

Burkhardt Bauer; Egon Robert Schwarz,

Ionisierende Strahlung und radioaktive Stoffe als diagnostisches und therapeutisches Instrumentarium in der Medizin

1. Einleitung

Neben der Exposition gegenüber natürlicher ionisierender Strahlung ist der Mensch auch künstlichen Strahlenquellen ausgesetzt (zivilisatorische Strahlenexposition). Die zivilisatorische Strahlenexposition resultiert zum größten Teil aus der Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin.

Weitere (geringfügige) Beiträge zur mittleren zivilisatorisch bedingten Strahlenexposition der Bevölkerung sind durch Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen, aus der Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Forschung, Technik und Haushalt und durch den Fall-out von Kernwaffenversuchen bedingt. Die berufliche Strahlenexposition betrifft nur einen sehr kleinen Teil der Bevölkerung.

Einen Überblick über die Strahlenexposition der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland, einschließlich der Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl, zeigt für das Jahr 1994 die Tabelle 1. In der Tabelle ist die Strahlenexposition der Bevölkerung angegeben als "Mittlere effektive Dosis in Millisievert pro Jahr". Näheres zu diesem Dosisbegriff ist in Kapitel 3 unter 3.1 erläutert.

Die als mittlere effektive Dosis ausgedrückte Strahlenexposition ist jedoch nicht geeignet, um daraus etwa ein mittleres Strahlenrisiko aus medizinischen Maßnahmen für einen Durchschnittsbürger zu errechnen, da sich die medizinisch bedingte Strahlenexposition sehr ungleichmäßig auf die Bevölkerung verteilt. Medizinische Maßnahmen betreffen immer Einzelpersonen, für die ein individuelles Verhältnis zwischen Nutzen und Risiko ermittelt werden muß, nämlich das (hypothetische) Risiko aus der Strahlenexposition im Vergleich zu deren Nutzen, d.h. die Erkennung oder auch der Ausschluß einer Krankheit. Näheres hierzu ist in Kapitel 4 erläutert.

Tabelle 1:

Mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1994

		Mittlere effektive Dosis in Milli-sievert pro Jahr
1.	Natürliche Strahlenexposition	
1.1	durch kosmische Strahlung (in Meereshöhe)	ca. 0,3
1.2	durch terrestrische Strahlung von außen bei Aufenthalt im Freien (5 Std./Tag) bei Aufenthalt in Häusern (19 Std./Tag)	ca. 0,4 ca. 0,1 ca. 0,3
1.3	durch Inhalation von Radonfolgeprodukten durch Aufenthalt im Freien (5 Std./Tag) durch Aufenthalt in Gebäuden (19 Std./Tag)	ca. 1,4 ca. 0,2 ca. 1,2
1.4	durch Ingestion von natürlich radioaktiven Stoffen	ca. 0,3
	Summe der natürlichen Strahlenexposition	ca. 2,4
2.	Zivilisatorische Strahlenexposition	
2.1	durch kerntechnische Anlagen	< 0,01
2.2	durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin	ca. 1,5 a)
2.3	durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in Forschung, Technik und Haushalt (ohne 2.4)	< 0,01
	2.3.1 Industrieerzeugnisse	< 0,01
	2.3.2 technische Strahlenquellen	< 0,01
	2.3.3 Störstrahler	< 0,01
2.4	durch berufliche Strahlenexposition (Beitrag zur mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung)	< 0,01
2.5	durch besondere Vorkommnisse	0
2.6	durch Fall-out von Kernwaffenversuchen	< 0,01
	2.6.1 von außen im Freien	< 0,01
	2.6.2 durch inkorporierte radioaktive Stoffe	< 0,01
	Summe der zivilisatorischen Strahlenexposition	ca. 1,5
3.	Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl	ca. 0,02

a) Der Schwankungsbereich dieses Wertes beträgt ca. 50 %

(aus: *Umweltpolitik - Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1994*. Hrsg.: Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, Januar 1997, S. 7)

Der folgende Text befaßt sich ausschließlich mit der medizinischen Strahlenexposition der Patienten. Auf die berufliche Strahlenexposition der im medizinischen Bereich Beschäftigten wird hier nicht eingegangen.

2. Anwendungen in der Medizin

Die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin verfolgt diagnostische und therapeutische Ziele. Die Gewinnung einer Information aus dem menschlichen Körper zur ärztlichen Diagnostik wird in Kapitel 2.1 (Röntgendiagnostik) und 2.2 (Nuklearmedizin) beschrieben. Ionisierende Strahlen verschiedener Art, einschließlich der von radioaktiven Stoffen ausgehenden, eignen sich aber auch zur Strahlentherapie, die in Kapitel 2.3 beschrieben ist.

2.1 Röntgendiagnostik

Um Informationen aus dem menschlichen Körper zu erhalten, kann man sich unter anderem der Eigenschaften der Röntgenstrahlen bedienen, die beim Durchdringen von Materie in ihrer Intensität abgeschwächt werden. Diese Abschwächung ist von mehreren Faktoren abhängig, die einerseits in den physikalischen Eigenschaften der Röntgenstrahlen bedingt sind und damit vom untersuchenden Arzt beeinflusst werden können und andererseits durch die physikalischen Gegebenheiten im menschlichen Körper, der untersucht werden soll.

2.1.1 Bilderzeugende Systeme

Die für das menschliche Auge unsichtbare Röntgenstrahlung muß, um als Abbild des menschlichen Körpers vom Arzt beurteilt werden zu können, in ein sichtbares Bild umgewandelt werden. Dies kann in unterschiedlicher Weise erfolgen:

Radiographie

Unter Radiographie versteht man die Anfertigung von Röntgenaufnahmen in sog. Direkttechnik. Um die durch den Körper in Abhängigkeit von seiner Gewebszusammensetzung abgeschwächten Röntgenstrahlen sichtbar zu machen, wird auf der der Röntgenröhre gegenüberliegenden Seite des

Körpers eine Filmkassette angebracht, in die ein beidseits beschichteter Film eingeschlossen ist. Die Kassette besteht aus Aluminium oder Kunststoff, wobei sich Karbonfasermaterialien als besonders strahlendurchlässig und mechanisch haltbar erwiesen haben. In die Kassette sind sowohl an der Vorder- wie an der Rückseite Verstärkerfolien eingeklebt, die auf sie auftreffende Röntgenstrahlen in sichtbares Licht umwandeln. Heutzutage werden üblicherweise als Leuchtstoffe Salze von Seltenen Erden verwendet, die ein grünliches Licht ausstrahlen. Die Schwärzung des Films erfolgt zu etwa 95 % aus diesem von den Verstärkerfolien stammenden Licht. Nur 5 % der Schwärzung erfolgt durch direkte Einwirkung der Röntgenstrahlen auf die Silberhalogenidkristalle des Films. Es gibt Folien mit unterschiedlicher Verstärkungswirkung, wobei mit zunehmender Verstärkungswirkung auch die geometrische Unschärfe zunimmt und die Abbildungsqualität leidet. Bei guter Abstimmung der Folie und des Films benötigt man etwa 5 - 10 μGy Dosis auf der Filmkassette, um einen gut auswertbaren Röntgenfilm zu erhalten. Die Belichtungszeiten bei Röntgenaufnahmen liegen je nach darzustellendem Organ und Patientendicke zwischen einigen Millisekunden bis zu 0,5, bei besonderen Untersuchungen auch 2 Sekunden.

