

Strahlenanwendung in Krankenversorgung und medizinischer Forschung – Das Prinzip der Rechtfertigung

Christoph REINERS ML (Würzburg)

Mit 4 Abbildungen

Zusammenfassung

Ionisierende Strahlung, wie sie bei den Atombombenabwürfen auf Hiroshima und Nagasaki oder der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl freigesetzt wurde, kann erhebliche Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen haben. Allerdings werden direkte gesundheitliche Effekte dieser Form der Strahlenexposition auf menschliches Gewebe häufig mit indirekten, gesellschaftlichen Folgen derartiger Katastrophen in der öffentlichen Wahrnehmung vermischt. Dies führt häufig zu einer Überbewertung der gesundheitlichen Risiken von Strahlenexpositionen. Unter dem Aspekt der Nutzen-Risiko-Abwägung im Rahmen der Rechtfertigung der Anwendung ionisierender Strahlung in der Krankenversorgung und in der medizinischen Forschung ist jedoch zu fordern, dass direkte gesundheitliche Folgen der Strahlenwirkung klar von mit Strahlenkatastrophen verbundenen indirekten gesellschaftlichen Auswirkungen getrennt betrachtet werden.

Auf der Basis der Empfehlung unabhängiger internationaler Expertenkommissionen wurde in den letzten Jahrzehnten weltweit ein System zur Rechtfertigung der Anwendung ionisierender Strahlung in der Medizin entwickelt, das sowohl auf die Krankenversorgung als auch die medizinische Forschung anzuwenden ist. Hierauf basieren auch die in Deutschland und Europa gültigen Rechtsnormen.

Abstract

Ionizing Radiation as e.g. released from atomic bombing of Hiroshima and Nagasaki or the reactor catastrophe of Chernobyl, may tremendously effect human health. However, the direct effects of this kind of radiation exposure on human tissue are frequently mixed up in the perception of the public with indirect, societal consequences of such catastrophes. This frequently leads to over estimation of the health related risks of radiation exposure in general. Under the aspect of justification of the application of ionizing radiation in health care and in medical research, such directly health related consequences of radiation effects have to be clearly separated from indirect societal consequences of radiation catastrophes.

During the last decades, a system for justification of the application of ionizing radiation in medicine has been developed worldwide on the bases of the recommendations of international independent expert commissions. This system of justification has to be applied both for health care and medical research and is the scientific base of laws and regulation valid in Europe and in Germany.

Ionisierende Strahlung, wie sie in massiver Form bei den Atombombenabwürfen auf Hiroshima und Nagasaki oder der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl freigesetzt wurde, kann erhebliche Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen haben. Allerdings werden in der öffentlichen Wahrnehmung direkte gesundheitliche Effekte dieser Form der Strahlenexposition häufig mit indirekten, gesellschaftlichen Folgen derartiger Katastrophen vermischt. Dies führt häufig zu einer Überbewertung der gesundheitlichen Risiken von Strahlenexpositionen. Die sorgfältige Langzeitbeobachtung der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki erlaubt aber heute mit ausreichender Sicherheit die korrekte Einschätzung der Risiken medizinischer Strahlenexpositionen.

Auf der Basis der Empfehlung unabhängiger internationaler Expertenkommissionen wurde in den letzten Jahrzehnten weltweit ein System zur Rechtfertigung der Anwendung ionisierender Strahlung in der Medizin entwickelt, das sowohl auf die Krankenversorgung als auch die medizinische Forschung anzuwenden ist. Hierauf basieren auch die in Deutschland und Europa gültigen Rechtsnormen.

1. Strahlung, Strahlendosen und Strahlenwirkungen in Kürze

1.1 Strahlenarten und Strahlendosen

Die in der Röntgendiagnostik, nuklearmedizinischen Diagnostik sowie der Strahlentherapie angewendete Strahlung ist – physikalisch betrachtet – elektromagnetische Wellenstrahlung. Zu dieser Strahlenart gehören auch die optische Strahlung, Radiowellen sowie niederfrequente Felder von elektrischen Überlandleitungen. Die im Röntgen, der Nuklearmedizin und Strahlentherapie verwendete durchdringende Strahlung unterscheidet sich einerseits von diesen Strahlungsarten durch die kürzere Wellenlänge und die höhere Frequenz, andererseits aber auch durch ihre Eigenschaft, in Materie Ionisationen zu erzeugen. Insofern bezeichnet man sie zusammenfassend auch als „Ionisierende Strahlung“.

