

Unfälle mit radioaktiven Stoffen: Die externe Bestrahlung ist nicht das Problem



F.D. Maul, J. Schöchlin

Jedes Jahr finden auf deutschen Straßen Transporte von radioaktiven Stoffen statt. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Transporte für die (Nuklear-)Medizin. Es besteht also das reale Risiko, bei einem Rettungseinsatz auf das amtliche Zeichen für Radioaktivität und Strahlung, der so genannten Flügelschraube, zu stoßen. Wenn dieses Zeichen bei einem Rettungseinsatz auftaucht, werden sich die Beteiligten möglicherweise nach der eigenen Gefährdung fragen. Wie groß ist das persönliche Risiko, wie lässt es sich im Einzelfall abschätzen und was muss vor Ort beachtet werden, um den Verletzten und der eigenen Sicherheit gerecht zu werden?

Teil 1

Das Thema Radioaktivität ist wie kaum ein anderes von Emotionen geprägt. Viele Ängste der Menschen sind rational so nicht nachvollziehbar und beruhen offensichtlich auf einer Art Halbwissen, das zu falschen Schlussfolgerungen führt. So werden die Gefahren radioaktiver Strahlung, die zweifelsohne vorhanden sind, häufig völlig überschätzt bzw. in ihrer relativen Gewichtung falsch gewertet. Um es vorweg zu nehmen: Die Wahrscheinlichkeit, sich im Rettungsdienstseinsatz mit Hepatitis B oder HIV zu infizieren, ist – verglichen mit den Gefahren, die sich aus Unfällen mit radioaktiven Stoffen ergeben – um Größenordnungen höher.

Abb. 1: Bei Unfällen mit radioaktiven Stoffen handelt es sich meist um Transporte für die (Nuklear-)Medizin, aber auch andere Notfälle sind durchaus vorstellbar



Der folgende Artikel ist aus diversen Vorträgen entstanden, die die Autoren im Rahmen von Fortbildungen im Rettungsdienst und Katastrophenschutz des DRK-Kreisverbandes Karlsruhe gehalten haben. Wir wollen bewusst keine Grundlagenvorlesung zum Thema Strahlenschutz halten. Begriffe, die zum Verständnis dieses Artikels wichtig sind, werden in einem Glossar (Tab. 1) erläutert.

Grundlagen

Über radioaktive Stoffe und der von ihnen ausgehenden ionisierenden Strahlung lassen sich scheinbar ganz widersprüchliche Aussagen machen, die – für sich genommen – alle zutreffend sind. Hier einige Beispiele:

- Natürliche Radioaktivität findet sich überall, z.B. ca. 4.000 Bq (Bequerel) des langlebigen ^{40}K (Kalium mit der Massenzahl 40) in jedem Menschen.
- Die Radioaktivität von Gesteinen in unserer Umgebung liegt weit über den Freigrenzen für künstliche Strahlung.
- Ein Pilot, der regelmäßig Transatlantikflüge durchführt, ist pro Jahr einer größeren Strahlenbelastung ausgesetzt als viele radiologisch tätige Ärzte.
- Die krebserzeugende Sterblichkeit der Radiologen am Anfang des 20. Jahrhunderts war deutlich höher als die anderer Ärzte. Am Ende des Jahrhunderts, nachdem der Strahlenschutz stark verbessert wurde, fand sich keine gesteigerte Sterblichkeit von Radiologen mehr.
- In der unmittelbaren Umgebung von Tschernobyl wurden bei Erwachsenen keine gesteigerten Krebsraten festgestellt, wohl aber bei Kindern eine eindeutig höhere Zahl von Schilddrüsenkrebsfällen.
- In der Region von Hiroshima und Nagasaki starben viele Menschen an bösartigen

