar mehr als 20 Millisievert pro Jahr.

An der brasilianischen Atlantikküste der Staaten Espirito Santo und Rio de Janeiro ist ebenfalls thoriumhaltiger Monazit Ursache für sehr hohe Strahlenexpositionen. Mittelwerte der Dosisleistung in den Orten Guarapari und Meaibe liegen bei 8 Millisievert pro Jahr.

In Guarapari, 12 000 Einwohner und einige zehntausend Urlauber in der Ferienzeit, wurden am Strand Dosisleistungen bis rund 800 Millisievert pro Jahr gemessen. Diese hohen Werte treten aber zum überwiegenden Teil in nicht oder nicht ständig bewohnten Gebieten auf. Messungen mit Personendosimetern ergaben für Einwohnern von Guarapari Werte der Personendosis zwischen 1 und 30 Millisievert pro Jahr mit einem Durchschnitt von 6 Millisievert pro Jahr.

Ebenfalls hohe Werte der durch die terrestrische Strahlung bedingten Dosis wurden im Nil- und im Gangesdelta mit 3,5 Millisievert pro Jahr gemessen. Bei Ramsar in der Islamischen Republik Iran am Kaspischen Meer wurden an einzelnen Stellen Werte bis zu 860 Millisievert pro Jahr als Folge von Radiumablagerungen aus Quellwässern ermittelt.

Aus seiner natürlichen, radioaktiven Umwelt nimmt der Mensch mit Luft, Wasser und Nahrung radioaktive Stoffe auf. Die daraus resultierende gesamte Aktivität im Menschen - bezogen auf eine Person von 75 kg Körpergewicht - beträgt rund 9 000 Becquerel (siehe Tab. 8).

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

Tab. 8: Aktivität natürlich radioaktiver Stoffe im Menschen

Wesentlich für den jeweiligen Beitrag eines Nuklides zur gesamten Strahlenexposition sind sein metabolisches Verhalten im menschlichen Organismus und seine Zerfallsart. Die Dosisbeiträge durch die Nuklide der Uran- und Thoriumzerfallsreihen werden überwiegend von Radon-222 und Radon-220 hervorgerufen.

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.

Einen großen Einfluss auf die Radonkonzentration hat neben dem Radiumgehalt des Bodens die Durchlässigkeit des Bodens. Bei lockerem Untergrund wie beispielsweise Sand oder bei Böden mit Spalten und Rissen wandert das Radongas besonders leicht an die Oberfläche, so dass höhere Radonkonzentrationen auftreten.

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 die mittlere effektive Dosis durch Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte zu 1,1 Millisievert pro Jahr berechnen.

Von den primordialen Radionukliden außerhalb von Zerfallsreihen führt nur Kalium-40 zu merklichen Strahlendosen. Neben einer äußeren Strahlenexposition führt Kalium-40 zu einer inneren Strahlendosis, da Kalium und mit ihm Kalium-40 als lebenswichtiges Element im Körper vorhanden ist. 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 0,18 Millisievert pro Jahr. Hinzu kommt die Dosis durch externe Bestrahlung von 0,17 Millisievert pro Jahr.

Die effektive Dosis aus allen natürlichen Strahlenquellen einschließlich des Dosisbeitrags durch die kosmische Strahlung ergibt sich zu etwa einem Drittel aus externer und zu 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 Dosis im Bereich von 1,5 bis 6 Millisievert pro Jahr liegen mit einem mittleren Wert von 2,4 Millisievert pro Jahr.

Exposition durch	jährliche effektive Dosis in mSv		
	von außen	von innen	gesamt
kosmische Strahlung Meereshöhe			
ionisierende Komponente	0,24		0,27
Neutronen	0,03		
kosmogene Radionuklide			
		0,02	0,02
primordiale Radionuklide			
K-40	0,18	0,17	0,35
Rb-87		0,006	
U-238-Reihe			
U-238 → Ra-226	0,12	0,02	1,3
Rn-222 → Po-214		1,1	
Pb-210 → Po-210		0,05	
Th-232-Reihe			
Th-232 → Ra-224	0,14	0,01	0,2
Rn-220 → Tl-208		0,07	
Summe	0,7	1,4	2,1

Tab. 9: Mittlere natürliche Strahlenexposition in Deutschland

2 Künstliche radioaktive Stoffe und zivilisatorische Strahlenexposition

2.1 Entdeckung der künstlichen Aktivität und der Kernspaltung

Der erste Nachweis einer nicht auf natürlicher Radioaktivität basierenden Kernumwandlung gelang 1919 Rutherford durch Beschuss von Stickstoff mit α -Strahlen und die Erzeugung des Reaktionsproduktes Sauerstoff. Nach der in der Kernphysik gebräuchlichen Schreibweise hatte er die Reaktion N-14 (α, p) O-17 beobachtet. Allerdings ist das dabei entstehende Produkt Sauerstoff-17 stabil.

Die Entdeckung der künstlichen Radioaktivität gelang 1934 Irène Curie und Frédéric Joliot. Sie stellten fest, dass beim Beschuss von Aluminium mit α -Strahlen Phosphor entstand, der sich unter Aussendung von Positronenstrahlung mit einer Halbwertszeit von 130 Sekunden in stabiles Silizium umwandelte. Als Reaktionsgleichung geschrieben:



In den folgenden Jahren wurden von vielen Forschergruppen - Fermi in Italien, Joliot/Curie in Frankreich, Hahn/Meitner/Straßmann in Deutschland - insbesondere durch Beschuss mit Neutronen vielfältige künstliche Nuklide hergestellt. Schwierigkeiten bereitete dabei die Interpretation der beim Beschuss von Uran mit Neutronen gefundenen radioaktiven Produkte. Diese konnten, der kernphysikalischen Kenntnis jener Zeit folgend, nur aus dem Uran durch Neutronenanlagerung und nachfolgende β -Zerfälle entstehende Transurane sein. An eine Kernspaltung und das Entstehen von Spaltprodukten mit mittleren Ordnungszahlen dachte niemand.

Oder fast niemand, Ida Noddack schrieb im September 1934 in ihrer Kritik an einer Veröffentlichung von E. Fermi, in der er die mögliche Erzeugung von Elementen mit Ordnungszahlen größer als 92 - also jenseits des Urans (Transurane) - beschreibt:

"Es wäre denkbar, dass bei der Beschießung schwerer Kerne mit Neutronen diese Kerne in mehrere größere Bruchstücke zerfallen, die zwar Isotope bekannter Elemente, aber nicht Nachbarn der bestrahlten Elemente sind."

Offensichtlich wurde aber dieser Hinweis nicht weiter beachtet, denn alle Versuche zur Strukturierung der vielfältigen, bei der Neutronenbestrahlung von Uran beobachteten neuen radioaktiven Stoffe führten zu den Transuranen. Man ging davon aus, dass Uran-238 ein Neutron einfängt und dabei das Uranisotop U-239 entsteht, das sich unter Emissi-

on eines Beta-Teilchens in ein Isotop des Elementes 93, ein Transuran, umwandelt.

In der am 22. Dezember 1938 fertiggestellten und am 6. Januar 1939 in der Zeitschrift "Die Naturwissenschaften" veröffentlichten Arbeit schreiben Hahn und Straßmann über ihre Versuche:

"Nun aber müssen wir auf einige neuere Untersuchungen zu sprechen kommen, die wir der seltsamen Ergebnisse wegen nur zögernd veröffentlichten ... Wir kommen zu dem Schluß: Unsere "Radiumisotope" haben die Eigenschaften des Bariums ... Als der Physik in gewisser Weise nahestehende "Kernchemiker" können wir uns zu diesem, allen bisherigen Erfahrungen der Kernphysik widersprechenden Sprung noch nicht entschließen".

Aber schon in ihrem Beitrag vom 28. Januar 1939 [9] schreiben Hahn und Straßmann:

"Die Entstehung von Bariumisotopen aus Uran wurde endgültig bewiesen".

Und von Lise Meitner und O. R. Fritsch wird aufgrund der ersten Hahn'schen Veröffentlichung bereits am 16. Januar 1939 auf der Basis des neueren Bohr'schen Tröpfchenmodells des Atomkerns die Möglichkeit der Kernspaltung von Uran festgestellt und auf die Tatsache der großen dabei freigesetzten Energie hingewiesen.