Der Mensch ist im Alltag den genannten Strahlenarten in verschiedener Form ausgesetzt. Was die ionisierende Strahlung angeht, so resultiert nach den regelmäßigen Erhebungen des Bundesamts für Strahlenschutz (Abb. 1) pro Kopf des Bundesbürgers im Durchschnitt eine jährliche Exposition aus natürlichen Quellen von rund 2,1 mSv (*BfS* 2015, o. J.).

Kommentar: Im Strahlenschutz verwendet man zur Bewertung gesundheitlicher Strahlenrisiken die sogenannte effektive Dosis. Diese berücksichtigt die physikalisch bestimmbare Höhe der Strahlenexposition, die dabei wirksame Strahlenart sowie die unterschiedliche Strahlensensibilität exponierten Gewebes. Auf diese Weise wird rechnerisch eine Größe ermittelt, die das Gesamtrisiko der Strahlenexposition unterschiedlicher Organe im Sinne einer „Ganzkörperdosis“ sowohl für äußerliche als auch für innerliche Strahlenexpositionen berücksichtigt. Einheit der effektiven Dosis ist das „Sievert“ (benannt nach dem schwedischen Arzt und Physiker Rolf SIEVERT [1896–1966]).

Die natürliche Exposition (Abb. 1) in Höhe von 2,1 mSv/a setzt sich zusammen aus kosmischer Strahlung aus dem Weltraum (ca. 0,3 mSv), terrestrischer Strahlung aus radioaktiven Gesteinsarten im Boden (ca. 0,4 mSv) und Exposition durch natürlich radioaktive Nahrungsbestandteile (z. B. durch Kalium-40; ca. 0,3 mSv). Hinzu kommt die Exposition von etwa 1,1 mSv durch das natürliche vorkommende radioaktive Edelgas Radon und seine Zerfallsprodukte im Freien und in Häusern.

Bei der Einschätzung der Risiken der Strahlenexposition in diesem Dosisbereich ist zu berücksichtigen, dass die Strahlenexposition aus natürlichen Quellen – weltweit – vor allem von der Höhe des Standorts über dem Meeresspiegel einerseits (höhere Exposition durch kosmische Strahlung z. B. auch bei Interkontinentalflügen) und andererseits von der lokalen Bodenbeschaffenheit abhängt (relativ höherer Wert in Gegenden mit Vorkommen von natürlich radioaktiven Gesteinsarten und dem Edelgas Radon). In Deutschland variiert die jährliche Strahlenexposition aus diesen Quellen zwischen ca. 1 mSv/a und ca. 5 mSv/a.

Zu dieser Strahlenexposition aus natürlichen Quellen von ca. 2,1 mSv/a kommt jährlich eine zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition von ca. 1,9 mSv/a hinzu (Abb. 1).

Fast der gesamte Beitrag dieser zivilisatorischen Exposition beruht auf Strahlenanwendungen in der Medizin. Die Beiträge durch Freisetzungen aus Kernkraftwerken im Normal-