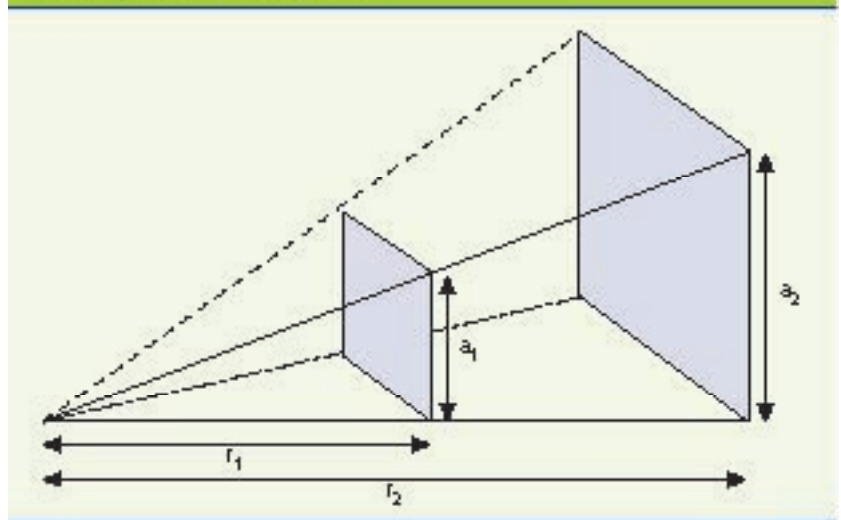
Tumoren als Folge der Strahlung durch die Atombombenexplosion.

Aus diesen Beispielen kann man ersehen: Es muss unterschiedliche Ursachen dafür geben, ob die Strahlung, die von einer radioaktiven Substanz ausgeht, ohne Folgen bleibt, mit einem gesteigerten Krebsrisiko (stochastischer Effekt) einhergeht oder ob eine direkte Strahlenwirkung zu erwarten ist (deterministischer Effekt).

Wie so oft sind auch beim Thema Radioaktivität Segen und Fluch eine Frage der differenzierten Betrachtungs- und Herangehensweise. So hängen die Gefahren dabei u.a. von der Art der Strahlung, ihrer Stärke, der Einwirkdauer und dem Alter des Bestrahlten ab.

Von entscheidender Bedeutung ist der Abstand zwischen Bestrahltem und der Strahlenquelle, weil hier das Naturgesetz gilt, dass sich allein durch die Verdoppelung des Abstandes die Strahlendosis auf ein Viertel reduziert (Abb. 2). Das erklärt, warum es besonders wichtig ist, Abstand von Strahlenquellen zu halten, und warum Kontamination und Inkorporation von radioaktiven Stoffen besonders ungünstig ist, da dann überhaupt kein Abstand mehr zur der Strahlenquelle besteht.

Abb. 2: Abstandsgesetz



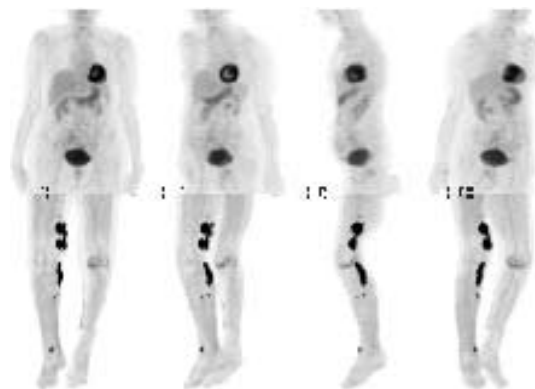
Ihre biologische Wirkung entfaltet die Strahlung dadurch, dass es zu Wechselwirkungen mit den Molekülen in den Körperzellen kommt. Dabei sind die Änderungen, die an den Genen entstehen, von größter Bedeutung, weil sie z.B. die Entstehung eines bösartigen Tumors begünstigen und/oder zu Schäden an den Erbanlagen der nächsten Generationen führen können. Ob es zu einer Tumorentstehung oder zu einer Veränderung des Erbgutes kommt, folgt allein dem Zufallsprinzip und ist auch bei noch so kleinen Strahlendosen möglich (stochastische Wirkung der Strahlung).

