

H. Kuni, Marburg:

Die gesundheitlichen Folgen des Umgangs mit radioaktiven Stoffen in der Medizin

abgedruckt in: Till Bastian, Karl Bonhoeffer (Hrsg.): Thema: Radioaktivität
Wege zu einer sozial verpflichteten Medizin
S. Hirzel, Wiss. Verlagsgesellschaft Stuttgart, 1991, S. 111-149

Inhalt

Einleitung	2
Bekannte Schäden durch Anwendung der Radioaktivität in der Medizin	3
Thorium-232 (Thorotrast).....	3
Radium-224 (Peteosthor) und Radium-226.....	7
Diagnostik und Therapie heute	11
Anwendung mit überwiegendem Nutzen.....	11
Positive Folgen	11
Belastung der Patienten	12
Belastung des Personals	19
Belastung der Bevölkerung	21
Epidemiologie der Nuklearmedizin	22
Anwendung mit überwiegender Schädlichkeit.....	23
Radonbäder	23
Radium-Mineralwässer	24
Nuklearmedizin ohne Fachkunde	27
Versorgung und Entsorgung	29
Herstellung	29
Transport per Luft und Straße	30
Abfallzwischen- und Endlager	33
Belastung bei der Abfallwiederverwertung	34
Minimierung des Schadens	36
Qualitätskontrolle und Radionuklidverbrauch	36
Qualifikation und Strahlenschutz	36
Indikationsstellung	37
Gesundheits- und andere Politik	39
Zusammenfassung	41
Literatur	43
Abkürzungen, Akronyme und Einheiten	44
Anschrift des Autors	45

Vorbemerkung zu diesem Nachdruck: Diese Publikation wird immer wieder nachgefragt, die Broschüre ist jedoch leider vergriffen. Deshalb soll sie online in der ursprünglichen Fassung, deshalb auch die alte Rechtschreibung, zugänglich gemacht werden.

Einleitung

Dies ist ein einseitiger Beitrag; einseitig, weil die negativen Seiten, die der Umgang mit radioaktiven Stoffen in der Medizin hat, ganz im Vordergrund stehen. Gerade ein junges Fachgebiet wie die Nuklearmedizin kennzeichnet es, daß seine Vertreter die Vorzüge in besonderem Maße herausstreichen und auf kritische Überlegungen überempfindlich und abwehrend reagieren. Diesem Verhalten wird hier bewußt entgegengesteuert. Bei Nuklearmedizinern wurzelt die angesprochene Empfindlichkeit sicher tiefer: Dieses Fach ist untrennbar mit der Kernenergie verbunden. Der Umgang mit einer Energieform, die das Kainsmal des Massenmords von Hiroshima und Nagasaki trägt, die ein gigantisches Wettrüsten mit verheerenden Folgen gebracht hat, deren Anwendung im Krieg die Menschheit auszulöschen vermag, deren ziviler Gebrauch viele Opfer gefordert hat und noch fordern wird und eine globale ökologische Bedrohung bedeutet, erzwingt in besonderem Maße eine verantwortungsvolle Rechenschaft. Ich möchte nicht für mich in Anspruch nehmen, dies hier in befriedigendem Umfang leisten zu können, sondern lediglich einen ausführlichen Diskussionsbeitrag im Rahmen der von den Herausgebern dieser Buchreihe gesteckten Ziele liefern.

Diejenigen Leser, die röntgenologisch tätig sind, sollten beachten, daß ein beachtlicher Teil der hier diskutierten Problematik für die Anwendung aller ionisierenden Strahlen in der Medizin gilt und die Röntgendiagnostik zur Strahlenbelastung der Bevölkerung und des Personals einen ungleich größeren Beitrag leistet. Die Nuklearmediziner sollten bedenken, daß unser Fach aufgrund seiner Leistungen für den Patienten ausreichend etabliert ist, um eine kritische Betrachtung aushalten zu können, und von einer kritisch gesteuerten Entwicklung nur profitieren kann.

Bekannte Schäden durch Anwendung der Radioaktivität in der Medizin

Viele radioaktive Stoffe sind eine Quelle für Photonenstrahlen und werden in dieser Eigenschaft auch zur Strahlentherapie eingesetzt. Hier können Schäden durch falsche Dosierung auftreten, sei es durch menschliches oder technisches Versagen, sei es durch mangelnde Erfahrung in der Frühzeit der Anwendung. Auf diese Art von Schäden, die nicht charakteristisch für den Umgang mit radioaktiven Stoffen sind, wird hier nicht näher eingegangen. Die Besonderheit radioaktiver Stoffe als Strahlenquelle wird hier darin gesehen, daß sie beabsichtigt oder unabsichtlich in den Stoffwechsel des Menschen gelangen können. Durch Anreicherungsvorgänge, langes Verweilen in einem spezifischen Gewebe, Emission biologisch besonders wirksamer Teilchenstrahlen und/oder lange physikalische Halbwertszeit können auch scheinbar kleine Radioaktivitätsdosen beachtliche Strahlenbelastungen auslösen.

Die beiden ausführlicher dargestellten Schadensserien haben Gemeinsamkeiten:

- Schon bei der ersten Anwendung war die schädliche Potenz der mit der Substanz verbundenen Alphastrahlen bekannt. Sie wurde von den Anwendern negiert oder als vernachlässigbares "Risiko" eingestuft.
- Es hat nicht an frühzeitigen Warnungen gefehlt, die den breiten Einsatz jedoch zunächst nicht beenden konnten.
- Die Patienten haben keine Kompensation ihrer Schäden erhalten und wohl oft wegen mangelhafter Information über die Zusammenhänge auch garnicht erst reklamiert.
- Weder für die anwendenden Ärzte noch für die Hersteller gab es rechtliche Konsequenzen.
- Die Beobachtung der großen Anzahl von Schäden hat unser Wissen um die Wirkung ionisierender Strahlen erweitert. Ein Befassen damit ist zugleich ein Repetitorium über die in diesem Beitrag zu beachtenden Schadensmechanismen.
- Die Blindheit der Anwender für die mit der Radioaktivität verbundenen Schädigungsmöglichkeiten ist vielleicht typisch für die Haltung mancher Ärzte gegenüber den mit ihrer Diagnostik und Therapie verbundenen Gefahren für Patienten und Dritte.

Thorium-232 (Thorotrast)

Thorotrast (Heyden) ist nicht, wie bei den radioaktiven Substanzen in der Nuklearmedizin typisch, wegen seiner Radioaktivität, sondern in der Röntgendiagnostik trotz seiner Radioaktivität als

Kontrastmittel eingesetzt worden. Obwohl sein Gebrauch inzwischen zur Medizingeschichte gehört, leben und leiden viele der etwa 100 000 mit Thorotrast belasteten Patienten noch heute, wenn auch statistisch in diesem Jahrzehnt mit dem Aussterben der Kohorte zu rechnen ist. Die Zeittafel (Tab. 1, S. 4) spricht für sich.

Die 25%ige Lösung von Thoriumdioxid, stabilisiert mit Dextran und mit 0,15% p-Oxybenzoesäure-äthylester als Konservierungsmittel versehen, bestach bei ihrer Einführung durch hervorragende Bildkontraste, die durch die hohe Ordnungszahl des Thoriums erzielt werden konnten, sowie durch eine niedrigere Nebenwirkungsquote bei der intravasalen Anwendung des wasserlöslichen Kolloids im Vergleich zu den jodierten Kontrastmitteln. Hauptanwendungen waren Gefäßdarstellungen, daneben retrograde Pyelographie und Darstellung von Hohlräumen physiologischer und pathologischer Art. Vor allem der 2. Weltkrieg lieferte zahlreiche Ursachen zur Abklärung von Fistelgängen.

Tab. 1: Zeittafel Th-232 (Thorotrast)

Jahr	Ereignis
1924	Hinweis auf Langzeitgefahren der Alpha-Strahlung
1928	Einführung des Thorotrast Frik, Blühbaum: "Eine neue Anwendungsart der Kolloide in der Röntgendiagnostik"
1929	Bericht des ersten Osteosarkoms nach Ra-226/228 (Leuchtzifferblattmalerin), in Folge zahlreiche Fälle, auch nach Ra-226/228 intern aus "medizinischer" Indikation
1934	Spezifischer Hinweis auf Kanzerogenität des Thorotrast
1942	Warnung der Schweizerischen Röntgengesellschaft vor der weiteren Verwendung
1946	Letzte Anwendung in Zürich und Dänemark
1951	Letzte Anwendung in Deutschland
1954	Einstellung von Herstellung und Vertrieb Letzte Anwendung in Japan
1955	Letzte Anwendung in Portugal

Zugleich ist Thorium (Th-232) ein natürliches Radionuklid mit einer physikalischen Halbwertszeit von 14,1 Milliarden Jahren. Sein Alphazerfall führt zu einer langen Kette von radioaktiven Folgekernen, die bis zum stabilen Blei (Pb-208) als Endpunkt noch weitere sechs Alpha- und vier Betazerfälle aufweisen. Einige Zerfälle sind von einer charakteristischen Gammastrahlung begleitet, so daß eine Thorotrastbelastung sehr einfach durch eine Außenkörpermessung mit einem Szintillationszähler nachweisbar ist. Eine intravasale Applikation führte zu einer raschen Aufnahme in das RES, aufgrund der Partikelgröße von 10-25 µm vor allem der Leber, daneben der Milz, des Knochenmarks und der Lymphknoten. Durch Zelluntergang freigesetztes Kolloid wird häufig von den Nachbarzellen phagozytiert. Das erste Folgeprodukt des Th-232 ist Ra-228, das aufgrund seiner Halbwertszeit von 5,75 Jahren kalziumanalog am Stoffwechsel teilnimmt und vor allem im Knochen angereichert wird. Bei der Umverteilung nehmen auch Hepatozyten Aktivität auf und scheiden sie in die Galle aus. Aus Hohlräumen können Kolloide durch mobile Makrophagen aufgenommen und subepithelial verschleppt werden. Paravasate weisen eine große Immobilität auf. Zu den Tochterprodukten zählt auch ein

radioaktives Edelgas (Radon-220), das trotz seiner kurzen physikalischen Halbwertszeit (55 s) teilweise über die Lunge die Atemwege erreichen kann.

Die Strahlenbelastung ist vor allem auf die strahlenbiologisch besonders wirksamen Alphateilchen zurückzuführen, die überwiegend eine Reichweite von 40-45 µm haben, also ihre Energie (meist um 4-6 MeV) in ca. 4 Zellen deponieren. Der einzelne Zellkern erhält dadurch sehr hohe Dosen um 1 Gy. In der Umgebung der Kolloide kommt es zu gehäuften Zelluntergängen, so daß die klinische Schwelle für deterministische Strahlenwirkungen überschritten wird, also von Strahlenwirkungen, deren Schwere mit der Strahlendosis zunimmt. Die Folge sind aplastische Anämien, Agranulozytosen, Thrombozytopenien, Atrophien von Leber und Milz, Papillenspitzennekrosen (nach retrograder Pyelographie) und ausgeprägte Fibrosen (Thorotrastleber, Leberzirrhose, Milzfibrose, Myelofibrose, pelvine Fibrosen, Thorotrastome bei Paravasaten mit der Möglichkeit der Ulzeration, Fistelbildung, Gefäßarrosion und Infektion).

Zusätzlich kommt es zu stochastischen Strahlenwirkungen, also strahleninduzierten somatischen Mutationen, die zu einer malignen Transformation führen können. Hier ist die klinische Ausprägung des Strahlenschadens von der Dosis unabhängig, es nimmt aber die Häufigkeit solcher Schäden mit der Dosis zu. Obwohl stochastische Strahlenschäden definitionsgemäß und wegen der langen Latenzzeit im Einzelfall nicht kausal mit einer Ursache in Verbindung gebracht werden, sondern erst durch Vergleich eines belasteten Kollektivs mit einer Kontrollgruppe statistisch nachgewiesen werden können, wurde man auf die dramatische karzinogene Potenz des Thorotrast frühzeitig aufmerksam. Dies lag daran, daß eine Koinzidenz seltener Tumorlokalisationen mit dem Applikationsort oder der Manifestation der oben beschriebenen deterministischen Strahlenwirkungen beobachtet wurde.

Studien über die Folgen der Thorotrastanwendung liegen aus Dänemark, Bundesrepublik Deutschland, Japan, Portugal, Schweiz und USA vor. Die umfangreichste Studie ist die deutsche, die das Krebsforschungszentrum Heidelberg betreut. In diesem Zusammenhang muß erwähnt werden, daß der Initiator des Krebsforschungszentrums Heidelberg, der Chirurg K.H. Bauer, nicht nur ein unermüdlicher Warner vor den Gefahren radioaktiver Strahlen war, sondern speziell auch auf die Gefahren des Thorotrasts hingewiesen hat. Die Bilanz dieser Studie zeigt Tab. 2 (S. 6). Sie ist auch weitgehend repräsentativ für die Berichte aus anderen Ländern.

Der Übersterblichkeit an den Thorotrastfolgen steht eine gewisse Untersterblichkeit an Herz-Kreislaufkrankungen gegenüber. Übereinstimmend mit den Studien anderer Länder ist nicht nur eine markante Zunahme von Leberkrebs aufgetreten, sondern auch eine Vermehrung von Tumoren in Organen, die eine wesentlich niedrigere Strahlenbelastung als die Leber erhalten haben, wie Knochenmark, Knochen und Nieren. Bei den Tumoren der Leber ist bemerkenswert, daß neben dem hepato- und cholangiozellulären Karzinom sehr häufig, in den portugiesischen und amerikanischen Studien sogar überwiegend, das sonst extrem seltene Hämangiosarkom gefunden wurde. Auch die Häufung des seltenen Tumors Pleuramesotheliom verdient Beachtung. Uneinheitlich ist das Auftreten

von Lungenkrebs. In der dänischen Studie war eine Verdopplung gegenüber den Kontrollen gesehen worden, in der portugiesischen Studie waren Karzinome der Lunge und des Pharynx in der Gruppe der signifikant vermehrten Malignome enthalten.

Hervorzuheben sind die Häufungen von Plasmozytomen und Tumoren des lymphatischen Systems. Solche Tumoren waren in Studien an beruflich strahlenbelasteten Beschäftigten der Kernindustrie gehäuft beobachtet worden und ein Zusammenhang mit der Strahlenbelastung wurde nicht selten bestritten.

Tab. 2: Todesursachen nach Angiographien mit Thorotrast im Vergleich zu Kontrollen (nach v. Kaick et al.)

	Thorotrast	Kontrollen
Fallzahl	5159	5151
> 3 Jahre nach Applikation gelebt und aufgefunden	2334	1912
bis 1984 gestorben	1964	1409
Wichtige Diagnosen		
Leberkrebs	347	2
Myeloproliferative Erkrankungen	35	3
Chronisch lymphatische Leukämie	3	2
Non Hodgkins Lymphom	16	7
Multipl. Myelom	4	1
Knochensarkom	4	1
Lungenkrebs	46	40
Larynxkrebs	5	1
Pleuramesotheliom	4	0
Pankreaskrebs	20	4
Nierenkrebs	4	2
Leberzirrhose	292	42
Knochenmarksinsuffizienz	20	1
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	587	468

Sehr unterschiedlich waren die Latenzzeiten für die verschiedenen Tumoren, wobei beim Vergleich mit anderen durch eine Einmaldosis belasteten Kohorten die chronische Dosisakkumulation berücksichtigt werden muß. Die Leukämie trat nach 5 Jahren erstmals auf und nahm dann gleichmäßig zu. Die erste Leberzirrhose war nach 16 Jahren beobachtet worden. Die Leberkrebse nahmen nach 20 Jahren dramatisch zu, wobei die mittlere Latenzzeit bei ca. 35 Jahren lag. Insgesamt ist etwa jeder dritte Patient aufgrund eines Lebertumors oder einer Leberzirrhose vorzeitig verstorben! Bei 100 000 Anwendungen von Thorotrast ergibt sich eine gewaltige Schadziffer.

Neben diesem "bedauerlichen Beispiel einer voraussehbaren und vermeidbaren iatrogenen Fehlleistung" (Morant, Rüttner 1987) haben die Thorotrastschäden eine weitere eminente Bedeutung: Die belasteten Kohorten sind die einzige humanmedizinische Beobachtung, aus denen die Gefahr

einer Krebserkrankung der Leber nach Belastung mit Alphastrahlen abgeleitet werden kann. Die Vermutung, daß die Zunahme der Leberkrebsse auch wesentlich durch die chemische Wirkung des Thorotrast erzeugt wurde, ließ sich in Tierversuchen nicht stützen. Deshalb muß auch bei einer Strahlenbelastung der Leber durch andere Alphastrahler wie Americium, Curium und Plutonium, die nach Inkorporation eine Anreicherung in der Leber zeigen, die Auslösung von Leberkrebs befürchtet werden. Diese Alphastrahler werden aber nicht nur bei Atomwaffenexplosionen, sondern auch durch die zivile Kerntechnik, vor allem bei der Wiederaufarbeitung von Brennelementen, in die Ökosphäre freigesetzt.

Sehr wichtig ist auch die Beobachtung von Tumoren des hämatologischen Systems, da bei der Beurteilung der Gefahren durch die transurane Elemente immer wieder bezweifelt wird, ob eine Knochenmarksbelastung durch Alphastrahler eine Leukämie hervorrufen kann.

Abschließend sollen nochmals die schweizer Autoren Morant und Rüttner zu Wort kommen, deren Arbeit in der sonst sehr umfassenden Literaturübersicht des BEIR IV-Reports nicht erwähnt ist, und das, obwohl sie über wesentlich mehr Fälle berichten als die amerikanische Studie (wenn auch in deutscher Sprache und nicht in einem radiologischen Publikationsorgan):

"Eindrücklich veranschaulichen die Thorotrast-Schäden die irreversiblen, schweren Folgen einer langfristigen Einwirkung von nicht eliminierbarem, radioaktivem Material. Rückblickend ist die weit verbreitete, langjährige Anwendung von radioaktivem Thorotrast schwer verständlich, selbst wenn man seine beeindruckende technische Kontrasteigenschaft in Rechnung stellt. Die Vernachlässigung und Verdrängung bekannter potentieller Gefahren ist ein warnendes Beispiel falschen diagnostischen Fortschritts. Abgesehen von den verheerenden Folgen der Atomwaffenexplosionen, den noch nicht absehbaren Langzeitwirkungen der Tschernobyl-Katastrophe und den Strahlenschäden aus der Pionierzeit der Radiologie, stellen die Thorotrast-Spätfolgen das Ergebnis eines der größten, unbeabsichtigten Experimente mit ionisierenden Strahlen am Menschen dar. Diagnostischer Eifer, Nichtbeachtung zeitgenössischer Literatur und Sorglosigkeit - schon bei der Einführung des Kontrastmittels 1928 waren die schädlichen Wirkungen radioaktiver Strahlung bekannt - tragen für diese wenig schöne Episode der Röntgendiagnostik die Verantwortung."