Eine andere Möglichkeit der Gewinnung eines statischen Röntgenbildes ist die digitale Radiographie. Bei ihr wird statt der Verstärkerfolien und des Films in der Aufnahmekassette auf einer Lumineszenzschicht proportional zur Menge und Energie der auftreffenden Röntgenquanten ein latentes Bild erzeugt, das durch Laserlicht zum Leuchten angeregt wird und digital ausgewertet werden kann. Man kann dann das Röntgenbild entweder in einem Laserprinter als Hardcopy ausdrucken oder auf einem Monitor direkt befunden und dadurch den Film einschließlich seiner Archivierung einsparen. Vorteil dieser sehr teuren Methode ist weniger die Dosisersparung pro Bild, sondern die Tatsache, daß bei Unterbelichtung ein noch auswertbares Bild, wenn auch mit schlechterer Bildqualität, entsteht. Auch erhebliche Überbelichtungen führen nicht zu einem unauswertbaren schwarzen Bild, sondern zu einem Bild mit verbessertem Signal-Rausch-Verhältnis. Die Dosisersparung ergibt sich also durch die Vermeidung von Wiederholungsaufnahmen, vor allem bei schwierigen Belichtungen im freien Betrieb, wo die Strahlendosis nicht durch eine Belichtungsautomatik geregelt werden kann.

Fluoroskopie (Durchleuchtung)

Soll bei der Untersuchung ein bewegter Vorgang, etwa die Funktion eines Organs, beurteilt werden, wird die Röntgenuntersuchung als Durchleuchtung durchgeführt. Dabei findet sich hinter dem Patienten wiederum ein Leuchtschirm, der aber sein Licht nicht auf einen Röntgenfilm, sondern auf einen elektronischen Bildverstärker abgibt, der das zunächst sehr schwache Bild optoelektronisch verkleinert und verstärkt. Das so entstehende kleinere, aber lichtstarke Bild wird über eine Fernsehkamera wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt, auf einen Monitor übertragen und kann hier direkt betrachtet werden.

Indirekte Radiographie

Sollen bei der Durchleuchtung zusätzlich Röntgenaufnahmen zur späteren Auswertung angefertigt werden, bietet sich die Indirekttechnik an. Dabei kann mit einer Mittelformatkamera das Bild am Bildverstärkerausgang abfotografiert oder bei sehr schnellen Vorgängen, wie etwa Herz- oder Herzkranzgefäßuntersuchungen, mit einer Kinokamera abgefilmt werden. Auch die Überführung des Durchleuchtungssignals in ein Digitalbild und eine Übertragung auf den Monitor oder eine Laserkamera als indirekte digitale Radiographie ist möglich. Diese digitale Technik eignet sich besonders zur Untersuchung schwacher Kontraste, wie etwa Gefäßdarstellungen als sog. digitale Subtraktionsangiographie (DSA). Es ist möglich, zunächst eine kurze Leeruntersuchung durchzuführen, dieses Bild ins Negativ zu verkehren und anschließend von dem mit Kontrastmittel angefertigten Bild elektronisch abzuziehen, so daß sich die Körperkonturen gegenseitig aufheben und sich nur die durch Kontrastmittel erzeugten Schatten deutlich darstellen.

Computertomographie

Einen völlig anderen Weg der Bilderzeugung beschreitet die Computertomographie (CT). Durch eine Schlitzblende vor dem Röntgenstrahler wird ein schmales fächerförmiges Röntgenstrahlenbündel quer zur Körperachse des Patienten ausgeblendet. Auf der Gegenseite befindet sich anstelle des Films ein bogenförmiger Kranz von Detektoren, die die Röntgenstrahlung über Leuchtstoffkristalle und Photomultiplier in ein elektrisches Signal entsprechend der Abschwächung der Röntgenstrahlen in die-

ser Strahlrichtung umwandeln. Während der Untersuchung rotiert die Röntgenröhre und der Detektorkranz um den menschlichen Körper, so daß man aus zahlreichen Einstrahlrichtungen, bei modernen Geräten auch in kontinuierlicher Aufzeichnung, aus allen Richtungen Schwächungswerte der Röntgenstrahlen erhält. In einem komplizierten Rechenverfahren wird daraus im Computer jedem Volumenelement des menschlichen Körpers innerhalb der durchstrahlten Schicht ein Röntgenstrahlenabsorptionswert zugeordnet. Dieser läßt sich als Bildpunkt auf einem Monitor darstellen und ergibt ein überlagerungsfreies Querschnittsbild des menschlichen Körpers. Dieser Vorgang der Querschnittsbilderzeugung wird abschnittsweise in Schichtdicken von 10 - herunter zu 1 mm entlang der Längsachse des Körpers fortgesetzt, so daß sich ein räumliches Bild bei Betrachtung der nebeneinander liegenden Schichten im Kopf des untersuchenden Radiologen ergibt oder vom Computer in einer dreidimensionalen Darstellung erzeugen läßt.

2.1.2 Kontrast

Um die einzelnen Organe und Gewebearten im Röntgenbild, bei der Durchleuchtung oder der Computertomographie in ihrer regulären Form und Funktion, aber auch in ihren krankhaften Veränderungen erkennen zu können, nutzt man die unterschiedliche Absorption der Röntgenstrahlen beim Durchdringen von Materie in Abhängigkeit von der Strahlenqualität und der durchstrahlten Materie aus. Röntgenstrahlen werden beim Durchdringen von Materie im wesentlichen durch Absorption und durch Streuung unter gleichzeitiger Abschwächung der Energie abgeschwächt. Je niedriger die Strahlenenergie, um so stärker überwiegt die Abschwächung durch Absorption und diese nimmt mit der Ordnungszahl der Atome zu. Bei höheren Strahlungsenergien überwiegt die Abschwächung durch Streuung, die in erster Linie von der Anzahl der Atome im durchstrahlten Volumen und damit von der physikalischen Dichte abhängt. Gleichmäßig auf beide Abschwächungsarten wirkt die Schichtdicke des durchstrahlten Gewebes. Diese sich überlagernden Effekte nutzt man bei der Darstellung von Organen und Geweben in der Medizin.

Natürlicher Kontrast

Die Unterscheidung nach der Dichte gelingt besonders dort gut, wo Körpergewebe von Lufteinschlüssen im Körper zu unterscheiden ist, wie z.B.

bei der Untersuchung der Lunge oder einer krankhaften Gasansammlung im Bauchraum. Entsprechend dem oben gesagtem verwendet man hier die Hartstrahltechnik mit einer Röhrenspannung oberhalb von 100 kV.

Geht es eher um die Darstellung von Skelettanteilen, die Kalzium (mit der Ordnungszahl 20 bzw. dem Atomgewicht 40) enthalten, wählt man eine niedrigere Aufnahmespannung im Bereich zwischen 70 und 50 kV, um einen guten Kontrast gegenüber dem Körperweichteilgewebe zu erhalten. Bei einer noch niedrigeren Aufnahmespannung im Bereich um 25 kV wird dieser Kontrasteffekt derart verstärkt, daß sich sogar die unterschiedliche mittlere Ordnungszahl von Fettgewebe, das im wesentlichen Wasserstoff und Kohlenstoff enthält, von sonstigem Körpergewebe, das schwerere Atome wie Sauerstoff und Stickstoff enthält, unterscheiden läßt. Dieses Verfahren findet in der Mammographie Anwendung.