Kernspaltungsprozesse sind heute die Hauptquelle für künstliche Radionuklide. Allerdings werden viele für die Nuklearmedizin wichtige Radionuklide, wie z. B. Iod-123, Fluor-18 oder Rubidium-81 mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern hergestellt. Und bezüglich der Strahlenexposition ist zu berücksichtigen, dass der größte Beitrag zur zivilisatorischen Strahlenexposition des Menschen nicht von der Strahlung der künstlich erzeugten Radionuklide sondern aus der Anwendung der Röntgenstrahlung in der Medizin stammt.

2.2 Strahlenexposition durch Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin

Von allen Anwendungsgebieten ionisierender Strahlen bringt die Röntgendiagnostik den bei weitem größten Beitrag zur zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung. Die Organdosen in der Tab. 10 für verschiedene Untersuchungen sind nur als Orientierungswerte zu werten, da im individuellen Fall erhebliche Abweichungen auftreten können.

Im Mittel wurden in den Jahren 1996 - 2001 in Deutschland jährlich rund 1,8 Röntgenuntersuchen pro Einwohner durchgeführt.

Die Abb. 5 zeigt die prozentuale Häufigkeit der verschiedenen Röntgenuntersuchungen und die Abb. 6 ihren jeweiligen Beitrag zur kollektiven Dosis durch die Röntgendiagnostik in Deutschland für das Jahr 2001.

Untersuchungsart	effektive Dosis in mSv
Computertomographie	
Bauchraum	10 - 25
Brustkorb	6 - 10
Wirbelsäule	3 - 10
Kopf	2 - 4
Untersuchung mit Aufnahmen und Durchleuchtung	
Arteriographie	10 - 20
Darm	10 - 18
Magen	6 - 12
Hartrakt	3 - 7
Gallenblase	1 - 5
Untersuchung mit Aufnahme	
Lendenwirbelsäule	0,8 - 1,8
Beckenübersicht	0,5 - 1,0
Mammographie	0,4 - 0,6
Brustkorb	0,02 - 0,05
Halswirbelsäule	0,09 - 0,15
Zahn	≤ 0,01

Tab. 10: Effektive Dosis pro Röntgenuntersuchung

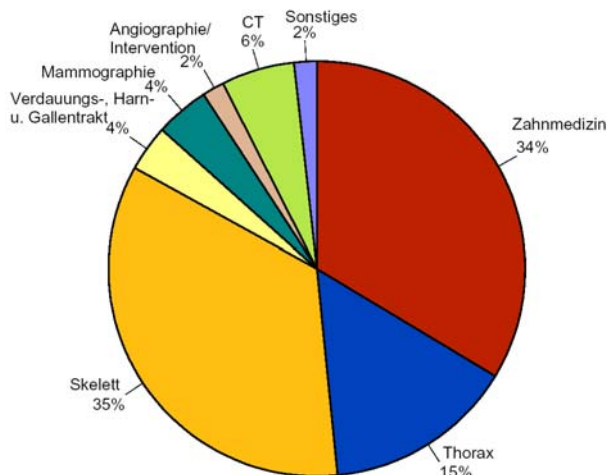


Abb. 5: Röntgendiagnostik; Häufigkeit der verschiedenen Untersuchungsarten, 2001

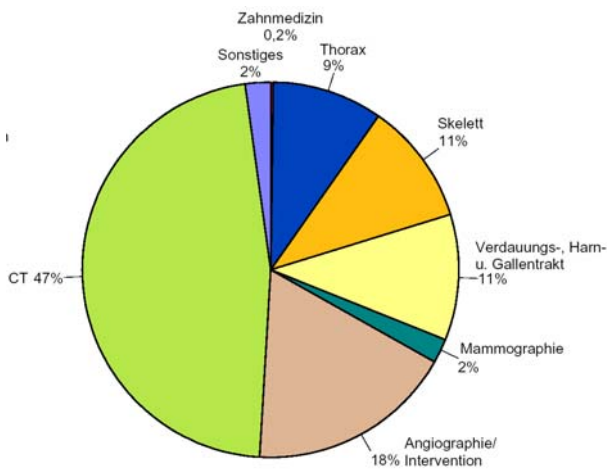


Abb. 6: Röntgendiagnostik, Beitrag zur Gesamtdosis durch die verschiedenen Untersuchungsarten, 2001

Die mittlere effektive Dosis pro Einwohner in Deutschland durch die Röntgendiagnostik beträgt etwa 2 mSv pro Jahr. Die durch die Röntgendiagnostik bewirkte Strahlenexposition ist in anderen Industrieländern zum Teil wesentlich geringer. Sie beträgt in Großbritannien 0,33, in den USA 0,5 und in der Schweiz 1 Millisievert pro Jahr.

Der Dosisbeitrag durch die Anwendung radioaktiver Stoffe zur Diagnose ist gegenüber dem durch die Röntgendiagnostik vergleichsweise gering. In der nuklearmedizinischen Diagnostik wurden in Deutschland in den Jahren 1996 bis 2000 im Mittel etwa 3,9 Millionen Radionuklidapplikationen jährlich durchgeführt. Das entspricht einer Anwendungshäufigkeit von 47 Untersuchungen pro 1000 Einwohner. Am häufigsten wurden bei den ambulanten Patienten Szintigraphien der Schilddrüse und des Skeletts durchgeführt. Im Mittel ergab sich

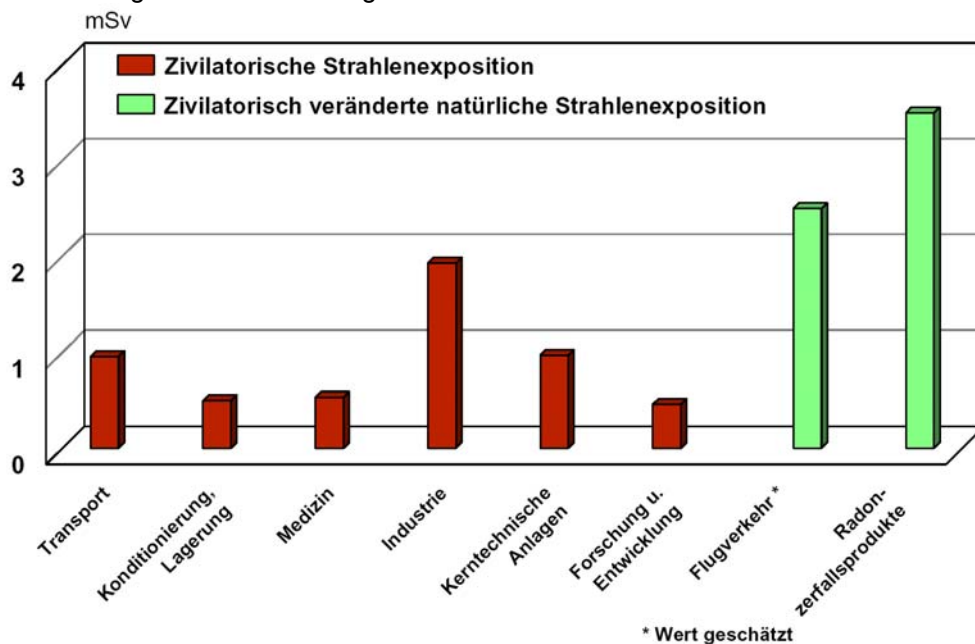


Abb. 7: Mittlere Jahrespersonendosis beruflich strahlenexponierter Personen in Deutschland im Jahr 2003 für verschiedene Bereiche

eine jährliche kollektive effektive Dosis von 11 300 Personen-Sievert. Rechnerisch ergibt sich damit eine mittlere effektive Dosis pro Einwohner von 0,14 mSv pro Jahr.

Effektive Äquivalentdosen durch die Strahlentherapie sind nicht berechenbar, da das Effektivdosis-konzept auf therapeutische Bestrahlungen nicht anwendbar ist.

2.3 Berufliche Strahlenexposition

Im Jahr 2003 wurden in Deutschland 314 316 Personen während ihrer beruflichen Tätigkeit mit Personendosimetern überwacht. Davon waren rund 77 % im medizinischen Arbeitsbereich tätig. Die Summe der Jahresdosis aller Überwachten im Jahr 2003 betrug 44,4 Personen-Sievert. Die mittlere Jahres-Personendosis aller Überwachten betrug 0,14 mSv. Bei 85 % der überwachten Personen lagen die ermittelten Werte unter der kleinsten feststellbaren Dosis von 0,05 mSv im Jahr.