Radium-224 (Peteosthor) und Radium-226

Wenn auch der hier betroffene Patientenkreis um mehr als eine Größenordnung kleiner ist als bei Thorotrast, weist die Anwendung des Ra-224 nicht nur Parallelen, sondern zusätzliche bemerkenswerte Züge auf, die eine ausführliche Darstellung rechtfertigen. Dazu gehört auch, daß Ra-224 auch heute noch therapeutisch eingesetzt wird. Ra-224 ist eines der Tochterprodukte des Th-232 - deshalb die historische Bezeichnung Thorium-X - mit einer physikalischen Halbwertszeit von 3,62 Tagen. Es geht durch Alphazerfall in das radioaktive Edelgas Radon-220 über. Dieses diffundiert vom Ort seines Entstehens weg, bis schließlich über die Blutzirkulation die Atemwege erreicht sind. Es

ist aber wegen seiner kurzen Halbwertszeit von 55s noch weitgehend ungeklärt, in welchen Geweben es seine Strahlenenergie (3 Alpha- und 2 Betazerfälle incl. der weiteren Zerfallsreihe) abgibt. Zur Bewertung der Anwendung von Ra-224 ist ein Blick auf die Zeittafel nützlich (Tab. 3, S. 8). Hierbei wird auch auf das traurige Kapitel der internen Anwendung von Radium-226, die ab 1922 in USA stattfand, eingegangen.

Tab. 3: Zeittafel Ra-224 und Ra-226

Jahr	Ereignis
1912	2 Todesfälle durch akutes Strahlensyndrom nach hoher Dosis von Ra-224 in USA
1913	Erste Empfehlung des Thorium-X zur Therapie bei Anämie(!), Leukämie und rheumatischen Erkrankungen in Deutschland
1922	Erste Anwendung von Ra-224 bei Spondylitis ankylosans (Sp. a.) in Frankreich In USA wird Ra-226 intern angewendet
1924	Hinweis auf Langzeitgefahren der Alpha-Strahlung
1928	Beginn häufiger interner Anwendung von Ra-226 in den USA
1929	Bericht des ersten Osteosarkoms nach Ra-226/228 (Leuchtzifferblattmalerin), in Folge zahlreiche Fälle, auch nach Ra-226/228 intern aus "medizinischer" Indikation
1930	Die Anwendung bei Sp. a. wird in England wieder aufgegriffen
1931	Elgin State Hospital Illinois: 39 psychiatr. Patienten erhalten 2590-16650 kBq Ra-226
1940	Troch: "Peteosthor - neue Wege des Heilens"
1944	Peteosthor wird zunehmend, auch bei Kindern, eingesetzt zur Behandlung von Knochentuberkulose, anderen Tb-Manifestationen und Sp. a. mittl. Dosis: 0,56-1,04 MBq/kg
1950	Warnung vor den Gefahren des Peteosthor durch Spiess Koch: Thorium-X Methode der Wahl bei Sp. a.
1952	Einstellung der Peteosthor-Therapie, nicht aber der Anwendung von Ra-224 bei Sp. a. Standard Dosis: $10 \cdot 1,04 \text{ MBq/Woche} = 0,15 \text{ MBq/kg}$

Der Einsatz des Ra-224 wie auch des Ra-226 trägt unverkennbar magische Züge, wenn man bedenkt, daß schon die Entdeckerin des Ra-226, Frau Maria Curie, an einer Knochenmarksinsuffizienz verstarb. Dies gilt vielleicht sogar für die anscheinend rationale Indikation bei der Spondylitis ancylosans, da diese aufgrund eines maßgeblichen Werks Kienböcks 1925 für eine Form der Tuberkulose gehalten wurde. Die Irrationalität wurde im Peteosthor noch übersteigert. Unmittelbar vor Injektion wurden zu 1 ml Lösung mit ca. 1 MBq Ra-224 (...thor) 2,2 ml Peteos gemischt, das 0,035% kolloidales Platin (Pet...) und 0,2-1% Eosin-Natrium (...eos...) enthielt, "um das Ra-224 in das entzündete Gewebe zu steuern". Zweimal wöchentlich wurde die Serie über Monate und Jahre ausgedehnt. Erwachsene erhielten bis 37 MBq Ra-224 und 36-79 ml Peteos, also 13-28 mg Platin.

Die Schäden der 383 in einer Studie analysierten Ra-226-Patienten in den USA reihen sich nahtlos in die Statistik der Leuchtzifferblattmalerinnen ein, die eine Häufung von Knochenkrebs und Krebs der

Nasennebenhöhlen zeigten. Fuchs schildert die Kasuistik eines Arztes, der bereits zwei Jahre nach Applikation von ca. 28 MBq (Indikation: "arthritische" Schulterschmerzen) alle Zähne und die vordere Hälfte des Unterkiefers verlor und nach 18 Jahren an einer aplastischen Anämie verstarb. Die Applikation an psychiatrischen Patienten gehört wohl gleichermaßen in das Kapitel von psychischen wie kriminellen Deformationen von Ärzten.

Nachdem die ersten Todesfälle durch Überdosierung von Ra-224 offensichtlich zunächst abschreckten, kam in den 20er Jahren sein Einsatz in Gang. Die mit Peteosthor behandelten Patienten werden auf ca. 2000 geschätzt. Nach Peteosthor standen zunächst die deterministischen Strahlenschäden durch die Zelltötungseffekte in den Geweben im Vordergrund, wo das kalziumanaloge Ra-224 einwirkte: Exostosen, Minderwuchs, Frakturneigung und Zahnschäden, aber auch Katarakte und Leberzirrhosen. Über 10% der Patienten starben an einer Niereninsuffizienz. 3,5 Jahre nach der Applikation wurde das erste Osteosarkom beobachtet. 35 der 218 Patienten im Alter von 1-20 Jahren und 18 der 680 älteren erkrankten an einem Knochensarkom (s. Tab. 4).

Tab. 4: Bilanz der von Spiess beobachteten Patienten nach Ra-224 (Juni 1984)

	1-20a	>20a	Alle	Erwartet
nachkontrolliert	218	681	899	
gestorben	81	369	450	
mittl. Akt [MBq/kg]	1,04	0,56	0,67	
mittl. Knochendosis [Gy]	10,6	2,06	4,16	
Knochenkrebs	35	18	53	0,2
Exostosen	28	0	28	1
Wachstumsstörung	28	0	28	0
Zahnbruch	27	17	44	0
Nierenschaden	8	56	64	3
Nierenkrebs			4	1
Leberschaden	2	23	25	6
Katarakt	12	32	44	
Leukämie	0	5	5	2-5

Strahlenbiologisch bedeutsam ist die Beobachtung, daß der zeitliche Verlauf ähnlich der Leukämiehäufung der Atombombenopfer einer Wellenfunktion gleicht (s. Abb. 1, S. 10). Dies ist eine Abweichung von allen anderen radiogenen Tumoren, bei denen nach einer Strahlenbelastung lebenslänglich die relative Wahrscheinlichkeit einer Tumorinzidenz erhöht zu sein scheint. Da man zunächst auch bei anderen Tumoren, die eine längere Latenzzeit hatten, wie bei der Leukämie, wenn auch später, einen Rückgang der Häufung nach einem Maximum erwartete, unterschätzte man die Gesamthäufigkeit von Krebserkrankungen nach einer Strahlenbelastung erheblich. Aus den Beobachtungen der Ra-224-Fälle wurde für das Knochensarkom eine Erkrankungswahrscheinlichkeit von 0,013/Gy für Dosen bis 8 Gy im linearen Modell und 0,0085/Gy nach dem linear-quadratischen Modell abgeleitet.

Die Erfolge des Ra-224 bei der Spondylitis ancylosans sind objektivierbar. Deshalb gibt es auch heute noch Anhänger dieser Therapie. Sie weisen auf die niedrigeren Dosen im Vergleich zum Peteosthor, auf das Fehlen der Ingredienzien Platin und Eosin und darauf hin, daß ihr Präparat nicht wie Peteosthor mit langlebigem Ra-228 verunreinigt sei. Es gibt allerdings bislang keinen Hinweis, daß die schädlichen Folgen des Peteosthor ganz oder teilweise auf die Beimengung von Platin und Eosin zurückzuführen sind. Zwar ist der Reinheitsgrad des heutigen Ra-224-Präparates höher, da die frühere Verunreinigung mit Ra-228 nur ca. 2% der Strahlenbelastung des Ra-224 ausmachte, ist dieser Gesichtspunkt von untergeordneter Bedeutung. Bis vor kurzem gingen etwa 90% der ausgelieferten Dosen in die DDR. Otto Hug hat eine Studie dieser Patienten angeregt, die seit 1971 durchgeführt wird. Sie umfaßt 1568 Patienten und 1544 Kontrollen (gleiche Diagnose ohne Behandlung mit Ra-224 oder Röntgenstrahlen) mit einer mittleren Beobachtungszeit von 16,4 Jahren (im Dez. 1985). Bisher dahin waren nach einer Latenzzeit von 11-16 Jahren drei Tumore beobachtet worden (zwei Sarkome und ein Plasmozytom). Dies sind weniger als die bis dahin mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,0085/Gy zu erwartenden 5,6 Tumore, aber (nicht signifikant) mehr als der spontane Erwartungswert von 0,4-0,7 Fälle. Dazu kommen noch elf Patienten mit einer Anämie oder Panmyelophthise, denen in der Kontrollgruppe nur fünf Fälle gegenüberstanden.

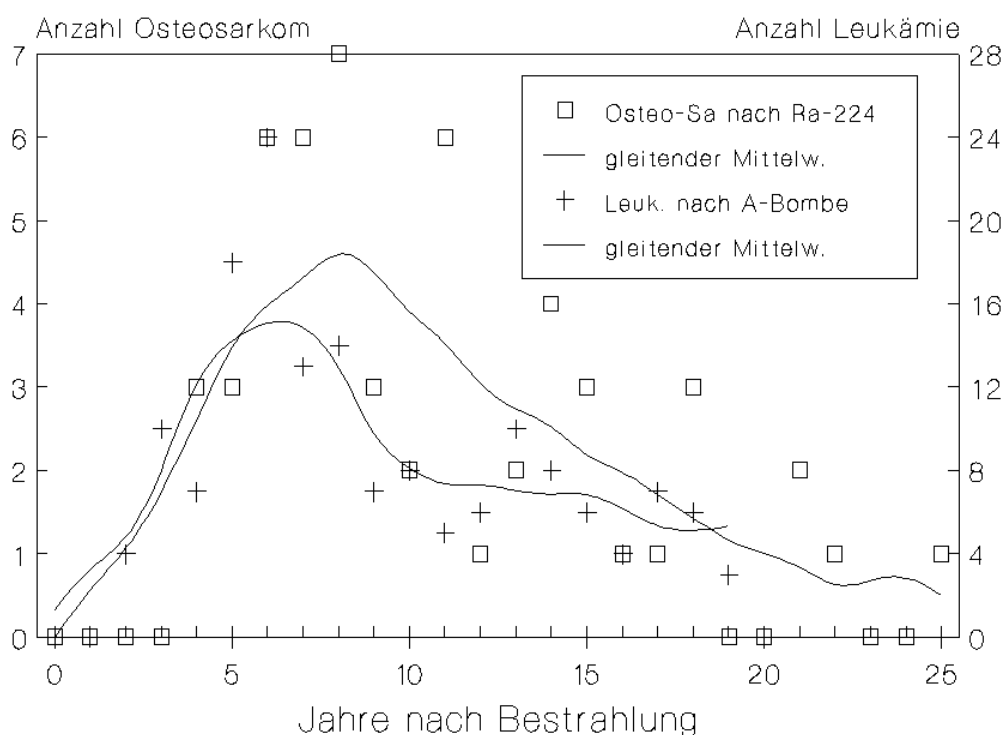


Abb. 1: Zeitlicher Verlauf der zusätzlich aufgetretenen Osteosarkome nach Ra-224 und Leukämien nach dem Atombombenabwurf (nach Mays und Spiess 1984)

Die Fortentwicklung der Arzneimitteltherapie in Verbindung mit einer intensiven physikalischen Therapie wird wahrscheinlich den Kreis der Rheumatologen, die grundsätzlich auf das Ra-224 verzichten, vergrößern.

Diagnostik und Therapie heute

Anwendung mit überwiegendem Nutzen

Hierzu zähle ich die nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie, wenn sie von einem fach- und sachkundigen Arzt bei gegebener Indikation durchgeführt wird. Um die einschränkenden Bedingungen besser würdigen zu können, werden in den folgenden Abschnitten die negativen Seiten auch der modernen Nuklearmedizin breiter dargestellt, obwohl sie in der Praxis gegenüber dem Gewinn, den der Patient im Regelfall aus der richtigen Anwendung der Nuklearmedizin ziehen kann, eine viel untergeordnetere Bedeutung haben.

Positive Folgen

Die Vorteile der Nuklearmedizin für den Patienten ausgiebig darzustellen, würde ein kleines Kompendium der Nuklearmedizin erfordern, weil dies für die einzelnen Anwendungsgebiete spezifiziert abgehandelt werden müßte. Hierzu kann auf die einschlägige Literatur verwiesen werden. An dieser Stelle sollen nur die allgemeinen Vorteile für den Patienten in Erinnerung gerufen werden, die die meisten nuklearmedizinischen Methoden gemeinsam haben.

- Die Durchdringungsfähigkeit der Gammastrahlen erlaubt eine Informationsgewinnung aus tiefliegenden Geweben mit einem Minimum an Invasivität. Oft ist eine einfache intravenöse Injektion das Maximum dessen, was einem Patienten zugemutet werden muß. Schmerzen, Verletzungs- und Infektionsgefahr, die vielen invasiven Methoden eigen sind, sind damit minimiert. In der Therapie gilt dies analog.
- Da eine sehr kleine chemische Menge einer radioaktiven Substanz mit kurzer physikalischer Halbwertszeit, also einer großen Zerfallswahrscheinlichkeit, eine für die Diagnostik ausreichende Menge an Gammaquanten pro Zeit abstrahlt, sind die verabreichten Stoffmengen in der Nuklearmedizin außerordentlich gering. Im Regelfall liegen sie so niedrig, daß die klinische Schwelle für toxische, immunologische oder endokrinologische Reaktionen nicht überschritten wird. Das zu messende System wird durch die Messung in der Regel nicht gestört.
- Nuklearmedizinische Methoden erlauben meist eine quantitative Erfassung dynamischer funktioneller Vorgänge. Selbst die bildgebenden nuklearmedizinischen Methoden sind meist funktionsorientiert, liefern also eine Abbildung von morphologischen Strukturen durch und wegen spezifischer Stoffwechselvorgänge. Nicht selten können für den Patienten entscheidende diagnostische Schlüsse erst aus der Synopsis von Informationen aus einer nuklearmedizinischen und einer anderen, mehr morphologisch orientierten Untersuchungsmethode gezogen werden.

- Die Quantifizierbarkeit entfaltet ihren Wert für den Patienten oft weniger in der Primärdiagnostik als vielmehr als Mittel der Verlaufs- und Erfolgskontrolle während der Therapie.

Der Nuklearmediziner wird im Regelfall aufgrund einer gezielten Zuweisung des Patienten tätig. Nur der für den überweisenden Arzt offensichtliche diagnostische und therapeutische Erfolg sichert ihm auf die Dauer seine Tätigkeit. Jeder Nuklearmediziner wird über eine eindrucksvolle Sammlung von Kasuistiken verfügen, bei denen die nuklearmedizinische Diagnostik eine entscheidende, gelegentlich sogar lebensrettende Information beigetragen oder eine nuklearmedizinische Therapie durchgreifenden Erfolg erzielt hat. Jeder wird auch tragische Verläufe kennen, an denen er einen unterlassenen, einen verspäteten oder einen falsch bewerteten Einsatz der Nuklearmedizin zu beklagen hat.

Belastung der Patienten

Bei den radiologischen Folgen der Nuklearmedizin steht naturgemäß die Strahlenbelastung des Patienten im Vordergrund. Sieht man von der genetisch signifikanten Dosis ab, stimmt im Regelfall die Person, die von dem erhofften Nutzen der Untersuchung profitiert überein mit der Person, an der sich eine mögliche Schädigung manifestieren wird. Deterministische Strahlenschäden durch hohe Dosen sind in der Diagnostik nur in der Anfangszeit der Nuklearmedizin bekannt geworden. In einem Fall ist bei Au-198, das früher sowohl diagnostisch als auch therapeutisch eingesetzt wurde, durch Verwechslung von μCi und mCi aus der Flasche mit der Therapiekonzentration eine vermeintliche Diagnostikdosis aufgezo- gen worden. Der Patient erhielt 7,4 GBq, damit eine Knochenmarkdosis von ca. 4,4 Gy und verstarb nach 69 Tagen an einer Hirnblutung bei schwerer Thrombozytopenie. Es wurden auch lokale Hautschäden nach subkutaner interdigitaler Injektion von hohen diagnostischen Dosen Gold-198 in kolloidaler Form am Fuß zur Lymphszintigraphie berichtet. Beim heutigen Stand der Diagnostik müssen die stochastischen Spätschäden durch Induktion eines Malignoms oder eines genetischen Schadens beachtet werden. Ihre Häufigkeit ist von der Kollektivdosis abhängig. Deshalb muß man sich ein Bild von der Häufigkeit nuklearmedizinischer Untersuchungen und der dabei applizierten Dosen machen.