Künstliche Kontrastanhebung

Reicht der natürliche Kontrast zur Abgrenzung der Organe und der Erkennung krankhafter Veränderungen nicht aus, so kann man den Kontrast durch negative, d.h. stärker strahlendurchlässige, oder positive, d.h. stärker schattengebende Kontrastmittel verstärken.

Als negatives Kontrastmittel eignet sich z.B. Kohlensäuregas, das in neueren Techniken in kleinen Mengen in Blutgefäße eingespritzt wird, um so diese darstellen zu können. Häufig verwendet werden positive Kontrastmittel, die es in zwei Arten gibt, nämlich als Barium-Verbindungen und als organische Iodverbindungen.

Barium als Ion ist hochtoxisch, als Bariumsulfatverbindung jedoch absolut unlöslich und daher ungiftig, aber auch nicht resorbierbar. Als feinstes Pulver in Wasser suspendiert eignet es sich zur Darstellung des Verdauungstraktes von der Speiseröhre über Magen und Dünndarm bis zum Dickdarm. Eine besonders gute Darstellung erlaubt der sog. Doppelkontrast, bei dem nach Füllung des zu untersuchenden Abschnittes mit Barium-Kontrastmittel der Magen-Darm-Kanal medikamentös kurzfristig ruhiggestellt wird und dieser Abschnitt zusätzlich mit Luft oder Kohlensäuregas aufgefüllt wird, so daß sich ein hauchdünner Kontrastmittelwandbeschlag um das entspannte und weit gefüllte gasgefüllte Hohlorgan legt und einen optimalen Doppelkontrast bildet.

Zur Darstellung anderer Organe eignen sich organische Iodverbindungen. So lassen sich z.B. durch Einspritzen in die Blutgefäße diese kontrastreich abbilden. Bei der intravenösen Verabreichung wird auch die Ausscheidungsfähigkeit dieses Kontrastmittels durch den Körper ausgenützt, so füllen sich die Hauptausscheidungsorgane, nämlich die Nieren und entsprechend die ableitenden Harnwege, gut mit Kontrastmittel. Andere Iodhaltige Kontrastmittel werden über die Galle ausgeschieden und lassen die Gallenblase und Gallenwege erkennen.

Auch für eine direkte Kontrastmitteleinbringung, z.B. in Fisteln und krankhafte sowie natürliche Hohlräume, eignet sich das Kontrastmittel. In aufwendiger Technik kann z.B. auch durch ein Endoskop vom Zwölffingerdarm aus eine Sonde in den Gallengang eingeführt werden und dieser mit Iodhaltigem Kontrastmittel angefüllt im Röntgenbild dargestellt werden.

Die Kunst des Radiologen besteht unter anderem darin, aus diesen mit den verschiedenen Techniken angefertigten Röntgenbildern zu erkennen, ob sich die Organe oder Gewebe normal darstellen oder krankhaft verändert sind.

2.2 Nuklearmedizin

Die nuklearmedizinische Diagnostik erlaubt eine Darstellung von Organen/Organsystemen oder Geweben bzw. darin enthaltener Krankheitsherde in Abhängigkeit von deren physiologischer bzw. krankheitswertig gestörter Funktion. Es werden dem Patienten Arzneimittel durch Injektion oder auch oral, d.h. durch Trinken, verabreicht, deren Verteilung im Körper, Anreicherung in bestimmten Organen, Geweben oder Krankheitsherden und deren Ausscheidung bekannt ist. Diese Arzneimittel werden dergestalt verändert, daß in deren chemischer Struktur einzelne Atome durch radioaktive Atome ersetzt oder solche zusätzlich eingefügt werden. Die von diesen Atomen ausgehenden ionisierenden Strahlen (Gammastrahlen) können von außen mit empfindlichen Meßinstrumenten in ihrer örtlichen und zeitlichen Verteilung gemessen und bildlich bzw. graphisch dargestellt werden. Diese Art der Messung wird Szintigraphie genannt. Bei der Szintigraphie trifft die Gammastrahlung auf einen Detektor, der die Energie dieser Strahlung in elektrische Signale umwandet, die je nach Meßaufgabe elektronisch weiterverarbeitet werden (verstärkt mittels sog. Photomultiplier, sortiert u.ä.) und für die Auswerteeinheiten (Zähler,

Rechner, u.ä.) im Hinblick auf Bildgebung bzw. graphische Darstellung aufbereitet werden.

Damit ist es möglich, nicht-invasiv, allenfalls mittels Injektion des geeigneten radioaktiven Arzneimittels, die Funktion einzelner Organe/Organsysteme bzw. deren krankhafte Veränderungen festzustellen, d.h. deren gestörte Funktion örtlich zu erfassen und bildlich bzw. graphisch darzustellen. Die Nuklearmedizin beinhaltet somit im wesentlichen das Prinzip der sog. abbildungsunterstützten Funktionsdiagnostik, d.h. die erstellte Abbildung eines Organs bzw. Organsystems läßt auch Aussagen zu dessen regionaler und globaler Funktion zu.

Zu den verschiedenen nuklearmedizinischen Anwendungen im einzelnen:

2.2.1 In-vivo und in-vitro-Meßplätze

Es handelt sich hier um Meßsysteme zur Ermittlung der Aktivität eines radioaktiven Stoffes im Körper (in-vivo-Meßsysteme) oder in Probenmaterial wie z.B. Blut, Urin (in-vitro-Meßsysteme). Diese Meßsysteme sind nicht den bildgebenden Systemen zuzuordnen.

Je nachdem, ob die Aktivität radioaktiver Stoffe in bestimmten Organen bzw. Körperregionen oder im gesamten Körper zu ermitteln ist, wird bei den in-vivo-Meßsystemen zwischen Organmeßplätzen und Ganzkörperzählern unterschieden.

Von großer Bedeutung war der Einsatz von in-vivo-Meßsystemen nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl zur Erfassung der Aufnahme in den Körper der damals im Vordergrund stehenden Cäsium- und Iodradionuklide.

Die in-vitro-Meßsysteme dienen zur Ermittlung der Aktivität von Radionukliden in Probenmaterial. So können z.B. nach Verabreichung geeigneter, nierengängiger radioaktiver Arzneimittel mittels aufeinanderfolgender Messungen von Blutproben wichtige Aussagen zur Nierenfunktion gemacht werden.