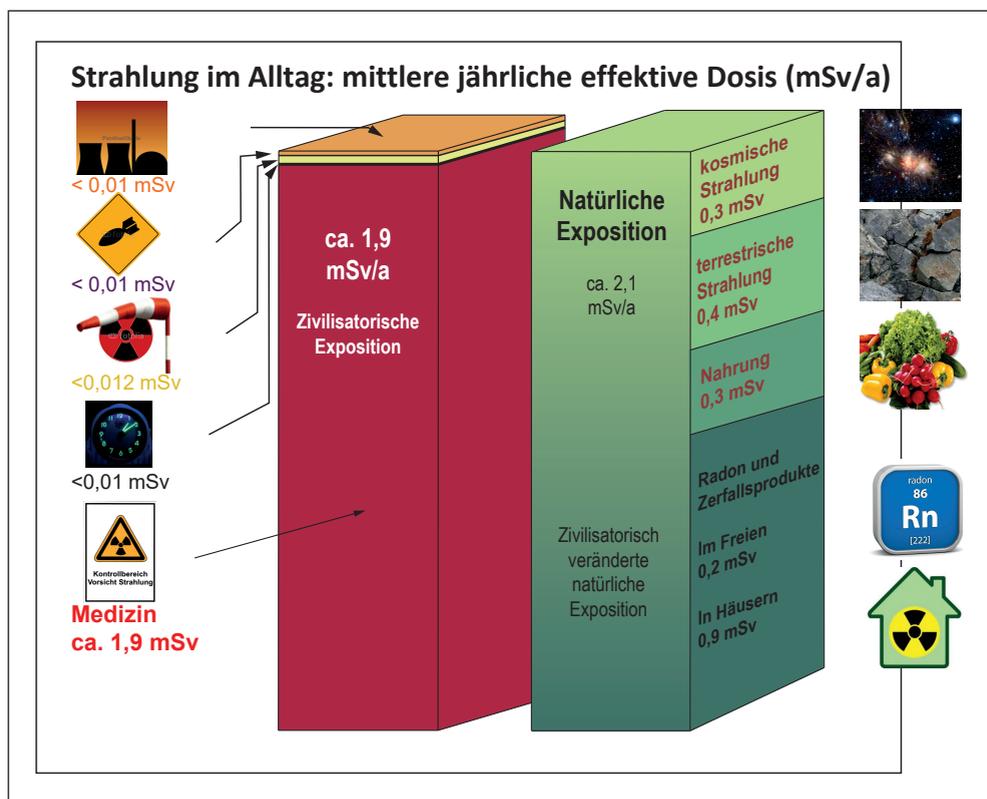


Abb. 1 Effektive Jahresdosis einer Person durch ionisierende Strahlung in mSv im Jahr 2013, gemittelt über die Bevölkerung Deutschlands (BMUB 2015)

betrieb, Fallout von Kernwaffenexperimenten in den 1960er Jahren, heute noch in Deutschland nachweisbare Folgen der Kernkraftwerksunfälle in Tschernobyl und Fukushima sowie aus technischen Anwendungen von Strahlen machen insgesamt weniger als 0,04 mSv/a aus und sind somit sehr gering.

1.2 Strahlenschäden

Bereits unmittelbar nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung durch Wilhelm Conrad RÖNTGEN (1845–1923) im November 1895 in Würzburg und deren rascher Verbreitung insbesondere für medizinische Anwendungen wurden erste gravierende Strahlenschäden beim Menschen beschrieben. Es handelte sich einerseits um frühe lokale Schäden im Sinne einer speziellen Art von „Hautverbrennung“ und andererseits um einige Jahre nach überhöhter Exposition auftretende Schäden wie den Grauen Star oder Tumorerkrankungen (hier insbesondere die Leukämie).

Heute unterscheidet man bei den Strahlenschäden die sogenannten deterministischen von stochastischen Schäden (Abb. 2).

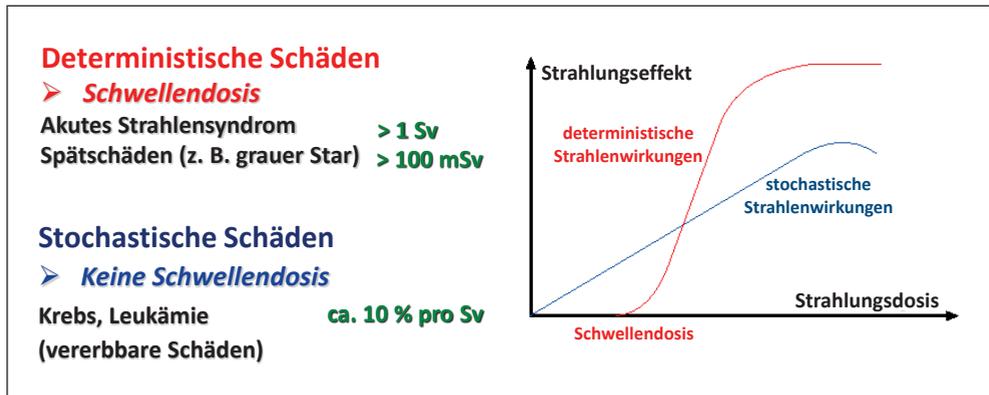


Abb. 2 Arten der Strahlenschäden (mit Beispielen)

Unterhalb einer Schwellendosis treten *deterministische Schäden* nicht auf. Diese Schwellendosis beträgt z. B. für den Grauen Star etwa 100 mSv. Für das besonders gefürchtete als Frühschaden auftretende akute Strahlensyndrom, das mit einer hohen Letalität verbunden ist, liegt die Schwellendosis bei ca. 1 Sv. Man schätzt, dass ca. 30000 von 210000 Todesfällen im ersten Halbjahr nach den Atombombenabwürfen auf Hiroshima und Nagasaki auf das akute Strahlensyndrom zurückzuführen sind (KODAMA et al. 2012). Bei der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl (UNSCEAR 2008) waren 134 Anlagenarbeiter mit Symptomen eines akuten Strahlensyndroms erkrankt; 31 davon sind in den Folgemonaten an diesem Syndrom verstorben. Bei ca. 25 % der Ersthelfer ist wie bei den auf der Tschernobyl-Anlage tätigen Arbeitern das spätere Auftreten einer Trübung der Augenlinse im Sinne eines Grauen Stars festzustellen.

