

# 7 Nukleardiagnostik

## 7.1 Grundlagen der Nuklearmedizin

### 7.1.1 Prinzip

Die Nuklearmedizin nutzt radioaktive Elemente für diagnostische und therapeutische Zwecke. In diesem Kapitel beschäftigen wir uns mit den diagnostischen Anwendungen. Ziel dieser Anwendungen ist es meistens, funktionelle Abläufe sichtbar zu machen, teilweise auch zeitaufgelöst. Dazu wird ein radioaktives Isotop in den Körper des Patienten eingebracht, typischerweise durch Injektion in die Blutbahn, Schlucken in den Magen-Darm Trakt, oder durch Inhalation in die Lunge. Die Menge an Aktivität, die in den Körper eingebracht wird, ist bekannt, und aus der ebenfalls bekannten Zerfallszeit kann die Gesamtaktivität zu einem späteren Zeitpunkt errechnet werden. Ziel der diagnostischen Verfahren ist es, zu bestimmen, wo im Körper sich diese Aktivität befindet, d.h. gesucht ist  $A(x, y, z, t)$ .

Um die Aktivität an den gewünschten Ort im Körper zu bringen werden **Tracer** eingesetzt, das sind radioaktiv markierte Moleküle, die an chemischen Prozessen, wie zum Beispiel dem Stoffwechsel, beteiligt sind oder in bestimmte Organe diffundieren (Perfusion) oder auch nur mitgespült werden im Blut oder in der Atemluft. Welche Moleküle als Tracer besonders gut geeignet sind hängt also von der gewünschten Information ab.

Typische Aktivitäten in der nuklearmedizinischen Diagnostik sind zwischen 100 und 1000 MBq, d.h.  $10^8 - 10^9$  Zerfälle pro Sekunde. Da der radioaktive Zerfall ein statistischer Prozess enthält die erzeugten Bilder notwendigerweise eine gewisse Statistik. Eine zu geringe Aktivitätskonzentration führt zu einem entsprechend großen Fehler. Für eine reine Funktionsdiagnostik wird jedoch wesentlich weniger Aktivität benötigt, als für eine hochaufgelöste Bildgebung notwendig wären.

Die **Szintigraphie** erfasst die räumliche Verteilung der Radioaktivität im Körper, und der zeitliche Verlauf wird in Untersuchungen der **Kinetik**, also der zeitlichen Abläufe der Radioaktivitätsverteilung im Körper erfasst. Die Kinetik wird einerseits durch den radioaktiven Zerfall bestimmt, andererseits durch die physiologischen Prozesse im Körper.

### 7.1.2 Radioaktiver Zerfall

Das Zerfallsgesetz, das den radioaktiven Zerfall beschreibt, lautet

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

mit  $N(t)$  als Anzahl der Kerne zur Zeit  $t$ ,  $N_0$  die Anfangszahl der vorhandenen Kerne und  $\lambda$  ist die Zerfallsrate.

Die **Aktivität**  $A(t)$  einer Menge radioaktiven Materials ist definiert als die Anzahl Zerfälle pro Zeiteinheit, also

$$A(t) := -\frac{dN}{dt} = A_0 e^{-\lambda t},$$

und wird gemessen in Becquerel [Bq]. In der Literatur (vor allem in älteren Arbeiten) wird außerdem die Einheit Curie (Ci) verwendet.  $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ .

Eine Aktivität von z.B.  $100 \text{ MBq}$  entspricht somit  $10^8$  Zerfällen pro Sekunde. Die entsprechende Anzahl an radioaktiven Atomen ergibt sich aus der Lebensdauer: Beträgt diese z.B.  $1000 \text{ s}$ , so benötigt man  $10^{11}$  Atome für eine Aktivität von  $100 \text{ MBq}$ .

