

## Die natürliche und die künstliche Strahlenexposition des Menschen

Manfred Säbel

Aus der Abteilung für Gynäkologische Radiologie  
(Leiter: Professor Dr. Julius Weishaar)  
der Frauenklinik mit Poliklinik  
(Direktor: Professor Dr. Karl Günther Ober)  
der Universität Erlangen-Nürnberg



Die mittlere jährliche Strahlenexposition der Bevölkerung – ausgedrückt durch die genetisch signifikante Dosis (GSD) – liegt in der Bundesrepublik Deutschland gegenwärtig bei etwa 170 mrem; davon entfallen 110 mrem auf die Strahlenexposition aus natürlichen Quellen. Die Röntgendiagnostik liefert mit etwa 50 mrem/a den höchsten Beitrag zur GSD durch künstliche Strahlenquellen. Aufgrund der kanzerogenen Wirkung ionisierender Strahlen müssen jedoch bei der Beurteilung des Strahlenrisikos neben der Keimdrüsendosis auch die Dosen in anderen Organen und Geweben berücksichtigt werden.

### 1. Einleitung

Wir wissen heute, nach über 80 Jahren Strahlenforschung, daß der Mensch und seine Umwelt seit jeher den Wirkungen ionisierender Strahlen ausgesetzt sind, die aus natürlichen Strahlenquellen stammen. Verschiedene technische Entwicklungen dieses Jahrhunderts haben zu einer unbeabsichtigten Erhöhung dieser Strahlenexposition aus natürlichen Quellen geführt. Beispiele dafür sind u. a. (4)<sup>1)</sup>

► die Strahlenexposition durch die Emission natürlich radioaktiver Stoffe aus Kohlekraftwerken,

► die Strahlenexposition durch die industrielle und landwirtschaftliche Nutzung von Phosphatprodukten

(Rohphosphate haben einen erhöhten Gehalt an Uran und Radium)

► und die Strahlenexposition durch die Verwendung von Baustoffen, die einen erhöhten Gehalt an natürlich radioaktiven Stoffen haben.

Zu dieser natürlichen Strahlenexposition kommt – seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen und der Radioaktivität – die Exposition durch künstliche Strahlenquellen, also zum Beispiel

► durch den Fall-out von Kernwaffenversuchen,

<sup>1)</sup> Die in Klammern stehenden Zahlen beziehen sich auf das Literaturverzeichnis des Sonderdrucks.

## Strahlenexposition

- ▶ durch kerntechnische Anlagen und
- ▶ durch die Anwendung ionisierender Strahlen in der Medizin<sup>2)</sup>.

Wir wissen heute – nach diesen 80 Jahren Strahlenforschung – ebenfalls, daß auch bei kleinen Dosen ionisierender Strahlen biologische Wirkungen beobachtet werden können – und zwar sogenannte „stochastische“ (das heißt zufallsabhängige) Strahlenwirkungen, bei denen die *Wahrscheinlichkeit* des Auftre-

<sup>2)</sup> Die Trennungslinie zwischen natürlich und zivilisatorisch bedingten Strahlenexpositionen ist bisher nicht eindeutig gezogen worden. Die im folgenden gewählte Einteilung lehnt sich an die Jahresberichte „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ der Bundesregierung an (Tabelle 2). In der internationalen Literatur findet man verschiedene Definitionen (9, 12, 13, 14) dieser Begriffe; jedoch sind die Unterschiede vor allem von strahlenschutzpolitischem Interesse und im Rahmen dieser Arbeit von untergeordneter Bedeutung.

tens um so größer ist, je höher die Dosis ist, und bei denen es keine Schwellendosis gibt, bei deren Unterschreitung diese Wirkungen nicht auftreten. (Im Gegensatz dazu stehen die – vor allem bei höheren Dosen auftretenden – „nichtstochastischen“ Strahlenwirkungen, bei denen die *Schwere* des Schadens von der Dosis abhängt; hier gibt es in der Regel auch eine Schwellendosis.) Zu den stochastischen Strahlenwirkungen gehören Schäden am Erbgut und die Induktion von Krebs. Diese Wirkungen werden gegenwärtig als das wichtigste Strahlenrisiko bei kleinen Dosen und damit als das Hauptproblem im Strahlenschutz angesehen (9).

Bei der Beurteilung dieses Strahlenrisikos und der Festlegung von Dosisgrenzwerten im Strahlenschutz ist die Größe der natürlichen Strahlenexposition eine wichtige Orien-

tierungsmarke; sie stellt auch die grundlegende Vergleichsgröße bei allen Bemühungen dar, die künstliche Strahlenexposition in sinnvollem Maße zu begrenzen.

## 2. Genetisches und somatisches Strahlenrisiko

Als Maß für die Strahlenexposition der Bevölkerung wird in offiziellen Darstellungen meistens die sogenannte *genetisch signifikante Dosis (GSD)* angegeben (s. bei (4) und (5)). Man geht dabei von der Annahme aus, daß der zu erwartende durch ionisierende Strahlen erzeugte genetische Schaden in späteren Generationen aus der Summe der Strahlenexpositionen der Gesamtbevölkerung abgeschätzt werden kann, und zwar deshalb, weil es in späteren Generationen zu einer Vermischung der durch Strahlung ver-

**Tabelle 1: Organspezifische Strahlenrisikofaktoren (nach (9, 13))**

Organ	Art des Strahlenschadens	Anzahl der Fälle pro 10 <sup>6</sup> Personen und pro rem
Keimdrüsen	Erbkrankte*)	40
	Erbkrankte**)	40
rotes Knochenmark	Leukämietote	20
Brust	Krebstote	25
Lunge	Krebstote	20
Knochen (Endost)	Krebstote	5
Schilddrüse	Krebstote	5
alle anderen Organe und Gewebe	Krebstote	50

\*) Erbkrankheiten von klinischer Bedeutung in den ersten beiden Generationen  
 \*\*) Erbkrankheiten von klinischer Bedeutung in allen nachfolgenden Generationen

**Tabelle 2: Genetisch signifikante Strahlenexposition der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1977 (nach (4, 5))**

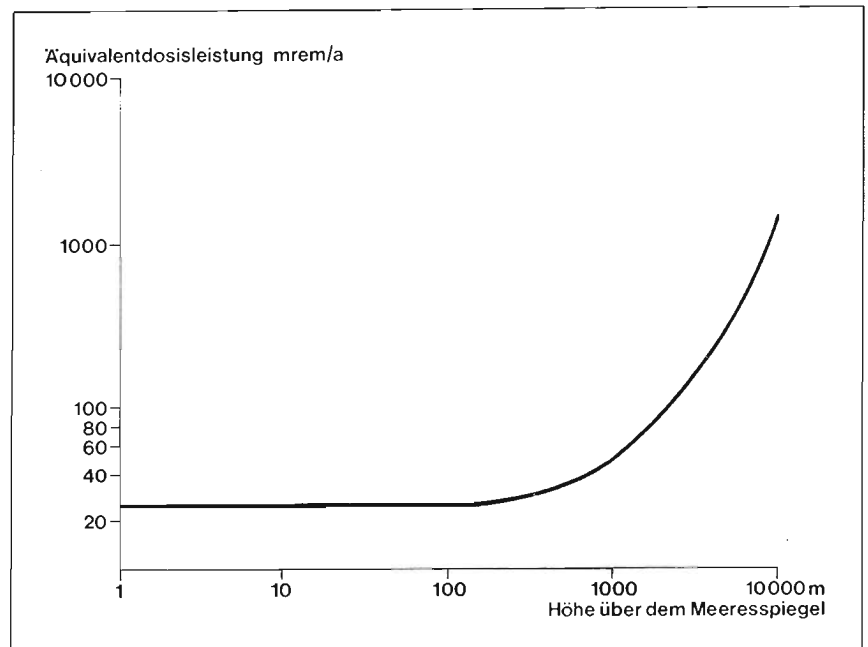
<b>1. Natürliche Strahlenexposition</b>	<b>110 mrem/a</b>
1.1. kosmische Strahlung	30 mrem/a
1.2. terrestrische Strahlung von außen	50 mrem/a
1.3. inkorporierte natürliche radioaktive Stoffe	30 mrem/a
<b>2. Künstliche Strahlenexposition</b>	<b>60 mrem/a</b>
2.1. Verwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Forschung, Technik und Haushalt	< 1 mrem/a
2.2. berufliche Strahlenexposition	< 1 mrem/a
2.3. Fall-out von Kernwaffenversuchen	< 1 mrem/a
2.4. kerntechnische Anlagen	< 1 mrem/a
2.5. Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe in der Medizin	50 mrem/a