Abb. 2: Abstandsgesetz: Doppelter Abstand bedeutet nur noch ein Viertel der Strahlendosis

Es gibt noch eine zweite Form der Strahlenwirkung, der deterministische Strahleneffekt. Ab einer gewissen Strahlendosis lassen sich nämlich direkte bzw. reproduzierbare Zusammenhänge zwischen der Strahlung und ihrer Wirkung nachweisen. Einerseits können das krankhafte Strahlenschäden wie z.B. Hautrötungen sein, andererseits wird in der Nuklearmedizin aus dieser Wirkung ein Nutzen gezogen: Mit einer Strahlendosis von etwa 150 Gy (Gray) kann man eine Hyperthyreose erfolgreich behandeln.

Die Lebewesen dieser Erde haben im Laufe der Evolution gelernt, mit radioaktiven Zellschäden umzugehen. Das mussten sie auch, denn Radioaktivität war auf unserem Planeten schon immer vorhanden. Die sich so entwickelten Reparaturmechanismen sind eng verknüpft mit den genetischen Algorithmen, die der Evolution zugrunde liegen. Offensichtlich spielt in der über Milliarden von Jahren fein eingestellten Mutationsrate im Rahmen der Zellteilung die radioaktive Strahlung eine Schlüsselrolle. Es wird sogar vermutet, dass der biologische Fortschritt ohne die uns umgebende natürliche Strahlung nicht möglich gewesen wäre.

Abb. 4: FDG-PET bei regional metastasierendem Melanom („schwarzer Hautkrebs“): Das Melanom und seine Metastasen (Tochtergeschwülste) speichern sehr stark radioaktiv markierten Traubenzucker (FDG). Es findet sich eine ausgedehnte Metastasierung in die Lymphknoten des rechten Beins. Auf dem Blutweg weitertransportierte Melanomherde können nicht nachgewiesen werden. Die Methode ist besonders empfindlich und eignet sich zur Stadieneinteilung bei Risikopatienten. Physiologisch und damit nicht tumorverdächtig sind die Anreicherungen in Herz sowie Blase und angedeutet in Leber, Milz und Magen. Die Metastasen am Bein sind gekennzeichnet durch viele herdförmige Anreicherungen am Unter- und Oberschenkel des rechten Beins. Zum Teil lassen sich auch sehr kleine Herde, die nur wenige Millimeter groß sind, erfassen



Messen

Der größte Vorteil von Radioaktivität ist, dass sie leicht und vor allem hochempfindlich gemessen werden kann. Durch geeignete Messgeräte lassen sich sogar verschiedene Radionuklide identifizieren. Es gibt verschiedene Typen solcher Geräte mit unterschiedlichem Aufbau und unterschiedlichem Einsatzziel. Für den Strahlenschutz stehen einfache und robuste Geräte, die auch im Batteriebetrieb einsetzbar sind, zur Verfügung. Sie können praktisch überall verwendet werden. Die Feuerwehren verfügen über spezielle Fahrzeuge, auf denen solche Geräte mitgeführt werden. In der Nuklearmedizin werden vor allem die Gamma-Kameras eingesetzt. Sie erlauben die bildliche

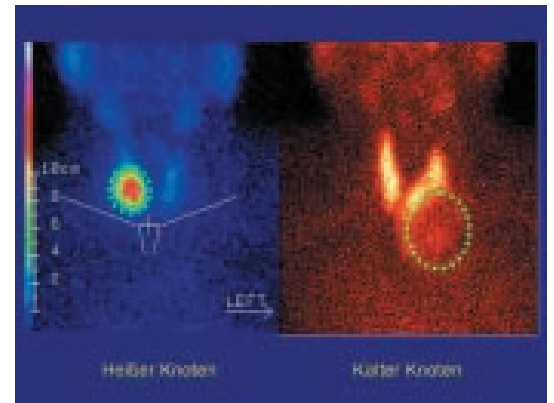


Abb. 3: Schilddrüsenszintigramm, rechts mit einem funktionell aktiven Knoten (heißer Knoten) und links mit einem funktionell inaktiven Knoten (kalter Knoten): Da die sonographisch darstellbare Durchblutung nur teilweise mit der Funktion übereinstimmt, lässt sich diese Unterscheidung nur szintigraphisch vornehmen; bei heißen Knoten handelt es sich um gutartige autonome Adenome, die ab einer bestimmten Größe zur Überfunktion führen; hinter kalten Knoten kann sich ein bösartiger Schilddrüsentumor verbergen

Darstellung der Verteilung einer radioaktiven Substanz im Körper.