Der radioaktive Zerfall ist ein reiner Zufallsprozess. Die Zahl der in einem bestimmten Zeitraum gemessenen Zerfälle ist deshalb durch die Poisson-Verteilung gegeben. Bei  $N$  Zerfällen beträgt die Unsicherheit  $\sqrt{N}$ . Da man einzelne Zerfälle zählt ist die minimal notwendige Aktivität dadurch bestimmt, dass auf dem Detektor genügend Photonen

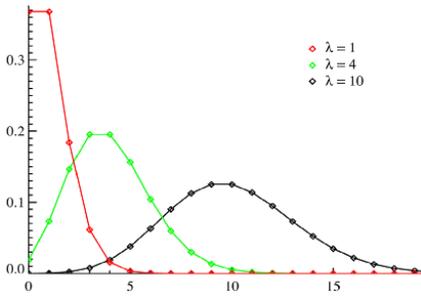


Abbildung 7.1: Poisson Statistik

eintreffen und die relative Unsicherheit,  $\sqrt{N}/N = 1/\sqrt{N}$  genügend klein wird. Um die Strahlenbelastung des Patienten nicht unnötig erhöhen zu müssen versucht man deshalb, aus einem möglichst großen Anteil der Zerfälle ein Signal zu gewinnen.

Es gibt verschiedene Arten von radioaktivem Zerfall. Beim  $\alpha$ -Zerfall wird ein Helium-Kern emittiert, bei der  $\beta^\pm$ -Strahlung Positronen beziehungsweise Elektronen. Der K-Einfang ist ein besonderer Fall des  $\beta$ -Zerfalls, bei dem ein Hüllenelektron der inneren Schalen durch den Kern "eingefangen" wird und eine charakteristische Strahlung ausgesendet wird. Als drittes kann  $\gamma$ -Strahlung auftreten, dabei wird die überschüssige Energie angeregter Kerne durch Abstrahlung hochenergetischer Photonen abgegeben.

In der nuklearmedizinischen Diagnostik werden vor allem  $\gamma$ -Strahlung, Vernichtungsstrahlung und K-Strahlung verwendet; bei  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung ist die Reichweite zu gering, so dass die Strahlung vor allem innerhalb des Körpers absorbiert würde.

Vernichtungsstrahlung entsteht, wenn sich ein Elektron und sein Antiteilchen, das Positron, gegenseitig vernichten. Die Ruhemasse der beiden Teilchen wird in elektromagnetische Strahlung umgewandelt. Energieerhaltung bedingt eine gesamte Strahlungsenergie von  $2 \cdot 511 \text{ keV}$ . Impulserhaltung bedingt einen Gesamtimpuls von (fast) 0. Deshalb wird die Energie auf zwei Photonen verteilt, welche jeweils eine Energie von  $511 \text{ keV}$  und entgegengesetzten Impuls besitzen.

### 7.1.3 Eigenschaften von Radionukliden

Eine entscheidende Rolle spielen die isomeren Kerne in der Anwendung, die sich nach einem erfolgten  $\beta$ -Zerfall in einem angeregten, metastabilen Zustand befinden. Diese metastabilen Zustände können Halbwertszeiten von bis zu einigen Tagen besitzen. Während des angeregten Energiezustandes isomerer Kerne werden entweder Gammastrahlung oder Konversionselektronen ausgesendet. Der Buchstabe m am Elementsymbol kennzeichnet metastabile Kerne. Eine herausragende Stellung in der Nuklearmedizin besitzt  $^{99m}\text{Tc}$ , da es ein reiner Gammastrahler ist und daher wenig Strahlenexposition für den Patienten bedeutet.

In der Nuklearmedizin werden keine in der Natur vorkommenden Elemente benutzt wegen ihrer negativen Eigenschaften:

- Radiotoxizität;
- es tritt nicht nur die gewünschte Strahlenart auf, sondern auch andere, die nur zur erhöhten Strahlenbelastung des Patienten führt;
- viel zu lange Halbwertszeit (sonst wären diese Elemente nicht mehr in der Natur vorhanden);
- zu schlechte radiochemische Reinheit.