Überblickt man die nuklearmedizinische Versorgung der Weltbevölkerung, ist die Nuklearmedizin ein typischer Indikator für den medizinischen und auch medizin-technischen Versorgungsgrad der Bevölkerung. Das UNSCEAR-Komitee (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) hat für diesen Versorgungsgrad vier Level of Health Care definiert und die Staaten wie folgt zugeordnet:

Level I: Argentinien, Australien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Japan, Kanada, Libyen, Niederlande, Norwegen, Österreich, Spanien, Schweden, USA, UDSSR

Level II: Bolivien, Brasilien, Chile, China, Costa Rica, Dominikanische Republik, Ekuador, Iran, Kolumbien, Kuba, Mexiko, Nikaragua, Paraguay, Peru, Philippinen, Türkei, Uruguay, Venezuela

Level III: Burma, Indien, Kenia, Liberia, Malaysia, Singapur, Sri Lanka, Sudan, Thailand

Level IV: Äthiopien, Bangladesch, Elfenbeinküste, Ghana, Indonesien, Nigeria, Pakistan

Nuklearmedizinische Versorgung der Weltbevölkerung

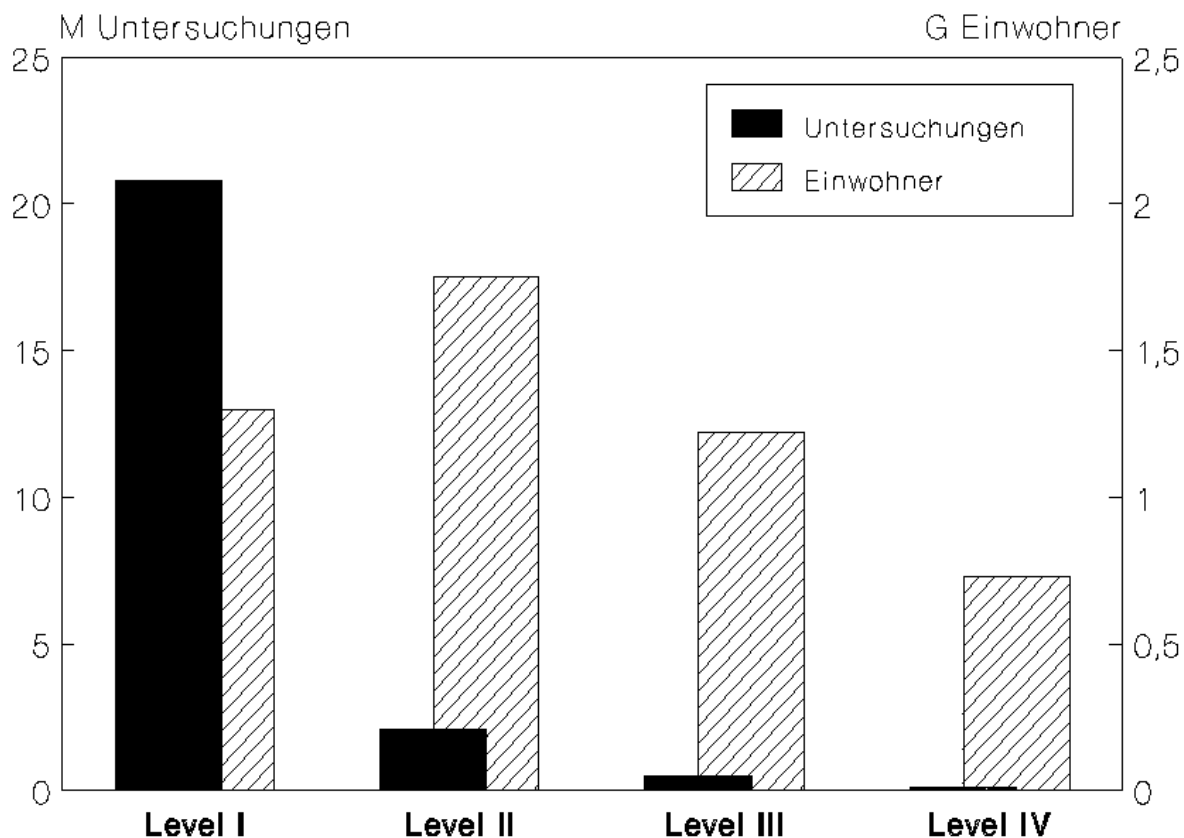


Abb. 2: Verteilung der Weltbevölkerung und der Nuklearmedizinischen Leistungen auf die vier von UNSCEAR definierten Level of Health Care
Daten aus UNSCEAR 88

Die Abbildung 2 zeigt, daß 26% der Weltbevölkerung mit 89% der nuklearmedizinischen Leistungen versorgt werden. Auch bei der Betrachtung möglicher negativer Folgen brauchen wir uns praktisch nur dem Level I zuzuwenden. Dieser zeigt bei näherer Betrachtung aber in sich ebenfalls eine erhebliche Inhomogenität der nuklearmedizinischen Versorgung. Man kann diesen Bereich ebenfalls in vier Versorgungsstufen einteilen, wobei sich die Bundesrepublik in der Kategorie der höchsten Versorgungsdichte befindet (s. Abb. 3, S. 14).

Nuklearmedizinische Versorgung Level of Health Care I

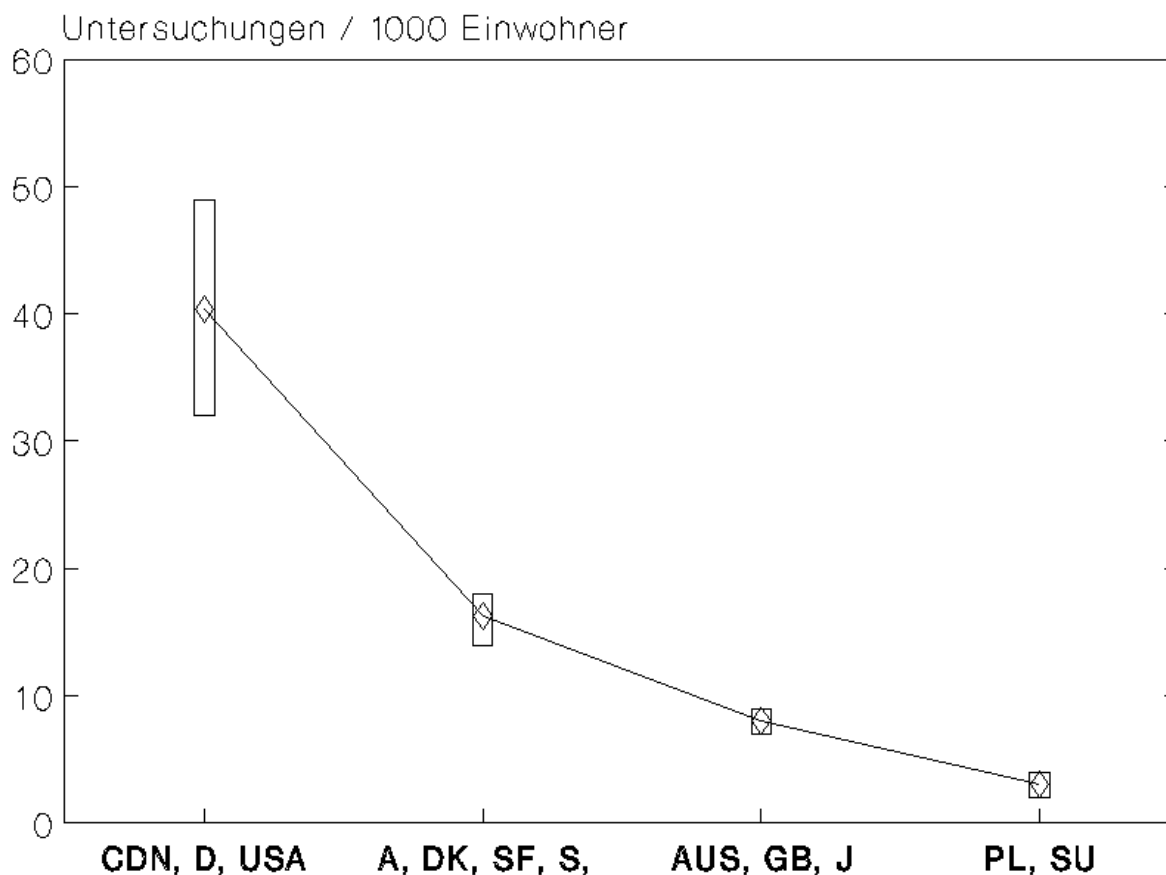


Abb. 3: Häufigkeit nuklearmedizinischer Leistungen pro Tausend Einwohner in den Ländern des Level of Health Care I nach UNSCEAR (meist 1982)
Die Balken geben die Spannweite der Extremwerte an

Der Wert für Deutschland (ohne neue Bundesländer) ist nach hessischen Angaben hochgerechnet. Innerhalb Deutschlands findet sich wiederum eine unterschiedliche Versorgungsdichte, wenn man die verschiedenen Bundesländer betrachtet. Da das für die Aktivitätsmenge wesentlichste Radionuklid das Technetium-99m ist, haben wir Anfang der 80er Jahre eine Umfrage über den Verbrauch an Molybdän-99-Generatoren gemacht, aus denen das Tc-99m gewonnen wird. Von den meisten Bundesländern haben wir sehr differenzierte Antworten, auch mit der Entwicklung über mehrere Jahre, erhalten (Tab. 5, S. 15). Daraus ergab sich in den Jahren 1981-1983 ein jährlicher Zuwachs von acht Prozent. Das Land Nordrhein-Westfalen verwies auf die Regierungspräsidenten, von denen wir aber keine Informationen erhielten. Das Land Baden-Württemberg und Berlin führte kein Kataster über diesen Radioaktivitätsumsatz und meinte, für uns wegen des unvermeidbaren Verwaltungsaufwandes die Daten nicht erheben zu können. Baden-Württemberg versorgte uns mit den Daten für Im- und Export radioaktiver Stoffe des Bundesamtes für gewerbliche Wirtschaft, auf das uns auch andere Länder hinwiesen. Dieses Amt informierte uns auch prompt und ausführlich.

Tab. 5: Verbrauch von Mo-99 in GBq und pro M Einwohner in einigen Bundesländern 1983 sowie die berechnete normierte Kollektivdosis pro Einwohner durch daraus gewonnenes Tc-99m für Bremen und Rheinland-Pfalz wurden die Angaben aus 1982 mit 8% Steigerung extrapoliert
In der letzten Zeile: Summenwerte für Einwohner der Länder mit Mo-99-Angabe und für Mo-99 Aktivität, daraus berechnete Mittelwerte für Mo-99-Verbrauch pro M Einwohner und normierte Kollektivdosis Tc-99m

Land	Einw. M	E/qkm	GBq	GBq/M E	$\mu\text{Sv/E}$
Baden-W.	8,909	249			
Bayern	10,568	150	59200	5602	145
Berlin	2,134	4446			
Bremen	0,756	1872	6157	8145	211
Hamburg	1,817	2413	8991	4948	128
Hessen	5,422	257	26196	4831	125
Niedersachsen	7,1	150	18722	2637	68
Nordrhein-W.	17,129	503			
Rheinland-Pf.	3,671	185	17922	4882	126
Saarland	1,127	439	7256	6438	167
Schleswig-H.	2,557	163	7819	3058	79
	33,018		152263	4612	120

Die Daten zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Bevölkerungsdichte und dem Radionuklidverbrauch pro Einwohner. Bei den Stadtstaaten Bremen und Hamburg muß man auch eine Mitversorgung von angrenzenden Bereichen benachbarter Bundesländer in Rechnung stellen. Bildet man auch aus dieser Tabelle Mittelwerte der erkennbaren Kategorien von Bevölkerungsdichte, kann man die Daten für den Radionuklidverbrauch pro Einwohner gut mit einer exponentiellen Sättigungskurve beschreiben, die einem Verbrauch von 6600 GBq Mo-99 pro M Einwohner zustrebt (s. Abb. 4, S. 16), wobei bei einer Bevölkerungsdichte von 115 E/km^2 die Hälfte des Sättigungswertes erreicht wird.

Zwei Bundesländer schlüsselten den Verbrauch noch nach Institution auf (Tab. 6).

Tab. 6: Verteilung des Mo-99-Verbrauchs zwischen niedergelassenen Ärzten und Kliniken Hamburg 1983, Rheinland-Pfalz 1982

Land	E/qkm	Praxis	Klinik
Hamburg	2413	48,6%	51,4%
Rheinland-Pf.	185	34,6%	65,4%

Sättigungskurve der Technetium-99m Dosis

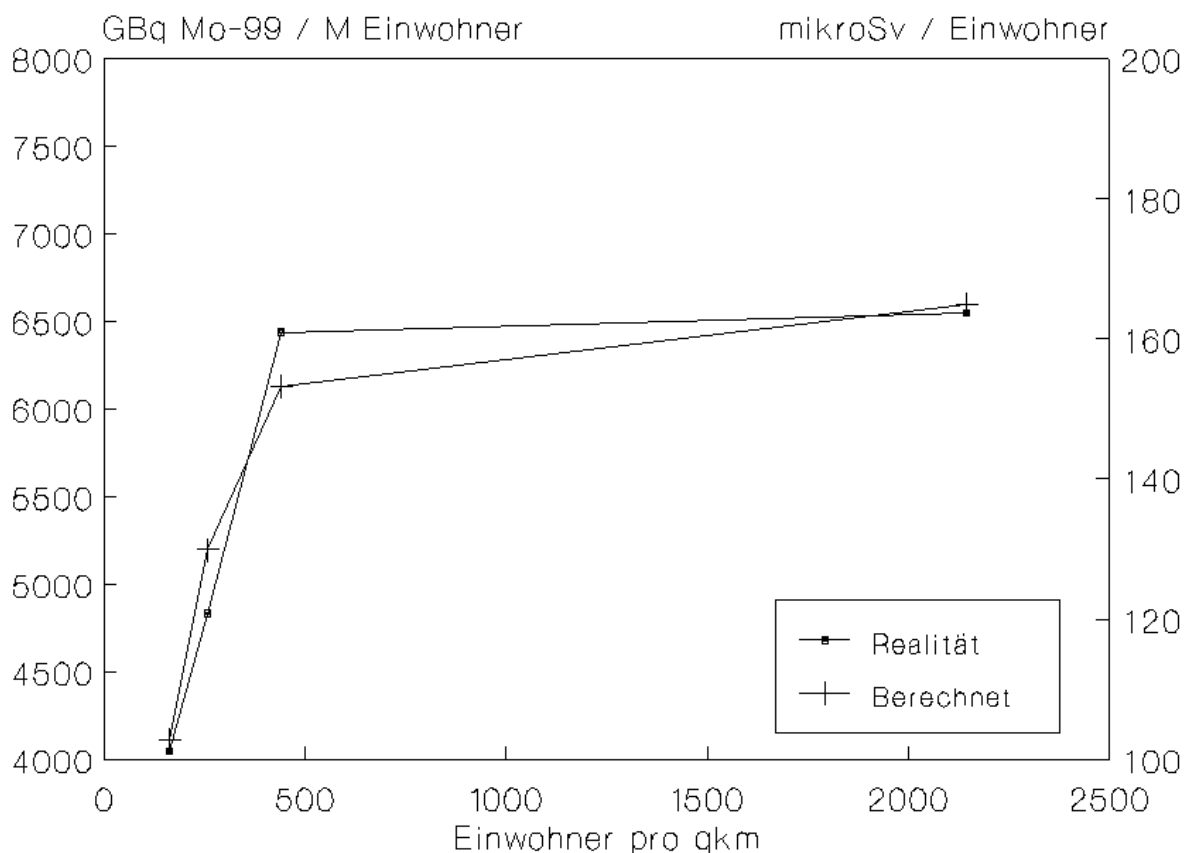


Abb. 4: Abhängigkeit des jährlichen Mo-99-Verbrauchs pro M Einwohner von der Bevölkerungsdichte (teilweise Mittelwerte benachbarter Werte) und geschätzte jährliche Strahlenbelastung pro Einwohner (abgerundet)
Dargestellt sind die Werte aus Tab. 5 im Vergleich zur Berechnung mit einem Sättigungswert von 6600 GBq Mo-99 pro M Einwohner und einer Exponentialkonstanten von $0,006027 / E$ pro qkm
Die Werte der Bundesländer Bayern, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein sowie Bremen und Hamburg sind jeweils zu Mittelwerten zusammengefaßt

Man erkennt, daß eine hohe Bevölkerungsdichte zu einer vermehrten Versorgung durch niedergelassene Ärzte führt. Das Spektrum der nuklearmedizinischen Leistungen und damit der Strahlenbelastung ist in einem Schwerpunktkrankenhaus und einer Praxis sehr unterschiedlich. Dies macht die Abbildung 5 deutlich, die auch die Auswirkung auf die durchschnittliche Strahlenbelastung pro Untersuchung zeigt.

An dieser Stelle muß ein kleiner Exkurs zur Dosimetrie gemacht werden. Die Dosisbelastung ist in den einzelnen Organen und Geweben sehr unterschiedlich. Der Konzentrationsverlauf des Nuklids über die Zeit in einem Organ bestimmt die gesamte Anzahl der sich dort ereignenden radioaktiven Zerfälle. Während die Änderung durch den physikalischen Zerfall genau bekannt ist, können über den Verlauf durch den Stoffwechsel nur mittlere Annahmen aus Erfahrungswerten gemacht werden, von denen im

individuellen Einzelfall, vor allem in pathologischen Fällen extreme Abweichungen möglich sind. Gut bekannt ist die durch den Zerfall freigesetzte Energie und wie sie sich auf verschiedene Strahlenarten verteilt. Viele Fragen gibt es noch bei der Mikrodosimetrie der Energieübertragung zwischen Zerfallsort und dem Wirkort, im Regelfall die DNS des Zellkerns. Für die Dosisberechnung durch die Röntgen- und Gammastrahlung der Organe selbst und anderer Organe in der Nachbarschaft müssen allgemeine Modelle über die geometrischen Beziehungen zugrunde gelegt werden, von denen im Einzelfall erhebliche individuelle Abweichungen möglich sind. Dies gilt vor allem im Wachstumsalter. Gleiches gilt für die Organmasse, auf die sich die Strahlenenergie verteilt. Sind schließlich die einzelnen Organ- und Gewebedosen kalkuliert, stellt sich die Frage nach der Zusammenfassung der Einzelwerte. Bei den Angaben in diesem Beitrag muß ich mich den internationalen Gepflogenheiten anschließen, die seit 01.11.1989 auch Bestandteil der Strahlenschutzverordnung geworden sind. Nach einer Empfehlung der ICRP (ICRP-26 1977) werden die Organdosen mit Wichtungsfaktoren gewichtet, so eine effektive Organdosis berechnet und daraus die Summe für den Ganzkörper gebildet.

Wenn man die effektive Dosis verschiedener Verfahren addiert, muß man sich bewußt sein, daß dies nur eine sehr globale Beschreibung der Belastung und ihrer strahlenbiologischen Folgen ist. Die Wichtungsfaktoren basieren auf Annahmen für die Häufigkeit der Krebsinduktion vom Anfang der 70er Jahre, die heute überholt sind. Sie mitteln über erhebliche Unterschiede in der Schadenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht. Sie fassen auf eine nicht unumstrittene Art "schwere, todesfalläquivalente" genetische Schäden (nur in den ersten beiden Folgegenerationen) mit der Krebsinduktion zusammen (Anteil 25%). In unserem Zusammenhang ist wichtig, daß nur tödliche Krebserkrankungen beachtet wurden. Vor allem eine Belastung der Schilddrüse wird deshalb systematisch unterbewertet.

