

Nuklearmedizin: **eine Einführung für Physiklehrer**

Nuklearmedizin = Anwendung der Strahlung von radioaktiven Isotopen in der Medizin

- 2 Bereiche: 1) Szintigraphie zur Diagnose: Schilddrüse, Knochen, Nieren, Herz, Hirn, Lunge und Leber, besonders zur Tumordiagnostik
 2) Radio-Jod-Therapie der Schilddrüse

Szintigraphie

In der Szintigraphie stellt man durch Messung der austretenden radioaktiven Strahlung fest, wie sich ein bestimmtes Isotop in einem menschlichen Körper verteilt.

Man verwendet heute fast nur noch ^{99m}Tc , ein angeregtes Isotop des Elements Technetium. Im Rahmen der Radiojod-Therapie wird auch von Jod eine Szintigraphie aufgenommen.

^{99m}Tc entsteht aus ^{99}Mo (Molybdän) durch β -Zerfall unter Abgabe von γ -Strahlung. Es gibt seine überschüssige Energie in Form von γ -Strahlung ab mit einer Energie von 140 keV und einer Halbwertszeit von 6 h.

Gründe für die Verwendung von ^{99m}Tc :

- 1) Es ist ein reiner γ -Strahler und belastet damit den Körper weniger als ein α -Strahler.
- 2) Das Isotop kann im Hause hergestellt werden, indem eine Molybdänquelle (Feststoff) durch eine Kochsalzlösung ausgespült wird. In dieser Lösung löst sich das ^{99m}Tc und kann dann entnommen werden. Eine solcher "Molybdängenerator" kann etwa eine Woche lang verwendet werden.
- 3) Die γ -Energie von 140 keV ist ideal für den Nachweis durch die Detektoren (NaJ-Kristall mit Tl dotiert). Bei zu hoher Energie weisen die Detektoren nicht mehr gut nach, bei zu niedriger Energie kann die Strahlung den Körper nicht mehr verlassen.

Das Technetium wird in eine Komplexverbindung eingebaut, die an bestimmte Organe koppelt. Dies geschieht, indem die Tc-Lösung in ein Fläschchen mit der Komplexverbindung eingespritzt, geschüttelt und evtl. erhitzt wird. Das Technetium verbindet sich dort mit der Komplexverbindung. Diese Lösung dieser Verbindung wird dann dem Patienten in die Vene gespritzt, kommt also sofort in die Blutbahn. Nach einigen Minuten (Schilddrüse 15 min. andere länger) wird dann ein Szintigramm erstellt.

Szintigramm:

Mit einem großen Einkristall aus NaJ, das mit Tl-Atomen dotiert ist, erzeugt die γ -Strahlung des ^{99m}Tc Lichtblitze. Vor dem Kristall sitzt eine dicke Platte mit vielen

parallelen Kanälen (Kollimator), die bewirkt, dass nur Strahlung senkrecht zum Kristall den Kristall erreichen kann. Die von der γ -Strahlung erzeugten Lichtblitze werden von einer größeren Anzahl von Detektoren gleichzeitig gemessen, z. B. 22 auf einer Fläche von 20 cm x 20 cm. Die Messung dieser Detektoren wird dann mit einem Computer verarbeitet, der daraus ein Bild der räumlichen Verteilung der radioaktiven Substanz im Körper gewinnt. Ein Szintigramm des ganzen Körpers erhält man, wenn man mit einer fahrenden Kamera in der Breite des Körpers den ganzen Körper abscannt.

Schilddrüse:

Tc-Perotechnit verhält sich bei der Einlagerung in der Schilddrüse ähnlich wie Jod. Deshalb wird es in der Schilddrüse so aufgenommen, dass man damit die Schilddrüse abbilden kann.

Knochen:

Technetium wird mit einer Phosphatverbindung (Methylendiphosphat, Medronsäure) gekoppelt, diese Substanz wird innerhalb einer halben Stunde an den Knochen angelagert. Besonders stark wird das Tc dort eingelagert, wo der Knochenumbau besonders intensiv ist, also in den Gelenken und vor allem bei einem Reizzustand, bei Brüchen und in den Knochentumoren, die man auf diese Weise im Szintigramm sehr schön sehen kann.