Bildet man einen Mittelwert nur für die Überwachten mit einer von Null verschiedenen Jahresdosis, so ergibt sich für diese rund 48 800 Personen eine mittlere Jahres-Personendosis von 0,92 mSv.

Eine Aufschlüsselung der Expositionsdaten für das Jahr 2002 für unterschiedliche Bereiche der beruflich exponierten Personen (Abb. 7) zeigt, dass sich die im Durchschnitt höchste mittlere beruflich bedingte Strahlenexposition im Flugverkehr auftritt. Hier erhält das fliegende Personal durch die kosmische Strahlung im Mittel eine Jahresdosis von knapp 2,5 mSv. Die Beschäftigtengruppen in kerntechnischen Anlagen erhalten demgegenüber nur eine mittlere Jahresdosis von weniger als 1 mSv.

2.4 Strahlenexposition bei Flügen und Raumflügen

Eine erhöhte Strahlenexposition durch die kosmische Strahlung tritt bei Flügen in größeren Höhen auf. Im kommerziellen Personenluftverkehr werden zur Zeit 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.

Strecke	Dauer h:min	Dosis µSv
Frankfurt - London	1:40	4
Frankfurt - Palma de Mallorca	2:05	6
München - Las Palmas	4:40	12
München - New York	8:55	50
Frankfurt - Vancouver	9:50	65
Frankfurt - Johannesburg	10:10	25
Frankfurt - San Francisco	11:10	75
Frankfurt - Sao Paulo	11:50	30

Tab. 11: Strahlenexposition auf verschiedenen Flugstrecken (einfacher Flug)

Die effektive Dosis der Besatzung von Düsenflugzeugen 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 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 umgeben und als Van-Allen-Gürtel bezeichnet werden, ausgesetzt.

Flug	Flugdauer, Stunden	Dosis, mSv
Erdumkreisung	260	3,6
Erdumkreisung	4 200	55
Mondumkreisung	147	5,7
Mondlandung	195	6
Mondlandung	209	15

Tab. 12: Strahlendosis bei Raumflügen

So ist ein großer Anteil der gesamten Strahlendosis bei den in Tab. 12 aufgelisteten Mondflügen auf den Dosisbeitrag aus diesen Strahlungsgürteln, die

die Erde äquatorial in etwa 8 000 und 50 000 km Entfernung umgeben, zurückzuführen. 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.

2.5 Ionisierende Strahlung von Röhren-Bildschirmen und Leuchtzifferblättern

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 Monitoren sowie an Fernsehgeräten Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tab. 13 zusammen mit Messwerten über die Strahlenexposition durch Zeitschriften infolge der natürlich radioaktiven Stoffe im Papier zusammengefasst.

Da die Dosisleistungswerte sehr klein sind, sind sie in der Einheit Pikosievert angegeben ($1 \text{ pSv} = 0,000\,000\,001 \text{ mSv}$). Zum Vergleich wurde die mittlere Dosisleistung durch die natürliche kosmische und terrestrische Strahlung angegeben, die rund 100 000 Pikosievert pro Stunde, das sind 0,000 1 Millisievert pro Stunde, beträgt.

Natürliche Umgebungsstrahlung (im Mittel)	100 000 pSv/h
Bildschirmgerät (Arbeitsabstand 0,5 m)	
- betriebsbedingte Röntgenstrahlung	6 pSv/h
- Gammastrahlung natürlich radioaktiver Stoffe in Bildröhre und Leuchtstoffen	1 200 pSv/h
Farbfernseher (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- u. Th-Folgeprodukten	30 pSv/h
Mensch (Abstand 0,5 m)	
- Gammastrahlung von K-40	50 pSv/h

pSv = Pikosievert,
1Pikosievert = 0,000 000 001 Millisievert

Tab. 13: Strahlenexposition durch Bildschirm- und Farbfernsehgeräte

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 sehr durchdringender Strahlung emittiert wird. Diese Strahlung trägt zur Lichtemission wenig, zur Strahlendosis aber viel bei. Nachdem durch die kerntechnische Entwicklung geeignetere Radionuklide zur Verfügung standen, wurde Radium in

Leuchtfarben überwiegend durch Tritium ersetzt. Aufgrund der sehr geringen Beta-Energie des Tritiums von maximal 18 keV ist 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.

2.6 Strahlenexposition durch Kernwaffentests

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 514 Kernwaffen mit einer Sprengkraft von 440 Megatonnen TNT-Äquivalent oberirdisch, d. h. mit einer Freisetzung der radioaktiven Stoffe in die Atmosphäre, gezündet (Abb. 8). Die nach Zahl und Sprengkraft größten Versuchsserien wurden in den Jahren 1961/62 durch die USA und die Sowjetunion durchgeführt. Die Zahl der bisherigen unterirdischen Explosionen beträgt 1538 (andere Quellen nennen 1876 Explosionen) mit einer Sprengkraft von 90 Mt. Diese Explosionen sind mit keiner relevanten Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre verbunden.

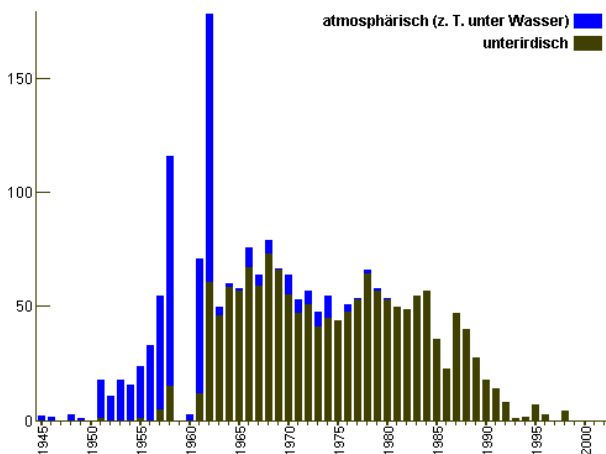


Abb. 8: Kernwaffenexplosionen, nach Jahr

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.

Die Abb. 9 zeigt die Ergebnisse von Messungen des Cs-137-Gehalts im Körper, die an einer Referenzpersonengruppe im Ganzkörperzähler des Forschungszentrums Karlsruhe ermittelt werden. Für Personen in Mitteleuropa ergibt sich für den Zeitraum von 1960 bis 2050 im Mittel eine effektive Dosis von rund 2 Millisievert; rund 80 % dieser Dosis sind in den Jahren von 1960 bis 1970 angefallen. Die heutige jährliche Strahlendosis durch die Kernwaffentests beträgt in Deutschland etwa 5 Mikrosievert.

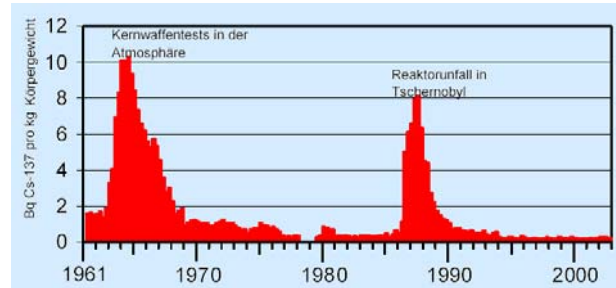


Abb. 9: Cs-137-Körperaktivität der Karlsruher Referenzgruppe

2.7 Freisetzung von Radionukliden beim Betrieb von Kernkraftwerken und resultierende Strahlenexposition

Eine der Hauptaufgaben der Reaktorsicherheitstechnik bei Planung, Konstruktion, Bau und Betrieb von Kernreaktoren ist die Gewährleistung des sicheren Einschusses der großen Mengen der beim Reaktorbetrieb durch die Kernspaltung entstehenden radioaktiven Stoffe. Das sind zum einen die als Folge der Spaltung entstehenden radioaktiven Spaltprodukte und zum anderen die durch Neutronenstrahlung entstehenden Aktivierungsprodukte, beispielsweise im Strukturmaterial des Reaktors oder der Korrosionsprodukte im primären Reaktorkühlmittel.

Gestaffelte Barrieren, die jeweils die Radionuklide enthaltenden Systeme dicht einschließen, reduzieren die Freisetzungen auf ein Vierhundertmillionstel des Inventars. So betragen die Freisetzungen an Iod-131 mit der Abluft aus dem Kernkraftwerk Brunsbüttel im Jahr 2002 nur 2 MBq - eine Menge, die in der Nuklearmedizin gerade ausreichend für einen Schilddrüsenfunktionstest wäre.