Wird bei den weiteren Erörterungen eine mittlere Patientendosis oder gar eine durchschnittliche Dosis pro Einwohner berechnet, handelt es sich um nicht anderes, als um eine pro Kopf normierte Schätzung der Kollektivdosis. Nach Abbildung 5 (S. 18) wird in Klinik und Praxis übereinstimmend etwa die Hälfte der Kollektivdosis durch die Knochenszintigramme appliziert. Ein zweites quantitativ wichtiges Kapitel sind die Schilddrüsenuntersuchungen, vor allem in der ambulanten Versorgung. Parallel zur internationalen Entwicklung ist auch in Deutschland eine starke Zunahme der Myokardszintigraphie zu beobachten. Dies beruht auch auf methodischen Verbesserungen, an denen die apparativ und zeitlich sehr aufwendige Emissionscomputertomographie einen entscheidenden Anteil hat. Dies ist z.Z. sicher noch ein limitierender Faktor für die Untersuchungsfrequenz, vor allem bei niedergelassenen Ärzten. Die Strahlenbelastung ist bei Verwendung des Thallium-201 um ein Vielfaches höher als bei Anwendung des Tc-99m markierten MIBI (Isonitrit), das sich allerdings noch in der klinischen Erprobung befindet. Im hier gezogenen Vergleich zwischen Praxis und Krankenhaus macht sich schon bemerkbar, daß mehr als die Hälfte der Myokardszintigraphien mit MIBI-Tc-99m statt mit Tl-201 durchgeführt wurden.

Patientendosis durch nuklearmedizin. Untersuchungen

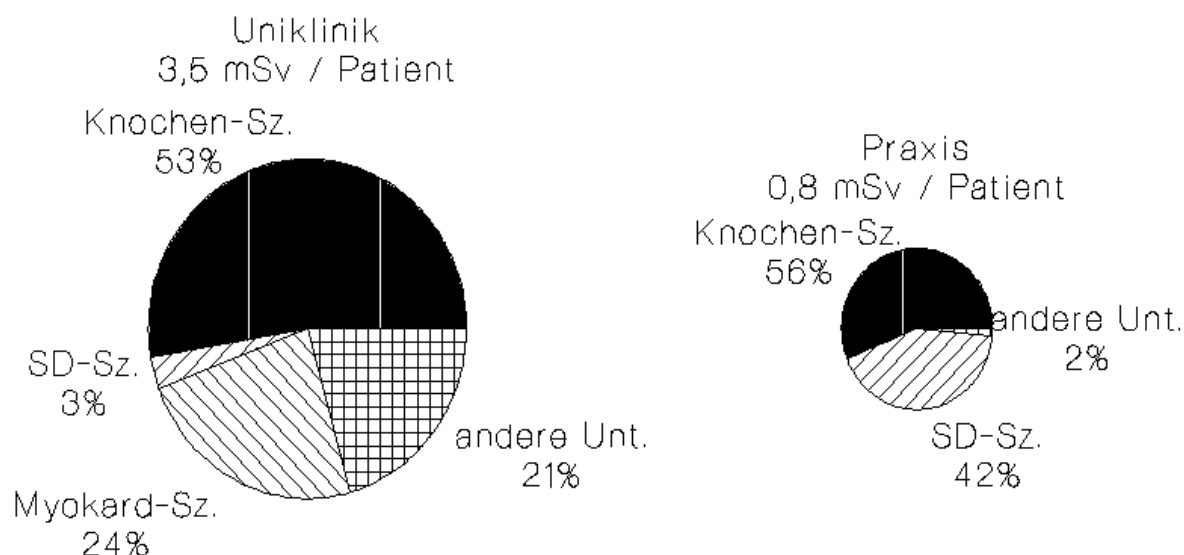


Abb. 5: Relativer Anteil häufiger nuklearmedizinischer Leistungen an der Strahlenbelastung des Patienten und durchschnittliche Strahlenbelastung am Beispiel einer Universitätsklinik und einer Großstadtpraxis

Gedanken zu den Faktoren, die die Untersuchungsfrequenzen beeinflussen, werden in einem späteren Abschnitt abgehandelt. Hier soll noch eine Abschätzung der Kollektivdosis durch die nuklearmedizinische Diagnostik in Deutschland versucht werden. Dazu gibt es mehrere Ansätze.

Geht man von der Untersuchungsfrequenz aus, kann man mit einer durchschnittlichen Strahlenbelastung pro Untersuchung multiplizieren. Adzersen multipliziert 40 Untersuchungen pro Tausend Einwohner aus 1984 mit 2,8 mSv pro Untersuchung, erhält also 112 mSv pro Tausend, 0,11 mSv pro Einwohner. Mit ca. 60 M Einwohner in den alten Bundesländern errechnet man ca. 7 k Personen-Sv Kollektivdosis.

In einem zweiten Ansatz kann man von der verbrauchten Radionuklidmenge ausgehen. Dabei stimmen die Schätzungen, die sich aus der Import-Export-Statistik und meinen Erhebungen in den Bundesländern in der Größenordnung überein. Ich gehe von einem Eintreffen drei Tage vor dem Referenzdatum aus und einem normalen Elutionsrhythmus ab dem zweiten Tag, z.B. Fr, Mo-Fr, Mo-Do, einer 90% Ausbeute und einem Verlust von 1/3 des gewonnenen Tc-99m durch radioaktiven Zerfall und Vorratshaltung. Auf 1 MBq Referenzaktivität Mo-99 kommen damit 2,59 MBq verabreichtes Tc-99m. Kalkuliert man vereinfachend mit einem durchschnittlichen Dosisfaktor von 10 μ Sv/MBq,

erhalten bei 4612 GBq Mo-99 pro M Einwohner diese ein M Einwohner 11945 GBq Tc-99m und 119 Sv Dosisbelastung, also 0,120 mSv/Einwohner.

Will man die weitere Entwicklung abschätzen, könnte man von folgenden Spekulationen ausgehen: Sowohl in den alten Bundesländern als auch in den neuen Bundesländern strebt die Versorgungsdichte den oben abgeleiteten Sättigungswert von durchschnittlich 6600 GBq Mo-99 pro M Einwohner an. Dies würde eine Steigerung der Kollektivdosis in den alten Bundesländern um etwa 140% bedeuten und einen Wert von ca. 12,5 k Personen-Sv bei 80 M Einwohnern.

Die Kollektivdosis durch Nuklearmedizin ist nur ein Bruchteil der jährlichen Dosis durch die Röntgendiagnostik, die Adzersen auf 2,06 mSv/ Einwohner und damit auf 124 k Personen-Sv bei 60 M Einwohner in den alten Bundesländern schätzt. Rechnet man mit 150 Krebsinduktionen pro k Personen-Sv, würde sich aus den 7 k Personen-Sv eine Schadenserwartung von ca 1000 Krebserkrankungen abschätzen lassen, von denen etwa die Hälfte tödlich verlaufen kann. Bezogen auf die einzelne Untersuchung errechnet sich die sehr kleine Wahrscheinlichkeit von 0,042% einer Krebsinduktion. Dies kann kein Grund sein, auf eine medizinisch indizierte Untersuchung zu verzichten, auch nicht im Kindesalter. Die Kollektivdosis und die daraus errechnete Schadenserwartung muß aber jedem verantwortungsvollen Arzt auf dem Gewissen lasten und veranlassen, daß alles getan wird, um diese Dosis zu vermindern.

Belastung des Personals

Diese Betrachtung muß in zwei Teilen geschehen. Zunächst soll die Belastung der Mitarbeiter in einer nuklearmedizinischen Abteilung dargestellt werden, die amtlich zu den beruflich strahlenexponierten Personen zählen. Aber auch die Belastung der übrigen Mitarbeiter im Krankenhaus soll untersucht werden.

In den amtlichen Dosisstatistiken werden die verschiedenen Sparten der medizinischen Mitarbeiter nicht unterschieden. Die jährliche Kollektivdosis für die beruflich Strahlenbelasteten in der Medizin liegt seit Jahren ziemlich konstant bei 27 Personen-Sv, also durchschnittlich 1,1 mSv pro einer der etwa 24 000 tatsächlich exponierten Personen. Amtlich überwacht werden etwa 180 000. 1983 wurden im Geltungsbereich der Strahlenschutzverordnung in der Medizin 48 579 Personen überwacht (incl. Forschung und Strahlentherapie). Auf diese etwa 25% des Personals dürften etwa die Hälfte der Kollektivdosis entfallen, also 13-14 Personen-Sv.

Von einzelnen großen nuklearmedizinischen Abteilungen werden durchschnittliche Jahresdosen von 1-3 mSv von Mitarbeitern berichtet, die gleichmäßig in der Radiochemie, der Applikation und der Patienteneinstellung tätig sind. In unserer Abteilung lag 1989 bei den tatsächlich exponierten die mittl. Jahresdosis bei 0,9 mSv mit einer Spannweite von 0,2 bis 2,0 mSv. Nur 21% der überwachten hatten eine Dosis erhalten. Die Kollektivdosis betrug 11 mPersonen-Sv. Inkorporationen sind sehr selten und

geringfügig und machen nur einen vernachlässigbaren Beitrag aus. Dies gilt noch mehr durch eine externe Belastung aus dem Strahlenfeld kontaminierter Oberflächen. Aus Arztpraxen werden bei den technischen Mitarbeitern Strahlendosen von 0,2-0,4 mSv/Jahr berichtet.

Im Einzelfall sind von diesem Durchschnitt markante Abweichungen möglich. Im Bereich der Strahlentherapie wurden bei der Ra-226-Therapie durchschnittliche Dosen von 10 mSv/Jahr berichtet und immer wieder Überschreitungen der maximal zulässigen Jahresdosis von 50 mSv im Einzelfall. Ohne jedes Verständnis muß man es deshalb als unzumutbar für das Personal bezeichnen, wenn im Zeitalter der After-Loading-Therapie noch Radium gelegt wird.

In der medizinischen Forschung ist die eigene Markierung mit Radiojod besonders inkorporationsgefährdet. Hier müssen schärfste Schutzvorkehrungen sowie eine Jodsubstitution mit 300-500 µg Jod/d vorbeugen und eine regelmäßige Überwachung der Schilddrüsenaktivität Lücken im Schutz aufspüren.

Die Belastung des Personals bei der Ver- und Entsorgung wird in einem späteren Abschnitt behandelt.

Der Belastung des übrigen Krankenhauspersonals wird sicher in Zukunft eine größere Beachtung zukommen. Zur Zeit hat man den Eindruck, daß Extremhaltungen gegenüber einem besonnenen Vorgehen überwiegen. Die Extremhaltung geht von der Weigerung, sich einem nuklearmedizinisch untersuchten Patienten pflegerisch zu nähern, bis zur völligen Sorglosigkeit und Ignoranz gegenüber der Strahlenbelastung. Schicha hat für ein nuklearmedizinisch intensiv versorgtes Schwerpunkt-krankenhaus Abschätzungen vorgenommen.

Seine Annahmen waren für ein Jahr: 150 untersuchte Patienten pro Allgemeinstation, drei Pflegekräfte pro Station, 10mal täglich Aufenthalt im Zimmer in 2m Abstand für eine Minute (Kommunikation etc.), 6mal täglich eine Minute in 0,5-1m Abstand (Essenbringen, Schiebern, Pulsen) und 15min pro Tag in 0,5m Abstand zur Schwerkrankenpflege. Die täglichen Dosisbeiträge daraus beliefen sich auf 0,15, 0,6 und 2, zusammen also 2,75 µSv/Station. Im Jahr resultierten daraus ca. 200 µSv/Person, also etwa ein Zehntel der Dosis, mit der das Personal in der Nuklearmedizin belastet wird.

Bei der Analyse einer neurologischen Intensivstation, auf der ca. 40% der Patienten nuklearmedizinisch untersucht wurden, errechneten sich Jahresdosen in einer ähnlichen Größenordnung von ca. 150 µSv/Person, da sich die zeitlich intensivere Zuwendung zum Patienten auf eine größere Anzahl von Personen verteilte. Die Strahlenbelastung hing entscheidend davon ab, ob die Urinbeutel abgeschirmt wurden. Unterbleibt dieser Schutz, steigt die Belastung pro Person auf mehr als das Vierfache an. Sehr wirksam ist es auch, vor Verlassen der Nuklearmedizin den Beutel zu wechseln.

Die Strahlenbelastung durch einzelne pflegerische Maßnahmen kann also vernachlässigt werden. Allerdings akkumuliert sich im Krankenhaus eine Kollektivdosis, die in der gleichen Größenordnung liegt wie die der gesamten nuklearmedizinischen Abteilung! Es ist deshalb angezeigt, grundsätzliche Überlegungen anzustellen, durch welchen technischen Schutz und durch welche organisatorische Maßnahmen diese Kollektivdosis verringert werden kann.

Belastung der Bevölkerung

Bei der im amtlichen Strahlenschutz üblichen Denkweise macht die Strahlenbelastung der unbeteiligten Bevölkerung durch die Nuklearmedizin nur einen vernachlässigenden Anteil im Vergleich zu der Dosis aus, die statistisch gesehen jeder Einwohner durch nuklearmedizinische Untersuchungen an seinem eigenen Leib im Laufe seines Lebens erfährt, nach den obigen Annahmen etwa 6-7 mSv. Berechnungen oder gar Messungen über die Mitbestrahlung von Angehörigen, die einen Patienten am Krankenbett besuchen oder bei der Rückkehr von einer ambulanten Untersuchung mit ihm zusammenleben, sind mir nicht bekannt. Nimmt man für jeden ambulanten Patienten einen mitbelasteten Angehörigen an, der sich nach Feierabend 6 Stunden in 2m Abstand und eine Nacht über 8 Stunden in 1m Abstand aufhält, kann man für eine Knochenszintigraphie etwa $2 \mu\text{Sv}$ abschätzen. Ähnliches gilt für eine Myokarduntersuchung. Die Belastung durch andere Untersuchungsarten können dagegen vernachlässigt werden. Geht man von sechs ambulanten Knochenszintigrammen pro Tausend aus, ergibt sich bei 60 M Einwohnern eine Kollektivdosis von 0,7 Personen-Sv. Die Einzeldosis ist also so gering, daß sich daraus keine soziale Isolation rechtfertigen läßt. Die Kollektivdosis liegt in einer Größenordnung, die sich in einem Jahrzehnt zu der Schadenserwartung einer Karzinominduktion akkumuliert. Es ist also nützlich, wenn die Patienten eines Knochen- oder Myokardszintigramms so aufgeklärt sind, daß sie in den ersten Stunden nach der Untersuchung von ihren Angehörigen eine zumutbare Distanz wahren, um diesen Beitrag zur Kollektivdosis zu minimieren.

Viel ungünstiger liegen die Verhältnisse, wenn man von dem Szenario ausgeht, daß der Patient für ein Knochenszintigramm in einem dichtbesetzten Wartezimmer zwischen zwei anderen Patienten sitzt und so unmittelbar nach der Applikation mindestens zwei Stunden zubringt. Der Beitrag zur Kollektivdosis kann dann eine Größenordnung mehr ausmachen, also eine jährliche unnötige Strahlenbelastung der Bevölkerung in der Größenordnung einiger Personen-Sv. Sie rückt damit wie die Strahlenbelastung des Pflegepersonals in die gleiche Größenordnung wie die Belastung der beruflich Exponierten in der Nuklearmedizin selbst. Auch hier sind trotz der vernachlässigbaren Gefährdung des Einzelnen zumutbare Maßnahmen zur Verringerung der Kollektivdosis angezeigt. Eine separate, von den übrigen Patienten und dem Personal abgeschirmte Sitzgruppe für Patienten mit Strahlenbelastungen in der Größenordnung der Knochen- und Myokardszintigraphie, wie sie z.B. in unserer Klinik eingerichtet wurde, ist deshalb gerechtfertigt und sollte Standard sein.

Epidemiologie der Nuklearmedizin

Selbst, wenn alle Indikationen zu einer nuklearmedizinischen Untersuchung einer strengen Überprüfung standhalten könnten, wird man dennoch darüber nachdenken müssen, welche Einflußgrößen die Frequentierung nuklearmedizinischer Diagnostik bestimmen. Dies sei am Beispiel der Schilddrüsendiagnostik erläutert. Sie macht in der ambulanten Versorgung, vor allem niedergelassener Ärzte, den größten Anteil aus. Bis in die 70er Jahre hatte unsere Poliklinik auf diesem Gebiet für ein großes Einzugsgebiet das Monopol, bis auch in Marburg zunehmend niedergelassene Ärzte die Versorgung mit übernahmen. Dies hatte eine deutliche Umschichtung im Schweregrad der Diagnosen zur Folge. In der nuklearmedizinischen Basisdiagnostik stand mit ca. 85% die euthyreote Struma im Vordergrund. Die Inanspruchnahme in Relation zur Einwohnerzahl zeigte eine deutliche Korrelation zu soziodemographischen Merkmalen, u.a. auch zur Arztdichte, mit denen die Qualität eines Wohngebietes beschrieben werden kann, und zur Entfernung nach Marburg. Die Strumagröße und die Zahl der Knoten stellt ein Maß für die Verschleppung der Krankheit dar. Wenn aus Gebieten mit geringerer Inanspruchnahme die schwereren Stadien kamen, ist dies ein Hinweis, daß die geringere Inanspruchnahme nicht auf einer geringeren Inzidenz der Struma beruhte. Mit einer Verbesserung der Infrastrukturen, die die soziale und räumliche Erreichbarkeit medizinischer Versorgung verbessern, wird eine größere Inanspruchnahme auch nuklearmedizinischer Leistungen mit allen positiven und negativen Aspekten verbunden sein.