Dem gegenüber gibt es bei den *stochastischen Schäden* keine Schwellendosis. Die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines solchen Schadens steigt aber mit der Dosis. Zu den stochastischen Schäden zählen insbesondere Krebserkrankungen und Leukämie, die nach einer Latenzzeit von mehreren Jahren auftreten. Man schätzt, dass sich das Risiko, an Krebs oder Leukämie nach Strahlenexposition zu versterben, um 10 % pro 1 Sv erhöht (siehe 1.3).

Von den rund 90000 im Rahmen der sogenannten „Life-Span-Study“ (KODAMA et al. 2012) regelmäßig nachuntersuchten Atombombenopfern von Hiroshima und Nagasaki, die die Abwürfe überlebt haben, wurden bis heute rund 800 als zusätzlich zu betrachtende Todesfälle an Krebs und Leukämie registriert. Als Folge der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl, nach der eine viel größere Gruppe von Personen exponiert wurde, wurde sehr viel häufiger das Auftreten von Schilddrüsenkrebs bei Kindern und Jugendlichen in den von der Reaktorkatastrophe betroffenen Regionen der Ukraine, von Belarus und Russland beobachtet. Glücklicherweise ist Schilddrüsenkrebs – insbesondere im Kindes- und Jugendalter – sehr gut therapierbar; daher sind nur wenige der rund 6000 an Schilddrüsenkrebs Erkrankten bisher daran verstorben.

1.3 Schätzung des Krebsrisikos nach Strahlenexposition

Die wichtigste Quelle für die Schätzung des Krebsrisikos nach Strahlenexposition stellen die Langzeituntersuchungen an den Überlebenden der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und

Nagasaki dar (KODAMA et al. 2012). Die beiden Institute der Japanisch-Amerikanischen „Radiation Effects Research Foundation (RERF)“ in Hiroshima und Nagasaki führen bis heute regelmäßige medizinische Untersuchungen bei den noch Lebenden durch. Im Falle des Versterbens wird die Todesursache exakt bestimmt und mit der mittels aufwändiger Methodik rekonstruierten Strahlenexposition jedes Einzelnen korreliert. Danach lässt sich im Bereich einer Exposition von 100 – 1000 mSv (Abb. 3) eine lineare Dosiswirkungsbeziehung ermitteln, die ein zusätzliches Krebsmortalitätsrisiko im Dosisbereich von 100 mSv um 1 % und im hohen Dosisbereich von 1 Sv um 10 % bedeutet. Für den niedrigen Dosisbereich unterhalb von 100 mSv lässt sich anhand der Daten von Hiroshima und Nagasaki keine signifikante Korrelation des Krebsmortalitätsrisikos mit der Dosis herstellen. Es erscheint am wahrscheinlichsten, dass die Extrapolation einer linearen Dosiswirkungsbeziehung auch im niedrigen Dosisbereich die beste Schätzung des Risikos erlaubt. Die Frage einer nichtlinearen Dosiswirkungsbeziehung in diesem Bereich ist jedoch Gegenstand des wissenschaftlichen Diskurses. In diesem Zusammenhang sind Langzeituntersuchungen an dem wesentlich größeren bei der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl exponierten Kollektiv mit vergleichsweise niedrigerer Exposition von wissenschaftlich größter Bedeutung. Es wird allerdings noch Jahrzehnte dauern, bis Dosisabschätzungen im Bereich von Dosen unter 100 mSv „verlässlicher“ werden.