Lunge:

Man macht 2 Untersuchungen:

- 1) Tc wird in Feinststaub eingebaut und vom Patienten über eine Schlauch eingeatmet und ausgeatmet. Auf diese Weise sieht man alle Bereiche der Lunge, die von der Luft erreicht (belüftet) werden.
- 2) Tc wird gekoppelt mit Eiweißkörpern (MAA = Makroaggregierte Albumin-Partikel), die so groß sind, daß sie in den kleinen Arterien der Lungenbläschen steckenbleiben und sie vorübergehend verstopfen. Da dies nur in 1 /10000 aller Fälle geschieht, behindert es den Patienten nicht. Im Szintigramm kann man dann sehr deutlich sehen, ob ein bestimmter Bereich der Lunge nicht mehr durchblutet wird. Verstopfung einer Ader durch ein Blutgerinnsel (Embolie) zeigt sich dann z. B. an einer keilförmigen Lücke im Szintigramm.

Niere:

Tc wird mit Meriatid gekoppelt. Diese Substanz wird von den Nieren konzentriert und ausgeschieden. Wenn man dann 8 mal hintereinander je 20 Sekunden lang ein Szintigramm des Unterleibs erstellt, kann man direkt beobachten, wie schnell und wie viel die Nieren konzentrieren und ins Hohlssystem (Nierenbecken, Harnleiter, Harnblase) ausscheiden und ob z. B. eine Niere eine Unterfunktion zeigt.

Hirn:

Tc wird mit einer Substanz gekoppelt, die sich im Hirn anlagert (Bicisatdihydrochlorid) Dadurch läßt sich die Durchblutung des Gehirns darstellen.

Herz:

Hier wird das radioaktive ^{201}Tl eingespritzt, das in den Herzmuskelzellen angereichert wird. Auf diese Weise kann man die Stoffwechselaktivität des Herzmuskels beobachten.

Die Radiojod-Therapie:

Ihr Ziel ist die Zerstörung von überschüssigem oder überaktivem Gewebe der Schilddrüse durch die β -Strahlung des radioaktiven Jod-Isotops ^{131}I .

Die Schilddrüse und ihre Hormone:

Die Schilddrüse ist ein schmetterlingsförmiges Organ, das um den Kehlkopf herum liegt. Sie erzeugt aus Jod und anderen Bestandteilen die Schilddrüsenhormone FT_3 und FT_4 und speichert sie. Diese Schilddrüsenhormone sind im gesamten Organismus für einen normalen Ablauf verschiedener Vorgänge erforderlich und führen in der Regel zu einer Aktivierung von Stoffwechselprozessen. Sie beeinflussen den Stoffwechsel von Kohlehydraten, Fett und Eiweiß, den Knochenstoffwechsel, das zentrale Nervensystem, die Übertragung der Nervenimpulse auf die Muskeln und die Muskulatur.

Im gesunden Körper wird dadurch eine günstige Konzentration der Schilddrüsenhormone beibehalten, dass bei zu wenig Schilddrüsenhormonen im Blut die Schilddrüse durch ein weiteres Hormon (TSH) zu erhöhter Produktion und Ausschüttung angeregt wird. Bei zu hoher Konzentration der Hormone im Blut wird die Aussschüttung reduziert.

Schäden der Schilddrüse:

Deutschland ist ein Jodmangelgebiet. Deshalb kann es zu Über- oder Unterfunktionen der Schilddrüse kommen:

- 1) Gleichmäßige Vergrößerung der Schilddrüse (Kropf)
- 2) Autonomen: Bestimmte Bereiche (Knoten) der Schilddrüse produzieren ständig die Hormone, unabhängig von der Regelung.
- 3) Basedowsche Krankheit: Das Immunsystem greift die Zellen der Schilddrüse an und zwingt sie zu unkontrollierter Produktion.

Bei zu wenig Schilddrüsenhormonen läuft der Körper insgesamt zu langsam, bei zu viel Hormonen ständig auf Hochtouren (erhöhter Blutdruck, beschleunigter Puls, verstärkte Nervosität, Schweißausbrüche, Gewichtsabnahme). Zur Behandlung der

Schilddrüsenüberfunktion ist in den meisten Fällen die Zerstörung der unkontrolliert produzierenden ("heißen") Knoten erforderlich.