In der Frequenz nuklearmedizinischer Schilddrüsendiagnostik spiegelt sich auch wider, daß Deutschland ein endemisches Kropfgebiet ist, d.h. daß nach den Maßstäben der WHO mehr als 10% der Wohnbevölkerung eine Struma hat. Man kann nicht über die Strahlenbelastung durch Nuklearmedizin diskutieren, ohne auf den gesundheitspolitischen Skandal hinzuweisen, den die mangelhafte Jodversorgung in Deutschland darstellt. Trotz intensiver Anstrengung der Ärzteschaft wurde erst 1982 die Diätverordnung soweit novelliert, daß jodiertes Salz von seinem Warnaufdruck befreit wurde und bis 2 mg Jod/100g Salz enthalten kann. Aber auch diese Jodierung ist unzureichend, um die durchschnittliche tägliche Fehlbilanz von 100 µg Jod auszugleichen. Dies ist auch in neueren Publikationen wiederholt unterstrichen worden. Meine Arbeitsgruppe hat bei einer Reihenuntersuchung an ca. 1600 Personen, die durch Tschernobyl im Mai 1986 einem unfreiwilligen Radiojodtest ausgesetzt worden waren, zwar einen signifikanten Suppressionseffekt der Radioaktivitätsaufnahme in die Schilddrüse durch Einnahme von Schilddrüsenhormonen, nicht aber bei Verwendung von jodiertem Speisesalz gesehen. Pfannenstiel schätzte 1988 die jährlichen Kosten für Diagnose und Therapie von Kropfkrankheiten und ihren Folgekrankheiten in den alten Bundesländern auf ca. 1 Milliarde DM! Die Folgen der damit verbundenen Strahlenbelastung kommen noch hinzu. Die Prophylaxe der Struma ist also zugleich ein enormer Beitrag zur Verminderung der Kollektivdosis. Durch Änderung der Rechtsvorschriften ist seit 24.06.1989 die Verwendung jodierten Speisesalzes nicht mehr in der Diät-, sondern in der Zusatzstoff-Zulassungsverordnung geregelt. Damit ist die Verwendung jodierten Speisesalzes auch in Gemeinschaftsküchen etc. möglich, die immerhin ca. 25% der Bevölkerung ganz oder überwiegend ernähren! Auch eine Verwendung bei der

Lebensmittelherstellung ist erlaubt. Da über 80% des Kochsalzkonsums über vorgefertigte Lebensmittel erfolgt, würde erst dadurch eine flächendeckende Jodversorgung sichergestellt. Es ist aber zu befürchten, daß dies ohne gesetzliche Vorschrift nicht erreichbar ist. Eine Alternative kann die Anhebung der Salzjodierung sein. Beides ist nicht abzusehen, so daß sich an dem beklagten Zustand so rasch nichts ändern dürfte. Im Gegenteil, durch Rückgang der Versorgung mit Seefisch, der durchschnittlich etwa ein Drittel der täglichen Jodversorgung abdeckt, wird sich die Mangelversorgung durch natürliche Ressourcen tendenziell in der Zukunft noch weiter verschlechtern. Jeder Arzt sollte in seinem Einflußbereich alles dazu tun, daß sich die Verwendung des Jodsalzes im privaten und allgemeinen Bereich durchsetzt.

Anwendung mit überwiegender Schädlichkeit

Radonbäder

Radonhaltige Quellen werden schon seit langer Zeit in der Balneotherapie eingesetzt. Der Ursprung dieser Verwendung reicht weit über die Zeit der Entdeckung der Radioaktivität zurück. Seit dem Bekanntwerden der Radioaktivität der Radonquellen wird immer wieder versucht, die Heilerfolge der Balneotherapie mit diesen Wässern in einen spezifischen kausalen Zusammenhang mit ihrer Radioaktivität oder dem (radioaktiven) Edelgas Radon zu bringen. Seit dem Inkrafttreten der Strahlenschutzverordnung sind wenigstens die Radium-Trinkbecher aus dem Verkehr gezogen worden, die zur Herstellung von radonhaltigem "Kurwasser" in jedermanns Küche vertrieben wurden. Die Balneotherapie mit radioaktiven Quellen wird jedoch noch viel zu unkritisch gesehen. Deshalb muß hier auf ihre Gefahren etwas näher eingegangen werden.

Die Gefährlichkeit des Radons ist durch mehrere epidemiologische Untersuchungen an Bergwerksarbeitern in verschiedenen Ländern erwiesen. Der Erforschung der Exposition der normalen Bevölkerung durch Radon wird zunehmend Aufmerksamkeit gewidmet. Immerhin gibt es Schätzungen, daß etwa 10% der Bronchialkarzinome in der Bundesrepublik Deutschland, also etwa 2 500 Todesfälle pro Jahr, auf die Strahlenbelastung durch Radon zurückzuführen sind. Erst 1990 haben Henshaw et al. auf eindrucksvolle Korrelationen zwischen der Radonexposition der Bevölkerung und der Sterblichkeit an kindlichen Tumoren, vor allem Leukämie, aufmerksam gemacht. Zunehmend wird der Radongehalt in Wohnhäusern kontrolliert und bei erhöhten Werten (meist ab etwa $200\text{-}250\text{ Bq/m}^3$) eine Sanierung empfohlen.

Vergleicht man damit die Verhältnisse in einem Radon-Badeort wie Bad Gastein, findet man sich beeindruckenden Zahlen konfrontiert. Die Therme weist eine Radon-Konzentration von etwa $1\,000\,000\text{ Bq/m}^3$ auf. Bei einer täglichen Schüttung von ca. $5\,000\text{ m}^3$ werden also pro Jahr etwa $2\,10^{12}\text{ Bq}$ freigesetzt. In den Häusern des zentralen Teils des Ortes liegen dadurch Radonkonzentrationen von etwa 300 Bq/m^3 vor, also sanierungswürdige Verhältnisse. Monströs sind die Radioak-

tivitätskonzentrationen in der Luft der Badeeinrichtungen: bis ca. $100\,000\text{ Bq/m}^3$ im Stollen eines früheren Goldbergwerkes, gewissermaßen der heutigen Kur-Goldgrube. Bei einer Stunde Aufenthalt in der Luft dieses "Heilstollens" erhält man eine effektive Dosis von 1,3 mSv, also mit dem üblichen Wichtungsfaktor von 0,12 für die Lunge eine mittlere Organdosis von 10,8 mSv. Tatsächlich ist die Strahlenbelastung des Bronchialepithels etwa 6,5mal höher als des Alveolarraumes. Um dem Rechnung zu tragen, wird bei der Umrechnung von inhalierter Aktivität in die effektive Dosis der Wichtungsfaktor für die Lunge von 0,12 in jeweils 0,06 für Bronchien und Alveolen aufgespalten. Nach der Strahlenschutzverordnung ist dieses Vorgehen nicht legitimiert. Das Bronchialepithel ist als ein Gewebe für sich zu betrachten. Seine Dosis beläuft sich auf etwa 18,7 mSv/h. Die für die normale Bevölkerung maximal zulässige Gewebedosis von 0,9 mSv/Jahr wäre also bereits in drei Minuten Aufenthalt überschritten! Bei einer typischen Kur mit vier Stunden Aufenthalt in zwei Wochen beläuft sich die effektive Dosis auf 5,2 mSv und die Dosis des Bronchialepithels auf 74,8 mSv. Solche Dosen werden kaum bei einer nuklearmedizinischen Diagnostik erreicht!

Ich möchte nicht mißverstanden werden. Dies ist weder ein Plädoyer gegen die Balneotherapie noch gegen einen Aufenthalt in Bad Gastein, da man die Schönheit des Gasteiner Tales auch ohne eine Überexposition mit Radon genießen kann. Aber selbst wenn Radon tatsächlich, was nicht bewiesen ist, positive Heileffekte hätte, gibt es nach meiner Meinung keine Rechtfertigung, Patienten bewußt und ohne Notwendigkeit einem krebserzeugenden Agens auszusetzen. In diesem Sinne haben sich auch internationale Gremien geäußert, sei es das UNSCEAR-Komitee, sei es die ICRP, die zuletzt 1987 ausdrücklich zur Belastung in Radonbädern Stellung bezog.

Radium-Mineralwässer

Da der Radiumgehalt des Trinkwassers und der Getränke einen Beitrag zur (natürlichen) Strahlenbelastung liefert, läge es in Anbetracht der großen und regelmäßigen Aufnahme dieser Flüssigkeiten durch den Menschen nahe, diese Strahlenquelle zu kontrollieren, zumal der Aktivitätsgehalt je nach Herkunft sehr unterschiedlich ist. Die Strahlenschutzverordnung kennt aber nicht nur keine Deklarationspflicht der Radioaktivität der Nahrungsmittel und des Trinkwassers, sondern nimmt sogar den Umgang mit Wasser, das aus natürlichen Quellen stammt und dessen spezifische Aktivität natürlichen Ursprungs nicht erhöht ist, auch bei einer Anwendung am Menschen von der Anzeige- und Genehmigungspflicht aus. Deshalb kann auch Mineralwasser aus einer Radiumquelle frei verkauft und in beliebigen Mengen einem Patienten zur Kur verabreicht werden.

Drei umfangreiche Studien wurden dazu in den USA unternommen. Bei einem Vergleich von einer Trinkwasserversorgung mit durchschnittlich 174 mBq/l gegenüber weniger als 37 mBq/l fand man eine um 124% erhöhte Knochenkrebsrate ($p=0,08$). In einer weiteren Studie fand man eine Zunahme von Lungen-, Blasen- und Brustkrebs mit wachsendem Radiumgehalt des Trinkwassers (Abb. 6, S. 25). In einer dritten Studie ergab sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Leukämie (meist akute myeloische) und dem Radiumgehalt des Trinkwassers (Abb. 7, S. 25).

Radium im Trinkwasser und Krebs

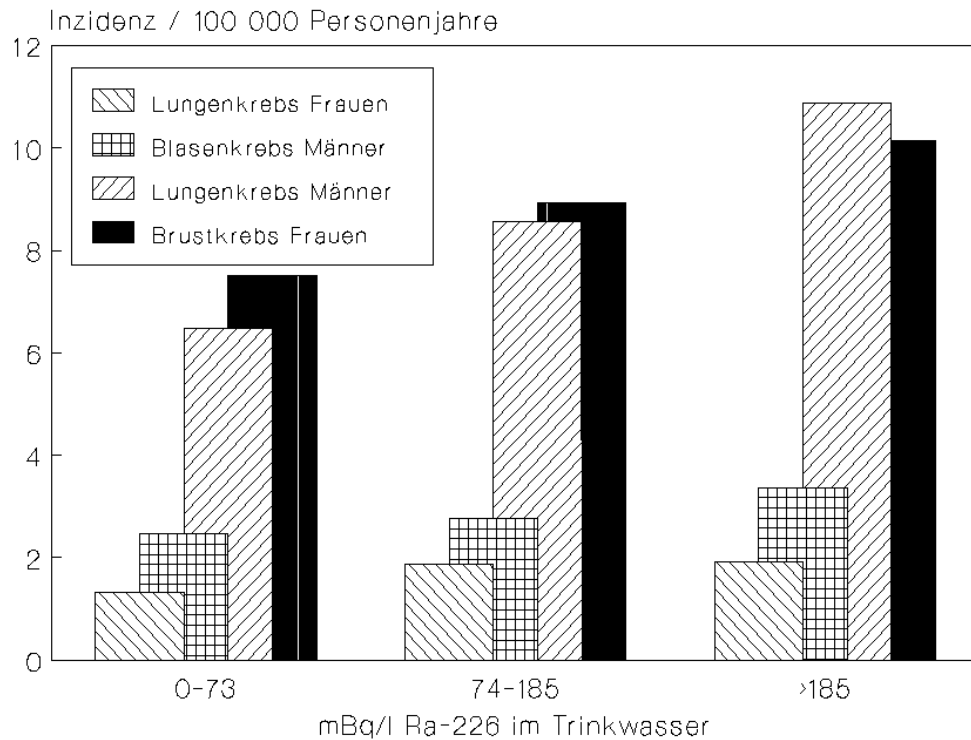


Abb. 6: Inzidenz verschiedener Karzinome in Abhängigkeit von der Konzentration des Ra-226 im Trinkwasser (nach Bean et al.)

Radium im Trinkwasser und Leukämie

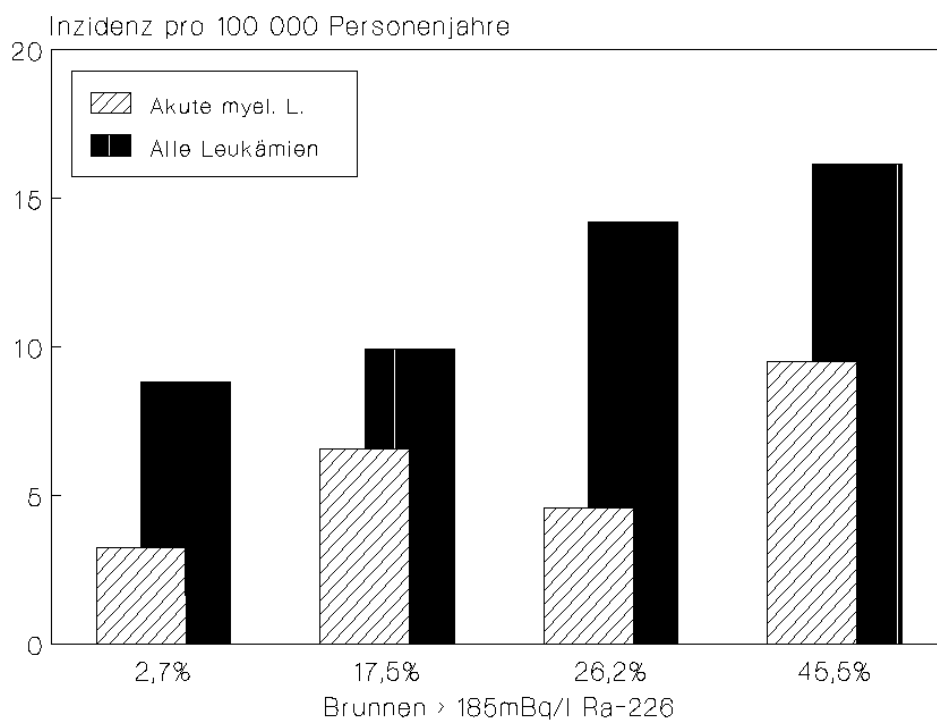


Abb. 7: Inzidenz von Leukämie in Abhängigkeit von der Häufigkeit von Brunnen mit mehr als 185 mBq/l Ra-226 im Versorgungsgebiet (nach Lyman et al.)

Seit 1976 gibt es eine Richtlinie der EPA, die den Grenzwert im Trinkwasser für Radium-226 und Radium-228 gemeinsam auf 185 mBq/l festlegt. Ein durchschnittlicher Konsum von 1,2 l/d dieses Wasser erzeugt beim Erwachsenen eine Dosis an der Knochenoberfläche von 0,6 mSv/a, ein gesteigerter Konsum von 2,2 l/d 1,1 mSv/a. Zum Vergleich: In der Strahlenschutzverordnung wird die maximal zulässige Jahresdosis der Knochenoberfläche für die Bevölkerung aus kerntechnischen Einrichtungen auf 1,8 mSv beschränkt.

Tab.7: Flaschenwässer mit einer Ra-226-Konzentration über 185 mBq/l (teilweise Mittelwerte aus mehreren Proben)
nach Gans et al.

Ort	Bezeichnung	Ra-226 [mBq/l]
3362 Bad Grund/Harz	Förster Heilquelle	263
	Lichtensteiner H.qu.	192
6242 Kronberg	Kronthal Min.w.	414
6337 Biskirchen-Leun	Karlssprudel	227
6293 Selters-Löhnberg	Staatl. Selters	259
	Urselters	358
6356 Rosbach 1	Dino Min.w.	296
	Mathildenqu.	796
	Rosbacher Mineralbr.	850
	Rosb. Urquelle	1280
6368 Bad Vilbel	Chattia	607
	Elfenquelle	222
	Elisabethenqu.	194
	Fr. Karl-Spr.	450
	Gloriaqu.	215
	Hassia-Spr.	451
	Hermannsqu.	259
	Hessenquelle	316
	Kronia-Qu.	337
	Riedqu.	211
	Ritter Bechtram St.w.	218
3590 Bad Wildungen	Venusqu.	200
5483 Bad Neuenahr	Helenenqu.	191
	Bad N. Heilw.	237
5427 Bad Ems	Heppinger Heilw.	306
	Emser Kränchen	403
6251 Fachingen	Staatl. Fachingen	191
7347 Bad Überkingen	Überkinger Qu. R.	296
7050 Waiblingen-Beinstein	Elisabethenqu.	188
8730 Bad Kissingen	Pandur	259
	Rakoczy	258
Vichy / F	Vichy	365
Karlsbad /CSFR	Karlsbader Mühlbrunn	1773
Rumänien	Vitalis Heilqu.	303

In der Bundesrepublik liegt der Gehalt des Trinkwassers im Median bei 4 mBq/l, im arithmetischen Mittel bei 6,83 mBq/l, mit einer logarithmischen Normalverteilung, die bis zu einem Maximalwert von 159 mBq/l reicht. In handelsüblichen Flaschenwässern lagen die Konzentrationen im Median mit

23,3 mBq/l und im Mittel mit 83,3 mBq/l deutlich höher. Immerhin lagen etwa 12% der Wässer über dem Grenzwert der EPA. Der Maximalwert eines Wassers lag bei 1790 mBq/l. Es gab aber auch sehr niedrig belastete Wässer zwischen 1 und 6 mBq/l. Eine Übersicht über Flaschenwässer mit Konzentrationen über dem EPA-Grenzwert gibt Tab. 7 (S. 26). Tab. 8 informiert über die Ra-226-Konzentrationen in Quellen und Brunnen.

Tab. 8: Brunnen und Quellen mit einer Ra-226-Konzentration über 185 mBq/l (teilweise Mittelwerte aus mehreren Proben) nach Gans et al.

Ort	Bezeichnung	Ra-226 [mBq/l]
6200 Wiesbaden	Faulbrunnen	255
	Kochbrunnen	2150
6242 Kronthal	Bismarkqu.	866
	Theodorusqu.	611
6422 Herbstein	Thermalqu.	418
6350 Bad Nauheim	Thermalqu.	12599
6368 Bad Vilbel	Fr.-Karl Qu.	1110
3500 Kassel	WW Tränkeweg Tiefbr. 2	200
	WW Tränkeweg Tiefbr. 4	244
6552 Bad Münster	Radonqu. Süd	6290
8730 Bad Kissingen	Brunnen	239

Bei Auswertung der Tabellen 7 und 8 ist zu beachten, daß es sich um Stichproben von Anfang der 80er Jahre handelt. Teilweise schwankten die Konzentrationen der Quellen. In vielen Orten, die in den Tabellen aufgeführt sind, existieren andere Mineralquellen, in denen (z.T. sehr viel) niedrigere Konzentrationen gefunden wurden. Die Bedeutung der Konzentration ist natürlich von den Verzehrgewohnheiten abhängig. Angesichts der kaum überschaubaren Palette von Mineralwässern mit allen möglichen Konzentrationsverhältnissen an Inhaltstoffen, ist sicher für jeden gewünschten therapeutischen Effekt ein Wasser ohne einen unnötig erhöhten Radiumgehalt zu finden. In keiner Weise zu rechtfertigen ist die bewußte Verabreichung eines besonders radiumhaltigen Wassers wegen seines Radioaktivitätsgehaltes zu Heilzwecken.

Nuklearmedizin ohne Fachkunde

Ein heißes Eisen in der ärztlichen Berufspolitik ist die Frage, wieviel Fachkunde von einem Arzt verlangt werden soll, der Nuklearmedizin betreibt. Seit es die Gebietsbezeichnung Nuklearmedizin gibt, die eine mindestens dreijährige Weiterbildung im engeren Fachgebiet verlangt, prangern Nuklearmediziner an, daß andere Ärzte nach einer Weiterbildung von nur 24 Monaten die Fachkunde für die gesamte nuklearmedizinische Diagnostik erwerben können. Darüber hinaus wurde Nuklearmedizin auch ohne Fachkunde und Umgangsgenehmigung betrieben.