Wichtiger für die strahlenschutzmäßige Beurteilung als diese Abgabewerte sind die aus diesen Daten berechenbaren höchsten Strahlendosen für die in unmittelbarer Umgebung wohnenden Personen. Dabei sind die vielfältigen Übertragungswege für mit Luft oder Wasser freigesetzte Radionuklide zu beachten.

So werden wir beispielsweise von den mit der Abluft abgegebenen radioaktiven Stoffen nicht nur

von außen bestrahlt oder erhalten eine Strahlendosis durch das Einatmen dieser Stoffe. Vielmehr ist durch Ablagerung der Radionuklide auf dem Boden und Übergang in die Pflanzen oder Tiere eine Strahlenexposition durch Anreicherungseffekte möglich.

Die unter Berücksichtigung solcher Übertragungswege errechenbaren maximalen Strahlendosiswerte einzelner Personen der Bevölkerung an der ungünstigsten Stelle in der Umgebung von Kernkraftwerken in Deutschland vermitteln Abb. 10 und Abb. 11 (nach [3]).

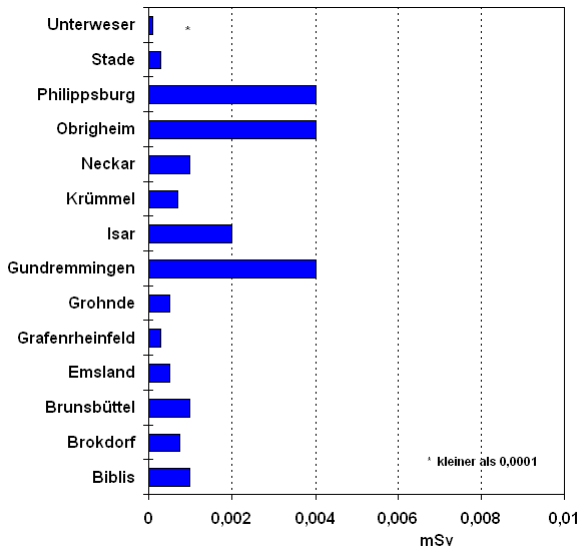


Abb. 10: Strahlendosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle in der Umgebung eines Kernkraftwerks durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft, 2003

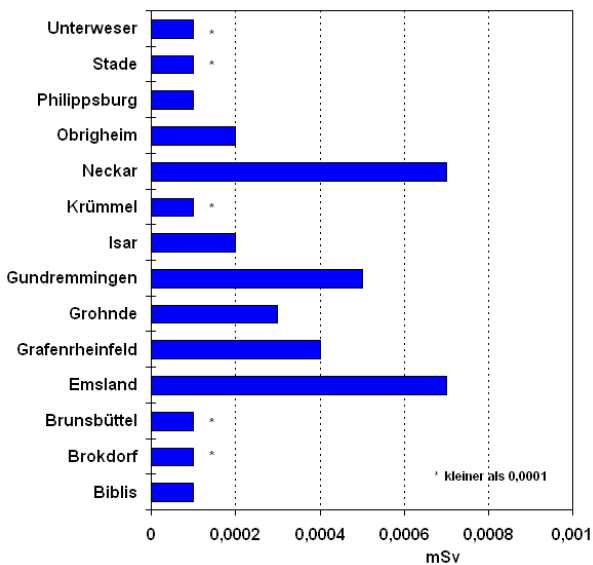


Abb. 11: Strahlendosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle in der Umgebung eines Kernkraftwerks durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abwasser, 2003

2.8 Strahlenexposition durch Unfälle in kerntechnischen Anlagen und mit radioaktiven Quellen

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.

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. Die Strahlenexposition in Deutschland betrug für Kleinkinder, für die sich gegenüber Erwachsenen generell höhere Dosiswerte errechnen, für das Jahr des Unfalls zwischen 0,2 mSv in Gebieten nördlich der Donau und 1,2 mSv für Bereiche des Voralpengebiets. Berechnet man die entsprechenden Werte der effektiven Dosis für die nächsten 50 Jahre, so ergibt sich ein Gesamtbetrag von 0,6 mSv bzw. 3,8 mSv. Für Einzelpersonen mit extremen Lebens- und Verzehrsgewohnheiten 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 Schilddrüsenkrebserkrankungen, die offensichtlich auf eine Strahlenexposition zurückzuführen waren. Verantwortlich dafür ist vor allem die Aufnahme von radioaktivem Iod-131 über die Nahrungskette, das zu höheren Strahlendosen in der Schilddrüse führte. Einen Überblick über die durchschnittliche Gesamtdosis in diesen Gebieten im Zeitraum von 1986 bis 1995 gibt Tab. 14.

Region	Bevölkerung	durchschnittliche effektive Dosis 1986 - 1995	
		externe Exposition	interne Exposition
Weißrussland	1.880.000	5,1 mSv	2,9 mSv
Russland	1.980.000	4,3 mSv	2,5 mSv
Ukraine	1.300.000	4,7 mSv	6,1 mSv

Tab. 14: Strahlenexposition im Zeitraum 1986 bis 1995 in den durch den Tschernobyl-Unfall besonders kontaminierten Gebieten

In der militärischen Plutonium-Produktionsanlage Kyshtym (Südrussland) überhitzte sich nach Kühlungsausfall ein Lagertank mit 70 bis 80 t hochaktivem Flüssigabfall und explodierte. Durch die radioaktive Wolke wurden etwa 270 000 Personen betroffen. Rund 10 000 Personen wurden evakuiert. Die mittlere effektive Individualdosis der - evakuierten - Bevölkerung aus den höchstbelasteten Gebieten wurde auf rund 500 Millisievert abgeschätzt.

Im Plutonium-Produktionsreaktor Windscale (England) kam es im Oktober 1957 zu einer partiellen Kernschmelze. Insbesondere das freigesetzte Radioiod führte zur Strahlenexposition der Bevölkerung. I-131 führte trotz des sofortigen Verzehrverbotes für Milch lokal zu Schilddrüsendosen bis zu 10 Millisievert für Erwachsene und bis zu 100 Millisievert für Kleinkinder.

Drei Unfälle mit Bestrahlungsquellen führten lokal und regional zu hohen Individualdosen und Kontaminationen von über tausend Personen.

1983 wurde in Ciudad Juarez (Mexiko) eine medizinische Bestrahlungsanlage mit Co-60 an einen Schrotthändler verkauft. Einzelne Personen erhielten eine Dosis bis zu 3 Sievert; 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 starben an einer Überexposition mit Dosen von 8 bis 25 Sievert.

In Goiania (Brasilien) wurde 1987 eine medizinische Bestrahlungsanlage mit 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.

2.9 Strahlenexposition durch fossile Energieträger

Steinkohle und Braunkohle, Erdöl und auch Erdgas 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.

In der Tab. 15 sind die Dosiswerte durch die Nutzung fossiler Energieträger zur Stromerzeugung mit den Werten für Kernkraftwerke zum Vergleich zusammengefasst. Da die Leistungseinheiten der verschiedenen Kraftwerktypen sehr unterschiedlich sind, sind die Zahlen auf eine gleiche Menge erzeugter elektrischer Energie von 10 Milliarden kWh

normiert. Das entspricht etwa der üblichen Jahresstromproduktion eines großen Kernkraftwerks.

Energieträger	typische Individualdosis in der Umgebung des Kraftwerks $\mu\text{Sv pro } 10^9 \text{ kWh}$
Kohle	1 bis 40
Erdöl	1
Erdgas	1 bis 2
Kernenergie	1 bis 10

Tab. 15: Individualdosen durch den Einsatz verschiedener Energieträger zur Stromerzeugung in Kraftwerken

2.10 Zivilisatorische Strahlenexposition der Bevölkerung

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 nuklearen Unfällen, Kernwaffentests, Flugreisen, beruflicher Strahlenexposition, Kernkraftwerken, fossilen Energieträgern und Industrieprodukten.