änderten Erbanlagen kommt und somit eine nahezu gleichmäßige Verteilung in größeren Bevölkerungsgruppen angenommen werden kann (20). Dementsprechend ist die GSD diejenige Dosis, welche, würde sie jedes Mitglied der Bevölkerung erhalten, dieser Bevölkerung die gleiche genetische Gesamtschädigung zufügen würde, wie die von den einzelnen Personen tatsächlich erhaltenen Dosen. Die genauere Definition der GSD lautet (6):

► Die genetisch signifikante Dosis ist die Summe der mit dem genetischen Bedeutungsfaktor multiplizierten Keimdrüsendosen für alle Angehörigen einer anzugebenden Personengruppe bei einer anzugebenden Bestrahlungsart, dividiert durch die Gesamtzahl der Bevölkerung oder speziellen Bevölkerungsgruppe, der die von der Bestrahlung betroffenen Personen zugehören. Der genetische Bedeutungsfaktor ist das Verhältnis zwischen der für eine spezielle Bevölkerungsgruppe bestimmten Alters und Geschlechts nach der Bestrahlung noch zu erwartenden Kinderzahl je Person und der für die Gesamtbevölkerung im Mittel je Person zu erwartenden Kinderzahl.

Aus dem bisher Gesagten wird deutlich, daß die GSD nur zur Abschätzung des *genetischen* Strahlenrisikos geeignet ist, das heißt desjenigen Risikos, das sich aus der Strahlenbelastung der Keimdrüsen ergibt und das sich erst in den folgenden Generationen auswirkt.

Dieses genetische Strahlenrisiko stand über Jahrzehnte hinweg bei Strahlenschutzüberlegungen im Vordergrund. Seit dem Ende des 2. Weltkrieges beschäftigten sich dann jedoch – ausgelöst auch durch die Atombombenabwürfe von Hiroshima und Nagasaki – in zunehmendem Maße epidemiologische Untersuchungen mit der strahleninduzierten Kanzerogenese. Diese Forschungsergebnisse konnten nicht ohne Einfluß auf die Grundlagen des Strahlenschutzes bleiben: In den im Jahre 1977 veröffentlichten Empfehlungen der Internationalen Strahlen-



Darstellung 1: Abhängigkeit der Dosisleistung der kosmischen Strahlung von der Höhe über dem Meeresspiegel (aus (15))

schutzkommission (9) wurde das *somatische* Strahlenrisiko, also das Risiko für die strahlenexponierte Person selbst, gleichrangig neben das genetische Risiko gestellt, und die Kommission betonte, daß die Induktion von Leukämie und anderen malignen Neubildungen als das wichtigste somatische Strahlenrisiko bei kleinen Dosen angesehen werden müßte.

Zur Abschätzung des genetischen und somatischen Risikos müssen außer der Keimdrüsendosis die Dosen<sup>3)</sup> in den einzelnen Organen und Geweben und sogenannte „organ-spezifische Risikofaktoren“ (Tabelle 1) bekannt sein. Seit einiger Zeit sind auch Bemühungen im Gange – entsprechend der GSD – die somatisch signifikante Dosis zu ermitteln.

Da hierbei neben den Organdosen noch die Abhängigkeit der organ-spezifischen Risikofaktoren von Alter und Geschlecht bekannt sein muß, ist ein solches Unterfangen naturgemäß viel schwieriger und aufwendiger als die Abschätzung der GSD.

Die Zusammenhänge zwischen Strahlenexposition und Strahlenrisiko konnten hier nur angedeutet werden. Eine ausführliche und allgemeinverständliche Darstellung dieses Fragenkomplexes findet sich in dem Buch „Strahlenrisiko!? – Medizin, Kernenergie, Strahlenschutz“ von Professor Rausch (17); Hinweise zur Methodik der Abschätzung insbesondere des somatischen Risikos können zum Beispiel den Arbeiten (10, 13, 16) entnommen werden.

Im folgenden sollen die wichtigsten Komponenten der Strahlenexposition des Menschen kurz dargestellt werden. Dabei wird zunächst ver-

<sup>3)</sup> Körper- und Organdosen werden in der Radiologie meistens in Einheiten der Energiedosis, das heißt in „Rad“ (Kurzzeichen: rd) oder in „Gray“ (Kurzzeichen: Gy) angegeben (1 Gy = 100 rd). Für Strahlenschutz-zwecke gibt man jedoch in der Regel die Äquivalentdosis in „Rem“ (Kurzzeichen: rem) oder „Sievert“ (Kurzzeichen: Sv) an (1 Sv = 100 rem). Dazu wird die Energiedosis mit einem dimensionslosen Bewertungsfaktor  $q$  multipliziert, der die biologische Wirksamkeit der Strahlenart berücksichtigt (6). Für dünn ionisierende Strahlen gilt:  $q = 1$  (9). In den folgenden Darstellungen und Tabellen werden Organdosen entweder in „Rad“ oder in „Rem“ angegeben; die GSD wird stets in „Rem“ angegeben.

Strahlenexposition

sucht, die Beiträge dieser Komponenten zur GSD (Tabelle 2) aufzuzeigen. (Die angegebenen Werte gelten in erster Linie für die Bevölkerung der Bundesrepublik im Jahre 1977; sie sind jedoch auch für die vorhergehenden Jahre annähernd richtig.) Außerdem wird an geeigneter Stelle durch die Angabe von Organdosen oder von mittleren (das heißt über die Gesamtbevölkerung gemittelten) Jahres-Äquivalentdosen auch immer wieder auf das somatische Strahlenrisiko hingewiesen werden.