### 7.1.4 Herstellung von Radionukliden

Für die Herstellung von Radionukliden sind entweder Kernreaktoren oder ein Zyklotron notwendig (Abbildung 7.2).

Kernspaltung	$^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U} \rightarrow ^{99}_{42}\text{Mo} + ^{133}_{50}\text{Sn} + 4\frac{1}{0}\text{n}$
Neutronenbeschuß	$^{98}_{42}\text{Mo} + \text{n} \rightarrow ^{99}_{42}\text{Mo} + \gamma$ $^{98}_{42}\text{Mo}(\text{n}, \gamma)^{99}_{42}\text{Mo}$
Beschuß mit geladenen Teilchen z.B. am Zyklotron	$^{18}_8\text{O} + \text{p} \rightarrow ^{18}_9\text{F} + \text{n}$ $^{18}_8\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}_9\text{F}$

Abbildung 7.2: Herstellung von Radionukliden. [10]

Bei dem Beschuß mit geladenen Teilchen in einem Zyklotron sind wegen der Coulomb-Barriere recht

hohe Energien nötig von etwa 10 MeV. Es gibt heutzutage aber "Baby-Zyklotrons", die diese Energien erreichen und in einem  $30\text{m}^2$ -Raum der Klinik installiert werden können.

Mit einem Radionuklidgenerator kann ein radioaktives Isotop in einer Klinik gewonnen werden.

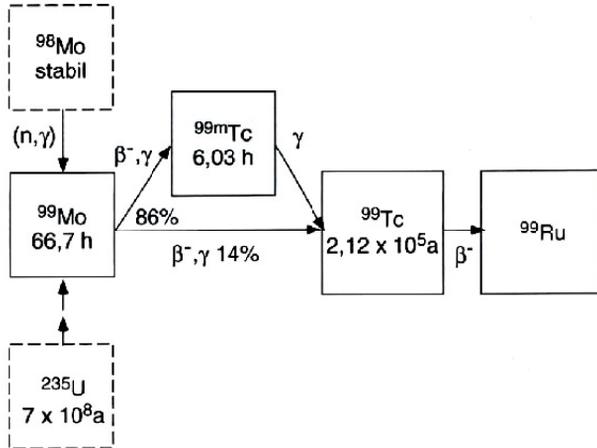


Abbildung 7.3: Radionuklidgenerator-Prinzip. [10]

Das wichtigste Beispiel ist die Gewinnung von  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  aus  $^{99}\text{Mo}$ , das in einem Kernreaktor durch Neutroneneinfang oder Kernspaltung gewonnen wird. Es wird in Bleibehältern in die Klinik gebracht, Transportzeiten von 1 Tag sind bei einer Halbwertszeit von 66,7 Stunden zu vertreten. In der Klinik wandelt sich das  $^{99}\text{Mo}$  in das metastabile  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  um, das eine Halbwertszeit von 6 Stunden besitzt.

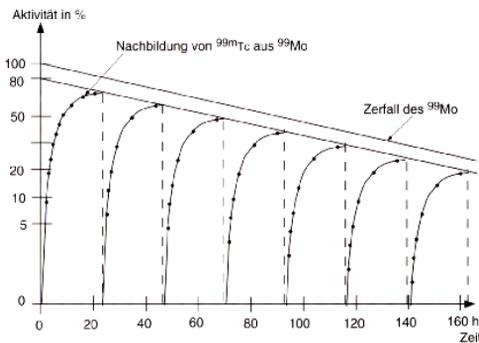


Abbildung 7.4: Herstellung von Technetium. [10]

Das hierbei entstehende Per technetat ist im Gegensatz zu der Molybdän-Verbindung wasserlöslich,

kann also herausgewaschen werden und in eine Spritze gezogen und injiziert werden. Nach einem Tag hat sich wieder genug Per technetat gebildet, daß der Vorgang wiederholt werden kann, man spricht vom täglichen "melken" des Generators. Nach 1 Woche ist der Generator verbraucht und muss ausgetauscht werden.