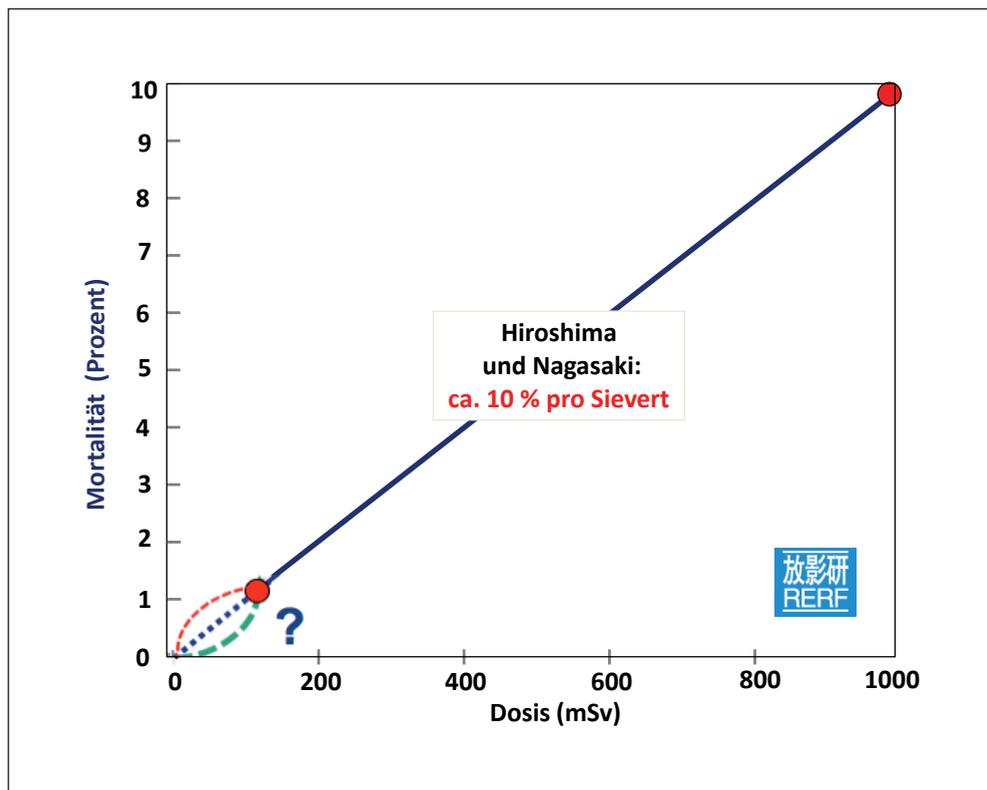


Abb. 3 Schätzung der Krebsmortalität nach Strahlenexposition auf der Grundlage der Daten von Hiroshima und Nagasaki nach den Daten der Radiation Effects Research Foundation (KODAMA et al. 2012)

Kommentar: Bei der Bewertung des zusätzlichen Mortalitätsrisikos durch Strahlenexposition ist zu berücksichtigen, dass die „übliche“ Wahrscheinlichkeit, in Deutschland an Krebs zu versterben, bei ca. 25 % liegt. Rein rechnerisch würde dieses Risiko bei einer Strahlenexposition mit 10 mSv – wie bei einer relativ dosisintensiven medizinischen Untersuchung – um 0,1 % (also auf 25,1 %) steigen. Zu berücksichtigen ist, dass diese Schätzung für die Altersgruppe der 20–40-Jährigen gilt. Bei über 40-Jährigen ist das zusätzliche Krebsmortalitätsrisiko mit 0,025 % nur etwa ein Viertel so groß. Dem gegenüber ergibt sich nach den Erfahrungen von Hiroshima und Nagasaki bei unter 20-Jährigen ein mit 0,25 % etwa 2,5-fach höheres zusätzliches Krebsmortalitätsrisiko als in der Altersgruppe der 20–40-Jährigen. Hieraus leitet sich einerseits eine der Grundregeln des Strahlenschutzes ab, mit Strahlenexpositionen im Kindes- und Jugendalter äußerst zurückhaltend zu sein. Andererseits bedeutet die beschriebene Altersabhängigkeit, dass die Altersgruppe, auf die sich medizinische Maßnahmen typischerweise konzentrieren, – nämlich die über 60-Jährigen – bei Strahlenexpositionen im diagnostischen Bereich ein äußerst geringes Risiko durch die medizinische Strahlenanwendung hat.

2. Strahlendosen bei Medizinischen Anwendungen

Abbildung 4 zeigt die Strahlenexposition (in mSv) für typische radiologische Anwendungen wie Vorsorgeuntersuchungen (etwa die Mammographie), Niedrigdosisprotokolle für die Computertomographie der Lunge, die Computertomographie der Wirbelsäule oder eine Ganzkörper-PET-Untersuchung in der Nuklearmedizin. Die beiden letztgenannten Untersuchungsverfahren sind den dosisintensiveren diagnostischen Verfahren zuzuordnen. In der modernen medizinischen Diagnostik spielen diese Verfahren insbesondere in der Onkologie eine wichtige Rolle.