Für Deutschland ergeben durch die zivilisatorische Strahlenexposition pro Einwohner folgende Werte der mittleren effektiven Dosis:

• Medizin	2,0	mSv pro Jahr,
• Tschernobyl	0,010	mSv pro Jahr,
• Kernwaffentests	0,005	mSv pro Jahr,
• Flugreisen	0,005	mSv pro Jahr,
• fossile Energieträger	0,002	mSv pro Jahr,
• Kernkraftwerke	0,001	mSv pro Jahr,
• Industrieprodukte	0,001	mSv pro Jahr.

Weltweit ergeben sich für die Bevölkerung aus Flugreisen, den nuklearen und nicht-nuklearen industriellen Tätigkeiten und der Medizin die in Tab. 16 zusammengestellten Strahlenexpositionen. Angegeben ist die Gesamtdosis bezogen auf ein Jahr der Nutzung im heutigen Umfang. Auch wenn die Daten für die Dosisbeiträge durch Kohlenutzung im häuslichen Bereich und den Einsatz von Phosphatgips im Hausbau nicht exakt abgesichert sind, so beträgt dennoch die zivilisationsbedingte Gesamtdosis aus allen technischen Bereichen einschließlich der Kerntechnik nur rund 2 % der jährlichen natürlichen Strahlenexposition.

Tätigkeit	effektive Folgedosis pro Jahr der Tätigkeit, Personen-Sv
Flugreisen	10 000
Stromerzeugung Kernenergie Kohle	3 000 8.000
Kohle im häuslichen Bereich, industrielle Aschenutzung	50 000 bis 90 000
Phosphatdünger, Phosphatgips	70 000 bis 300000
Medizin	1 600 000
Summe	1 800 000
zum Vergleich: Natur	13 200 000

Tab. 16: Strahlenexposition der Weltbevölkerung (Daten nach UNSCEAR)

2.11 Gesamte Strahlenexposition des Menschen

Die effektive Dosis aus allen natürlichen und künstlichen Strahlenquellen beträgt für einen Einwohner in Deutschland im Mittel rund 4,1 Millisievert im Jahr (Tab. 17, Abb. 12). Diese Dosis stammt etwa jeweils zur Hälfte aus der natürlichen Strahlenexposition und aus der medizinischen Exposition, insbesondere durch die Röntgendiagnostik. Gegenüber den Beiträgen zur Strahlendosis durch Natur und Medizin und insbesondere unter Berücksichtigung der nicht unerheblichen Streuung dieser Dosiswerte sind alle anderen Dosisbeiträge faktisch zu vernachlässigen.

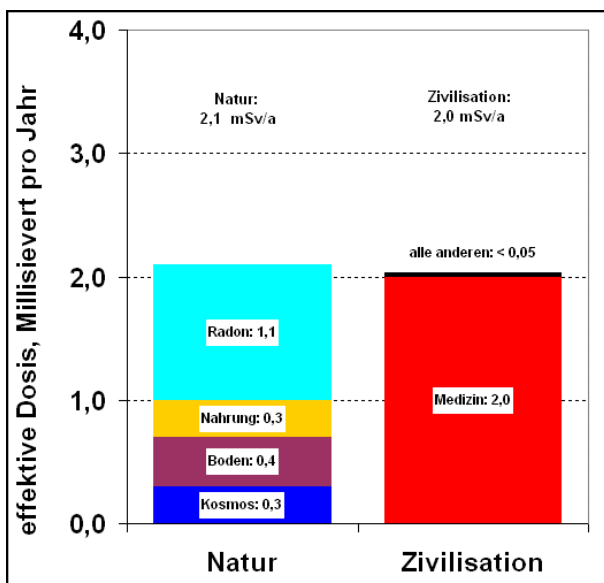


Abb. 12: Mittlere natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition in Deutschland

Ursache der Strahlendosis	effektive Dosis in mSv/a	
	Mittelwert für die Bevölkerung	Wertebereich für Einzelpersonen
Natur		
kosmische Strahlung	0,3	0,3 bis 0,5
terrestr. Strahlung	0,4	0,2 bis 3
innere Bestrahlung	1,4	0,5 bis 8
Natur gesamt	2,1	1 bis 10
Zivilisation		
Medizin	2,0	0,01 bis 30
Erhöhung der natürlichen Dosis durch industrielle Tätigkeit	0,01	0,1 bis 2
Tschernobyl-Unfall	0,01	0,005 bis 0,04
Kernwaffentests	0,005	0,002 bis 0,01
Flugreisen	0,005	0,01 bis 5
Beruf	0,002	0,5 bis 5
fossile Energieträger	0,002	0,001 bis 0,01
Kernkraftwerke	0,001	0,001 bis 0,01
Industrieprodukte	0,001	0,1 bis 2
Zivilisation gesamt	2,0	0,1 bis 30
gesamt	4,1	1 bis 30

Tab. 17: Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland

3 Biologische Wirkungen ionisierender Strahlen

3.1 Frühe Berichte über Strahlenschäden

Bereits kurz nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen im November 1895 und der natürlichen Radioaktivität im März 1896 wurden erste Berichte über schädliche Wirkungen dieser Strahlen auf das menschliche Gewebe, insbesondere Wirkungen auf die Haut, veröffentlicht („Es dürfte noch nicht allgemein bekannt sein, dass die so viel besprochenen X-Strahlen die Eigenschaft besitzen, ähnlich den Sonnenstrahlen, die Haut zu verbrennen.“ Deutsche Medicinische Wochenschrift, 9. Juli 1896). 1902 wurde der erste tödliche Strahlenerkrankungsfall bei einem Röntgenologen aus England beschrieben und 1927 veröffentlichte Hermann J. Muller seine Befunde über genetische Veränderungen durch Röntgenstrahlung, die er bei Experimenten an der Fruchtfliege gewonnen hatte.

3.2 Biologische Wirkungen ionisierender Strahlung Arten von Strahlenschäden

Die biologische Wirkung der ionisierenden Strahlung beruht auf ihrer Eigenschaft, Atome oder Moleküle anzuregen oder zu ionisieren. Ein Teil dieser physikalischen Primäreffekte kann zu Konsequen-

zen im biologischen Bereich führen, d. h. organisches Gewebe verändern oder schädigen, aber eben nur ein Teil, denn erstens ist eine Zelle in den allermeisten Fällen in der Lage, die aus einem physikalischen Primäreffekt folgenden chemischen Sekundäreffekte (z. B. die Bildung freier Radikale wie OH[•]) vollständig zu reparieren und zweitens kann im Falle des Versagens der Reparatur die geschädigte Zelle durch intra- und interzelluläre Effekte eliminiert werden. Reparatur oder Eliminierung beseitigen die Schäden.

Das Eliminieren (Absterben) einzelner Zellen ist biologisch bedeutungslos, weil der Körper ohnehin die meisten seiner Zellen regelmäßig austauscht. Wenn jedoch eine hohe Zahl von Zellen in einem Organ oder Gewebe abgetötet wird, wird die Funktionsfähigkeit des Organs oder Gewebes beeinträchtigt. Schäden dieser Art werden „deterministische“ Strahlenschäden, Strahlenfrühschäden oder akute Schäden genannt.

Bleibt eine nicht oder nicht erfolgreich reparierte Zelle lebensfähig, kann das - muss aber nicht - zu so genannten „stochastischen“ Strahlenschäden führen. Hierzu gehören die somatischen Schäden (Schäden an Körperzellen, die sich im betroffenen Individuum auswirken) Leukämie und Krebs und die genetischen Veränderungen (Schäden im Erbgut der Keimzellen, die sich erst in der Nachkommenschaft auswirken).

Zusammengefasst:

- Deterministische Strahlenwirkung: Die *Schwere* des Strahlenschadens variiert mit der Strahlendosis. Es besteht ein Dosis-schwellwert, unterhalb dessen der Schaden nicht auftritt.
- Stochastische Strahlenwirkung: Die *Wahrscheinlichkeit* für das Auftreten eines bestimmten Strahlenschadens ist dosisabhängig und damit für das Individuum zufallsbedingt (stochastisch). Bei einer gegebenen Strahlendosis in einem Organ oder Gewebe kann nur eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit, dass Schäden auftreten, gemacht werden. Die Zeitdauer bis zum Auftreten eines Schadens nach Bestrahlung reicht von Jahren bis Jahrzehnten.

Die Abb. 13 (nach [4]) gibt einen Überblick über die Reaktionskette nach Strahleneinwirkung und die Arten der Strahlenschäden.