Radiojod und seine Wirkung im Körper

Das Isotop ^{131}I wird im Reaktor erzeugt durch die Spaltung von ^{235}U . Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 8,021 \text{ d}$ durch β^- -Zerfall zu ^{131}Xe . ($E_{\beta} \leq 0,606 \text{ MeV}$)

Das entstehende Xenon-Isotop befindet sich in einem angeregten Zustand und geht dann unter Aussendung von γ -Strahlung in den Grundzustand über. ($E_{\gamma} = 0,365 \text{ MeV}$ zu 81%)

Alles Jod, also auch das radioaktive Isotop, das der Körper aufnimmt, wird in der Schilddrüse gespeichert und dort bevorzugt an den aktiven Stellen, wie z. B. den heißen Knoten. Die Strahlung, die vom abgelagerten ^{131}I abgegeben wird, hat im Körper eine mittlere Reichweite von 0,7 mm, schädigt also fast nur das umliegende Schilddrüsengewebe. Die ausgesandte γ -Strahlung hat eine Reichweite von 6,3 cm im Körper, kann den Körper also verlassen und von außen gemessen werden. Damit beruhen über 90 % der Strahlenwirkung von ^{131}I auf der β^- -Strahlung.

Vorteile der Radiojod-Therapie:

Das Isotop sammelt sich fast vollständig in der Schilddrüse und dort besonders in den heißen Knoten. So kann man Gewebe dort gezielt vernichten, ohne andere Organe zu schädigen, z. B. die Haut.

Bei Schilddrüsenkrebs kann man alle Schilddrüsenzellen zerstören, auch diejenigen, die schon die Schilddrüse verlassen haben, um außerhalb der Schilddrüse Tochtergeschwulste (Metastasen) zu bilden.

Eine Radiojod-Behandlung erfordert keine Operation

Bei der Bekämpfung von Autonomen ist eine Operation meist nicht erforderlich.

Wenn Menschen zu alt oder schwach sind, um die Narkose bei einer Kropfoperation zu überstehen, kann man durch eine Radiojodtherapie die Größe der Schilddrüse ohne Operation stark verkleinern.

Nachteile der Radiojodtherapie:

Radioaktives Material ist gefährlich und erfordert einen hohen Sicherheitsaufwand.

Patienten, die Radiojod zur Therapie eingenommen haben, müssen zum Schutz der Bevölkerung für einige Tage isoliert werden. Ihre Ausscheidungen sind radioaktiv.

Durchführung einer Radiojodtherapie:

- 1) Ein niedergelassener Arzt stellt eine Schilddrüsenerkrankung fest.
- 2) In der Klinik Vorgespräch und Abklärungsuntersuchung, ob der Patient für eine Radiojodtherapie geeignet ist. Dazu Blutentnahme und Untersuchung der Schilddrüse durch Ultraschall und ein Tc-Szintigramm.
- 3) Radiojodtest: Dem Patienten wird eine Kapsel mit kleiner Jodmenge verabreicht.

Nach 24 Stunden wird ein Szintigramm der Schilddrüse aufgenommen und 3 – 4 Stunden später nochmals. Damit wird festgestellt, welcher Anteil des verabreichten Jods von der Schilddrüse aufgenommen wird und wie schnell das Jod vom Körper wieder ausgeschieden wird. (Diese Abnahme der Jodmenge im Körper durch Ausscheidung lässt sich durch eine biologische Halbwertszeit beschreiben.) Aus den so gewonnenen Daten wird dann die erforderliche Dosis berechnet und bestellt.

- 4) In Braunschweig wird dann aus Material, das in England im Reaktor erzeugt wurde, ein Dragee mit der erforderlichen Dosis erzeugt und am folgenden Tag dem Patienten in der Klinik gegeben.
- 5) Der Patient bleibt dann 2 – 4 Tage auf der Station der Klinik; in Sonderfällen (großer Kropf) kann dies bis zu 16 Tagen dauern.
- 6) 4 – 6 Wochen nach der Therapie findet eine erste Funktionsprüfung statt.
- 7) Bei einer weiteren Nachuntersuchung 3 Monate nach der Therapie wird der Behandlungserfolg durch Laborwerte und Bildgebung (Ultraschallaufnahme, Szintigramm) dokumentiert.
- 8) Langfristig sind jährliche Kontrolluntersuchungen sinnvoll.

Strahlenschutz in einer Klinik für Nuklearmedizin

Entscheidendes Problem gegenüber anderen Kliniken ist die Verwendung radioaktiver Isotope.