2.2.2 Bilderzeugende Systeme

Neben der globalen Messung der Radioaktivität bzw. der Radioaktivitätskonzentrationen in Organen, Körperregionen sowie im gesamten Körper

mittels Organmeßplätzen bzw. Ganzkörperzählern, wie oben beschrieben, kommt in der Nuklearmedizin für klinische Fragestellungen der räumlich differenzierten in-vivo-Messung von Radioaktivitätskonzentrationen weit mehr Bedeutung zu. Hier hat die Nuklearmedizin im wesentlichen folgende Entwicklungen durchlaufen:

Scanner

Beim Scanner bewegt sich eine Szintillationsmeßsonde (zum Prinzip der Szintigraphie siehe unter 2.2) zeilenförmig innerhalb eines einstellbaren Meßfeldes über dem Patienten, ähnlich der zeilenförmigen Abtastung in der Fernsehtechnik. Die Meßsonde, mit einem festgelegten, räumlich eng begrenzten Meßbereich, erfaßt zeitlich nacheinander alle Objektbereiche unterhalb des Meßfeldes, die dabei jeweils gemessenen Impulsraten werden dann in Form eines Bildes dargestellt. Das so entstehende Szintigramm wird meist in Form verschiedener Strichdichten und einer farbig abgestuften Intensitätsaufzeichnung dokumentiert (Colorscan).

Gamma-Kamera

Die Gamma-Kamera hat den Scanner weitgehend ersetzt und ist derzeit das am häufigsten benutzte bilderzeugende Gerät in der Nuklearmedizin. Im Gegensatz zum Scanner ermöglicht die Gamma-Kamera die gleichzeitige Erfassung von Gammastrahlen aus dem gesamten Organ- bzw. Körperbereich, von dem ein Szintigramm anzufertigen ist. Wegen der Gleichzeitigkeit der Erfassung bzw. Aufnahme der Gammastrahlung über dem gesamten Meßbereich können auch sich verändernde Radioaktivitätsverteilungen dargestellt werden. Damit ist die Möglichkeit gegeben, durch eine Serie von Szintigrammen auch schnell ablaufende Funktionsvorgänge in Organen bzw. Körperregionen bildgebend und graphisch darzustellen.

Den Strahlungsdetektor bildet meist ein scheibenförmiger, kreisrunder oder rechteckiger Kristall aus NaI (Tl) als Szintillator, der dicht bestückt ist mit Photomultipliern. Eine umfangreiche sog. Kopfelektronik sorgt unter anderem für die räumliche Ortung sowie die Energieselektion der Strahlung und für die Stabilisierung der Multiplier-Verstärkung (X-, Y-, Z-Signale). Um die Abbildung der Verteilung von Radionukliden im zu messenden Bereich zu erreichen, ist dem Kristall ein Parallelochkollimator vorgeschaltet, damit möglichst nur achsenparallele Gammastrahlen

in den Kristall einfallen. Damit wird eine senkrechte Projektion der dreidimensionalen Aktivitätsverteilung im Meßbereich des Patienten in die zweidimensionale Kristallebene erreicht (Abb. 1).

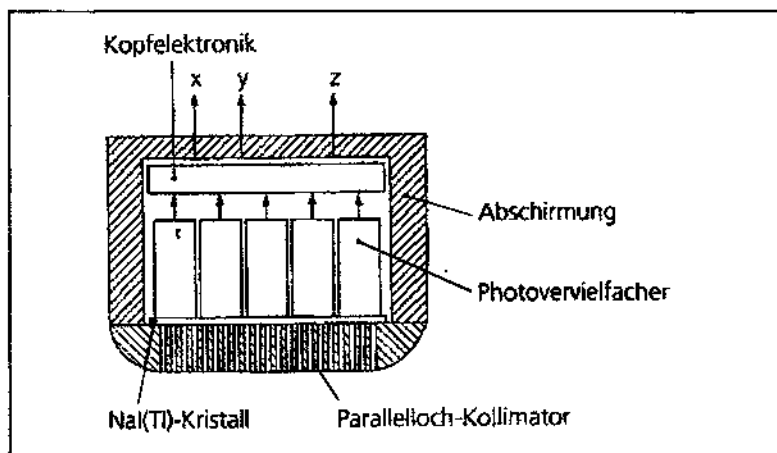


Abb. 1: *Prinzipieller Aufbau des Meßkopfs einer Gamma-Kamera*
(aus: Büll, U. et al. (Hrsg.): Nuklearmedizin, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1994, S. 44)

Mit Einführung der Gamma-Kamera ist in Kombination mit zunehmend leistungsfähigeren EDV-Systemen eine abbildungsunterstützte Funktionsdiagnostik mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung möglich geworden.

Emissions-Computer-Tomographie (ECT)

Bei der Emissions-Computertomographie handelt es sich um ein nuklearmedizinisches Untersuchungsverfahren, mit dem Schnittbilder der Verteilung von Radionukliden im Organismus aufgenommen werden können, um mit gleicher Zielrichtung wie in der Röntgendiagnostik eine bessere Auflösung in der Bildgebung zu erreichen. Im Gegensatz zur Computertomographie in der Röntgendiagnostik (= Transmissionstomographie; s. unter 2.1.1) handelt es sich in der Nuklearmedizin um eine Emissionstomographie, d.h. es werden die von den inkorporierten Radionukliden ausgesandten (emittierten) Strahlen registriert.

Zwei verschiedene Methoden stehen zur Verfügung, die sog. SPECT (Emissions-Computertomographie mit Einzelphotonen, Messung der Gammastrahlen) und die PET (Emissions-Computertomographie mit Positronen; Messung der beim Positronenzerfall entstehenden Strahlung). Bei der SPECT hat sich die rotierende Gamma-Kamera (bis zu 3 Meßköpfe) durchgesetzt, bei der PET dominiert die ringförmige Konfiguration von Detektoren - bei beiden Systemen jeweils axial um die schichtweise abzubildende Körperregion.

2.2.3 Radioaktive Arzneimittel in der Nuklearmedizin

Als radioaktive Arzneimittel eignen sich Stoffe, deren Verteilung im gesunden oder krankhaft veränderten Körpergewebe bekannt ist. Bekanntestes Beispiel ist das Iod bzw. dessen Radioisotope, die sich bevorzugt in der Schilddrüse anreichern. Bestimmte Phosphonatverbindungen reichern sich im Knochengewebe an, Glukose wird bei physiologisch oder pathologisch gesteigerter Aktivität in allen Zellen vermehrt umgesetzt. Zur radioaktiven Markierung dieser Substanzen bzw. zum Einsatz per se eignen sich Radioisotope, die günstige strahlenphysikalische Eigenschaften wie u.a. eine ausreichend kurze Halbwertszeit haben, damit der Meßvorgang ausreichend gut durchgeführt werden kann bei einer gleichzeitig möglichst geringen Strahlenexposition des Patienten und der Umgebung. Der radioaktive Zerfall sollte als Gammastrahlung möglichst ohne Alpha- und Beta-Strahlung erfolgen, um die Strahlenexposition in den Zellen und Geweben gering zu halten, aber gleichzeitig eine Messung von außen zu ermöglichen. Der Energiebereich dieser Gammastrahlung sollte einerseits so stark sein, daß der Strahlenschutz für die Umgebung kein Problem darstellt, andererseits die Abschwächung der Strahlung von dem zu untersuchenden Organ durch den Körper bis zum Meßgerät möglichst gering ist. Zudem sollten Radioisotope leicht in verschiedene Arzneimittel, also chemische Substanzen, einzubauen sein, ohne deren Struktur und damit pharmakologischen Eigenschaften zu verändern. Die für nicht-radioaktive Arzneimittel geltenden Randbedingungen (Pharmakologie, Toxikologie, arzneimittelrechtliche Bestimmungen u.ä.) gelten für radioaktive Arzneimittel sinngemäß ebenso.