3.2.1 Deterministische Strahlenschäden

Deterministische Strahlenwirkungen sind beispielsweise Trübung der Augenlinse, gutartige Veränderungen der Haut, Bindegewebeveränderungen oder auch Schädigung der Keimzellen, die zu einer Reduktion der Fruchtbarkeit führen kann.

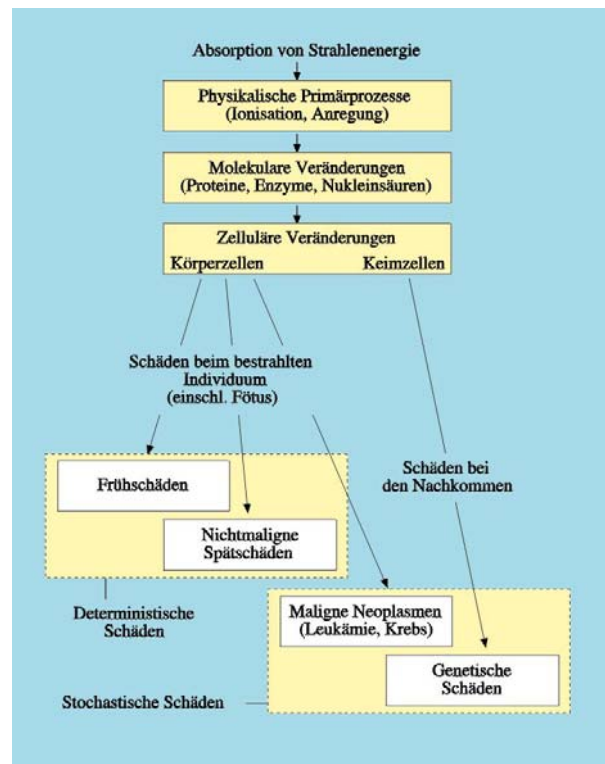


Abb. 13: Reaktionskette der Strahlenwirkung und Arten von Strahlenschäden

Der Dosis-schwellwert für diese Schädigung liegt mit einigen Gray sehr hoch. Zu den nichtstochastischen Strahlenwirkungen gehören auch die akuten Strahlenschäden, auch Frühschäden genannt, die nach kurzzeitiger Strahlenexposition bereits nach Stunden oder wenigen Tagen auftreten. Die Tab. 18 zeigt die Wirkung hoher Strahlendosen auf den Menschen bei einer kurzzeitigen Ganzkörperbestrahlung. (Die Strahlendosis wird hierbei als Energiedosis in der Einheit Gray (Gy) angegeben; die Organdosis mit der Einheit Sievert (Sv) wird für Strahlenschutz-zwecke nur zur Bewertung stochastischer Strahlenwirkungen benutzt.)

3.2.2 Somatische Strahlenschäden

Typische somatische Strahlenschäden sind Leukämie und Krebs. Bei hoher Dosis und Dosisleistung lässt sich ein kausaler Zusammenhang zwischen Strahlendosis und Krebs- oder Leukämierate nachweisen. Bei niedriger Dosis und Dosisleistung ist die mögliche Erhöhung des Leukämie- und Krebsrisikos so gering, dass sie wegen der hohen spontanen Krebsrate - in Deutschland sterben etwa 25 % aller Menschen an Krebs - zahlenmäßig nicht mehr erfassbar ist. Zur konservativen Abschätzung - nicht zur Berechnung! - der Wirksamkeit kleiner Strahlendosen bei niedriger Dosisleistung bedient man sich deshalb des Verfahrens der Extrapolation, wobei man von den im hohen Dosisbereichen gefundenen Wirkungen auf den Bereich niedriger Dosen umrechnet. Die Höhe des auf diese Weise quantifizierbaren Risikos ist stark von der Wahl des mathematischen Modells ab-

hängig. Die vorliegenden Ergebnisse erlauben es nicht, abschließend ein Modell als das richtige zu bezeichnen. Die im Strahlenschutz heute übliche Risikoabschätzung nach einem linearen Modell ohne Schwellenwert ist der Versuch, eine Obergrenze des strahlenbedingten Risikos zu definieren und stellt keinesfalls einen Beweis des Schlagwortes "Keine Dosis ohne Risiko" dar.

Dosis	Wahrscheinliche Wirkungen
bis 0,25 Gy	Keine Beschwerden, nur mit Labormethoden feststellbare Veränderungen.
bis 1 Gy	Bei etwa 5 - 10 % der Betroffenen folgende Krankheitserscheinungen: <ul style="list-style-type: none"> • Übelkeit oder leichtes Erbrechen, • in der Regel keine klinischen Krankheitsbefunde, • keine akuten Todesfälle.
um 2 Gy	Etwa die Hälfte der Betroffenen erkranken mit folgenden Krankheitserscheinungen: <ul style="list-style-type: none"> • Etwa vier Stunden nach Strahlenexposition Übelkeit oder Erbrechen, danach trügerisches Wohlbefinden für etwa zwei Wochen, • anschließend Fieber, Haut- und Schleimhautblutungen, Entzündungen im Mund-Rachen-Bereich, • Erholungszeit von einigen Wochen, • 5 - 10 % Todesfälle.
um 4 Gy	Fast alle Betroffenen erkranken mit folgenden Krankheitserscheinungen: <ul style="list-style-type: none"> • Nach weniger als vier Stunden schweres Erbrechen, Mattigkeit, danach trügerisches Wohlbefinden für etwa ein bis zwei Wochen, • anschließend Fieber, Haut- und Schleimhautblutungen, Entzündungen im Mund-Rachen-Bereich, Haarausfall, Blutarmut, • Erholungszeit von mindestens sechs Monaten, • etwa 50 % Todesfälle innerhalb eines Monats.
ab 6 Gy	Alle Betroffenen erkranken mit folgenden Krankheitserscheinungen: <ul style="list-style-type: none"> • Nach weniger als zwei Stunden schwerstes Erbrechen, starke Mattigkeit, danach kurze Besserung des Befindens, • anschließend schwere Krankheitserscheinungen wie oben, dazu: Durchfälle, Gewichtsverluste, Hinfälligkeit, • bis 100 % Todesfälle.

Tab. 18: Wirkung hoher Strahlendosen auf den Menschen bei kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung (medizinische Gegenmaßnahmen nicht berücksichtigt)

3.2.3 Genetische Effekte

Genetische Effekte sind erst in den folgenden Generationen feststellbar. Dominante Mutationen treten bereits in der ersten Generation nach Bestrahlung auf, rezessive Mutationen oft erst viele Generationen später. Infolge der hohen spontanen Mutationsrate stößt die Abschätzung des genetischen Risikos einer Bestrahlung grundsätzlich auf ähnliche Schwierigkeiten wie die Abschätzung des somatischen Risikos. Erschwerend kommt noch hinzu, dass strahlenbedingte Erbschäden auf jeden Fall so selten sind, dass sie bei Menschen noch in keinem Fall beobachtet wurden. Die auffallende Diskrepanz zu Krebserkrankungen ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Reparatur- und Eliminierungsprozesse bei Keimzellen besonders effektiv arbeiten, vielleicht auch deshalb, weil der Natur die Arterhaltung immer wichtiger war als die Erhaltung des Individuums.

3.3 Bewertung des Strahlenrisikos

Wissenschaftliche Erkenntnisse über die Wirkungen ionisierender Strahlen und die Beziehungen zwischen der Dosis und dem Auftreten von Schäden (Dosis-Wirkungs-Beziehungen) für den Menschen liegen aus einer Reihe von Untersuchungen vor.

Eine wichtige Datenquelle ist die langzeitige Untersuchung der Krebshäufigkeit an den Überlebenden der Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki, die nach der Explosion einer kurzzeitigen und recht hohen Ganzkörperbestrahlung von 0,1 bis mehr als 4 Gy ausgesetzt waren.

Diese strahlenexponierte Gruppe ist für eine Ermittlung des Strahlenrisikos deshalb besonders relevant, weil sie viele Personen (ca. 100 000), beide Geschlechts- und alle Altersgruppen, ein breites Dosispektrum, die relevanten Strahlenarten (Gammastrahlen, Neutronen) und eine intensive epidemiologische Untersuchung der Bevölkerung über lange Zeit umfasst.