Anwendungen in der (Nuklear-)Medizin

Wesentliche Anwendungen der Radioaktivität sind heute in der Medizin zu finden. Das Teilgebiet der Nuklearmedizin entstand vor mehr als 50 Jahren und hat sich rasch in eine selbstständige medizinische Disziplin zur Diagnose und Therapie ernsthafter Erkrankungen entwickelt.

Im Gegensatz zur Radiologie (Röntgendiagnostik), die Bilder auf der Basis der individuellen Anatomie liefert, untersucht und dokumentiert die Nuklearmedizin Organ- und Gewebefunktionen sowie biologische Strukturen. Viele nuklearmedizinische Verfahren können das Ausmaß der Funktion oder Funktionsstörung in beliebigen Organen oder Geweben messen und damit Informationen liefern, wie sie mit keinem anderen diagnostischen Verfahren möglich sind.

Die nuklearmedizinischen Verfahren sind sehr empfindlich beim Aufspüren von Organ- oder Gewebefehlfunktionen, sodass diese bereits erkannt werden, bevor sie körperliche Symptome verursachen. Es gibt nahezu kein Organ oder Organsystem, das nicht nuklearmedizinisch in seiner Funktion untersucht werden kann.

Die Anwendung radioaktiver Stoffe in Diagnostik und Therapie im Rahmen der Nuklear-

medizin soll an zwei Beispielen verdeutlicht werden.

Therapie von Schilddrüsenerkrankungen → Die Schilddrüsenszintigraphie ist eine nuklearmedizinische Anwendung, die bei der Diagnostik und Therapie von Schilddrüsenerkrankungen schon seit über 60 Jahren ausgeübt wird. Die Schilddrüsenszintigraphie ist mit einem Anteil von 40% die häufigste nuklearmedizinische Untersuchung überhaupt und wird überwiegend in nuklearmedizinischen oder radiologischen Praxen durchgeführt (Abb. 3). Notwendig wird die Schilddrüsenszintigraphie z.B. zur weitergehenden Abklärung einer Hyperthyre-

ose und von Schilddrüsenknoten, nachdem die Schilddrüsenhormone bestimmt wurden und eine Ultraschalluntersuchung durchgeführt worden ist. Die Schilddrüsenszintigraphie basiert auf der Eigenschaft der Schilddrüse, sehr stark Jod zu konzentrieren, das die Schilddrüse zur Bildung von Schilddrüsenhormon benötigt.

Zur Schilddrüsenszintigraphie verwendet man in der Praxis kein Jod-Isotop, sondern ^{99m}Tc (Technetium mit der Massenzahl 99), das eine physikalische Halbwertszeit von nur sechs Stunden aufweist. ^{99m}Tc kann in der für die Schilddrüsenszintigraphie notwendigen chemischen Form von Perotechnat aus einem