Dies führt dazu, dass rund 60 % der kollektiven Dosis durch medizinische Strahlenanwendungen in Deutschland der Computertomographie zuzuordnen ist. Wegen der zunehmenden Anwendungshäufigkeit dieses besonders aussagekräftigen Schnittbildverfahrens trägt die Computertomographie auch maßgeblich zum Anstieg der Strahlenexposition der Bevölkerung mit dem eingangs erwähnten aktuellen Durchschnittswert von 1,9 mSv/a pro Kopf der Bevölkerung bei. Damit bekommen unter dem Aspekt des Strahlenschutzes aktuelle technische Entwicklungen, die zu erheblichen Dosisersparungen führen, eine erhebliche Bedeutung.

3. Die Prinzipien des Strahlenschutzes

Das weltweite System des Strahlenschutzes in der Medizin beruht auf den Empfehlungen der unabhängigen *International Commission on Radiological Protection (ICRP) No. 105 (ICRP 2007)*. Als Erstes gilt die Forderung der Rechtfertigung: Jede Strahlenexposition – und sei sie noch so niedrig – ist wegen des auch unter Umständen nur geringen damit verbundenen Risikos sorgfältig bezüglich der Nutzen-Risiko-Relation zu bewerten. Der Nutzen der Anwendung muss immer größer sein als das damit verbundene Risiko.

Die nächste Grundregel befasst sich mit der Optimierung: Die Strahlendosis soll so niedrig sein, wie sinnvollerweise erreichbar („as low as reasonably achievable = ALARA“).

Last but not least – mit Ausnahme der medizinischen Anwendungen in der Krankenversorgung – sollen im Sinne der Dosisbegrenzung *Richtwerte bzw. Grenzwerte* vom Gesetzgeber vorgegeben werden.

3.1 Strahlenschutzregelungen für die Heilkunde

Die aktuellen Strahlenschutzregelungen in Deutschland beruhen auf den bereits erwähnten Empfehlungen von ICRP No. 105, die auf europäischer Ebene in den EURATOM-Grundnor-

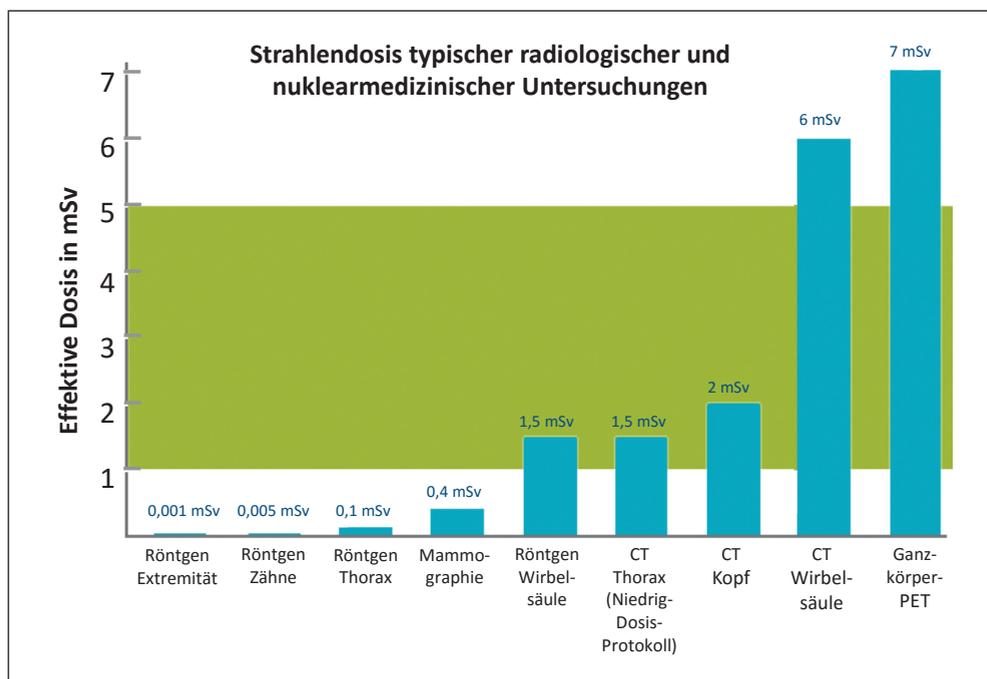


Abb. 4 Beispiel für die Strahlenexposition bei typischen Verfahren der radiologischen und nuklearmedizinischen Diagnostik (Quelle: medicalradiation.com. Alle Informationen beruhen auf radiologyinfo.org, außer den Werten für das Ganzkörper-PET aus SSK 2005)