Aufgrund der günstigen physikalischen Eigenschaften und der guten Verfügbarkeit mittels eines Generators hat sich das Isotop [^{99m}Tc] Technetium in der konventionellen nuklearmedizinischen in-vivo-Diagnostik als optimal herausgestellt und auch durchgesetzt. Bei PET-Untersuchungen, für

die die Entwicklung geeigneter radioaktiver Arzneimittel (Positronenstrahler) noch in den Anfängen steckt, findet bisher die [^{18}F] FDG zur Erfassung krankheitsspezifischer Veränderungen des Glukosestoffwechsels breite Anwendung, insbesondere bei onkologischen, neurologischen und kardiologischen Fragestellungen.

Mit Einführung der Emissions-Computertomographie in Verbindung mit neu entwickelten radioaktiven Arzneimitteln ist es möglich geworden, insbesondere mittels der PET Teilfunktionen des Körpers auch auf zellulärer bzw. molekularer Ebene bildgebend darzustellen.

2.3 Strahlentherapie

Wenige Monate nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen durch W.C. Röntgen erfolgten die ersten Mitteilungen über die Anwendung ionisierender Strahlung in der Therapie von Erkrankungen. So veröffentlichten Sjörgren und Steinbeck im Jahre 1899 einen Bericht über die Heilung eines Hautkrebses.

In der Strahlentherapie werden hauptsächlich unterschiedlich harte (=energiereiche) Röntgenstrahlen und γ -Strahlen sowie Elementarteilchenstrahlen (Elektronen und z.T. Neutronen) eingesetzt. Weniger Bedeutung haben bisher Elementarteilchen wie π -Mesonen und Protonen erlangt.

Die Bestrahlungsmethoden können einerseits nach dem Abstand zwischen Strahlenquelle und zu bestrahlendem Tumor und andererseits nach der Strahlenquelle eingeteilt werden:

Die **Radionuklidtherapie** nutzt die Möglichkeit, durch Wahl geeigneter radioaktiver Arzneimittel, d.h. mit offenen radioaktiven Stoffen, direkt in bzw. an der Tumorzelle zu bestrahlen. Als bekanntestes Beispiel sei hier das Radionuklid Iod-131 angeführt, das sich größtenteils im Schilddrüsengewebe anreichert und dort mit seiner β -Strahlung Tumorzellen vernichtet.

Bei der **Brachytherapie** werden umschlossene radioaktive Stoffe (Quellen) als Oberflächenkontakttherapie direkt auf die Haut aufgelegt, in natürliche oder künstliche Körperhöhlen eingeführt (intrakavitäre Kontakttherapie) oder als interstitielle Therapie, z.B. in Form von Drähten, operativ in das kranke Gewebe verbracht. Man verwendet hierzu Afterloading-Geräte für das sog. Nachladeverfahren. Dabei werden zunächst

spezielle Applikatoren intrakavitär (z.B. Uterus, Oesophagus) interstitiell (z.B. Prostata) oder auf der Haut plaziert. Dann werden radioaktive Quellen an den gewünschten Bestrahlungsort transportiert. Die radioaktiven Quellen werden in einem strahlensicheren Behälter des Geräts aufbewahrt und der Quellentransport erfolgt motorisch über Katheter, die an das Gerät und die Applikatoren angeschlossen sind. Nach Bestrahlungsende werden die radioaktiven Quellen in den Tresor des Afterloading-Geräts zurückgefahren.

Als sog. **Teletherapie** kann die Strahlenquelle auch aus größerer Entfernung wirken. Hierzu eignen sich unterschiedliche Bestrahlungsgeräte:

Röntgenbestrahlungseinrichtungen

Röntgenstrahlen haben nur eine geringe Eindringtiefe und entfalten ihre Hauptwirkung in der Haut, was zu Hautschäden führen kann, ohne eine ausreichende Dosis im tiefer liegenden Tumorgewebe zu erreichen. Die Röntgentherapie wird daher heute fast nur noch bei Hautkrankheiten eingesetzt.

Gammabestrahlungseinrichtungen

Die Strahlung wird bei diesem Gerätetyp nicht künstlich wie bei Röntgengeräten, sondern durch Radionuklide wie Kobalt-60 erzeugt. Da nur die Gammastrahlung eine größere Reichweite und Eindringtiefe besitzt, wird die zusätzlich entstehende, therapeutisch nicht erwünschte Alpha- und Betastrahlung durch entsprechendes Abschirmmaterial absorbiert. Das verwendete Radionuklid muß hochenergetische Gammastrahlung emittieren, eine hohe spezifische Aktivität bzw. eine entsprechend große Dosisleistung aufweisen und sollte aus ökonomischen Gründen eine möglichst lange Halbwertszeit haben. Diese Forderungen erfüllt vor allem Kobalt-60.

Nachteilig sind bei diesen Geräten der relativ große Quellendurchmesser und der dadurch bedingte allmähliche Dosisabfall am Feldrand (sog. Halbschatten).

Beschleunigereinrichtungen

Bei Beschleunigern werden Elektronen mit einer Anfangsenergie in eine Vakuumröhre eingespeist und dann je nach Gerätetyp in der Vakuumröhre beschleunigt.

Von medizinischer Bedeutung sind Teilchenbeschleuniger vom Typ des Kreisbeschleunigers (Betatron), des Linearbeschleunigers, des Elektronenzyklotrons (Mikrotron) und des Neutronengenerators bzw. Isochronenzyklotrons. Zahlenmäßig am weitesten verbreitet ist der Linearbeschleuniger.

Bestrahlungstechniken

Eine optimale Dosisverteilung zur Durchführung einer Strahlentherapie ist nur unter Einbeziehung aller technischen Möglichkeiten realisierbar. Es muß eine geeignete Bestrahlungstechnik gewählt werden, die zu der gewünschten Dosisverteilung führt, d.h. Vernichtung des Tumorgewebes bei höchstmöglicher Schonung des umgebenden gesunden Gewebes. So kann die Dosisverteilung wesentlich beeinflußt werden

- durch geeignete Wahl der Strahlenqualität
- durch geeignete räumliche Zuordnung einer oder verschiedenen Strahlenquellen zum Tumorgewebe während des Bestrahlungsvorganges unter Berücksichtigung des zwangsläufig miteinzubeziehenden bzw. mitbetroffenen Körpergewebes.

Bestrahlungsplanung

Die strahlentherapeutische Behandlung eines Patienten erfordert eine individuelle Planung, die im wesentlichen zwei Aufgabenbereiche, nämlich die medizinische und die physikalische Bestrahlungsplanung umfaßt. Wesentlich ist hierbei die interdisziplinäre Beurteilung der Tumorerkrankung unter Miteinbeziehung modernster bildgebender Untersuchungsverfahren, um so nach exakter Diagnostik des Tumorgeschehens sowie exakter Therapieplanung eine optimale Bestrahlung des Tumors zu erreichen.