Tab. 1: Glossar

Begriff	Erläuterung		
Aktivität	Im Sinne von Radioaktivität: Anzahl der Zerfälle (Kernumwandlungen) pro Zeitintervall. Einheit: 1 Becquerel (Bq) = 1 Zerfall pro Sekunde	Massenzahl	Summe der Kernbausteine (Protonen, Neutronen) eines Atoms
Algorithmus	(Rechen-)Verfahren, Strategie	Molybdän	chemisches Element
Becquerel (Bq)	Maßeinheit für die Aktivität	Mutation	Veränderung der Erbanlagen; typische Mutationsraten liegen zwischen 0,000001% und 0,001%
Dosis, effektive oder Äquivalent-	Die Äquivalentdosis ist ein Maß für die schädigende oder biologische Wirkung ionisierender Strahlung. Sie ergibt sich aus der Energie, die im menschlichen Körper bei der Absorption der Strahlung pro Masseneinheit deponiert wird (Energiedosis) und einem von der Strahlungsart abhängigen Wichtungsfaktor. Einheit: 1 Sievert (Sv)	Perotechnat	Chemische Verbindung (TcO_4^-), die wie Jodid in die Schilddrüse aufgenommen, aber nicht weiter in die Schilddrüsenhormone eingebaut wird
Dosis, Energie-	Die Energiedosis ist die messbare Strahlungsenergie E , die von einem Körper der Masse M absorbiert wird. Einheit: 1 Gray (Gy)	Positron	Antiteilchen des Elektrons. Positronen werden bei bestimmten radioaktiven Zerfällen ausgesendet.
Elastomer	Kunststoff, der sich elastisch verformen lässt, z.B. Kautschuk	Quanten	(Strahlungs-)Energie tritt nur in bestimmten „Packungseinheiten“ auf, den so genannten Quanten
Gamma-Strahlung	Radioaktive Energie-Strahlung, z.B. Röntgenstrahlung	Radionuklid	Atomkern, der unter Aussendung radioaktiver Strahlung zerfallen kann
Gray (Gy)	Einheit der Energiedosis (1 Gy = 1 J/kg)	Sievert (Sv)	Einheit der Äquivalentdosis (in J/kg)
Halbwertszeit	Zeit, nach der die Hälfte der anfangs vorhandenen Atome (radioaktiv) zerfallen ist	Szintigraphie	Zum Nachweis von Gamma-Strahlung werden so genannte Szintillationszähler eingesetzt. Sie enthalten als absorbierendes Medium einen Natriumjodidkristall, in dem die aufgenommene Energie in einen Lichtblitz umgewandelt wird. Der Lichtblitz wird von einer Kamera registriert.
Hyperthyreose	Überfunktion der Schilddrüse mit gesteigerter Produktion von Schilddrüsenhormonen	Technetium	chemisches Element
Inkorporation	Aufnahme gefährlicher Stoffe in den Körper	Thermoplast	Kunststoff, der sich bei Wärme verformen lässt und beim Abkühlen seine Form beibehält, z.B. Polyvinylchlorid (PVC)
Jod	chemisches Element	Tomographie	Schichtaufnahme
Kalium	chemisches Element		
Kobalt	chemisches Element		
Kontamination	Durch radioaktive Stoffe verursach-		

Dr. med. Frank-Dieter Maul

Direktor der Klinik für Nuklearmedizin
Städtisches Klinikum Karlsruhe gGmbH
Moltkestr. 90
D-76133 Karlsruhe
nuklearmedizin@klinikum-karlsruhe.de
www.klinikum-karlsruhe.de

Dr. rer. nat. Jürgen Schöchlin

Diplom-Physiker
DRK-Kreisverband Karlsruhe e.V.
Am Mantel 3
D-76646 Bruchsal
juergen.schoechlin@drk-karlsruhe.de
www.drk-karlsruhe.de

so genannten Tc-Generator täglich neu „gemolken“ werden und steht damit kurzfristig zur Diagnostik zur Verfügung. In diesen Generatoren, die das ^{99m}Tc in Form eines gebundenen Mutterradionuklid ^{99}Mo (Molybdän mit der Massenzahl 99) enthalten, ist die höchste Menge eines radioaktiven Stoffes enthalten, die in einer nuklearmedizinischen Abteilung oder einer nuklearmedizinischen Praxis gelagert werden. Aus dem Generator kann aber immer nur eine beschränkte Menge ^{99m}Tc -Aktivität gewonnen werden. Das ^{99}Mo (Halbwertszeit: 66 Stunden) selbst ist fest gebunden und durch ausreichend Blei abgeschirmt, damit die Mitarbeiter mit dem Generator arbeiten können. Von diesen Generatoren geht für den Rettungsdienst keine direkte Gefahr aus.