Das strahlenbiologische Wissen, insbesondere zu den stochastischen Strahlenwirkungen, ist z. B. zusammengefasst in

- den Berichten des Wissenschaftlichen Komitees der Vereinten Nationen über die Wirkungen atomarer Strahlung von 1986 [5], 1988 [6], 1993 [7] und 2000 [8],
- dem Bericht des Komitees des National Research Council der USA über die Wirkungen ionisierender Strahlen von 1990 [9],
- den Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission [10].

Die Internationale Strahlenschutzkommission hat ihrer Strahlenschutzempfehlung von 1990 insbesondere die neuesten Krebssterblichkeitsdaten der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki zugrundegelegt und bewertet.

Insbesondere aber hat die Internationale Strahlenschutzkommission - anders als in den vorhergehenden Bewertungen - weitgehend das relative Extrapolationsmodell für die zeitliche Entwicklung der Erkrankungsrate zugrundegelegt.

Der Einfluss einer Strahlenexposition auf die Erkrankungsrate in den betroffenen Bevölkerungsgruppen kann durch epidemiologische Untersuchungen immer nur bis zur Gegenwart festgestellt werden. Wenn - wie im Fall der Hiroshima/Nagasaki-Bevölkerung - fast die Hälfte der exponierten Personen noch leben, müssen zeitliche Extrapolationshypothesen aufgestellt werden, um das strahlenbedingte Risiko bis zum Lebensende abschätzen zu können.

Die verdeutlicht schematisch den Unterschied beider Modelle. Die Tumorzinzidenz steigt im absoluten Modell zunächst stärker an als im relativen Modell. Jedoch führt im relativen Modell die Multiplikation der altersbedingt steigenden Spontanrate mit einem Proportionalitätsfaktor im Alter zu höheren Inzidenzen. Bei beiden Modellen sind die Tumormraten alters-, geschlechts- und populationspezifisch.

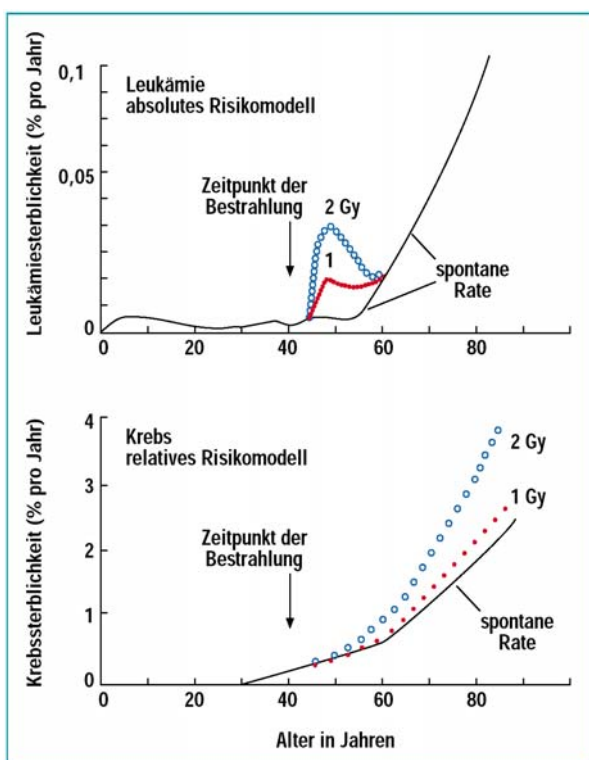


Abb. 14: Schematische Darstellung des absoluten und relativen Zeitextrapolationsmodells für die zusätzliche Krebssterblichkeitsrate

3.4 Strahlenepidemiologische Untersuchungen der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki

Durch den Atombombenabwurf am 6. August 1945 auf Hiroshima starben von den geschätzten 310 000 Einwohnern der Stadt etwa 90 000 bis 140 000 Menschen durch die unmittelbaren Explosionswirkungen wie Druckwelle, Hitze, Strahlung und einstürzende Bauwerke.

Genauere Angaben sind nicht möglich, da keine nachprüfaren Angaben über militärisches Personal und Zwangsarbeiter vorliegen. Durch die Atombombe vom 9. August 1945 auf Nagasaki starben von den rund 250 000 Einwohnern 60 000 bis 80 000 Personen an den unmittelbaren Wirkungen innerhalb der ersten beiden Monate.

Die seit 1950 von der Radiation Effects Research Foundation - einer gemeinsam von Japan und den USA getragenen wissenschaftlichen Einrichtung mit Sitz in Hiroshima und Nagasaki - durchgeführten Untersuchungen über die Sterblichkeit an den Atombombenüberlebenden beziehen sich auf die so genannte Life Span Study Untersuchungsgruppe (LSS) mit insgesamt 120 321 Personen, von denen sich 93 741 Personen zum Zeitpunkt der Explosionen in Hiroshima und Nagasaki aufhielten. Davon konnte für 86 572 Überlebende aufgrund detaillierter Angaben über den Aufenthaltsort eine Berechnung der Strahlendosis durchgeführt werden. Die LSS-Gruppe umfasst mit 50 113 Personen fast alle Überlebenden aus dem 2,5-km-Radius um das Hypozentrum der Explosion und weitere 36 459 Personen als Vergleichsgruppe mit ähnlicher Größe und vergleichbarer Altersstruktur diejenigen Personen, die sich im Bereich von 2,5 bis 10 km vom Hypozentrum aufhielten und eine vernachlässigbare Strahlendosis (weniger als 5 mSv) erhielten

Von den 86 572 Überlebenden, für die eine Dosisberechnung erfolgte, erhielten 53 380 (61 %) eine Dosis von weniger als 20 Millisievert, 15 928 eine solche zwischen 20 und 100 Millisievert, 11 775 Personen erhielten 100 bis 500 Millisievert und 4 827 Personen erhielten mehr als 500 Millisievert.

Von diesen 86 572 Personen, die die zentrale Untersuchungsgruppe für die Ermittlung der Strahlenauswirkungen darstellen, sind von 1950 bis Ende 1990 insgesamt 37 764 Personen verstorben, davon 7 578 an Krebs und 249 an Leukämie. Die erwarteten Zahlen betragen 7 244 Krebs- und 162 Leukämieerbfälle. Damit lassen sich in dieser Untersuchungsgruppe 334 Krebs- und 87 Leukämieerbfälle - insgesamt also 421 - auf die Strahlenspätwirkungen der Bombenabwürfe zurückführen (Abb. 15).

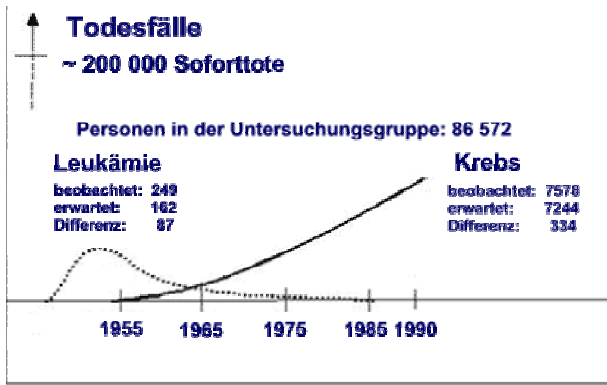


Abb. 15: Beobachtete und erwartete Leukämie- und Krebssterbefälle in der in der Life Span Study Gruppe

Im Jahre 2003 veröffentlichte die Radiation Effects Research Foundation Ergebnisse über die Fortführung ihrer Untersuchungen für die Jahre 1991 bis 1997. Es ergab sich kein Hinweis auf eine weiterhin erhöhte Leukämiersterblichkeit, während für die Krebssterbefälle weiterhin eine erhöhte Rate festgestellt wurde. Von 1950 bis nunmehr 1997 sind insgesamt 9 335 Krebssterbefälle aufgetreten, 440 mehr als erwartet. Aus den Daten ist aber auch zu entnehmen, dass für die rund 37 500 Personen mit Strahlendosen unterhalb 5 Millisievert gar keine erhöhte Krebssterblichkeit festgestellt werden konnte.

Die Radiation Effects Research Foundation bezieht auch Sterbefälle durch nicht krebsbedingte Erkrankungen in ihre Untersuchungen ein. Für einige Krankheiten wie Schlaganfall, Lungenentzündung oder Leberzirrhose wurden dabei für Strahlendosen oberhalb von 500 Millisievert erhöhte Sterblichkeitsraten festgestellt, die allerdings bezogen auf die Gesamtzahl deutlich niedriger liegen als bei den Krebssterbefällen.