men von 1996 und 2013 und der EURATOM-Medizinrichtlinie von 1997 umgesetzt wurden (s. www.bmub.bund.de/P365/). Die Regierungen der Europäischen Union sind verpflichtet, zur Umsetzung der Vorgaben von EURATOM entsprechende Gesetze oder Verordnungen zu erlassen. Aktuell gilt in Deutschland daher die Strahlenschutzverordnung aus dem Jahr 2001, zuletzt geändert 2012, und die Röntgenverordnung aus dem Jahr 2002, zuletzt geändert 2012, sowie die zur Strahlenschutzverordnung gehörenden Ausführungsbestimmungen der „Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin“ von 2011. Mit diesen Regelwerken werden die Grundforderungen von ICRP nach Rechtfertigung, Optimierung und Dosisbegrenzung umgesetzt.

Bei der *rechtfertigenden Indikationsstellung* muss ein fachkundiger Arzt feststellen, dass der gesundheitliche Nutzen der Strahlenanwendung gegenüber dem Strahlenrisiko überwiegt. Dazu müssen die verfügbaren Ergebnisse vorangegangener Strahlenanwendungen herangezogen werden. Wenn möglich, ist ein Verfahren ohne Strahlenexposition (Sonographie, Magnetresonanztomographie [MRT]) vorzuziehen. Bei gebärfähigen Frauen ist zu beachten, ob eine Schwangerschaft vorliegen kann oder ob sie stillen.

Im Rahmen der *Optimierung* wird zusätzlich gefordert, dass die durch ärztliche Untersuchung bedingte Strahlenexposition soweit einzuschränken ist, wie dies mit den Regeln der medizinischen Wissenschaft vereinbar ist. Dafür wurden vom Bundesamt für Strahlenschutz diagnostische Referenzwerte für die mit dem Verfahren verbundene Strahlenexposition veröffentlicht. Des Weiteren braucht der Strahlenanwender eine behördliche Genehmigung und

muss nachweisen, dass er bestimmte Auflagen erfüllt, z. B. die Fachkunde des Arztes, eine ausreichende Geräteausstattung besitzt sowie über entsprechend qualifiziertes Personal verfügt. Zur Überwachung dieser Regelungen sind „Ärztliche Stellen“ eingerichtet, die eine ganze Reihe von Kontrollen, wie z. B. die Überprüfung der Konstanz der Geräte, die Überprüfung der Einhaltung der Regeln der rechtfertigenden Indikationsstellung und der Referenzwerte durchzuführen haben.

Bei der Anwendung der vom ICRP vorgegebenen Regeln des Strahlenschutzes in der Heilkunde gibt es sinnvollerweise *keine Obergrenzen* für die Strahlenexposition eines Patienten. Der Verlauf einer Erkrankung macht es unter Umständen notwendig, relativ dosisintensive diagnostische Verfahren mehrfach zur Beurteilung des Therapieerfolgs anzuwenden. Das entbindet den indikationsstellenden Arzt aber nicht von der Pflicht, jedes Mal aufs Neue eine Nutzen-Risiko-Bewertung im Sinne der Rechtfertigung vorzunehmen. Eine Dosisbegrenzung macht auch bei der therapeutischen Anwendung ionisierender Strahlen keinen Sinn: Starre Grenzen würden hier den Erfolg dieser im Allgemeinen sehr wirkungsvollen Therapieverfahren unter Umständen in Frage stellen.

3.2 Strahlenschutzregelungen für die medizinische Forschung

Für den Bereich der medizinischen Forschung werden die Vorgaben von ICRP No. 105 vom Gesetzgeber in der Strahlenschutz- und Röntgenverordnung noch strikter umgesetzt als bei der Anwendung ionisierender Strahlung in der Krankenversorgung.