**3. Natürliche Strahlenexposition**

**3.1. Kosmische Strahlung**

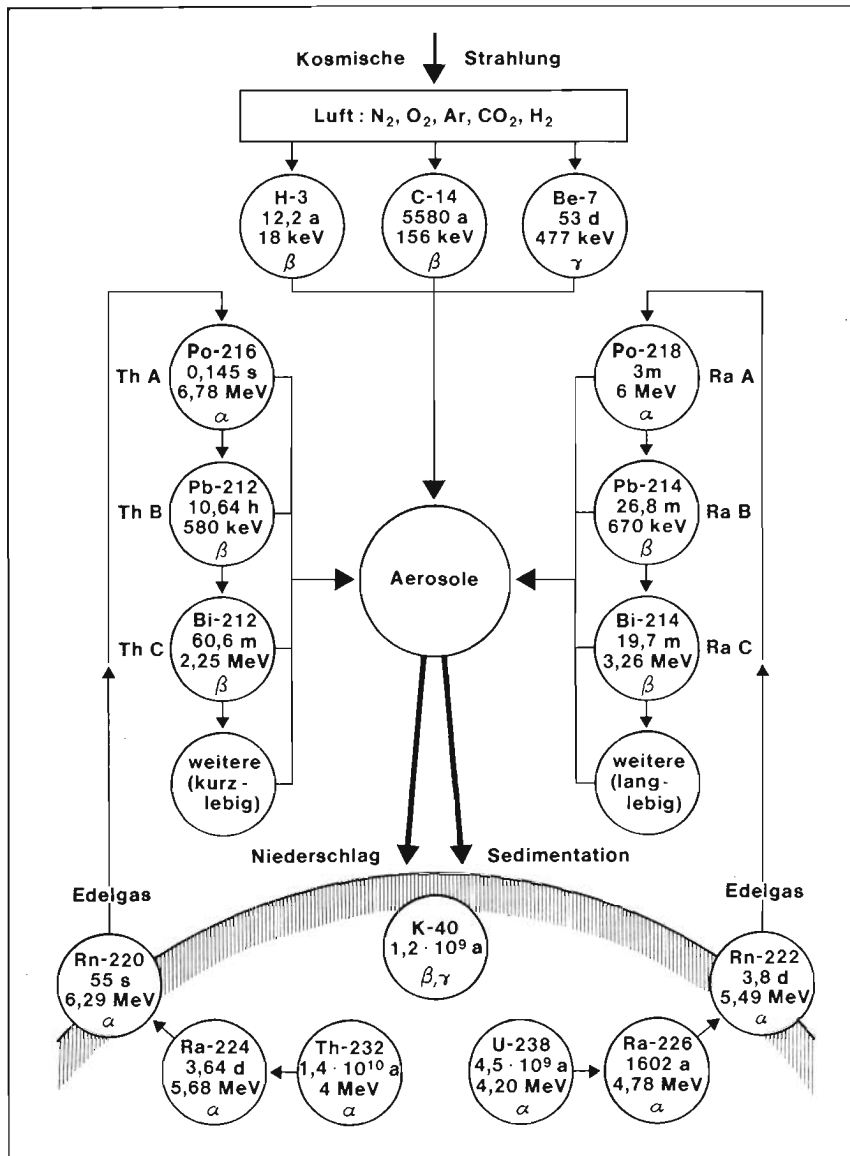
Die primäre kosmische Strahlung besteht bei ihrem Eintritt in die Lufthülle der Erde im wesentlichen aus sehr energiereichen Protonen, Alpha-Teilchen und überwiegend leichten Atomkernen mit Ordnungszahlen bis zu  $Z = 30$ . Durch Kernreaktionen mit den Atomkernen der Lufthülle entsteht die sogenannte se-

kundäre Komponente (Protonen, Neutronen, Alpha-Teilchen, Mesonen, Elektronen, Positronen, Photonen), die dann im wesentlichen für die Strahlenexposition in der Nähe der Erdoberfläche verantwortlich ist (19) (Darstellung 1).

Die Strahlenexposition durch kosmische Strahlung beträgt in Deutschland in Meereshöhe etwa 30 mrem/a; sie nimmt mit der Höhe zu (bedingt durch die kleiner werdende abschirmende Wirkung der Lufthülle) und beträgt z. B. in 1500 m Höhe etwa 60 mrem/a. Wenn also ein Hamburger 4 Wochen Urlaub im Hochgebirge macht, verursacht die erhöhte kosmische Strahlung eine zusätzliche Strahlenexposition von etwa 2,5 mrem. Mit einer erhöhten Strahlenexposition muß natürlich auch bei Flügen in großer Höhe gerechnet werden; so empfängt zum Beispiel ein Pilot bei 160 Rundflügen auf der Nordatlantikroute eine zusätzliche Jahresdosis von 1300 mrem (14).

An dieser Stelle sei (im Hinblick auf das in Abschnitt 2 diskutierte Strahlenrisiko) eine Bemerkung zu der manchmal aufgestellten Behauptung erlaubt, daß „eine Röntgenaufnahme nicht gefährlicher sei als ein mehrwöchiger Aufenthalt im Hochgebirge“. Richtig ist (siehe Abschnitt 4.5.), daß bei den meisten Röntgenuntersuchungen im Schädel- und Thoraxbereich die Keimdrüsensenden in der Größenordnung von einigen mrem liegen. Was jedoch bei diesem Vergleich verschwiegen wird, ist die Tatsache, daß die Dosen im untersuchten Organ durchaus in der Größenordnung von 1000 mrem liegen können; dies trifft dann auch für die Keimdrüsen zu, wenn sie im direkten Strahlenbündel liegen. Deshalb ist der Vergleich „Röntgenaufnahme – Hochgebirge“ in dieser allgemeinen Form nicht zulässig.

Die für die Bundesrepublik Deutschland aus der Höhenverteilung der Siedlungsgebiete und deren Einwohnerzahlen berechnete mittlere Jahres-Körperäquivalentdosis durch kosmische Strahlung beträgt etwa 33 mrem (12); dementsprechend



Darstellung 2: Entstehung, Zerfall und Ausbreitung natürlicher Radionuklide (aus (15))

**Tabelle 3: Mittelwerte der terrestrischen Strahlung im Freien und in Wohnungen für die verschiedenen Bundesländer und Berlin (West) (nach (3) )**

	jährliche Keimdrüsendosis in mrem	
	im Freien	in Wohnungen
Baden-Württemberg	39	49
Bayern	43	53
Bremen	26	33
Hamburg	35	35
Hessen	38	56
Niedersachsen	30	41
Nordrhein-Westfalen	37	48
Rheinland-Pfalz	42	64
Saarland	50	76
Schleswig-Holstein	33	38
Berlin (West)	36	44

**Tabelle 4: Änderung der Strahlenexposition in Wohnungen zu der im Freien in Abhängigkeit vom verwendeten Baustoff (aus (3) )**

Baustoff	Unterschied in %
Bimsstein	+50
Schlackenstein	+47
Klinker	+36
Ziegel und Naturstein	+35
Lehm	+33
Kalksandstein	+24
Beton	+24
Blähbeton	+18
Holz	- 4

liegt auch der Beitrag der kosmischen Strahlung zur GSD bei etwa 30 mrem/a (Tabelle 2).

### 3.2. Terrestrische Strahlung von außen

Die terrestrische Strahlenexposition wird verursacht durch den Gehalt der untersten Schichten der Atmosphäre und der obersten Erdschichten an natürlichen radioaktiven Nukliden. Bedingt durch das Alter der Erde von etwa  $5 \cdot 10^9$  a, handelt es sich dabei im wesentlichen um langlebige Nuklide und deren – teilweise kurzlebige – Folgeprodukte (Darstellung 2).