Personal einer Klinik für Nuklearmedizin (Krefeld, Stand Ende 2005)

- 1 Chefarzt (Professor für Medizin und promovierter Physiker)
- 1 Oberarzt (Arzt und Physiker)
- 2 Physiker als Medizinphysikexperten (mindestens einer erforderlich, nach dem Diplom in Physik mindestens 2 Jahre Berufserfahrung in der Medizinphysik und 2 Kurse)
- 1 leitende MTA (mit Zusatzausbildung in Fachkunde Nuklearmedizin)
- 5 MTAs (mit Zusatzausbildung in Fachkunde Nuklearmedizin)
- 5 Krankenschwestern
- 2 Sekretärinnen
- 1 Putzfrau

Allgemeines zum Strahlenschutz:

Schutz vor Strahlung durch 1) Abstand, 2) kurze Dauer der Einwirkung, 3) Abschirmung

Einheiten:

Aktivität: Anzahl der Zerfälle pro Sekunde, Einheit 1 Bq [Becquerel] = 1 / s

Energiedosis: Pro kg Materie absorbierte Energie, Einheit 1 Gy [Gray] = 1 J / kg

Äquivalentdosis: Wirkung der aufgenommenen Energiedosis beim Menschen,
Einheit 1 Sv [Sievert] = 1 J / kg

Die Äquivalentdosis berücksichtigt, dass 1 Gy durch α -Strahlung etwa 20 mal so stark wirkt wie 1 Gy durch β -Strahlung oder γ -Strahlung.

Bei α -Strahlung gilt: Die Energiedosis 1 Gy entspricht 20 Sv.

Strahlenbelastungen:

Natürliche Strahlenbelastung: 0,8 mSv / Jahr in Nordwestdeutschland,
bis 6 mSv / Jahr im Schwarzwald und im Bayerwald

In der indischen Provinz Kerala ist die natürliche Strahlenbelastung etwa 24 mSv / Jahr, dort ließ sich aber keine erhöhte Krebshäufigkeit feststellen.

Medizinische Untersuchungen: 2 mSv / Jahr

durch Radon aus Sand im Beton: 1,1 mSv / Jahr

Grenzwerte:

Keine unbeteiligte Person darf mehr als 1 natürliche Strahlenbelastung pro Jahr erhalten.

=> Bei Entlassung darf ein Patient in 2 m Abstand nicht mehr als 3,5 μ Sv / h aussenden.

Überwachungsbereich: ≤ 1 mSv / Jahr

Kontrollbereich: ≤ 3 μ Sv / h oder $H \leq 6$ mSv / Jahr oder
Umgang m. Stoffen, die zu Dosis ≥ 6 mSv führen können.

Sperrbereich: ≤ 20 mSv / Jahr, nur kurze Arbeiten unter besonderen
Sicherheitsvorkehrungen

Mitarbeiter, die im Kontroll- und Sperrbereich arbeiten, tragen ein Filmdosimeter und ein Fingerringdosimeter und werden einmal jährlich untersucht.

Die menschlichen Organe sind unterschiedlich empfindlich: Die maximalen Äquivalentdosen betragen für Augenlinse 150 mSv (sonst Linsentrübung), Haut und Hände 500 mSv, Schilddrüse 300 mSv, innere Organe 150 mSv, Keimzellen und Knochenmark 50 mSv

Dosimeter zum Nachweis der aufgenommenen Äquivalentdosis:

Jeder trägt ein Filmdosimeter, einen Clip, der ein lichtdicht verpacktes quadratisches Stück Film enthält. Dieser Film wird durch radioaktive Strahlung geschwärzt. Auf dem Film sind ein Al-, ein Cu- und ein Pb-Stück angebracht. Damit kann man Aussagen über Energie und Richtung der Strahlung machen.

Ärzte und MTAs tragen außerdem noch ein Fingerringdosimeter, das einen Film enthält. Das Personal im Pflegebereich trägt zusätzlich noch ein elektronisches Personendosimeter, das einen Warnton beim Überschreiten eines Grenzwerts abgibt.

Abschirmung:

Strahlung wird von Materie absorbiert. Eine Halbwertsschichtdicke (HWS) der Materie halbiert die durchtretende Strahlung, 3 HWS reduzieren die Strahlung auf $(1/2)^3 = 1/8$. Für ^{99m}Tc mit 0,141 MeV ist die HWS in Blei 0,28 mm (in Wolfram noch weniger) und für ^{131}I ist die HWS in Blei 2,3 mm bei 0,364 MeV und 5,1 mm bei 0,637 MeV.