Am 28.09.90 hat das Amtsgericht Frankfurt deshalb einen Arzt für Radiologie wegen Verstoßes gegen § 311 d StGB verurteilt (Az.: 65 Js 3309.1/89-933 Cs-1002). Dieser weitgehend unbekanntes Paragraph ist ab 1.7.1980 in Kraft. Wenn man ihn liest, kann man in tiefes Grübeln kommen, warum bei so manchem Vorkommnis in der Kernindustrie die Staatsanwaltschaft keine Anklage erhoben hat. Nach ihm wird u.a. bestraft, wer unter Verletzung verwaltungsrechtlicher Vorschriften ionisierende Strahlen freisetzt, die geeignet sind, Leib und Leben eines anderen zu schädigen. Bemerkenswert ist dabei, daß mit Rücksicht auf den Charakter einer stochastischen und erst in der Zukunft liegenden Schädigung nicht der Nachweis eines kausalen Zusammenhangs zwischen einer Ursache und einem Schaden verlangt wird, sondern die Geeignetheit zur Schädigung ausreichend für den Straftatbestand ist. Der Arzt hatte bereits wegen unkorrekter Abrechnung (von Leistungen auf dem Gebiet des Ultraschalls und der Nuklearmedizin) von der Kassenärztlichen Vereinigung eine Ordnungsstrafe und Regreßforderung erhalten. Die Kassenärztliche Vereinigung hatte schließlich auch erreicht, daß das Gewerbeaufsichtsamt die illegale Praxis beendete, die letzterem bereits seit über 1,5 Jahren bekannt war! Diesem Arzt war das Unrechtsbewußtsein möglicherweise auch dadurch geschwunden, daß er unbeanstandet in den Jahren 1982-1984 zweimal 4 und einmal 7 Wochen als Praxisvertreter bei nuklearmedizinisch tätigen Ärzten ohne Fachkunde und Umgangsgenehmigung gearbeitet hatte, davon mindestens 8 Wochen sogar vor seiner Anerkennung als Arzt für Radiologie! Vor Eröffnung seiner eigenen Praxis war er (ebenfalls ohne Fachkunde und Umgangsgenehmigung) 13 Monate Dauervertreter eines berufsunfähigen Radiologen. Das Fehlen der Fachkunde war nicht nur eine formale Unvollkommenheit, es waren vielmehr auch die Voraussetzungen dafür nicht gegeben.

Den Richter beeindruckte in der Verhandlung, daß sowohl der vertretene Arzt als auch der Angeklagte jede Schädigungsmöglichkeit von Patienten durch die niedrigen Dosen weit von sich wiesen. Er rekurrierte allerdings auch nicht auf mein Gutachten, in dem ich aus einer abgeschätzten Kollektivdosis von insgesamt 2,37 Personen-Sv durch die beanstandete Tätigkeit mit aller Vorsicht gegenüber dem Angeklagten eine Wahrscheinlichkeit von 26 Prozent für die Auslösung eines schweren Gesundheitsschadens berechnet hatte. Dem Richter genügte, daß bereits ein einziger Strahlenquant die Potenz zur Auslösung eines Schadens hat. Wenn das Urteil, gegen das eine Revision vor dem Landgericht anhängt, Rechtskraft erlangen sollte, folgt das Berufungsverfahren, das den Verlust der Approbation zur Folge haben kann.

Der Fall wurde nicht nur deshalb etwas ausführlicher dargestellt, weil es nach meiner Kenntnis der erste Fall einer Verurteilung nach diesem Paragraphen ist, sondern weil man immer wieder von Praxisvertretungen durch Ärzte hört, die keine Umgangsgenehmigung und oft keine Fachkundebescheinigung besitzen. Die Umgangsgenehmigung wird bei niedergelassenen Ärzten in der Regel unübertragbar und ohne dedizierte Benennung eines Stellvertreters auf den Praxisinhaber ausgestellt. Das Gericht hat klargestellt, daß damit trotz der Duldung durch das Gewerbeaufsichtsamt eine Vertretung durch einen anderen Arzt illegal ist. Es gibt allerdings keine Daten, die eine Quantifizierung des dadurch ausgelösten Schadens in der Bundesrepublik insgesamt erlauben.

Versorgung und Entsorgung

Herstellung

Zunächst sei betont, daß die Produktion medizinisch wichtiger radioaktiver Stoffe nicht an Einrichtungen der thermischen Verwertung von Kernspaltung gebunden ist. Viele kurzlebige Verbindungen werden durch Beschuß geringer Substanzmengen in einer Beschleunigerapparatur gewonnen. Eine häufige Form der Herstellung ist allerdings die Neutronenbestrahlung in einem Kernreaktor sowie die Isolierung aus einem Gemisch von Spaltprodukten nach Spaltung von Uran. Der letztere Prozeß ist heute wegen der erzielbaren höheren spezifischen Aktivität auch die übliche Methode, um das Molybdän-99 für die Beladung der Radionuklidgeneratoren zu gewinnen, aus denen in der Nuklearmedizin das kurzlebige Technetium-99m gewonnen wird. Insgesamt gibt es kein Zahlenmaterial über die Belastung der Bevölkerung und von Beschäftigten speziell durch die Herstellung von medizinisch verwendeten Radionukliden.

Als nicht repräsentatives Beispiel soll die Auseinandersetzung einer Bürgerinitiative in Dresden (Gruppe Ökologie der BI Bühlau) mit dem Zentralinstitut für Kernforschung (ZfK) in Rossendorf bei Dresden geschildert werden. Das ZfK liegt etwa 15 km östlich des Stadtzentrums und betreibt u.a. einen 10 MW-Forschungsreaktor. Dort wird jeweils von Montag bis Freitag eine Probe mit hochgradig angereichertem Uran-235 bestrahlt. Nach Abklingen über das Wochenende wird zu Beginn der Folgewoche in der Anlage AMOR-I (**Anlage Molybdän Rossendorf**) aus dem Gemisch von Spaltprodukten das Molybdän-99 isoliert. Es handelt sich also um eine kleine Wiederaufarbeitungsanlage. Zwar wird kein Kernbrennstoff mit dem für Leistungsreaktoren üblichen hohen Abbrand aufgearbeitet, dafür liegt die Abkühlzeit nicht wie bei einer großen WAA im Bereich von vielen Jahren, sondern beträgt nur drei Tage. Nach dem Report des SAAS (Staatliches Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz der DDR) liegt die Abgabe radioaktiver Stoffe in die Abluft für Edelgase, Jod und Aerosole aus dem ZfK deutlich höher als aus dem KKW Greifswald (s. Tab. 9, S. 30). Dabei ist anzumerken, daß der Forschungsreaktor des ZfK 1986 außer Betrieb genommen worden war und bis 1989 rekonstruiert wurde. Während dieser Zeit waren die Uranproben in "osteuropäischen Partnerinstituten des ZfK" bestrahlt worden. An die Anlage AMOR-I schließt sich eine Anlage AMOR-II zur Rückgewinnung von Kernbrennstoff an. In der Anlage AMOR-I gibt es übrigens seit Jahren Probleme wegen der steigenden Differenzen zwischen Ist- und Sollwerten bei der Mengenüberwachung des waffentauglichen hochangereicherten Urans.

Von der Meßstelle "Eltern für unbelastete Nahrung Norderstedt e.V." waren in Buchen- und Eichenblättern Jod-131 in Deka-Bq/kg gefunden worden. Dagegen führte das ZfK Messungen des Umweltsenators Berlin an, die keine erhöhte Radioaktivität ergeben hätten. Die Diskrepanz könnte darauf beruhen, daß die ersteren Proben an einem Dienstag, die letzteren an einem Freitag

entnommen worden waren. Dem ZfK kommt sicher entgegen, daß nach dem Einigungsvertrag die deutlich höheren Grenzwerte der DDR für die zulässige Strahlenbelastung der Bevölkerung in der Umgebung kerntechnischer Anlagen fortgelten.

Tab. 9: Abgabe radioaktiver Schadstoffe an die Abluft durch das KKW Greifswald und das ZfK Rossendorf
Quelle: Report SAAS-382 1990,
Aerosol ZfK für 1988: Korrigierter Wert durch das ZfK

	Edelgase [TBq]		Jod [GBq]		Aerosole [MBq]	
	KKW	ZfK	KKW	ZfK	KKW	ZfK
1984	191	254	4	174	741	5904
1985	188	238	4	68	593	2504
1986	164	501	6	58	509	2225
1987	232	275	9	19	517	425
1988	278	117	11	45	616	790

Die Strahlenbelastung der Mitarbeiter des ZfK wurde durch die Radionuklidproduktion bestimmt. 1988 verteilte sich die offiziell mitgeteilte Kollektivdosis wie in Tab. 10 dargestellt.

Tab. 10: Kollektivdosis in verschiedenen Abteilungen des ZfK Rossendorf/Dresden (nach Öko-Institut Darmstadt)

Abteilung	Kollektivdosis [Personen-Sv]
Forschungsreaktor	0,07
Radionuklid-Produktion	0,95
übrige Einrichtungen	0,68
Summe	1,70

Besonders hoch war die Schilddrüsenbelastung mit Radiojod. Der Maximalwert lag 1988 bei 326 mSv! Dies sind zwar nur 65% des DDR-Grenzwertes, der sich wie die EG-Norm an den Empfehlungen der ICRP-26 orientierte, aber erheblich mehr als nach der Strahlenschutzverordnung zulässig, die pro Jahr nur 300 mSv und in drei aufeinanderfolgenden Monaten nur 150 mSv zuläßt. An eine Inkorporationsdämpfung durch Jodidsubstitution war bisher noch nicht gedacht worden!

Transport per Luft und Straße

Für diesen Bereich gibt es weder zuverlässiges Datenmaterial über die Belastung der Bevölkerung noch der Beschäftigten. Die Transportvorschriften für die verschiedenen Verkehrsmittel sind (grenzüberschreitend) so harmonisiert, daß die radioaktiven Stoffe in der Verpackung eines Versenders ohne weiteres umgeladen werden können. Im medizinischen Bereich dominiert im

Versand Molybdän-99 in der Form der Radionuklidgeneratoren. Etwa 18 Stunden nach Abtrennung befindet sich das Mo99 im Gleichgewicht mit dem Tochternuklid Technetium-99m. Wegen der wesentlich geringeren Halbwertsschichtdicke des Tc-99m von 0,25 mm als des Mo-99 von 7 mm ist für die Dimensionierung der Abschirmung praktisch nur das Mo-99 relevant. Die physikalische Halbwertszeit des Mo-99 von 2,75 Tagen erfordert vom Versender eine Vordosierung, um dem Empfänger die bestellte Aktivität zu garantieren. Da die für den ungünstigsten Fall kalkulierten Transportzeiten im Regelfall unterboten werden, wird dem Kunden praktisch eine Aktivitätszugabe geboten, die im Wettbewerb von den Konkurrenten beachtet werden muß. Die Aufsichtsbehörden achten zunehmend darauf, daß dadurch die maximal genehmigte Umgangsaktivität nicht überschritten wird. Die Versandstücke müssen mit spezifischen Warnzetteln versehen werden, die je nach Kategorie I-III rote Balken tragen. Die Mo-99-Generatoren gehören meist der Kategorie III an. Ein Versandstück darf dabei an der Außenfläche eine Dosisleistung bis 2 mSv/h aufweisen und in 1 m Abstand davon noch 100 µSv/h. Die letztere Dosisleistung muß auf dem Warnzettel mit der Aktivitätsangabe angegeben werden, allerdings verschlüsselt als Transportindex (TI). Da die Vorschriften noch aus der Zeit der alten Einheiten stammen, entspricht der TI mrem/h, darf in der Kategorie III also bis 10 betragen. Innerhalb dieser Grenzen kann der Versender das Minimierungsgebot eigenwillig interpretieren, d.h. statt der Dosisleistung das Gewicht und damit Versandkosten verringern. Dies sei am Beispiel zweier Versender erläutert. Versender A aus dem hessischen Inland deklariert einen Generator mit 12 GBq Referenzaktivität auf dem Etikett mit 39,2 GBq und dem TI 1,9, Versender B aus dem westeuropäischen Ausland einen Generator mit nur 8,5 GBq Referenzaktivität mit dieser Aktivität auf dem Etikett und dem TI von 3,0! Der Grund liegt in einer geringeren Bleiabschirmung bei Versender B. In der folgenden Tabelle 11 sind zur Gegenüberstellung diese Verhältnisse auf eine einheitliche Referenzaktivität umgerechnet. Zum besseren Vergleich mit dem TI sind die Dosisleistungen in mR/h angegeben, das vereinfachend mrem/h gleichgesetzt werden kann (1mR/h , 1mrem/h = 10µSv/h).

Tab. 11: Auswirkung unterschiedlicher Verpackungen beim Versand von Mo-99-Generatoren
 Versender A 38 mm Pb, Paket 34*34*38 cm, TI 1,9
 Versender B 28 mm Pb, Paket 39*39*39 cm, TI 4,2
 Versender B auf gleiche Referenzaktivität wie A umgerechnet
 Dosisleistung an der Oberfläche des Versandstückes und
 in 1 m Entfernung davon in mR/h (1mR/h , 1mrem/h = 10µSv/h)

Zeit	Tage	GBq	Versender A		Versender B	
			Oberfl.	1 m	Oberfl.	1 m
Versand	-4,7	39	66,6	1,4	136,2	3,6
Ankunft	-3,1	26	44,7	0,9	91,4	2,4
Referenz	0	12	20,3	0,4	41,6	1,1

Jeder Nuklearmediziner wird eine solche Sendung nach dem Empfang so rasch wie möglich mit einer zusätzlichen kräftigen Bleiabschirmung umgeben, aber die Bevölkerung und die Beschäftigten im Transportwesen sind unnötigen Strahlendosen ausgesetzt.

Wegen der Kurzlebigkeit werden die Radionuklide für die Nuklearmedizin im Regelfall im grenzüberschreitenden Verkehr mit dem Flugzeug transportiert und zwar aus Zeitgründen meist als Beifracht in Passagierflugzeugen. Über 80% des Mo-99 wird aus Nordamerika importiert. Etwa 40% der importierten Aktivität wird wieder exportiert, im Regelfall ebenfalls per Flug. 1983 betrug die Einfuhr 479 316 GBq, die Ausfuhr 201 287 GBq. Zusammen mußten also 680 603 GBq vom Personal der Flughäfen verladen werden. Dabei handelt es sich nur um die Referenzaktivität. Die tatsächlich verladene Aktivität dürfte etwa das Dreifache betragen! Im Flugzeug sind je nach TI Mindestabstände zu den Trennwänden gegenüber Passagier und Personal vorgeschrieben, z.B. für ein TI bis 2,0 50cm, bis 5,0 1m (zu unentwickelten Filmen müssen die Abstände größer sein!). Die Nuclear Regulatory Commission (NRC USA) hatte 1975 in 3,3% der Passagierflüge radioaktive Fracht festgestellt und auf den Routen, die von Radiopharmaka-Versendern benutzt wurden, eine zusätzliche mittlere Jahresbelastung von 0,13 mSv für das Kabinen- und 0,025 mSv für das Cockpitpersonal kalkuliert. In einer Stichprobe im November 1986 hatten 3,6% der Flüge einer deutschen Fluggesellschaft (682) eine radioaktive Zuladung, insgesamt 815 Sendungen. Der mittlere TI betrug pro Sendung 2,4 und pro Flug 4. Als Nebeninformation bei Messungen in Moskaufügen im Mai 1986 waren bei einer Ladung mit TI 2,2 in der Kabine bis 5 μ Sv/h gemessen worden, in einem anderen Fall mit TI 2,8 fanden sich 4 μ Sv/h. Verteilt man die für die Bevölkerung aus kerntechnischen Anlagen maximal erlaubte zusätzliche Jahresdosis von 300 μ Sv auf jeden Kalendertag, ergibt dies 0,82 μ Sv/d. Angesichts dieser Verhältnisse kann es für Passagiere kein Trost sein, daß in größeren Flughöhen die zusätzliche Strahlenbelastung durch die Höhenstrahlung diese Dosisleistung deutlich übersteigt.

Für das fliegende Personal ist relevant, daß in Frachtflugzeugen bis TI-Summe 50 und mit Sondergenehmigung sogar bis 200 geladen werden dürfen. Letzteres ist allerdings nur für die Strecken zwischen Nordamerika sowie Großbritannien und Frankfurt relevant. Bei der Ladungskontrolle sowie bei Außenchecks ergeben sich auch für das Cockpitpersonal geringe Abstände. Insgesamt wird der mittlere Beitrag zur jährlichen Strahlenbelastung des fliegenden Personals auf 1,2-1,5 mSv geschätzt. Dies entspricht in etwa der durchschnittlichen Belastung des tatsächlich exponierten Personals in der Medizin. Addiert man allerdings die Belastung durch die Höhenstrahlung dazu, liegt die durchschnittliche Belastung mit ca. 5 mSv höher als es dem Durchschnitt der tatsächlich belasteten Personen in der Kernindustrie entspricht. Es ist also unverständlich, warum das fliegende Personal nicht durch die Strahlenschutzvorschriften zu den beruflich strahlenbelasteten Personen gezählt werden.

Eine konsequentere Beachtung des Minimierungsprinzips beim Transport von radioaktivem Material für die Medizin könnte also sowohl Passagieren als auch dem fliegenden Personal unnötige Strahlenbelastung ersparen.

Auf der Straße sieht es nicht besser aus. In ein normales Speditionsfahrzeug, in dem dieser Transport durchgeführt werden darf, dürfen bis TI-Summe 50 geladen werden. An der Außenseite des Fahrzeugs, das mit entsprechenden Warnschildern versehen sein muß, sind bis 2 mSv/h zugelassen,

in 2m davon noch 100 $\mu\text{Sv/h}$. Im rauen Alltag eines Speditionsbetriebes dürfte wohl kaum jemand die TI-Indizes der Versandstücke beim Beladen aufaddieren. Im Innenraum des Fahrzeugs dürfen 20 $\mu\text{Sv/h}$ nicht überschritten werden. Das Personal darf pro Jahr mit maximal 5 mSv belastet werden. Dieser Wert ist bei Ausschöpfen der maximalen Dosisleistung in 5 h/Woche erreicht.

Die Einhaltung dieser Vorschriften wird praktisch nicht überwacht. Dem Transportpersonal fehlen häufig das Wissen und die Instrumente dafür. Umsomehr muß man dringend eine umfassende Revision der Vorschriften für die Verpackung radioaktiven Materials fordern.

Eine Rarität sind Diebstähle von Radiopharmaka. Sie erfolgen während des Transportes, ein Einbruch in einem heißen Lager ist mir noch nicht bekannt geworden. Erkennt der Dieb beim Sortieren der Beute an den Warnschildern den unerfreulichen Inhalt, wird die Packung weggeworfen, der Polizei als Fund gemeldet und dann bei der nächsten nuklearmedizinischen Einrichtung sichergestellt. Die Dosis dürfte in einem solchen Fall vernachlässigbar bleiben. Ein späterer Abschnitt wird allerdings einen unvorhergesehen Besitzwechsel mit dramatischeren Folgen schildern.