Da ist zunächst K-40 mit einer Halbwertszeit von  $1,2 \cdot 10^9$  a; dann die Elemente der Uran-Radium-Reihe und der Thorium-Reihe. Beide Zerfallsreihen enthalten als Folgeprodukt je ein radioaktives Edelgas (Radon-220 und Radon-222), das in die Atmo-

sphäre diffundiert und dort auch zur Bildung von radioaktiven Aerosolen führt. Durch die von der kosmischen Strahlung in der Lufthülle ausgelösten Kernreaktionen werden ebenfalls Radionuklide erzeugt, vor allem Tritium, Kohlenstoff-14 und Beryllium-7.

Aus dem bisher Gesagten wird verständlich, daß die Strahlenexposition *von außen*, das heißt durch Strahlenquellen außerhalb des Körpers, stark von der lokalen Konzentration dieser Radionuklide abhängt.

So wurden zum Beispiel hohe Dosisleistungen über Eruptivgestein mit vergleichsweise starkem Gehalt an Radionukliden und niedrige Werte über Kalken, Gips und Quarziten mit entsprechend geringem Gehalt gemessen (19).

Für das Gebiet der Bundesrepublik sind inzwischen auch schon Isodosenkarten erstellt worden (3).

Aus diesen Dosisverteilungen läßt sich die Strahlenexposition im Freien in den einzelnen Bundesländern abschätzen (Tabelle 3).

Nun halten wir uns aber vorwiegend in Gebäuden auf, und man sollte meinen, daß die Exposition durch terrestrische Strahlung durch die abschirmende Wirkung der Wände, Fußböden und Decken kleiner wird. Dem ist aber nicht so. Besonders im letzten Jahrzehnt durchgeführte umfangreiche Untersuchungen an verschiedenen Baustoffen haben gezeigt, daß diese teilweise einen erhöhten Gehalt an Radionukliden aufweisen (3).

Aus Tabelle 4 ergibt sich, daß die Strahlenexposition in Wohnungen durchaus um 50 Prozent höher sein kann als im Freien. Dementsprechend liegen auch die Mittelwerte in den einzelnen Bundesländern höher (Tabelle 3). Die bei diesen Untersuchungen (3) ermittelten Werte der

Strahlenexposition

jährlichen Keimdrüsendosis liegen zwischen 3 mrem und 253 mrem bei dauerndem Aufenthalt im Freien und zwischen 9 mrem und 211 mrem bei dauerndem Aufenthalt in Wohnhäusern.

Zusammenfassend kann man sagen, daß in der Bundesrepublik die Strahlenexposition von außen durch terrestrische Strahlung im Mittel bei dauerndem Aufenthalt in Wohnungen 57 mrem/a und bei dauerndem Aufenthalt im Freien 43 mrem/a

beträgt (5). Das ergibt dann einen Beitrag zur GSD von etwa 50 mrem/a (Tabelle 2); auch die mittlere Jahres-Körperäquivalentdosis liegt in dieser Größenordnung.

**3.3. Inkorporierte natürliche radioaktive Stoffe**

Die oben erwähnten natürlichen Radionuklide können auf verschiedenen Wegen in den menschlichen Körper gelangen und damit eine

Strahlenexposition von innen verursachen: Entsprechend ihren chemischen und biologischen Eigenschaften werden einzelne Radionuklide entweder direkt vom Menschen aufgenommen oder sie nehmen an Biozyklen teil und gelangen so, zum Beispiel über die Nahrungskette, in den menschlichen Körper.

Tabelle 5 zeigt als Beispiel Aktivitätskonzentrationen im Trinkwasser und in verschiedenen Lebensmitteln.

**Tabelle 5: Natürlich radioaktive Stoffe im Trinkwasser und in Lebensmitteln (aus (5) )**

► Natürlich radioaktive Stoffe im Trinkwasser

Radionuklid	Konzentration (pCi/l)	Bemerkung
H-3	0,6 – 2	
K-40	5	Mittelwert
Po-210	0,01	Mittelwert
Pb-210	0,04	geschätzter Mittelwert
Rn-222 und kurzlebige Folgeprodukte	10 – 100	
Ra-226	0,04	geschätzter Mittelwert
U-238	0,01	geschätzter Mittelwert

► Natürlich radioaktive Stoffe in Lebensmitteln

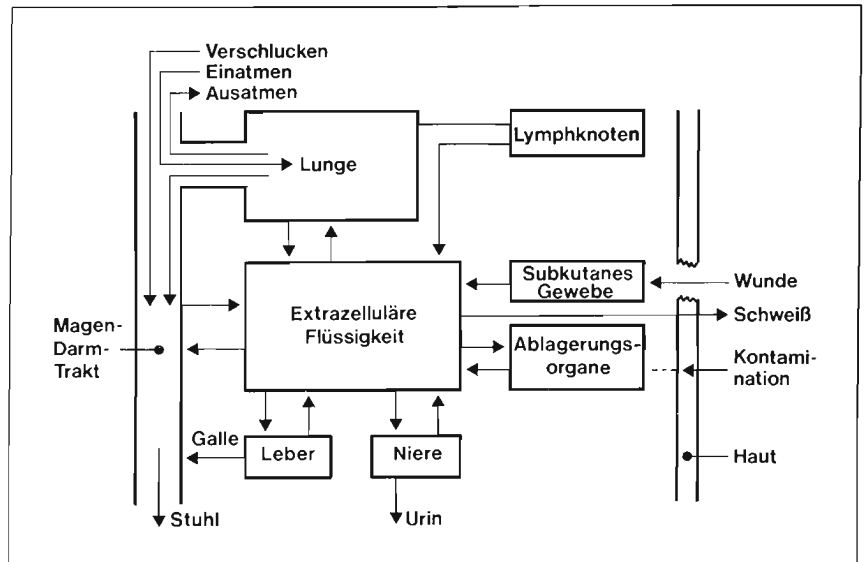
Lebensmittel	Radionuklid	Konzentration (pCi/kg Frischgewicht)
Gemüse	Ra-226	0,5 – 1,7
Wurzelgemüse	Ra-226	1,4
Kartoffeln	Ra-226	0,8 – 2,8
Obst	Ra-226	0,4
Eier	Ra-226	6,1
Fleisch	Ra-226	0,01 – 1,1
Milchprodukte	Ra-226	0,25
Paranüsse	Ra-226	200 – 3600

Beim Trinkwasser handelt es sich hauptsächlich um Tritium, Kalium-40 und Folgeprodukte der Uran-Radium-Reihe. Für verschiedene Lebensmittel ist der Gehalt an Radium-226 angegeben, das als Erdalkalimetall ein ähnliches Stoffwechselverhalten wie Kalzium zeigt und damit überwiegend in den Knochen eingebaut wird. Paranüsse zeigen einen ungewöhnlich hohen Gehalt an Radium-226. Das liegt nicht daran, daß Paranußbäume nur auf stark radiumhaltigen Böden wachsen, sondern daß dieser Baum Radium in besonders hohem Maße anreichert (18).

Darstellung 3 zeigt schematisch die verschiedenen Möglichkeiten der Inkorporation und Elimination von Radionukliden. In diesem Falle gelangen die Radionuklide hauptsächlich durch Ingestion und Inhalation, also durch Verschlucken und Einatmen, in den Körper. Ein Teil davon wird auf verschiedenen Wegen wieder ausgeschieden, ein anderer Teil – entsprechend den Stoffwechselverhältnissen – von verschiedenen Geweben und Organen aufgenommen.