3. Strahlenexposition

3.1 Konzept der effektiven Dosis

Der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeit der verschiedenen Gewebe des menschlichen Körpers wird mit Hilfe der sog. effektiven Dosis Rechnung getragen. Durch die Einführung dieses Dosiskonzeptes, das auch in die Röntgenverordnung und Strahlenschutzverordnung zur Festlegung der Dosis-Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen und der Bevölkerung Eingang gefunden hat, besteht die Möglichkeit, auch bei ungleichförmiger Bestrahlung eine risikorelevante Größe zu berechnen, in der unterschiedliche Strahlenexposition und Strahlenempfindlichkeit verschiedener betroffener Gewebe berücksichtigt werden können. Die effektive Dosis errechnet sich durch gewichtete Summierung der Organdosen unter Verwendung von organspezifischen Wichtungsfaktoren. Bei der effektiven Dosis handelt es sich um eine dosimetrische Größe, die für die Begrenzung des Risikos aus stochastischen Strahlenschäden (Krebs und genetische Effekte) entwickelt wurde.

Das Konzept der effektiven Dosis wurde zunächst für die Bewertung des Strahlenrisikos bei beruflich strahlenexponierten Personen entwickelt. Es wird aber inzwischen auch als einheitliche Berechnungsmethode für die Quantifizierung der Strahlenexposition von Patienten benutzt. Man hat damit die Möglichkeit, verschiedene Untersuchungsmethoden wenigstens bezüglich ihres relativen Strahlenrisikos vergleichen zu können.

Wenn die Zahlenwerte der effektiven Dosis für verschiedene Untersuchungen bekannt sind, kann auch die kollektive effektive Dosis für diese Untersuchungen für eine definierte Personengruppe angegeben werden. Das ist die Summe der effektiven Dosiswerte, die in einer betrachteten Gruppe oder der ganzen Bevölkerung eines Landes auftreten.

Die mittlere effektive Dosis wird ermittelt, indem die Summe der effektiven Dosiswerte, die in einer betrachteten Gruppe oder der ganzen Bevölkerung eines Landes auftreten, durch die Anzahl der untersuchten Personen geteilt wird.

3.2 Strahlenexposition für die Patienten

3.2.1 Röntgendiagnostik

Die Strahlenexposition der Patienten in der Röntgendiagnostik ist bei den meisten Untersuchungen gering. Schwierigkeiten ergeben sich bei der Angabe der Dosiswerte, da bei der Untersuchung bestimmter Organe die Dosis im Körper extrem ungleichmäßig verteilt ist, je nachdem ob die Organe vom Nutzstrahlbündel direkt getroffen werden oder außerhalb des Nutzstrahlungsfeldes liegen und wie weit sie davon ggf. entfernt sind. Unabhängig davon schwanken die Dosiswerte in Abhängigkeit von den Körpermaßen des Patienten, von der Schwierigkeit der Diagnosefindung im Einzelfall und von der angewandten Röntgentechnik bei gleichen Untersuchungen von Fall zu Fall erheblich und zwar im Bereich von bis zu 2 Größenordnungen. Es ist daher nicht möglich, für eine bestimmte Untersuchung genau anzugeben, welche Dosis der Patient erhalten hat. Zum Vergleich verschiedener Untersuchungsmethoden unter Anwendung ionisierender Strahlen oder radioaktiven Stoffe wird trotz aller Einschränkungen die effektive Dosis herangezogen. In der Tabelle 2 sind daher Dosiswerte als effektive Dosis für ganze Untersuchungen angegeben, die zum Teil nur einzelne Aufnahmen, zum Teil aber zahlreiche Aufnahmen und längere Durchleuchtungszeiten beinhalten. Röntgenaufnahmen der Zähne, der Extremitäten und des Brustkorbs sind nur mit einer geringen effektiven Dosis verbunden. Besonders hohe Dosiswerte ergeben sich bei der Computertomographie sowie bei den Gefäßdarstellungen einschließlich der interventionellen Radiologie, also etwa der Aufdehnung verengter Gefäße mit Ballonkatheter.

3.2.2 Nuklearmedizin

In Tabelle 3 sind effektive Dosen für die 11 am häufigsten durchgeführten nuklearmedizinischen Untersuchungsverfahren unter Berücksichtigung der in der ICRP 60 geänderten Wichtungsfaktoren aufgeführt. Es handelt sich hier um die 11 Untersuchungsverfahren, die in der Bundesrepublik Deutschland etwa 95 % der diagnostischen Anwendung offener radioaktiver Stoffe ausmachen. Die Angaben gelten für Erwachsene. Für Kinder und Jugendliche sind nach ICRP 53 höhere Dosiswerte und ein damit verbundenes 2 - 3fach höheres Strahlenrisiko anzusetzen.

Tabelle 2: Gerundete Mittelwerte der effektiven Dosis bei häufigen Röntgenuntersuchungen aus Messungen an Patienten

Organ/Untersuchung	Effektive Dosis (mSv)
Brustkorb	0,3
Gliedmaßen	0,06
Halswirbelsäule	0,2
Brustwirbelsäule	0,7
Lendenwirbelsäule	2,0
Becken	1,0
Hüfte	0,5
Schädel	0,03
Bauchraum (Übersicht)	1,2
Magen	9
Dünndarm	16
Dickdarm	20
Harntrakt	5
Schlagaderdarstellung	20
Venendarstellung (Bein)	2
Mammographie	0,5
Zahnaufnahme	0,01
Knochendichtemessung	0,001
Computertomographie-Kopf	2,5
Computertomographie-Brustraum	20
Computertomographie-Bauchraum	30
Computertomographie-Wirbelsäule	9

(aus: *Umweltpolitik - Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1994*, Hrsg.: Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, Januar 1997, S. 223)

Tabelle 3: Nach ICRP 60 auf der Grundlage von ICRP 53 berechneten effektiven Dosen für die 11 am häufigsten durchgeführten nuklearmedizinischen Untersuchungsverfahren

Untersuchung	Radiopharmakon	Aktivität (MBq)	Effektive Dosis in mSv (ICRP 60)
Schilddrüse	^{99m}Tc -Pertechnetat	50	1,0
Skelett	^{99m}Tc -Phosphonat	600	3,8
Myokard	^{201}Tl -Chlorid	75	17,5
RNG/Clearance	^{123}I -Hippuran	25	0,33
Lunge (Perfusion)	^{99m}Tc -Mikrosphären	100	1,1
Herzbinnenraum	^{99m}Tc -Erythrozyten	700	5,1
Niere statisch	^{99m}Tc -DMSA	40	0,39
Hirn	^{99m}Tc -HMPAO	500	9,0
Leber/Galle	^{99m}Tc -IDA	200	5,6
Tumor/Entzündung	^{67}Ga -Zitrat	200	24,4
Radioiodtest	^{131}I -Nal	3	91,0

(aus: Reiners, Chr.: Die Strahlenexposition in der nuklearmedizinischen Diagnostik - Risikovergleiche auf der Basis effektiver Dosen. Nucl.-Med. 1993, 32, 47-51)

Zur Veranschaulichung des mit einer medizinischen Strahlenexposition möglicherweise verbundenen Risikos bietet sich ein Vergleich der angegebenen effektiven Dosen, hier aus der nuklearmedizinischen Diagnostik, mit der effektiven Dosis resultierend aus der natürlichen Strahlenexposition unter Berücksichtigung ihrer Schwankungsbreite in der Bundesrepublik Deutschland an. Die 11 am häufigsten durchgeführten nuklearmedizinischen Untersuchungsverfahren lassen sich grob in 3 Kategorien einteilen:

- solche mit einer effektiven Dosis **bis zu 1 mSv** (entsprechend der unteren Grenze der natürlichen jährlichen Strahlenexposition),
- solche mit effektiven Dosen **zwischen 1 und 6 mSv** (Schwankungsbereich der jährlichen natürlichen Strahlenexposition) und

- solche mit effektiven Dosen **von mehr als 6 mSv** (obere Grenze der natürlichen jährlichen Strahlenexposition).