Spritzen mit der ^{99m}Tc -Lösung tragen einen Mantel aus Wolfram, um die Finger dessen zu schützen, der spritzt.

Radiojoddragees werden in einem dickwandigen Bleizylinder geliefert, der ein Kunststoffgefäß mit dem Dragee enthält. Zur Behandlung wird ein 30 cm langes Rohr an den Kunststoffbehälter geschraubt. Dann entnimmt der Patient mit dem Rohr den Behälter und lässt das Dragee durch das Rohr in seinen Mund gleiten.

Der Beton der Wände der Patientenzimmer neben den Betten enthält Baryt (BaSO_4), da Barium die Strahlung besser absorbiert als normaler Beton.

Ein Patient, der auf der Station isoliert ist, darf von seinen Angehörigen nicht besucht werden, kann mit ihnen aber über ein Bildtelefon sprechen.

Abstand:

Die Intensität einer elektromagnetischen Strahlung, also auch der γ -Strahlung, die von einer punktförmigen Quelle ausgeht, nimmt mit zunehmendem Abstand stark ab: Doppelter Abstand \Rightarrow 1/4 der Intensität, dreifacher Abstand \Rightarrow 1/9 der Intensität.

Um dem Patienten freien Ausblick aus dem Krankenzimmer zu gewähren, liegt vor der Terrasse des Patientenzimmers eine Rasenfläche, die in größerer Entfernung mit einem Zaun abgesperrt ist.

Austritt von Radioaktivität vermeiden

Die Raumluft wird abgesaugt, dadurch entsteht ein leichter Unterdruck, der Luft immer nur nach innen strömen lässt. Die abgesaugte Luft wird durch einen Aktivkohle-Filter geleitet, der die radioaktiven Teilchen abfängt. Das Abwasser und die menschlichen Ausscheidungen werden im Keller in Tanks gesammelt. Kontaminierter Müll aus den Patientenzimmern und kontaminierte Gegenstände werden im Keller gelagert.

Abklingzeit:

Im Laufe der Zeit zerfallen radioaktive Isotope; nach einer Halbwertszeit (HWZ) ist nur noch die Hälfte der vorher vorhandenen Stoffmenge übrig, nach 10 HWZ nur noch $(1/2)^{10} = 1/1024$.

Durch Radiojod kontaminierte Ausscheidungen und Abwässer werden im Keller ein Dreivierteljahr gelagert und dabei noch biologisch geklärt, bis sie an die Umwelt abgegeben werden.

Kontaminierte Abfälle und kontaminierte Gegenstände des Patienten werden 10 HWZ im Keller gelagert.

Kontrolle durch genaue Dokumentation:

Führen von Nachweisen (mindestens 20 % der Arbeitszeit)

- 1) Nachweis aller radioaktiven Präparate, die geliefert wurden
- 2) Welcher Patient bekam welche Kapsel?
- 3) Wieviele Kapseln bekam wann jeder Patient?
- 4) Nachkontrolle, ob die angestrebte Dosis erreicht wurde

Für alle Arbeitsabläufe gibt es detaillierte schriftliche Arbeitsanweisungen, die von einem Medizinphysikexperten erstellt und vom Direktor der Klinik genehmigt wurden.

Verwendete Literatur:

Hotze, Lothar-Andreas, und Schumm-Draeger, Petra-Maria: Schilddrüsenkrankheiten, Diagnose und Therapie. 5. erweiterte und vollständig überarbeitete Aufl.. Berlin 2003.

Schicha, H. , und Schober, O. (Hrsg.): Nuklearmedizin, Basiswissen und klinische Anwendung. 4. vollkommen überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart 2000.

Ein herzlicher Dank

an Herrn Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. Otmar Lauer, Herrn Dipl. Phys. Dr. Müdder und Frau MTRA Brigitte Rothgang für die umfassende und detaillierte Information, die ich von ihnen über die Theorie und Praxis der Nuklearmedizin an der Klinik für Nuklearmedizin in Krefeld erhielt.

Dipl. Phys. Dr. Reiner Hennig, L. i. A.
 Hamburger Allee 56
 60486 Frankfurt am Main
 Tel. 069/97981356
 email: ReinerHennig@freenet.de