Dieses komplexe Wechselspiel zwischen den einzelnen Kompartimenten macht einen wesentlichen Unterschied verständlich: Während wir es bei der Strahlenexposition von außen durch kosmische und terrestrische Strahlung – von Feinheiten abgesehen – mit einer homogenen Ganzkörperbestrahlung zu tun hatten, liegt hier der Fall vor, daß lokal begrenzte Bezirke des Körpers (also bestimmte Organe und Gewebe, in denen Radionuklide abgelagert werden) höheren Strahlenexpositionen ausgesetzt sind, während andere praktisch kaum belastet werden. Dies wird auch aus Tabelle 6 deutlich, in der die Strahlenexposition durch einige der wichtigsten natürlichen Radionuklide für verschiedene Organe angegeben ist.

Kalium-40 und Kohlenstoff-14 sind praktisch gleichmäßig im Körper verteilt und haben deshalb eine verhältnismäßig homogene Strahlenexposition zur Folge. Uran-238, Thorium-232 und ihre Folgeprodukte



Darstellung 3: Aufnahme und Ausscheidung von Radionukliden (aus (11))

**Tabelle 6: Strahlenexposition einzelner Organe des Menschen durch inkorporierte natürliche radioaktive Stoffe (nach (13)) – Angegeben ist die mittlere Jahres-Äquivalentdosis in mrem.**

Radionuklid	Keimdrüsen	rotes Knochenmark	Lunge	Knochen (Endost)
Ingestion:				
C-14	0,5	2,2	0,6	2,0
K-40	15	27	17	15
U-238	0,4	0,4	0,4	2,4
Th-230	0,08	0,4	0,8	6,0
Ra-226	0,2	0,6	0,2	5,4
Po-210	12	14	6	60
Th-232	0,08	0,4	0,8	6,0
Rn-220	0,24	0,68	0,24	4,2
Po-216	0,26	0,78	0,26	4,8
Po-212	0,2	0,86	0,2	4,2
Inhalation (bei Aufenthalt im Freien):				
Rn-222 bis Po-214	0,7	0,8	100	0,8
Rn-220 bis Tl-208	0,02	0,3	10	0,3

Strahlenexposition

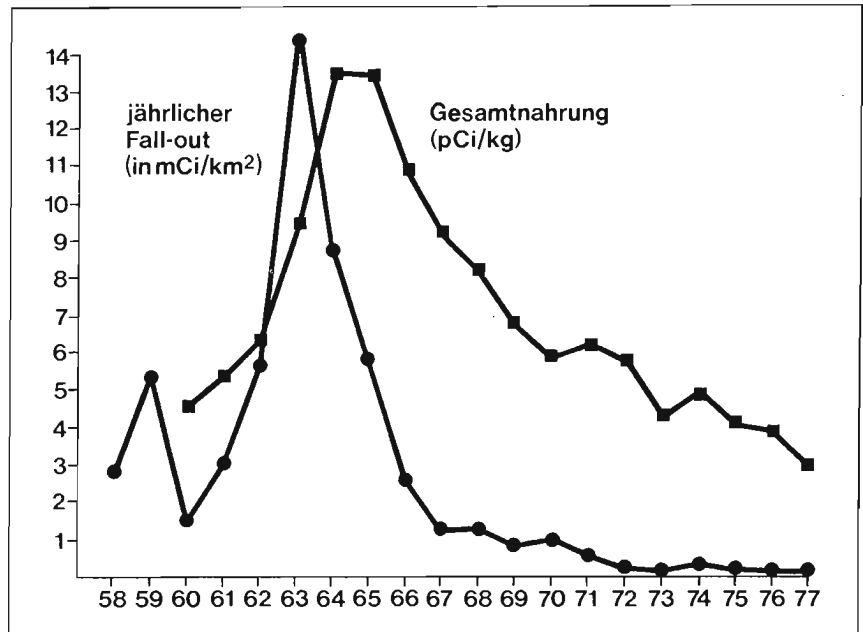
**Tabelle 7: Radioaktive Stoffe enthaltende Industrieerzeugnisse für Wissenschaft, Technik, Landwirtschaft und private Haushalte (aus (5) )**

Warengruppe	Einzelprodukt	Enthaltene Radionuklide
Geräte, die Leuchtfarben enthalten	Skalen und Zeiger bei Uhren, Kompassen, Luftfahrzeug-Instrumenten	H-3, Pm-147
Keramische Gegenstände, Glaswaren	Uranfarben für Kacheln und Porzellane	Natürliches oder abgereichertes Uran
Elektrische Bauteile und gastech-nische Geräte	Elektronenröhren Überspannungsableiter	H-3, Co-60, Kr-85, Cs-137
Vorrichtungen mit Tritiumgasleucht-röhren	Meßgeräte, Notbeleuchtungen	H-3
Gas- und Aerosol-Detektoren	Rauch- und Feuermelder	Ra-226, Am-241
Antistatika	Vorrichtungen zur Verhinderung von Aufladungen	Ra-226, Am-241
Technische Geräte	Prüfstrahler bzw. Eichstrahler	Ir-192, Co-60, Cs-137, Na-22, C-14, Sr-90, Ba-133, Pb-210, Ra-226
Wissenschaftliche Instrumente	Dicken- und Dichtemeßgeräte Füllstandmeßgeräte Röntgenfluoreszenzanalysenge-räte Gaschromatographen Geräte für Demonstrations-zwecke, z. B. in Schulen	Co-60, Kr-85, Sr-90, Cs-137, Pm-147, Tl-204, Am-241 Co-60, Cs-137 H-3, Pm-147, Cd-109, Fe-55, Pu-238 H-3, Ni-63 Ra-226
Glaswaren für den Gerätebau	optische Gläser, optische Linsen	Th nat
Metallegerungen	Stahl/Thorium- Wolfram/Thorium- Molybdän/Thorium- Magnesium/Thoriumlegierungen	Th nat
Düngemittel	Phosphatdünger Superphosphat Thomasphosphat kalium- und stickstoffhaltige Phosphatdünger	U nat, Ra-226 Th nat, K-40



belasten vor allem das Knochen- gewebe, und durch die Inhalation von Radon (und seinen als Aerosol vor- liegenden Folgeprodukten) wird vor allem die Lunge strahlenexponiert. In Wohnhäusern kann die Inhalation von Radon (abhängig von der Art des Baumaterials) zu Lungendosen von mehr als 1000 mrem/a führen (3, 14).

Für die Abschätzung der GSD ist die Keimdrüsendosis entscheidend: hier liefern Kalium-40 und Polo- nium-210 den größten Beitrag. In- gesamt wird die GSD durch inkorpo- rierte natürlich radioaktive Stoffe mit etwa 30 mrem/a abgeschätzt, so daß sich für die Summe der Expo- sitionen durch natürliche Strah- lenquellen eine GSD von 110 mrem/a ergibt (Tabelle 2).



Darstellung 4: Zeitlicher Verlauf des Sr-90-fall-out und der Sr-90-Aktivitätskonzentra- tion in der Gesamtnahrung für die Bundesrepublik Deutschland (aus (4))

#### 4. Künstliche Strahlenexposition

##### 4.1. Radioaktive Stoffe und ionisierende Strahlung in Forschung, Technik und Haushalt

Tabelle 7 vermittelt einen Eindruck von der Häufigkeit, mit der radioaktive Stoffe in Industrieerzeugnissen vorkommen, also zum Beispiel auf den Skalen und Zeigern von Uhren (Tritium, Prometium-147, in älteren Uhren auch noch Radium-226), in Glaswaren und keramischen Gegenständen (Uran) und in Vorrichtungen zur Verhinderung von elektro- statischen Aufladungen (Radium- 226, Americium-241).