Zur ersten Gruppe mit effektiven Dosen bis zu 1 mSv zählen die nuklearmedizinischen Verfahren der Nierendiagnostik und die Schilddrüsenszintigraphie mit ^{99m}Tc -Pertechnetat.

Im Bereich mittlerer effektiven Dosen zwischen 1 und 6 mSv finden sich als nuklearmedizinische Untersuchungsverfahren die Perfusionsszintigraphie der Lunge, die Skelettszintigraphie mit ^{99m}Tc -markierten Phosphonaten, die Szintigraphie des Herzbinnenraums bzw. der großen Bluträume mit ^{99m}Tc -markierten Erythrozyten sowie die Funktionsszintigraphie des Leber/Galle-Systems.

Effektive Dosen oberhalb von 6 mSv ergeben sich bei der nuklearmedizinischen Diagnostik für die Hirnszintigraphie mit ^{99m}Tc -HMPAO (etwa 9 mSv) oder die Myokardszintigraphie mit ^{201}Tl -Chlorid (etwa 18 mSv).

Zusammengefaßt ergibt sich, daß die Strahlenexposition in der nuklearmedizinischen Diagnostik sich größtenteils innerhalb oder unterhalb der jährlichen Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition bewegt.

3.2.3 Strahlentherapie

Ziel der Strahlentherapie ist es, an den zu bestrahlenden Tumor eine möglichst hohe Dosis zu bringen, ohne das umgebende gesunde Gewebe dabei übermäßig zu schädigen. Gesundes menschliches Gewebe hat jedoch eine Toleranzdosis, d.h. eine Dosis, oberhalb derer nach einem bestimmten Zeitraum mit entsprechender Wahrscheinlichkeit irreparable Schäden auftreten können.

Die optimale Gesamtdosis im Tumorumfang hängt sowohl von der Dosis-Effekt-Beziehung für die Tumorkontrollrate als auch der Nebenwirkungshäufigkeit ab. Beide sind von den Tumoreigenschaften und von der Bestrahlungstechnik abhängig. Es ist die Aufgabe prospektiver klinischer Studien, die optimale Gesamtdosis in einer bestimmten klinischen Situation zu finden.

Um in den Tumor eine ausreichend hohe Dosis zu bringen, ohne dabei das umgebende gesunde Gewebe übermäßig zu schädigen, werden verschiedene Taktiken angewendet:

Mit Hilfe von Planungscomputern wird die Bestrahlungstechnik und die daraus resultierende Dosisverteilung für die durchzuführende Strahlentherapie berechnet. Dabei werden die interessierenden Körperquerschnitte des Patienten mit ihren anatomischen Einzelheiten unter Anwendung moderner bildgebender Verfahren in den Planungscomputer einprogrammiert.

Ein weiterer wichtiger Faktor, um das Bestrahlungsziel zu erreichen, ist die Fraktionierung, d.h. die zeitliche Aufteilung der verordneten Gesamtdosis. Die Einzelfraktionen sind so gewählt, daß gesundes Gewebe sich während der Bestrahlungspause im Gegensatz zum Tumorgewebe wieder einigermaßen erholen kann. Erreicht werden soll, daß bei der nächsten Fraktion ein deutlich stärker vorgeschädigtes Tumorgewebe noch wirksamer bestrahlt wird.

Die meisten klinischen Erfahrungen wurden mit der konventionellen Fraktionierung gewonnen, d.h. 1,8 - 2,0 Gy pro Fraktion an 5 Bestrahlungstagen in der Woche bis zum Erreichen der verordneten Gesamtdosis.

Zur Strahlentherapie gehört auch die Therapie mit Radionukliden. Sie beinhaltet die Therapie mit offenen radioaktiven Substanzen. Diese reichern sich direkt in der Zelle an, z.B. bei der Radioiodtherapie oder werden in Körperhöhlen eingebracht, z.B. in die Pleura oder den Peritonealraum. Verwendet werden vor allem Alpha- und Beta-Strahler.

4. Nutzen und Risiko aus der medizinischen Anwendung

4.1 Röntgendiagnostik und diagnostische Nuklearmedizin

Das strahlenbedingte Risiko bei der Anwendung radioaktiver Stoffe oder ionisierender Strahlen in der diagnostischen Medizin kann nicht absolut gesehen werden, da es für den Patienten ein Nullrisiko nicht gibt. Es ist vielmehr stets zwischen Nutzen und Risiko abzuwägen. Das größte Risiko für den Patienten stellt eine nicht oder zu spät erkannte Erkrankung mit ihren Folgen dar.

Es ist grundfalsch, wie dies in letzter Zeit mehrfach getan wurde, aus der Anwendung von Röntgenstrahlen in der Medizin durch einfache Multiplikation mit den Risikofaktoren der internationalen Strahlenschutzkommission Krebstote in der Gesamtbevölkerung auszurechnen. Vielmehr sind medizinische, also röntgendiagnostische und nuklear diagnostische Maßnahmen immer auf eine Einzelperson, nämlich individuell auf einen Patienten, beschränkt. Bei diesem muß eine Diagnose gestellt werden, ohne die er nicht geheilt werden kann. Im Verhältnis zu dem von der Internationalen Strahlenschutzkommission in ihrer Veröffentlichung 60 (ICRP 60, 1991 bzw. 1993) angegebenen pauschalen Risikowert von 5 % Krebssterbewahrscheinlichkeit für 1 Sievert effektive Dosis fällt der Risikowert mit zunehmendem Alter erheblich ab und beträgt im Alter von 60 Jahren nur noch 2 % und ab 80 Jahre nur noch 0,5 %, also 1/10 des Mittelwertes. Dagegen ist das Risiko bei Kindern unter 10 Jahren etwa 3mal so hoch wie der angegebene Mittelwert.