Die Szintigraphie der Schilddrüse gehört übrigens hinsichtlich der Strahlenbelastung des Patienten zu den diagnostischen Strahlenuntersuchungen mit einer der geringsten effektiven Dosen. Sie liegt unter der üblichen mittleren Jahresdosis durch die natürliche Strahlenbelastung.

Bei so genannten warmen Knoten, einer gutartigen Schilddrüsenerkrankung, und bei einer Überfunktion der Schilddrüse, bei der die gesamte Schilddrüse betroffen ist, ist es möglich, mit dem radioaktiven ^{131}I (Jod mit der Massenzahl 131, Halbwertszeit: 8 Tage) die Schilddrüse zu behandeln. Dadurch, dass Jod etwa 50-mal stärker in der Schilddrüse angereichert wird als in anderen Geweben, lässt sich gezielt die an der Überfunktion erkrankte Schilddrüse behandeln. Innerhalb von zwei bis drei Monaten kommt es im Allgemeinen zur Beseitigung der Überfunktion.

Die Patienten müssen zu dieser Behandlung einige Tage stationär aufgenommen werden. Die Ausscheidungen der Patienten werden aufgefangen und in speziellen Behältern solange gelagert, bis keine relevante Radioaktivität mehr nachweisbar ist. Dies geschieht in einer so genannten Abklinganlage. Das ist erforderlich, um die unbeteiligte Bevölkerung nicht mit Strahlen zu belasten. Aber selbst, wenn es notwendig würde, einen Patienten in einer Abklinganlage zu behandeln, geht von diesen Behältern auf Grund baulicher Maßnahmen kein Gesundheitsrisiko aus. Wenn die von den Patienten ausgehende Strahlung ein bestimmtes Maß unterschreitet, ist der Zeitpunkt erreicht, an dem sie entlassen werden dürfen.

Positronen-Emissions-Tomographie → Bei der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) handelt

es sich um die neuste nuklearmedizinisch-diagnostische Entwicklung. Sie wird derzeit überwiegend in der Diagnostik von bösartigen Tumoren eingesetzt. Als radioaktives Diagnostikum benutzt man meist Traubenzucker, der mit dem Radionuklid ^{18}F (Fluor mit der Massenzahl 18, Halbwertszeit: 110 min) markiert ist. Diese so genannte Tracer-Substanz ist abgekürzt unter FDG (Fluorodeoxyglukose) bekannt.

Positronenstrahler wie ^{18}F besitzen eine besondere Eigenschaft, die man sich bei der PET zunutze macht. Bei ihrem Zerfall entstehen zwei Energieteilchen (Gamma-Quanten), die



Abb. 5: Die so genannte Flügelschraube ist das amtliche Zeichen für Radioaktivität und Strahlung

in einem Winkel von fast genau 180° auseinander fliegen. Bei einer PET-Kamera sind die Detektoren ringförmig angeordnet, so dass beide Teilchen gleichzeitig registriert werden können. FDG wird intravenös in den Stoffwechsel eingeschleust. Da FDG im Körper weitgehend normal umgesetzt wird, ist mit der PET eine Darstellung der natürlichen Zellfunktion möglich.

Die FDG-PET wird bei einer Reihe von bösartigen Tumoren wie dem Malignen Melanom („schwarzer Hautkrebs“), den Lymphomen (Lymphknotenkrebs), den verschiedenen Arten des Darmkrebses, dem Lungenkrebs, den Kopf-Hals-Tumoren und einer Reihe anderer Tumoren eingesetzt, um das genaue Stadium (Ausdehnung des Tumors sowie den Befall der Lymphknoten in Tumornähe) festzulegen sowie bei der Suche nach Tochtergeschwülsten im ganzen Körper (Metastasen) behilflich zu sein. Schließlich kann bei bestimmten Tumoren der Erfolg einer Tumorthherapie frühzeitig vorausgesagt werden (Abb. 4). +

Literaturangaben im nächsten Teil