Eine weitere Gruppe von Strahlen- quellen, die zu dieser Komponente der künstlichen Strahlenexposition gehören, sind die sogenannten Stör- strahler, das heißt Geräte, in denen Röntgenstrahlen erzeugt werden, ohne daß sie zu diesem Zweck be- trieben werden. Das bekannteste Beispiel sind die Fernsehgeräte: Hier wurde zum Beispiel bei einem Betrachtungsabstand von 2,5 Meter eine Ortsdosisleistung von etwa 2,4 µrem/h gemessen (15). Unter be- stimmten Annahmen läßt sich dar-

Tabelle 8: Beiträge zur GSD durch die Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe in der Strahlentherapie, Nuklear- medizin und Röntgendiagnostik (nach (4, 5))

	Anzahl der Unter- suchungen beziehungsweise Behandlungen pro 1000 Einw.	jährliche Zuwachsrate	GSD
Strahlentherapie	8		< 1 mrem/a
Nuklearmedizin	45	5% (1977) 16% (1970–1975)	2 mrem/a
Röntgen- diagnostik	1800	3–5%	50 mrem/a

aus auch die GSD abschätzen. Sie beträgt etwa 0,7 mrem/a (4, 15) und ist damit sicher größer als die Strah- lenexposition durch den Betrieb von Kernkraftwerken. Letztere wird zwar in der Regel mit „< 1 mrem/a“ ange- geben (siehe zum Beispiel (5) oder Abschnitt 4.4.); sie liegt jedoch ge-

genwärtig wohl eher in der Größen- ordnung von weniger als 0,1 mrem/a.

Insgesamt läßt sich abschätzen, daß der Beitrag zur GSD durch die Ver- wendung radioaktiver Stoffe und io- nisierender Strahlung in Forschung, Technik und Haushalt < 1 mrem/a ist

Strahlenexposition

**Tabelle 9: Richtwerte der Strahlenexposition (in mrd) bei den häufigsten nuklearmedizinischen Untersuchungsverfahren (nach (4, 5) )**

Untersuchung	Radiopharmakon	Aktivität in $\mu\text{Ci}$	Keimdrüsendosis		Knochen- markdosis	Organdosis*)
			Männer	Frauen		
Nieren: Funkt.	J-131 Jodhippurat	30	1,2	1,9	–	3 (Nieren) 1 400 (Schilddrüse)
Szint.	Tc-99m DMSA	2 000	28	46	70	1 500 (Nieren)
Leber-Szint.	Tc-99m S-Kolloid	1 500	1,7	8,4	41	510 (Leber)
Vitamin B <sub>12</sub> - Resorption	Co-57 Vitamin B <sub>12</sub>	0,5	2,1	1,8	1,8	–
Lungen-Szint.	Tc-99m Mikrosphären	2 000	7,6	12	300	420 (Lunge)
Schilddrüse: Szint. u. Funkt.	J-131 Jodid	50	8	9	21	105 000 (Schilddrüse)
Szint.	Tc-99m Pertechnetat	1 000	12	17	22	340 (Schilddrüse)
Erythrozyten- Überlebenszeit	Cr-51 Chromat	100	30	30	200	400 (Milz)
Hirn-Szint.	Tc-99m Pertechnetat	12 000	140	200	260	–
Skelett-Szint.	Tc-99m Diphosphonat	10 000	150	150	350	400 (Skelett)

Abkürzungen: Szint. = Szintigraphie; Funkt. = Funktionsuntersuchung, Szint. u. Funkt. = Szintigraphie und Funktionsuntersuchung  
\*) In dieser Spalte ist die Energiedosis im untersuchten bzw. kritischen Organ angegeben

(Tabelle 2); dies gilt auch für die mittleren Jahres-Äquivalentdosen anderer Organe und Gewebe.

**4.2. Berufliche Strahlenexposition**

Die Anzahl der im Rahmen der Strahlenschutzverordnung überwachten beruflich strahlenexponierten Personen stieg von 1973 bis 1977 von etwa 41 000 auf 60 000 Personen an; davon waren etwa 50 Prozent im medizinischen Bereich tätig. Im Rahmen der Röntgenverordnung wurden 1977 etwa 84 000 Personen überwacht, davon 85 Prozent im medizinischen Bereich (5).

Die mittlere Personendosis beruflich strahlenexponierter Personen be-

trug im Jahre 1977 84 mrem/a (5). Der Beitrag der beruflichen Strahlenexposition zur GSD der Bevölkerung der Bundesrepublik ist damit auch sicher < 1 mrem/a (Tabelle 2).

**4.3. Fall-out von Kernwaffenversuchen**

Bei Explosionen von Atombomben, die in der Atmosphäre stattfinden, gelangt ein Teil der radioaktiven Spaltprodukte bis in die Stratosphäre. Die erzeugten Radionuklide können dort einige Jahre verweilen und sich dabei Tausende von Kilometern vom Ort der Explosion entfernen. Dadurch kommt es zu einer weltweiten Kontaminierung. Durch Sedimentation und Niederschläge er-

reicht ein Teil dieser Radionuklide schließlich die Erdoberfläche und trägt damit – wie die natürlich radioaktiven Stoffe – durch Bestrahlung von außen und durch Inkorporation zur Strahlenexposition des Menschen bei.

Aufgrund der langen Verweildauer der Spaltprodukte in der Stratosphäre leisten praktisch nur die langlebigen Radionuklide, das heißt vor allem Strontium-90 und Cäsium-137, einen Beitrag zur Strahlenexposition der Bevölkerung.

Darstellung 4 zeigt für die Bundesrepublik den zeitlichen Verlauf des Strontium-90-Fall-outs und der Strontium-90-Aktivitätskonzentration in der Gesamtnahrung. Beim

**Tabelle 10: Richtwerte der Strahlenexposition (in mrd) bei verschiedenen röntgendiagnostischen Untersuchungsverfahren (nach (2, 5, 8, 21) ) und eigenen Messungen)**

Untersuchtes Organ bzw. Untersuchungsart	Keimdrüsendosis		Knochenmark- dosis	Organdosis*)
	Männer	Frauen		
Schädel	1	1	75	790 (Schilddrüse)
Halswirbelsäule	1	1	30	140 (Schilddrüse)
Thorax	1	1	60	120 (Lunge)
Mammographie	–	1	35	4000 (Brust)
Gallenblase	10	150	150	15 (Brust)
oberer Magen-Darm-Trakt	80	200	500	100 (Brust)
Abdomen (Übersicht)	250	300	150	–
intravenöse Pyelographie	300	950	250	540 (Brust)
Lendenwirbelsäule	350	400	250	120 (Brust)
Becken	450	300	100	–
Kontrast-Einlauf	650	750	850	25 (Brust)
Hysterosalpingographie	–	750	250	–

Die angegebenen Organdosen stellen grobe Richtwerte dar. Die tatsächliche Strahlenexposition kann in Einzelfällen um eine Größenordnung (und mehr) höher oder tiefer liegen. Streubreiten der Organdosen bei den verschiedenen Untersuchungsverfahren sind z. B. in (5) und (17) angegeben.