Mehr als drei Viertel aller Röntgenuntersuchungen werden bei Patienten im Alter über 40 Jahren angefertigt und davon wiederum weit über die Hälfte bei Patienten im Alter über 65 Jahren. Besonders dosisintensive Maßnahmen, wie z.B. die interventionelle Radiologie, die vorwiegend die Behandlung von Gefäßkrankheiten beinhaltet, betreffen einerseits meist ältere Patienten und erübrigen andererseits risikoreiche Therapiemaßnahmen, wie z.B. Operationen oder machen eine Behandlung überhaupt erst möglich. Mit zunehmendem Alter sinkt, wie dargestellt, das Strahlenrisiko, während gleichzeitig das Risiko durch eine Operation einschließlich der Narkose ansteigt. Zudem werden gerade bei schwer- und schwerstkranken Patienten in den letzten Lebensjahren, -wochen und -tagen besonders viele und zum Teil dosisintensive Röntgenuntersuchungen durchgeführt. Dies sind Patienten, die wegen ihrer Erkrankung oder Verletzung eine kürzere Lebenserwartung haben als gesunde Patienten dieser Altersgruppe. Da ein strahlenbedingter Krebs eine bestimmte Latenzzeit hat, bis er sich auswirkt und tödlich verlaufen kann, kann er sich bei Patienten, die innerhalb von 5 - 10 Jahren nach der Röntgenstrahlenanwendung aus anderen Gründen sterben, nicht mehr auswirken.

Für den einzelnen Patienten eignet sich die effektive Dosis nicht, um ein Risiko abzuschätzen. Hier wären im Einzelfall sehr aufwendige Organdosisbestimmungen notwendig. Entscheidend ist vielmehr, daß in der Heilkunde auf Röntgenuntersuchungen und nuklearmedizinische Untersuchungen nicht verzichtet werden kann, und bei gewissenhafter Indikationstellung sowie einer Optimierung deren Durchführung das strahlenbe-

dingte Risiko für den einzelnen Patienten gegenüber dem Nutzen für seine Gesundheit sehr gering ist.

4.2 Strahlentherapie

In der Strahlentherapie muß angestrebt werden, daß der zu bestrahlende Tumor möglichst genau die therapeutisch erforderliche Strahlendosis erhält und das umgebende gesunde Gewebe möglichst geschont wird. Dies ist nur durch die Zusammenarbeit von Strahlentherapeuten und Medizinphysikern möglich. Ständige Qualitätssicherung und Kontrolle sind daher besonders in der Strahlentherapie von Bedeutung.

Für eine effektive Strahlentherapie werden naturgemäß ausreichend hohe Strahlendosen benötigt, so daß sich klinisch erkennbare Nebenwirkungen meist nicht vermeiden lassen.

Akute Strahlenfolgen treten innerhalb von Stunden bis mehreren Wochen auf. Als Allgemeinsymptome treten Übelkeit bis zum Erbrechen (sog. Strahlenkater) auf. Lokal bildet sich eine Rötung, z.T. auch ein Ödem im Bereich der Haut, des weiteren Ödeme innerer Organe mit entsprechenden Beschwerden wie Schluckbeschwerden, Halsschmerzen, Durchfälle oder Blasenentzündung. Ein Teil dieser akuten Strahlenwirkungen ist reversibel.

Ein anderer Teil führt zu chronischen Strahlenfolgen, die Wochen bis Monate bzw. Jahre nach Bestrahlungsende auftreten wie z.B. Hautpigmentierung, Geschwüre (Ulcera), Narben und Strikturen aber auch Fisteln im Bereich innerer Organe.

Neben diesen deterministischen Strahlenwirkungen, die auf das unmittelbar bestrahlte Gewebe beschränkt sind, können als weitere strahleninduzierte Spätfolgen auch stochastische Wirkungen auftreten. Dies können Zweitumore im Bestrahlungsgebiet aber auch außerhalb davon sein.

Sowohl akute wie auch chronische Strahlenfolgen sind in ihrem Ausmaß von der Größe des bestrahlten Volumens, dem Dosis-Zeit-Verhältnis, der Strahlenart, der Organsensibilität, individuellen Faktoren und zusätzlichen Therapieformen wie Hyperthermie, Radiosensitizer oder Zytostatika abhängig.

Angesichts der nicht unerheblichen Nebenwirkungen und Risiken der Strahlentherapie muß man sich deren Nutzen vor Augen halten. Ohne die

Strahlentherapie hätte ein Krebspatient in vielen Fällen eine sehr viel geringere oder überhaupt keine Chance, seine Erkrankung zu überleben. Tubiana (1992) gibt an, daß in Westeuropa und den USA von 100 Tumorpatienten 22 chirurgisch geheilt werden, 18 durch die Radiotherapie (allein oder als entscheidender Therapiefaktor) und 5 durch die Chemotherapie.

Bei der Bestrahlungsplanung kommt es daher wesentlich darauf an, entsprechend der Tumorerkrankung die technischen Möglichkeiten unter Berücksichtigung der verschiedenen biologischen Parameter optimal einzusetzen.

Die Bestrahlung gutartiger Erkrankungen wird mit sehr viel geringeren Dosen durchgeführt, ist aber trotzdem nicht risikofrei. Sie wird daher nur bei wenigen, ansonsten schlecht behandelbaren Krankheiten nach kritischer Indikationsstellung eingesetzt.

5. Verwendete Literatur

- Bäumel, A.; Bauer, B.; Schwarz, E.-R.; Kaul, A.: Medizinische Diagnostik VIII - 5, S. 1 - 22.
In: Wichmann, H.-E.; Schlipkötter, H.-W.; Fülgraff, G. (Hrsg.). Handbuch der Umweltmedizin. Ecomed-Fachverlag, Landsberg a.L. 1992.
- Büll, U. et al. (Hrsg.): Nuklearmedizin. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1994.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Umweltpolitik - Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1994. Bonn, Januar 1997.
- Dabben, H.-H. et al.: Strahlenbiologische Forschung - Eine Grundlage für Fortschritte der klinischen Radioonkologie. Röntgenpraxis 45, 309-316 (1992).
- Hör, G.: Positronen-Emissions-Tomographie (PET) - Von der Forschung zur Klinik. Deutsches Ärzteblatt 90 [Heft 25/26], A1-1883-1889 (1993).
- Empfehlung der Internationalen Strahlenschutzkommission 1990 (Deutsche Ausgabe): ICRP Veröffentlichung 60. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena 1993.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP): Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals, Publication No. 53. Oxford, Pergamon Press 1988.
- Jacobi, W.: Die neuen Empfehlungen der internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP). In: Strahlenschutz in Forschung und Praxis. Reiners, Chr.; Streffer, C.; Messerschmidt, O. (Hrsg.) 33, 139-55, G. Fischer, Stuttgart 1992.
- Lindner, H.; Kneschaurek, P.: Radioonkologie. Schattauer Verlag, Stuttgart 1996.
- Oberhausen, E. et al.: Technik der Nuklearmedizin, MTR-Lehrbuch, 4. Auflage. Deutscher Ärzteverlag, Köln 1990.
- Ostertag, H.: Positronen-Emissions-Tomographie (PET). Phys. Bl. 48, No. 2, 77-83 (1992).
- Reiners, Chr.: Die Strahlenexposition in der nuklearmedizinischen Diagnostik - Risikovergleiche auf der Basis effektiver Dosen. Nucl.-Med., 32, 47-51 (1993).
- Richter, E.; Feyerabend, T.: Grundlagen der Strahlentherapie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1996.
- Scherer, E.; Sack, H. (Hrsg.): Strahlentherapie - Radiologische Onkologie, 4. Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1996.
- Tubiana, M.: The role of local treatment in the cure of cancer. Eur. J. Cancer 12, 2061-9 (1992).
- Winkel zum, K.: Nuklearmedizin, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1990.