Dies betrifft zunächst die *rechtfertigende Indikationsstellung*. Im Rahmen von Forschungsvorhaben muss das Bundesamt für Strahlenschutz überprüfen, ob ein zwingendes Bedürfnis für die Anwendung in der Forschung besteht. Vor der Erteilung der Genehmigung durch das Bundesamt für Strahlenschutz muss eine Stellungnahme einer registrierten Ethikkommission vorliegen (mit der Bestätigung des zwingenden Bedürfnisses des Vorhabens). Bei gebärfähigen Frauen muss eine Schwangerschaft sicher ausgeschlossen werden. Forschungsvorhaben an Kindern und Jugendlichen oder nicht geschäftsfähigen Personen, bei denen ionisierende Strahlung zur Anwendung kommen soll, werden nur im Ausnahmefall unter Erfüllung sehr strenger Auflagen genehmigt.

Für die Qualitätssicherung bei der Strahlenanwendung in der medizinischen Forschung sind im Sinne der *Optimierung* zusätzliche Forderungen zu erfüllen. Wer Strahlen in der Forschung anwendet, bedarf zusätzlich zur üblichen behördlichen Genehmigung für die Anwendung im Rahmen der Krankenversorgung für den Forschungszweck einer speziellen Genehmigung des Bundesamts für Strahlenschutz. Der fachkundige Leiter des Forschungsvorhabens muss innerhalb von 3 Monaten nach Abschluss des Vorhabens dem Bundesamt und der Aufsichtsbehörde einen Abschlussbericht mit den ermittelten Körperdosen der Probanden vorlegen.

Die durch das Forschungsvorhaben bedingte Strahlenexposition ist soweit einzuschränken, wie dies mit den Regeln der medizinischen Wissenschaft vereinbar ist. Ein wesentlicher Unterschied zur Strahlenanwendung in der Krankenversorgung liegt darin, dass hier das *Prinzip der Dosisbegrenzung* greift: Die effektive Dosis darf für gesunde Probanden den Grenzwert von 20 mSv für die gesamte Lebenszeit nicht überschreiten. Dabei müssen vorangegangene Strahlenexpositionen berücksichtigt werden.

4. Resümee

Die Anwendung ionisierender Strahlung kann für die Medizin von großem Nutzen sein. Sie ist – dosisabhängig – mit Risiken verbunden; das Risiko für „Strahlenkrebs“ wird jedoch allgemein überschätzt.

Trotzdem ist jede Strahlenanwendung in der Heilkunde individuell zu rechtfertigen; der Nutzen muss das Risiko überwiegen. Sofern sinnvollerweise möglich, ist die Dosis bei der Anwendung so niedrig wie möglich zu halten.

Besondere Vorsicht hat bei der Anwendung ionisierender Strahlung an Kindern und Jugendlichen – insbesondere in der Forschung – sowie Gesunden im Rahmen der Anwendung von Screeningmethoden zu gelten. Die Regeln des Strahlenschutzes, deren Einhaltung von Behörden strikt überwacht wird, garantieren dem Patienten höchstmögliche Sicherheit.

Literatur

- BfS* (Bundesamt für Strahlenschutz): Genehmigungsbedürftige Anwendung von radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung – einschließlich Röntgenstrahlung – in der medizinischen Forschung. (o. J.)
http://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medizin/forschung/forschung_node.html
- BfS* (Bundesamt für Strahlenschutz): Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung 2015 (2015)
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2015072412951>
- BMUB* (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit): Strahlenschutz – Medizin.
www.bmub.bund.de/P365/
- ICRP* (International Committee on Radiological Protection): Publication No. 105: Radiological protection in medicine. Ann. ICRP 37/6 (2005)
- KODAMA, K., OZASA, K., KATAYAMA, H., SHORE, R. E., and OKUBO, T.: Radiation effects on cancer risks in the Life Span Study cohort. Radiat. Protect. Dosimetry 151, 674–676 (2012)
- SSK* (Strahlenschutzkommission): Stellungnahme: Strahlenschutz bei der Anwendung der Positronen-Emissions-Tomographie/Computertomographie (PET/CT). 2005
- UNSCEAR* (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation): Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations General Assembly: Fifty-sixth Session July 2008. New York: United Nations 2008

Prof. Dr. Dr. h. c. Christoph REINERS
Universitätsklinikum Würzburg und
Nationales WHO-Kollaborationszentrum
für Strahlenunfallmanagement
Josef-Schneider-Straße 2
97080 Würzburg
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 931 20155001
Fax: +49 931 201655001
E-Mail: reiners_c@klinik.uni-wuerzburg.de