Die Gesamtzahl der Sterbefälle durch nicht krebsbedingte Erkrankungen in der Untersuchungsgruppe im Zeitraum 1950 - 1997 betrug 31 881 gegenüber einer erwarteten Zahl von 31 631 - ein Mehr von 250 Sterbefällen.

Im Gegensatz zu den anfänglichen Befürchtungen haben die Untersuchungen an den Kindern und Kindeskindern der Atombombenüberlebenden bisher keinen Hinweis auf eine strahlenbedingte Erhöhung vererbbarer Effekte ergeben.

3.5 Risikowerte

Für hohe Dosen und hohe Dosisraten ermittelte die Internationale Strahlenschutzkommission aus den epidemiologischen Daten Risikofaktoren für die Altersgruppe der Berufstätigen und für die Gesamtbevölkerung.

Für den Bereich niedriger Dosen und Dosisleistungen, wie sie beim Normalbetrieb kerntechnischer Anlagen auftreten - für die Beschäftigten einige Millisievert pro Jahr, für die Bevölkerung einige Mikrosievert pro Jahr -, gibt es keine statistisch gesicherten Messdaten. Deshalb müssen Extrapolationen aus dem Bereich hoher Dosen und Dosisraten durchgeführt werden.

Zur Übertragung der bei hohen Dosen ermittelten Risikofaktoren auf den für Strahlenschutz zwecke relevanten Bereich niedriger Dosis und niedriger Dosisleistung wurde von der Internationalen Strahlenschutzkommission ein Reduktionsfaktor mit dem Zahlenwert 2 für Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlen abgeleitet.

Für Alpha- und Neutronenstrahlung wird kein Reduktionsfaktor angewandt.

Daraus folgt für niedrige Dosis und niedrige Dosisleistung ein Krebsmortalitätsrisiko von 4 % pro Sievert für die 18- bis 65-Jährigen und von 5 % für alle Altersgruppen. Die Krebshäufigkeit ist nicht für alle Organe bei gleicher Strahlendosis gleich.

Einen Überblick über das unterschiedliche Krebsrisiko für den Bereich niedriger Dosen geben die Daten von ICRP in der Tab. 19.

Organ	Krebsmortalitätsrisiko, Prozent pro Sv
Blase	0,30
Brust	0,20
Dickdarm	0,85
Eierstöcke	0,10
Haut	0,02
Knochenoberfläche	0,05
Knochenmark, rotes	0,50
Leber	0,15
Lunge	0,85
Magen	1,10
Schilddrüse	0,08
Speiseröhre	0,30
übrige	0,50
gesamt	5

Tab. 19: Krebsmortalitätsrisiko für die Gesamtbevölkerung für verschiedene Organe nach ICRP 1990

Die Keimdrüsen sind die Gewebe, in denen die Erzeugung strahleninduzierter Genmutationen und Chromosomenveränderungen, die zu Erbschäden führen, stattfindet. Beobachtungen hauptsächlich an kleinen Säugetieren und niederen Lebewesen haben Daten über die Häufigkeit der Erbveränderungen durch Bestrahlung geliefert. Beobachtun-

gen am Menschen haben die Häufigkeiten der verschiedenen natürlich auftretenden vererbaren Krankheiten aufgezeigt.

Das Ausmaß, in dem diese Krankheiten mit einer gegebenen Erhöhung der Mutationsrate ansteigen würden, wurde für die meisten Lebewesen nicht direkt nachgewiesen. So gibt es bisher beim Menschen keine statistisch gesicherten Befunde über Erbschäden bei den Nachkommen bestrahlter Eltern, obwohl z. B. einige tausend Nachkommen der Eltern untersucht wurden, die in Hiroshima und Nagasaki hohen Strahlendosen ausgesetzt waren.

Eine tabellarische Zusammenfassung der Daten über die Wahrscheinlichkeit von Erbschäden nach ICRP, UNSCEAR und BEIR gibt die Tab. 20.

Die Anzahl "natürlicher" erbbedingter dominanter und rezessiver Schädigungen beträgt rund 15 000 pro 1 Million Lebendgeburten.

Gremium	Wahrscheinlichkeit für Erbschäden Prozent pro Sv	
	1. Generation	alle Generationen
UNSCEAR (1988)	0,17	1,2
BEIR-V (1990)	0,15 - 0,4	1,15 - 2,15
ICRP (1990)		1

Tab. 20: Daten zum genetischen Strahlenrisiko

3.6 Gesamtbewertung der Schädigungsmöglichkeiten und Festlegung von Dosisgrenzwerten

ICRP hat in der Gesamtbewertung der Schädigungsmöglichkeit durch ionisierende Strahlen neben den Risikofaktoren für Krebsmortalität auch gewichtet den Schädigungsanteil durch strahlungsbedingte Nicht-Krebserkrankungen berücksichtigt

Grundlage aller Strahlenschutzmaßnahmen nach ICRP ist es, das Auftreten deterministischer Strahlenwirkungen zu verhindern, indem die Strahlendosen unterhalb der entsprechenden Schwellwerte gehalten werden, und sicherzustellen, dass alle vernünftigen Maßnahmen ergriffen werden, um das Eintreten stochastischer Strahlenschäden zu verringern.

Auf der Basis ihrer Daten empfiehlt die Internationale Strahlenschutzkommission für die beruflich strahlenexponierten Personen einen Grenzwert der effektiven Dosis von 20 Millisievert pro Jahr,

gemittelt über einen festen Zeitraum von fünf Jahren, maximal 50 Millisievert in einem einzelnen Jahr. Nach ICRP genügt diese Begrenzung der effektiven Dosis, um auch deterministische Wirkungen in den Körpergeweben und Organen auszuschließen, ausgenommen die Augenlinsen, deren Beitrag zur effektiven Dosis gering wäre, und der Haut, die hohen lokalen Expositionen ausgesetzt sein kann. Für diese Organe wurden eigene Dosisgrenzwerte festgesetzt (siehe Tab. 21).

Für die Bevölkerung empfiehlt die Internationale Strahlenschutzkommission einen Grenzwert für die effektive Dosis von 1 Millisievert pro Jahr. Unter besonderen Umständen kann ein höherer Wert gerechtfertigt sein, wenn der Mittelwert über fünf Jahre 1 Millisievert pro Jahr nicht übersteigt. Zur Festlegung der Grenzwerte der Teilkörperdosis für die Augenlinsen und die Haut hält ICRP gegenüber den Grenzwerten für beruflich strahlenexponierte Personen einen Reduktionsfaktor von zehn für gerechtfertigt.

Die Dosisgrenzwertempfehlungen wurden so festgelegt, dass eine andauernde Strahlenexposition oberhalb des Grenzwertes zu einem nichtakzeptablen Risiko führt. Der Dosisgrenzwert ist also nicht die Schwelle von "gefährlos" zu "gefährlich", sondern er stellt den Übergang vom tolerierbaren Risikobereich in den nichtakzeptablen Risikobereich dar.

Anwendungsbereiche	Dosisgrenzwert mSv / Jahr	
	beruflich	Bevölkerung
effektive Dosis	20*	1**
Teilkörperdosis		
Augenlinsen	150	15
Haut	500	50
Hände, Füße	500	-

* gemittelt über einen Zeitraum von fünf aufeinanderfolgenden Jahren, max. 50 mSv in einem einzelnen Jahr

** in besonderen Fällen kann ein höherer Wert zulässig sein, wenn der Mittelwert über fünf Jahre 1 mSv pro Jahr nicht übersteigt

Tab. 21: Dosisgrenzwerte nach ICRP 1990

4 Literatur

- [1] H. Becquerel: Sur une propriété nouvelle de la matière, la radioactivité, Les Prix Nobel en 1903, Stockholm, 1906
- [2] F. Kirchheimer: Das Uran und seine Geschichte, Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1963
- [3] Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2003, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

- [4] Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Hauptband, Hrsg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1980
- [5] Genetic and Somatic Effects of Ionizing Radiation (UNSCEAR 1986), United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, 1986
- [6] Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, (UNSCEAR 1988), United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, 1988
- [7] Sources and Effects of Ionizing Radiation, (UNSCEAR 1993), United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, 1993
- [8] Sources and Effects of Ionizing Radiation, (UNSCEAR 2000), United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, 2000
- [9] Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, BEIR V, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, National Academy Press, Washington, D. C., 1990
- [10] 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, 21, No. 1-3 (1991)