Abfallzwischen- und Endlager

So hart es klingen mag: Das quantitativ bedeutendste Abfallzwischenlager für Radiopharmaka ist der Patient, das Endlager stellt meist die Ökosphäre dar. Soweit die Aktivität nicht während des Transportes und der Lagerung zerfallen ist, wird sie den Patienten verabreicht. Das zurückbleibende radioaktive Material macht im Verhältnis dazu nur einen kleinen Teil aus. Auch dieser ist nach überschaubaren Lagerzeiten so abgeklungen, daß der Abfall "freigemessen" werden kann. Es ist deshalb absurd, den Bedarf der Nuklearmedizin zur Akzeptanzbeschaffung für ein "Endlager" in der Grube Schacht Konrad in Salzgitter zu verwenden. Auch eine Landessammelstelle als Zwischenlager wird kaum durch Abfall aus der Nuklearmedizin belastet.

Eine Rarität dürften Unfälle wie in einer großen städtischen Klinik in Osthessen sein, wobei durch ein Versehen beim Aufräumen eine Ra-226-Einlage in die Müllverbrennungsanlage gelangte. Die gesamte Schamottauskleidung mußte ausgetauscht werden. Die (unschuldige) Ärztin, die die Einlage in Vertretung des Oberarztes am Wochenende gezogen hatte, sollte den gesamten Schaden von ihrem Gehalt, von dem sie noch zwei Kinder versorgte, abstottern, weil sie zugab, als letzte das Radium gesehen zu haben. Dafür hatte man auch eine Verlängerung der Aufenthalts- und Arbeitserlaubnis der Ausländerin befürwortet. Die Ärztegewerkschaft Marburger Bund konnte die Ansprüche des Krankhausträgers, der zu diesem Zeitpunkt übrigens wegen Pensionierung des Chefarztes über keine Umgangsgenehmigung verfügte, leicht abwehren, da dieser bei der Geltendmachung seiner Regreßforderungen die Ausschlußfrist des BAT verpaßt hatte.

Die Abgabe therapeutischer Dosen in das Abwasser dürfte auch in den neuen Bundesländern hoffentlich in absehbarer Zeit (in einigen Jahren?) der Vergangenheit angehören. Immerhin wurden

z.B. 1988 in Dresden ca. 1000 GBq Jod-131 ohne Zwischenschaltung einer Abklinganlage verwendet, d.h. in das Abwasser und damit in weniger als einer Halbwertszeit (8,05 d) in die Elbe abgegeben, wo wenige Kilometer weiter die nächste Wassergewinnungsanlage Wasser entnimmt. Es muß angemerkt werden, daß dieser Mißstand auch durch die bekannten Versorgungsmängel in der ehemaligen DDR nicht zu rechtfertigen ist. Zwar ist heute Stand der Technik, daß Kliniken für Millionen DM mit einer Abklinganlage ausgestattet werden, die das gesamte Brauchwasser einer Therapiestation mit Toiletten- und Duschwasser etc. auffängt. Aber auch ohne diesen Komfort haben sich zuvor die notwendige Therapie Schwerkranker und ein Minimum an Schutz des Abwassers besser als in Dresden vereinbaren lassen. Da ca. 90% der Aktivität des Patienten über den Urin ausgeschieden wird, ist mit einer gezielten und möglichst vollständigen Urinsammlung schon sehr viel erreichbar. Die resultierenden Volumina lassen sich in Öltanks von Haushaltsgrößen sammeln. Jedes Verweilen des Urins von einer Woche reduziert die abgegebene Aktivität um die Hälfte.

Problematisch ist die Tatsache, daß das Zerfallsprodukt des Technetium-99m nicht ein stabiler Kern, sondern der Betastrahler Technetium-99 mit einer Halbwertszeit von 210 000 Jahren ist. Da sich bei einem Mutter-Tochter-Verhältnis die Radioaktivitäten umgekehrt proportional zu den Halbwertszeiten verhalten, macht der Aktivitätsbeitrag dieser langlebigen Komponente beim einzelnen Patienten einen völlig unwesentlichen Anteil an der Strahlenbelastung aus. Dies gilt natürlich nicht in der Summation. Jährlich dürften auf diese Weise ca. 30 MBq Tc-99 bei den Nuklearmedizinern im Bereich der alten Bundesländern anfallen, wovon etwa 75%, also 22,5 MBq über den Patienten und der Rest über den Klinikabfall gehen. Beim Hersteller dürften nochmals etwa 22,5 MBq Tc-99-Abfall entstehen. Weltweit dürfte sich die Jahresmenge in der Größenordnung von 500 MBq bewegen.

Es wird argumentiert, daß dieser Abfalleintrag in die Umwelt im Vergleich zu dem durch die Kerntechnik völlig vernachlässigbar sei. In der Tat betrug in den Jahren 1983-1985 die Abgabe von Technetium-99 in den Englischen Kanal durch die Wiederaufbereitungsanlage La Hague 3,90 TBq pro GW(e)*a. Eine Aufarbeitung von jährlich ca. 700 t deutscher Brennelemente mit 20-25 GW(e)*a unter diesen Bedingungen trägt (neben vielen anderen, z.T. noch viel gefährlicheren radioaktiven Schadstoffen) jährlich 78-98 TBq Tc-99 in die marine Lebenswelt ein, also mehr als das Millionenfache der Menge aus der Nuklearmedizin. Aber kann ich die Verschmutzung des Grundwassers durch einen Liter verschütteten Öls damit entschuldigen, daß irgendwo in der Nordsee aus einer defekten Borstelle das Millionenfache ausfließt? Auf lange Sicht wird die Nuklearmedizin Alternativen zur Technetiumtechnologie entwickeln müssen, denn bei einer Halbwertszeit des Tc-99 von 210 000 Jahren wird sich dieser Schadstoff in der Ökosphäre zunächst nur akkumulieren.

Belastung bei der Abfallwiederverwertung

Hier sind relevant die starken umschlossenen Quellen, die zur Strahlentherapie eingesetzt werden. Wenn sie ausgesondert werden, z.B., weil durch das Abklingen die Bestrahlungszeiten zu lang werden, können sie noch ein beachtliches Strahlenfeld erzeugen. Dadurch wurde Kobalt-60 in Stahl

wiedergefunden, der aus Mexiko nach USA eingeführt wurde und auf einem Lkw an einer Meßstelle für Radioaktivität vorbeifuhr. Es stammte aus einer amerikanischen Therapieanlage, die zunächst an ein Krankenhaus in Mexiko verkauft worden und dann auf dunklen Wegen in den Schrotthandel gelangt war.

Dramatischer verlief der illegale Versuch der Wiederverwertung einer Cäsium-137-Quelle im Schrotthandel in Goiania, Brasilien, 1987. Die Radioaktivität lag als Cs-Chlorid vor und konnte dadurch inkorporiert werden. Kinder rieben sich begeistert mit dem in der Dunkelheit leuchtenden Pulver die Haut ein. 22 Personen hatten eine Inkorporation von mehr als 3100 kBq. 21 Personen benötigten eine Intensivbehandlung. Zum ersten Mal wurde Preußisch Blau zur Elimination von Radiocäsium eingesetzt, das zwar die Ausscheidung beschleunigen, aber die hohe interne Kontamination nicht beseitigen konnte. Bei zehn Patienten in einem kritischen akuten Strahlensyndrom wurden durch biologische Dosimetrie (Chromosomenanalyse) Dosen von 3-7 Gy festgestellt. Trotz intensiver Therapie mit Antibiotika, Thrombozytentransfusionen, Experimenten mit GM-CSF (granulocyte-macrophage colony-stimulating factor) bei acht Patienten ohne erkennbaren Effekt, starben vier, darunter ein Kind mit einer Inkorporation von 1,1 GBq. Trotz massiver Abschirmung der Gräber mit Beton gab es erheblichen Widerstand gegen die Bestattung der Opfer auf einem Friedhof. Das Unglück demonstriert zum wiederholten Mal die Hilflosigkeit auch der modernen Medizin gegenüber dem akuten Strahlensyndrom und die Gefahr, daß Menschen ihre ewige Ruhe nur als radioaktiver Abfall finden können. Darüber hinaus wird an diesem Beispiel wieder deutlich, daß der Gebrauch einer Technik nicht nur Wissen weniger Experten verlangt, sondern in einen adäquaten Bildungsstand und ein damit verbundenes Gefahrenbewußtsein der Bevölkerung eingebettet sein muß.

Minimierung des Schadens

Qualitätskontrolle und Radionuklidverbrauch

Die Qualität nuklearmedizinischer Geräte und Verfahren und die zur Untersuchung notwendige Radionuklidmenge stehen in einem engen Zusammenhang. Wie in anderen Bereichen des Gesundheitswesens auch kann eine sparsame Verwaltung der Mittel in eine Politik ausarten, die die Qualität der medizinischen Versorgung kaputtspart. Es muß ausdrücklich vermerkt werden, daß deutsche Nuklearmediziner sich in einer beachtlichen Tradition bemühen, die Qualitätskontrolle und -sicherung, die sich in einer methodisch spezialisierten Disziplin auch besonders leicht objektivieren lassen, voranzutreiben. Nicht geringzuschätzen ist dabei die Rolle der Kassenärztlichen Vereinigung, die auf dem Gebiet der Nuklearmedizin durch Apparaterichtlinien schon sehr frühzeitig bundesweit Mindestansprüche festgelegt hat. Sie haben es auch manchem Krankenhausarzt erleichtert, auf die Erneuerung völlig veralteter Einrichtungen zu dringen. Erfreulich ist auch die deutsche Tradition, mit möglichst geringen Radionuklidmengen zu arbeiten. Andere Länder sind hier nicht so zurückhaltend und dies nicht etwa wegen einer schlechteren apparativen Ausstattung (s. Tab. 12).

Tab. 12: Mittlere und maximale Dosis Tc-99m [MBq] zur Schilddrüsendiagnostik in verschiedenen Ländern nach UNSCEAR 88

Land	mittl.	max.
BRD	37	78
S	81	146
GB	75	200
USA	237	555

Regelmäßige Ringversuche der Physikalisch Technischen Bundesanstalt erlauben eine Kontrolle der Dosismeßgeräte.

Insgesamt kann man festhalten, daß durch Bereitstellung ausreichender finanzieller und personeller Ressourcen sowie durch flankierende berufs- und allgemeinpolitische Maßnahmen dafür gesorgt werden kann, daß die erfreulich zahlreichen Einzelbemühungen auf diesem Feld rascher eine flächendeckende Breitenwirkung erzielen.

Qualifikation und Strahlenschutz

Ohne Zweifel ist die Qualifikation der Beschäftigten in der Nuklearmedizin von ausschlaggebender Bedeutung sowohl für den Strahlenschutz des Patienten als auch für den eigenen. Es ist ein Mißstand, daß nicht selten statt qualifizierter medizinisch technischer Radiologieassistenten nur

angelernte Hilfskräfte wie Arzthelferinnen eingesetzt werden, die weder über eine systematische Schulung in nuklearmedizinischer Methodik und Radiochemie noch im Strahlenschutz verfügen.

Auf die Notwendigkeit, die Anforderungen an den Umfang ärztlicher Weiterbildung als Voraussetzung für die selbstverantwortliche Tätigkeit in der Nuklearmedizin zu harmonisieren, wurde schon hingewiesen. Man erweist der Nuklearmedizin aber auch keinen Dienst, wenn man, wie jüngst geschehen, von Seiten der Fachgesellschaften den ärztlichen Körperschaften völlig unrealistische Anforderungskataloge für den quantitativen Inhalt der Weiterbildung übergibt. Ohne einer Verlängerung ärztlicher Weiterbildungszeiten das Wort reden zu wollen, halte ich es für viele Ärzte hinsichtlich der späteren Berufsausübung für sinnvoll, wenn sie sich sowohl für das Gebiet der radiologischen Diagnostik als auch der Nuklearmedizin qualifizieren. Leider wird dies zunehmend durch die rigorose Politik der Arbeitsvertragsbefristung durch die Krankenhausträger unmöglich gemacht. Auf diese Weise werden viele Radiologen, wenn der Arbeitsplatz beides verlangt, zu einer Schmalspurnuklearmedizin gezwungen, obwohl sie es nicht wollen.

Indikationsstellung

Nachdem sich in der Übersicht gezeigt hat, daß nuklearmedizinische Leistungen, gemessen an den Anforderungen einer hochtechnisierten Medizin, im Durchschnitt eher zu selten in Anspruch genommen werden, scheint es ein Widerspruch zu sein, die Indikationsstellung kritisch zu betrachten, also davon auszugehen, daß diese Untersuchungen in einem nennenswerten Umfang überflüssig sein könnten. Aber das eine schließt das andere nicht aus; die Untersuchung kann auch dem falschen Patienten zugute kommen.

Es gibt immer wieder einzelne Fälle, in denen die anstehende klinische Fragestellung nicht oder nicht zu dem verordneten Zeitpunkt durch die Nuklearmedizin zu beantworten ist. Trotz der starken Minderzahl dieser Fälle sollte deshalb jede Verordnung persönlich durch einen fachkundigen Arzt bestätigt werden. Es verstößt nicht nur gegen formale Vorschriften, sondern gegen Grundregeln ärztlicher Sorgfalt, wenn z.B. eine Arzthelferin auf eine Überweisung hin in Abwesenheit des Praxisinhabers die Radioaktivitätsdosis appliziert. Es ist schon vorgekommen, daß schon das irrtümliche Platznehmen im falschen Wartezimmer ausreichte, um einer nuklearmedizinischen Untersuchung unterzogen zu werden. Auch die Qualität der Befundung leidet darunter, wenn der Arzt sich kein persönliches Bild vom Patienten und seinem Beschwerdebild gemacht hat. Auf solche Praktiken kann man im Interesse des Patienten nur adäquat reagieren, in dem man auf weitere Zuweisungen verzichtet. Umgekehrt sollte man Verständnis haben, wenn ein Untersuchungsauftrag abgelehnt oder mit einem Vorschlag zur Modifikation beantwortet wird. Hier hilft ein verbesserter kollegialer Informationsaustausch weiter.

In vielen Fällen fehlen dem Nuklearmediziner aber ausreichende Informationen, um einen Untersuchungsauftrag trotz Zweifel an der Indikation ohne die Gefahr der Benachteiligung des

Patienten ablehnen zu können. Dies sei am Beispiel der Schilddrüsendiagnostik erläutert. Befaßt man sich näher mit der Anamnese eines Strumapatienten, so stellt man nicht selten fest, daß keineswegs eine Veränderung in der Schilddrüse der Grund für das Aufsuchen der Diagnostik ist, sondern daß sich die Schilddrüse, häufig nur geringfügig vergrößert, in einem längeren Zeitraum überhaupt nicht verändert hat. Die Patienten weisen Befindlichkeitsstörungen, sehr häufig mit depressiven Zügen, auf. Die Somatisierung der Beschwerden in die Schilddrüse und das Verlangen nach einer spezifischen Schilddrüsendiagnostik durch den Laien wird von manchen Ärzten durch eine prompte Überweisung zur nuklearmedizinischen Diagnostik quittiert. Ein besseres Eingehen auf das Beschwerdebild des Patienten, hinter dem neben einer Depression auch schlecht verarbeitete Stressexpositionen stehen können, durch den primären Arzt kann sicher einen Beitrag zu Reduktion unnötiger Schilddrüsendiagnostik und damit der Strahlenbelastung leisten.

Als ein sehr wirksames Mittel zur Abklärung der Indikation hat sich die Rückfrage an den überweisenden Arzt erwiesen, welche Konsequenz denn aus einem Untersuchungsergebnis gezogen werden soll oder welche für die nächsten diagnostische oder therapeutische Entscheidung relevante Frage der Nuklearmediziner zu beantworten hat. Stellt sich dabei heraus, daß die weiteren Schritte bereits unabänderlich feststehen und die nuklearmedizinische Untersuchung z.B. nur zur "Abrundung der Diagnose" dient, kann im Regelfall ohne Schaden für den Patienten auf die Verabreichung von Radioaktivität (und Strahlenbelastung) verzichtet werden. Angesichts des hohen und wachsenden Kollektivdosisanteils könnte dieser Dialog intensiv bei der Anordnung zur Myokardszintigraphie gepflegt werden.

Mit Blick auf den großen Anteil der Knochenszintigraphie an der Kollektivdosis soll noch kurz auf den Meinungsstreit zur Indikation regelmäßiger Knochenszintigramme in der Karzinomnachsorge eingegangen werden. Gerade das Mammakarzinom mit seinem großen Anteil von Patienten mit guter Prognose ist schon in mehreren Studien kritisch auf diese Frage hin untersucht worden. Bei einer niedrigen Prävalenz von Metastasen, einer hohen Sensitivität und einer eingeschränkten Spezifität einer Diagnostikmaßnahme stehen leicht einer unverhältnismäßig große Zahl falsch positiver Befunde nur wenige Fälle gegenüber, die ohne diese ungezielte Diagnostik übersehen worden wären. Hier kann es keine pauschale Antwort geben. Es muß patientenindividuell abgeschätzt werden, ob und in welchem Zeitraum ein besonders großes Metastasierungsrisiko besteht. Eine hohe Symptomaufmerksamkeit des Patienten und eine dichte ärztliche Betreuung des Patienten können es bei einem gegebenen Gefährdungsgrad eher erlauben, das Knochenszintigramm statt ungezielt in einer regelmäßigen Folge gezielt bei einem gegebenen Verdachtsmoment einzusetzen. Auch die Patientin muß hier mitentscheiden. So wird man eher eine Patientin aus der Routinediagnostik herausnehmen, die von der Anmeldung zur Untersuchung bis zur Mitteilung des normalen Ergebnisses eine Zeit der Angst durchlebt, als eine Patientin, die aus einem normalen Befund deutlich neuen Mut für "das nächste Jahr" schöpft.

Gesundheits- und andere Politik

Fast in jedem der vorangehenden Abschnitte ist deutlich geworden, welche Rolle die politischen Rahmenbedingungen auf allen Ebenen für Schaden und Nutzen bei der Anwendung radioaktiver Stoffe haben. Dies soll hier nicht nochmals wiederholt werden. Vielmehr sollen noch nicht behandelte Aspekte der Strahlenschutzpolitik angesprochen werden, die wegen ihrer Auswirkung auf die Strahlenbelastung und damit auf die Gesundheit auch Gesundheitspolitik ist.