\*) In dieser Spalte werden zusätzlich Dosiswerte für diejenigen (in Tabelle 1 aufgeführten) Organe angegeben, die bei der jeweiligen Untersuchung besonders strahlenexponiert werden

Fall-out ist ein deutliches Maximum im Jahre 1963 zu erkennen; dies rührt daher, daß im Jahre 1962 durch die USA und die UdSSR insgesamt 77 Kernwaffenversuche in der Atmosphäre stattfanden. Nach 1962 wurden nur noch von Frankreich und von der Volksrepublik China einige Testexplosionen in der Atmosphäre durchgeführt; infolgedessen nahm der Fall-out – abgesehen von kleinen Zwischenmaxima (Darstellung 4) – von Jahr zu Jahr ab. Strontium ist ein Erdalkalimetall und verhält sich deshalb in Biozyklen ähnlich wie Kalzium. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß etwa ein Jahr nach dem Maximum im Fall-out auch ein Maximum im Strontium-90-Gehalt der Gesamtnahrung zu finden ist.

Der Beitrag des stratosphärischen Fall-outs zur GSD betrug für die Bundesrepublik Anfang der sechziger Jahre etwa 20 mrem/a (15), im Jahre 1974 noch 8 mrem/a (2) und wird für das Jahr 1977 zu < 1 mrem/a abgeschätzt (Tabelle 2). Für einzelne Organe und Gewebe, wie zum Beispiel Lunge, Knochen und rotes Knochenmark, liegen die mittleren Jahres-Äquivalentdosen zwischen 1 und 5 mrem (12).

#### 4.4. Kerntechnische Anlagen

Die Strahlenexposition der Bevölkerung durch kerntechnische Anlagen entstammt in der Bundesrepublik Deutschland im wesentlichen dem Betrieb der Kernkraftwerke. Zur Zeit

sind etwa 10 Kernkraftwerke in Betrieb. Jede dieser Anlagen erzeugt eine – verglichen mit allen Anwendungen radioaktiver Stoffe in der Medizin – riesige Menge an Radionukliden.

Die Probleme der Reaktorsicherheit, der Wiederaufbereitung und der Endlagerung, die mit der Aktivität von etwa  $10^9$  Ci im Reaktorkern verbunden sind, sollen hier nicht diskutiert werden.

Für die Strahlenexposition der Bevölkerung durch ein Kernkraftwerk im Normalbetrieb sind die Emissionen an Radionukliden über die Abluft und über das Abwasser interessant. Der daraus über alle Expositionspfade abgeschätzte Beitrag zur

## Strahlenexposition

GSD und zur mittleren Jahres-Körperäquivalentdosis war 1977 (wie auch in den vorhergehenden Jahren)  $< 1$  mrem/a (Tabelle 2).

An dieser Stelle sei noch eine Bemerkung zur Energiegewinnung durch Kernfusion (das heißt durch Verschmelzung von Atomkernen) erlaubt:

Auf diese Energiequelle gründen sich große Hoffnungen. Sie gilt weit hin als wirtschaftlich, praktisch unbegrenzt nutzbar und umweltfreundlich. In letzter Zeit sind jedoch Zweifel angemeldet worden (1), ob der Fusionsreaktor, für dessen Weiterentwicklung jährlich weltweit etwa zwei Milliarden Mark ausgegeben werden, diese Eigenschaften wirklich erfüllt. Uns interessieren hier vor allem die Strahlenschutz-

probleme und die daraus resultierende Strahlenexposition der Bevölkerung. Strahlenschutzprobleme ergeben sich durch (1, 7)

- ① Aktivierung von Strukturmaterialien durch die beim Fusionsprozeß frei werdenden Neutronen und
- ② das für die Fusion notwendige Tritium.

Tritium (H-3) ist ein niederenergetischer  $\beta$ -Strahler mit einer Halbwertszeit von 12 Jahren. Das Tritiuminventar eines Fusionsreaktors mit einer Leistung von 1000 MW (elektrisch) beträgt  $10^7$  bis  $10^8$  Ci; das entspricht etwa dem natürlichen Tritiuminventar der Erde, das von dem in der oberen Atmosphäre (siehe Abschnitt 3.2.) erzeugten Tritium gebildet wird. Wenn der gesamte Ener-

giebedarf der Erde (etwa  $6 \cdot 10^6$  MW elektrisch) durch die Kernfusion abgedeckt werden sollte, so ist mit einer jährlichen Tritium-Abgabe an die Umwelt von  $2 \cdot 10^7$  Ci zu rechnen; dies würde für die Weltbevölkerung eine mittlere Jahres-Körperäquivalentdosis von etwa 0,2 mrem zur Folge haben (7).

### 4.5. Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe in der Medizin

Strahlenexpositionen durch medizinische Maßnahmen – insbesondere durch die Röntgendiagnostik – liefern den höchsten Beitrag zur GSD durch künstliche Strahlenquellen (Tabelle 8).

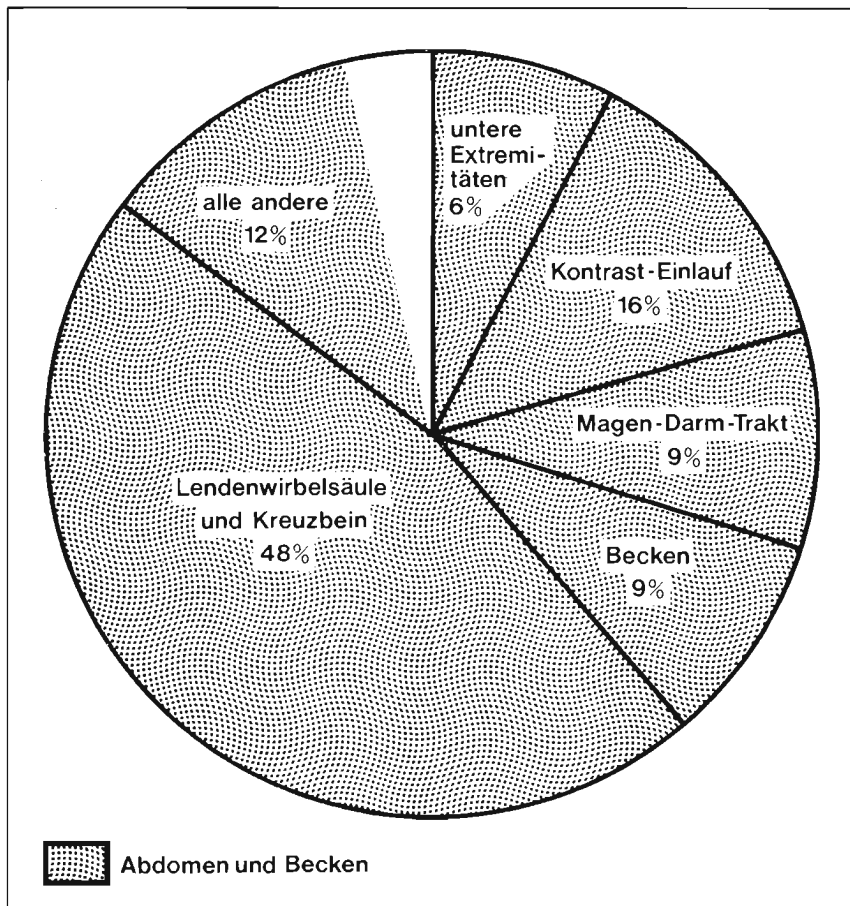
Der Beitrag der Strahlentherapie zur GSD ist klein ( $< 1$  mrem/a). Dies ist verständlich (trotz der teilweise hohen Keimdrüsendosen), da Personen, die an malignen Neubildungen leiden, schon meist wegen ihres Alters an der Fortpflanzung der Bevölkerung kaum beteiligt sind, und die Strahlentherapie gutartiger Erkrankungen rückläufig ist (zur Zeit etwa 3 Behandlungen pro 1000 Einwohner).