Zunächst müssen systematische Vollzugsdefizite beseitigt werden. Selbst wenn Verstöße gegen Rechtsnormen nur die Minderheit sind (was möglicherweise keineswegs in allen Bereichen so ist), kann diese Minderheit einen beachtlichen Teil der unnötigen Kollektivdosis und damit Schadenserwartung verursachen. Beginnend bei der Versorgung, über die Verhältnisse in der Praxis bis zur Entsorgung muß die Gewerbeaufsicht intensiver ihren Pflichten nachkommen. Das kostet natürlich auch Personal, mit dem diese Ämter viel zu schlecht ausgestattet sind. Ähnliches gilt auch für die Aufsichtsfunktionen der ärztlichen Körperschaften. Damit soll keineswegs einem Überwachungsstaat das Wort geredet werden, vielmehr darf nicht über Indikatoren für offenkundige Verstöße hinweggesehen werden.

Eine zentrale Forderung ist eine Verbesserung der Strahlenschutzgesetzgebung. Im Mittelpunkt steht eine lange überfällige Senkung der Grenzwerte für beruflich strahlenbelastete Personen. Damit muß die Einbeziehung weiterer Kreise von Berufstätigen einhergehen, die jetzt noch nicht zu den Strahlenbelasteten gezählt werden, obwohl ihre Belastung einen namhaften Beitrag zur Kollektivdosis stellt.

Viele Verbesserungen im Strahlenschutz sind in erheblichem Maße kostenträchtig und lassen sich gegenüber dem Kostenträger nur durchsetzen, wenn sie durch gesetzliche Anforderungen unabweisbar sind. Man wird den Eindruck nicht los, daß manche Anforderung durch den Gesetzgeber unterbleibt, weil die öffentliche Hand als Träger medizinischer Einrichtungen auch die finanziellen Konsequenzen zu tragen hat.

Der methodische Wandel benötigt im allgemeinen keinen gezielten ordnungspolitischen Anstoß. Die Erfahrung zeigt, daß Methoden, die eine nuklearmedizinische Diagnostik ersetzen können, wie bei vielen Indikationen z.B. die Ultraschalldiagnostik, sich nicht nur bei Überlegenheit, sondern auch bei Gleichwertigkeit durchsetzen können. Gelegentlich hat man den Eindruck, daß das Bewußtsein um die Notwendigkeit des Strahlenschutzes durch methodischen Wandel bei den nicht radiologisch tätigen Ärzten ausgeprägter ist. Gleiches gilt auch für die Substitution von Radioimmunoassays durch Assays mit anderen, nicht radioaktiven Indikatoren. Allerdings darf sich die traurige Episode nicht wiederholen, als eine verzögerte Anpassung rechtlicher Vorschriften viel zu lange verhinderte, daß

niedergelassene Ärzte sich in der Schilddrüsendiagnostik von Jod-131 auf Technetium-99m umstellen konnten, weil ihnen der Gebrauch von Molybdängeneratoren untersagt war.

Obwohl man Kreativität in der Forschung nicht verordnen kann, wird sich mancher Fortschritt nicht ohne politische und finanzielle Förderung ereignen. Welcher Hersteller kann mitten im Technetium-Boom ein Interesse daran haben, eine Alternative mit geringerer ökologischer Belastung zu entwickeln. Welches kernchemisches Institut hat dazu die finanziellen Mittel? Welche Regierung wird daran ein Interesse haben, wenn sie ihren Bürgern die Ungefährlichkeit einer viel größeren Umweltbelastung mit radioaktiven Schadstoffen als ungefährlich darstellt?

Politisch Verantwortliche, aber auch ärztliche Kollegen, vor allem die radiologisch tätigen, dürfen nicht ein Klima der Verharmlosung niedriger Strahlendosen pflegen. Dies vergiftet nämlich die Motivation aller, von deren wachen Mitwirkung die Verringerung der Strahlendosen auch in der Medizin abhängt. Schließlich gilt noch immer der Merkspruch, daß im Strahlenschutz ein Gramm Gehirn mehr bewirkt als eine Tonne Blei.

Abschließend muß ich ein Wort zur Haltung meiner Fachkollegen in der politischen Auseinandersetzung um den Gebrauch der Kernenergie verlieren. Man kann Verdrängung und Verleugnung der Probleme beobachten, verbunden mit einem "Einigeln" in eine scheinbar wertfreie Berufsausübung, aber auch eine Art Solidarisierung mit denen außerhalb der Medizin, mit denen man sich im gleichen Kontext angegriffen fühlt, wie den Vertretern der Kernindustrie und den Politikern, die den Gebrauch der Kernenergie befürworten. Nuklearmediziner sollten bedenken, daß sie als Ärzte der Anwalt ihrer Patienten sein sollten und in erster Linie ihr gesundheitliches Wohl im Auge haben sollten. Sie sollten berücksichtigen, daß ihre Haltung auch die Glaubwürdigkeit beeinflusst, die man ihren Bemühungen um Strahlenschutz für Patienten und Personal zumißt. Nichtnuklearmediziner sollten sich hier fragen, inwieweit diese Auseinandersetzung paradigmatisch ist, und wie sie reagieren, wenn sich in ihrem Fachgebiet analoge Fragen stellen, z.B. beim Gebrauch von Substanzen und Techniken in der Heilkunde, deren Entwicklung und Produktion ökologisch bedenklich ist.

Zusammenfassung

Zunächst werden die bekanntgewordenen Schäden durch Anwendung der Radioaktivität in der Medizin dargestellt. Über 30 000 Patienten mußten dadurch vorzeitig sterben, hauptsächlich an bösartigen Tumoren, obwohl zum Zeitpunkt der Anwendung die enorme Schadenspotenz der verwendeten Radionuklide bekannt war. Diagnostischer Eifer, Sorglosigkeit und Nichtbeachtung der Literatur sowie von Warnungen haben sich verhängnisvoll ausgewirkt. Die Schadensstatistik zeigt eindrucksvoll die Besonderheit stochastischer Strahlenwirkungen: Ohne erkennbare Dosischwelle nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung durch Erzeugung bösartiger Tumore mit der Dosis zu und damit die Anzahl der Betroffenen in einem belasteten Kollektiv.

Bei der Diagnostik und Therapie mit Radionukliden nach dem heutigen Stand der Wissenschaft überwiegen die positiven Folgen für den Patienten bei weitem. Nach einem konzisen Überblick über die wesentlichen Vorteile nuklearmedizinischer Verfahren für den Patienten wird ausführlicher auf die Schattenseiten eingegangen. 89% der nuklearmedizinische Verfahren kommen nur 26% der Weltbevölkerung zugute. Auch in den Ländern mit einem hochtechnisierten Gesundheitssystem sind die Leistungen pro Einwohner sehr unterschiedlich verteilt. Diese Inhomogenität läßt sich auch innerhalb Deutschlands zeigen. Die Untersuchungsfrequenz nimmt mit der Bevölkerungsdichte zu und scheint einem Sättigungswert zuzustreben, der bei einem jährlichen nominellen Molybdänverbrauch von 6600 GBq pro M Einwohner liegt. Dies entspricht etwa einer jährlichen Strahlenbelastung von 150 μ Sv pro Einwohner. Die derzeitige jährliche Strahlenbelastung wird auf 120 μ Sv pro Einwohner geschätzt. Daraus errechnet sich eine Kollektivdosis von ca. 7 k Personen-Sv in den alten Bundesländern. Eine Abschätzung der Schadenserwartung ergibt die Induktion von etwa 1000 Krebserkrankungen pro Jahr, von denen etwa die Hälfte tödlich verlaufen kann.

Wenn auch die Einzeldosis und damit das Krebsrisiko im Einzelfall so niedrig ist, daß dies kein Grund sein kann, auf eine medizinisch indizierte Untersuchung zu verzichten, muß alles getan werden, um die Kollektivdosis zu verringern.

Die Belastung des beruflich exponierten Personals wird pro Jahr grob auf etwa 14 Personen-Sv geschätzt. In Kliniken akkumuliert sich die sehr geringe Einzeldosis des Pflegepersonals auf Werte, die in der Größenordnung der beruflich exponierten Personen liegen. Auch hier ergibt sich die Notwendigkeit für eine Verringerung der Kollektivdosis.

Einen ähnlich hoher Beitrag kann sich aus vielen kleinen Dosisbeiträgen bei mitbestrahlten anderen Patienten zusammenaddieren. Deshalb müssen sie im Wartebereich von Patienten mit höheren Technetium-99m-Dosen (wie bei Knochen- und Myokardszintigramm) abgeschirmt werden.

Am Beispiel der Schilddrüsendiagnostik wird gezeigt, wie eine skandalöse Gesundheitspolitik in Deutschland nicht nur unnötige Folgekosten des Jodmangels von einer Milliarde DM verursacht,

sondern auch unnötige nuklearmedizinische Leistungen auslöst mit einem entsprechenden Beitrag zur Kollektivdosis.

Ausdrücklich wird auf heutige Anwendungen radioaktiver Stoffe hingewiesen, bei denen die Schädlichkeit überwiegt, vor allem Radonbäder und radiumhaltige Mineralwässer.

Neben der schädlichen Ausübung von Nuklearmedizin ohne Fachkunde und der Strahlenbelastung bei der Herstellung von Radiopharmaka wird ausführlich auf die Belastung von Beschäftigten und der Bevölkerung durch den Transport per Luft und Straße eingegangen. Die Vorschriften erlauben eine viel zu geringe Abschirmung des Transportgutes. Die betroffenen Beschäftigten im Transportgewerbe unterliegen Strahlendosen in einer mit Beschäftigten der Kernindustrie vergleichbaren Größenordnung, ohne daß in ausreichender Weise rechtliche Vorschriften des Strahlenschutzes greifen.

Nach dem heutigen Stand der Technik entstehen in der Nuklearmedizin keine so langlebigen Abfälle, daß damit ein "Endlager" wie Schacht Konrad in Salzgitter gerechtfertigt werden kann. Dennoch liefert das Tochterprodukt des kurzlebigen Technetium-99m, der Betastrahler Technetium-99 wegen seiner physikalischen Halbwertszeit von 210 000 Jahren eine ständig zunehmende Belastung der Ökosphäre, die derzeit nur wegen der gigantischen Umweltverseuchung durch Atomwaffener Explosionen sowie durch Wiederaufarbeitung und andere Freisetzungen im Bereich der Kernindustrie relativ unbedeutend ist. Langfristig muß diese Technologie abgelöst werden.

Von den drei Säulen des Strahlenschutzes, Sicherung der technischen Qualität, Qualifikation des Personals und Beachtung einer strengen Indikationsstellung kann die zweite und vor allem die dritte noch erheblich ausgebaut werden.

Abschließend wird die Notwendigkeit einer besseren Strahlenschutzgesetzgebung, vor allem eine Senkung der Grenzwerte für die zulässige Strahlenbelastung des Personals, reklamiert. Es wird an die Fachkollegen, die die Strahlengefahren verharmlosen oder negieren, appelliert, im Interesse ihrer Patienten ihre Haltung zu revidieren.

Literatur

Zu Abschnitt 2:

Zahlreiche Referate mit Diskussion eines von Ch. W. Mays geleiteten Symposiums sind in Health Physics 35 (1978) abgedruckt, eines von Buchler gesponserten Rundtischgespräches mit Referaten im Sonderheft 1 Band 12 Aktuelle Rheumatologie 1987. Ein Supplement der Strahlentherapie gilt diesem Thema: Gössner, W., Gerber, G.B., Hagen, U., Luz, A. (Eds.): The Radiobiology of Radium and Thorotrast, Urban & Schwarzenberg, München-Wien-Baltimore 1986. Eine Übersicht findet sich in BEIR IV: Health Risks of Radon and other Internally Deposited Alpha-Emitters, National Academy Press, Washington D.C., 1988

Zitiert wurden darüber hinaus: Morant, R., Rüttner, J.R.: Thorotrast-Spätschäden, Schweiz. Med. Wschr. 117 (1987) 952-957 und Fuchs, G.: Die Strahlengefährdung des Menschen in der gegenwärtigen Zivilisation, Akademie Verlag, Berlin 1971

Zum Abschnitt "Bekannte Schäden durch Anwendung der Radioaktivität in der Medizin":

Zusätzlich zu eigenen Recherchen wurden Daten verwendet aus UNSCEAR: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 1988 Report to the General Assembly, with annexes, New York 1988; Adzersen, K.-H.: Medizinische Strahlenbelastung in der BRD und Möglichkeiten der Dosisreduktion, Berichte des Otto Hug Strahleninstitutes, Band 3, in Vorbereitung; Glöbel, B., Keller, K.D., Keller, G., Lehnen, H., Andres, C.: Strahlenexposition durch die nuklearmedizinische Verwendung radioaktiver Stoffe, NucCompact 12 (1981) 242-248; Schicha, H.: Strahlenexposition des Patienten und des Personals in der Nuklearmedizin in: Köhnlein, W., Traut, H., Fischer, M. (Hrsg.): Die Wirkung niedriger Strahlendosen, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo 1989, S. 151-162; Informationen des Arbeitskreises Jodmangel für Ärzte und Gesundheitsorganisationen

Zum Abschnitt "Anwendungen mit überwiegendem Nutzen":

Eine Übersicht bietet der o.g. Report BEIR IV; Stellungnahmen finden sich im o.g. UNSCEAR Report 88 und im Statement from the 1987 Como Meeting of the ICRP, Annals of the ICRP 1987, Vol. 17, No. 4. Zitiert wurden auch Henshaw, D.L., Eatough, J.P., Richardson, R.B.: Radon as a Causative Factor in Induction of Myeloid Leukaemia and Other Cancers, Lancet (1990) 1008-1012; Gans, I, Fusban, H.U., Wollenhaupt, H., Kiefer, J., Glöbel, B., Berlich, J., Porstendörfer, J.: Radium 226 und andere natürliche Radionuklide im Trinkwasser und in Getränken in der Bundesrepublik Deutschland, WaBoLu Hefte des BGA 4/1987

Zu den Abschnitten "Versorgung und Entsorgung" sowie "Minimierung des Schadens":

Zu eigenen Recherchen Material der BI Bühlau, des Öko-Instituts Freiburg/Darmstadt und der Vereinigung Cockpit sowie Daten aus UNSCEAR Report 88.

Abkürzungen, Akronyme und Einheiten

Äquivalentdosis

wird berechnet durch Multiplikation der Energiedosis mit dem amtlich verordneten Qualitätsfaktor (nicht zu verwechseln mit der RBW, relativen biologischen Wirksamkeit aus der strahlenbiologischen Empirie), Einheit: Sievert (Sv)
Für Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlen wird $Q = 1$ gesetzt, obwohl die RBW dieser Strahlenarten unterschiedlich ist.

BEIR

Biological Effects of Ionizing Radiation
Komitee der Nationalen Akademie der Wissenschaften, USA, das Berichte über die biologische Strahlenwirkung, insbesondere die Krebsinduktion, veröffentlicht hat

Bq

Becquerel Einheit der Radioaktivität $1 \text{ Bq} = 1 \text{ Zerfall/s}$

deterministische Strahlenwirkung

wird nach Vorschlag der \rightarrow ICRP nicht-stochastische S. ersetzen. Schwere der klinischen Strahleneffekte sind proportional zur Dosis und bleiben unterhalb einer Dosischwelle verborgen (Beispiele: akutes Strahlensyndrom, Erythem, Katarakt)

eV

Elektronenvolt, Einheit der Energie, 1 eV entspricht $1,6021 \cdot 10^{-19}$ Joule

G

Giga 10^9

Grenzwert

bei \rightarrow stochastischen Strahlenwirkungen keine Grenze zwischen schädlich und unschädlich, sondern eine Begrenzung der Schadenswahrscheinlichkeit

GW(e)*a

Gigawattjahr(elektrisch), Energieäquivalent als Maß für den Abbrand eines Brennelementes im Kernreaktor, von dem die Menge entstandener Spaltprodukte und Transurane abhängt

Gy

Gray, Einheit der Energiedosis $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$ (= 100 rad, Einheit bis 31.12.85)

ICRP

International Commission on Radiological Protection
Internationale Strahlenschutzkommission, an die WHO angegliedert, Mitglieder werden selbstrekrutiert, gibt Übersichtsberichte über wichtige Einzelthemen, Berechnungsgrundlagen und Empfehlungen für den Strahlenschutz heraus, die in vielen Staaten und in der Europäischen Gemeinschaft in Rechtsvorschriften umgesetzt werden.

Kollektivdosis

Summe der Äquivalentdosis aller Angehörigen eines Kollektivs, entspricht dem Produkt aus durchschnittlicher Personendosis und Anzahl der Personen,
Einheit: Personen-Sv

M

Mega 10^6

Mo

Element Molybdän

Mo-99

Beta- und Gammastrahler, Halbwertszeit 66 Stunden, der zu 87,6% in \rightarrow Tc-99m und 12,4% in \rightarrow Tc-99 zerfällt. Im Mo-99-Generator ist Mo-99-Oxid meist adsorbtiv an ein Trägermaterial gebunden, aus dem das entstehende Tochternuklid mit physiologischer Kochsalzlösung eluiert werden kann.

Personen-Sv

Einheit der Kollektivdosis

R

Röntgen bis 31.12.85 Einheit der Ionisationsdosis $1 R = 2,58 \cdot 10^4$ Coulomb/kg, erzeugt bei 143 keV in Weichteilgewebe etwa 9,56 mSv, in kompaktem Knochen etwa 10,5 mSv

Ra

Element Radium

stochastische Strahlenwirkung

Schwere der klinischen Erscheinung unabhängig von der Dosis, Wahrscheinlichkeit eines Schadens nimmt mit der Dosis zu, keine Dosischwelle bekannt (Beispiele: Karzinom, Sarkom, genetischer Schaden)

Sv

Sievert, Einheit der \rightarrow Äquivalentdosis, $1 Sv = 1 \text{ Joule/kg}$
(= 100 rem, Einheit bis 31.12.85),
 $10 \text{ mrem} = 0,1 \text{ mSv} = 100 \mu\text{Sv}$, $1 \text{ rem} = 10 \text{ mSv}$

T

Tera 10^{12}

Tc

Element Technetium

Tc-99

Betastrahler, Halbwertszeit 210 000 Jahre, entsteht aus \rightarrow Mo-99 und \rightarrow Tc-99m

Tc-99m

metastabiles Tc-99, angeregter Kern, der mit einer Halbwertszeit von 6 Stunden und Emission einer Energie von 143 keV (Gammastrahlung) in den Grundzustand \rightarrow Tc-99 übergeht

Th

Element Thorium

UNSCEAR

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation,
gibt regelmäßig Berichte zur Strahlenbelastung der Weltbevölkerung, ihre Quellen und Folgen
etc. heraus

Anschrift des Autors

Prof. Dr. Horst Kuni

Nuklearmedizin, Zentrum für Radiologie, Universitätsklinikum

35033 Marburg

<http://www.staff.uni-marburg.de/~kuni/>

<mailto:horst@kuni.org>