Der Beitrag der Nuklearmedizin zur GSD betrug 1977 etwa 2 mrem/a. Die jährliche Zuwachsrate, die in den Jahren 1970 bis 1975 noch 16 Prozent betrug, ist 1977 auf 5 Prozent zurückgegangen.

Bei den röntgendiagnostischen Leistungen liegt die jährliche Zuwachsrate zur Zeit etwa bei 3 bis 5 Prozent.

Vor zwanzig Jahren betrug der Beitrag der Röntgendiagnostik zur GSD nur etwa 20 mrem/a (20); 1977 lag er bei etwa 50 mrem/a.

Daß der Beitrag der Röntgendiagnostik so viel höher ist als der der Nuklearmedizin, liegt natürlich zum ersten an der größeren Anzahl der Untersuchungen, zum zweiten aber auch daran, daß die Keimdrüsendosen bei röntgendiagnostischen Maßnahmen teilweise größer sind (Tabelle 9 und 10).



Darstellung 5: Beitrag der röntgendiagnostischen Untersuchungen im Abdominal- und Beckenbereich zur GSD (nach (8))

Bei diagnostischen Maßnahmen in der Nuklearmedizin liegen die Gonadendosen zwischen 1 mrd und einigen hundert mrd. Bei Röntgenuntersuchungen hängt die Höhe der Keimdrüsensendosis vor allem davon ab, wie weit die Keimdrüsen vom Nutzstrahlenbündel entfernt sind.

Bei Untersuchungen im Kopf- und Thoraxbereich sind die Keimdrüsensendosen niedrig ( $< 10$  mrd). Mittlere Keimdrüsensendosen in der Größenordnung von 100 mrd treten vor allem bei Untersuchungen im oberen Abdominalbereich auf, hohe Keimdrüsensendosen in der Größenordnung von 1 rd vor allem dann, wenn die Keimdrüsen im Nutzstrahlenbündel liegen, das heißt also bei Untersuchungen im Beckenbereich.

Die Untersuchungen mit hohen Keimdrüsensendosen machen etwa 20 Prozent aller Röntgenuntersuchungen aus (niedrige Keimdrüsensendosen: 65 Prozent; mittlere Keimdrüsensendosen: 15 Prozent); das sind dann bei jährlich 1800 Untersuchungen/1000 Einwohner immerhin 360.

Damit wird verständlich, daß der Beitrag zur GSD in der Röntgendiagnostik fast ausschließlich durch die Untersuchungen im Abdominal- und Beckenbereich bestimmt wird. Dieser Sachverhalt ist in Darstellung 5 noch einmal veranschaulicht.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß der Beitrag zur GSD durch die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin hauptsächlich durch die Röntgendiagnostik bestimmt wird und insgesamt etwa 50 mrem/a beträgt (Tabelle 2).

Die radiologische Diagnostik kann als typisches Beispiel für den schon mehrfach erwähnten Sachverhalt gelten, daß die GSD nur einen Teilaspekt des Strahlenrisikos beschreibt. Aus Tabelle 9 und 10 ist ersichtlich, daß es eine ganze Reihe von Untersuchungen gibt, bei denen die Keimdrüsensendosen klein ( $< 10$  mrd), die Organdosen jedoch relativ hoch sind. Dies gilt insbesondere für die Mammographie; damit wird

auch verständlich, daß gerade um Risiko und Nutzen dieser Untersuchungsmethode – besonders im Zusammenhang mit ihrer Anwendung als Reihenuntersuchung im Rahmen der Früherkennung von Brustkrebs – in den letzten Jahren eine lebhaft diskutierte Diskussion geführt worden ist (17). Der in Tabelle 10 angegebene Wert von 4000 mrd (2 Aufnahmen pro Brust) für die mittlere Energiedosis im Drüsenparenchym gilt für die gegenwärtig in der Bundesrepublik noch überwiegend angewandte Aufnahmetechnik, bei der ein folienloser Materialprüffilm verwendet wird. Durch dosissparende Aufnahmeverfahren kann die Strahlenexposition bei der Mammographie jedoch durchaus um den Faktor 10 gesenkt werden.

## 5. Zusammenfassung und Folgerungen

Die mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung – ausgedrückt durch die GSD – liegt in der Bundesrepublik gegenwärtig bei etwa 170 mrem/a (Tabelle 2). Die mittleren Jahresäquivalentdosen in einzelnen Organen liegen jedoch durchaus höher; so werden zum Beispiel in (12) für das Knochenmark 257 mrem/a, für die Schilddrüse 707 mrem/a und für die Lunge 1110 mrem/a angegeben.

Mit Hilfe dieser Dosiswerte und der in Tabelle 1 aufgeführten organspezifischen Risikofaktoren kann eine grobe Abschätzung des Strahlenrisikos vorgenommen werden (siehe zum Beispiel (12, 13)). Dabei ergibt sich, daß durch die natürliche und künstliche Strahlenexposition etwa 1 Prozent aller vererbaren Schäden verursacht werden, und daß die Anzahl der Todesfälle durch strahleninduzierte maligne Neubildungen in derselben Größenordnung liegt, also etwa 1 Prozent der Spontanrate beträgt.

Über andere Umwelteinflüsse, zum Beispiel über die Gefährdung durch chemische Schadstoffe, wissen wir, was die quantitative Abschätzung der Risiken betrifft, sehr viel weniger. Wenn jedoch die Vermutung

richtig ist, daß 80 bis 90 Prozent aller Krebserkrankungen durch Umwelteinflüsse bedingt sind, dann erscheint das mit der gegenwärtigen mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung verbundene Risiko klein im Vergleich zu anderen Umweltrisiken.

## Literatur

Bundesminister des Innern (Bundesrepublik Deutschland): Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung. Jahresbericht 1977, Bonn (1980) – Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP): Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission, ICRP Heft 26, Gustav Fischer, Stuttgart (1978) – Mehl, J.: Die natürliche und zivilisatorische Strahlenbelastung. Kerntechnik 20 (1978) 221–228 – Rausch, L.: Strahlenrisiko!? – Medizin, Kernenergie, Strahlenschutz, 1.–4. Auflage, Piper, München (1979, 1980) – United Nations: Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 1977 report to the General Assembly, with annexes United Nations, New York (1977)

Anschrift des Verfassers:

Privatdozent Dr. med.

Manfred Säbel

Frauenklinik mit Poliklinik  
und Hebammenschule

der Universität Erlangen-Nürnberg  
Universitätsstraße 21/23

8520 Erlangen

## ECHO

Zu: „Zur Mikrobiologie der Tuberkulose“ von Prof. Dr. med. Kurt Friedrich Petersen in Heft 14/1981, Seite 669 ff.

## Tuberkulose-Gefahr besteht weiter

„Auf die fortbestehende Gefahr von Tuberkuloseerkrankungen hat das DEUTSCHE ÄRZTEBLATT in Köln aufmerksam gemacht. Jahr für Jahr erkranken in der Bundesrepublik immer noch fast 30 000 Menschen an verschiedenen Formen der Tuberkulose, berichtete das Organ der Bundesärztekammer.“ (Mannheimer Morgen)