## 7.2 Messtechnik

Die wichtigsten Anforderungen an die Messgeräte umfassen

- Hohe Empfindlichkeit; dadurch kann die Menge an benötigter Aktivität und damit die Strahlenbelastung des Patienten gering gehalten werden.
- Gute Energieauflösung zur Unterdrückung von gestreuten Photonen.
- Kurze Abklingzeit; damit werden hohe Zählraten möglich.

### 7.2.1 Scintillationsdetektoren

Wie schon erwähnt besitzen reine Gammastrahler wie  $^{81\text{m}}\text{Kr}$  und  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  die günstigsten Eigenschaften für die konventionelle nuklearmedizinische Diagnostik. Für die Registrierung von Gammastrahlung im Bereich von 50 bis 511 keV haben sich Szintillationsdetektoren durchgesetzt.

Dabei werden in einem geeigneten Material (meistens  $\text{NaI}$ ) durch die  $\gamma$  Strahlung mehrere optische Photonen erzeugt. Wird das  $\gamma$ -Photon vollständig absorbiert, so ist die Zahl der optischen Photonen proportional zur Energie des  $\gamma$ -Photons. Diese Photonen werden zur Photokathode eines "Photomultipliers" gebracht. Dort werden dadurch Photoelektronen erzeugt, welche in den nachfolgenden Verstärkerstufen des Sekundärelektronenvervielfachers vervielfacht werden.

Die Forderungen an den Szintillatorkristall sind:

- Größe angepasst an das Messproblem;

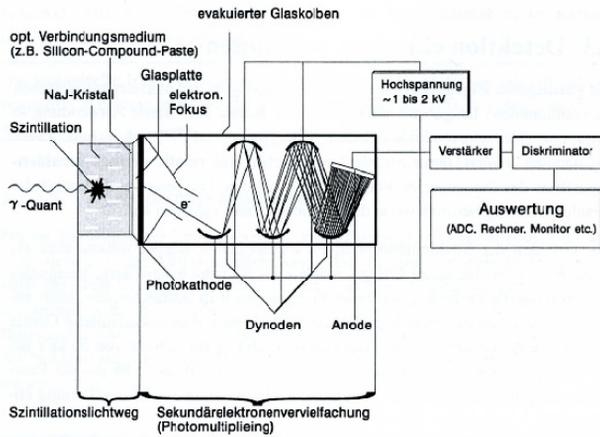


Abbildung 7.5: Szintillationsdetektor und Sekundärelektronenvervielfacher.

- Ausreichende Dicke, hohe effektive Ordnungszahl;
- Hohe Homogenität und optische Durchlässigkeit.

Die Größe variiert von 1 Quadratcentimeter bis zu  $40 \times 60 \text{ cm}^2$  für Ganzkörperszintigramme. Als Materialien werden  $\text{NaI} : \text{Tl}$  und  $\text{BGO} (\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12})$  verwendet. Die  $\text{Tl}$ -Dotierung des  $\text{NaI}$  Kristalls reduziert die Eigenabsorption und ergibt damit eine bessere Lichtausbeute.

	NaI(Tl)	BGO
Dichte ( $\text{gcm}^{-3}$ )	3,67	7,13
Ordnungszahl	11,53	82, 32, 8
Relative Lichtausbeute (normiert auf NaI)	1,0	0,08
Szintillations-Linie bei Wellenlänge (nm)	410	480
Brechungsindex	1,78	2,15
Szintillations-Abklingdauer (ns)	230	300
Nachweis-Effektivität %	(100 keV)	(400 keV)
Kristalldicke:		
20 mm	61	90
8 mm	52	84
4 mm	46	78

Abbildung 7.6: Eigenschaften von Scintillatormaterialien. [10]

Wie die Tabelle zeigt ist die Lichtausbeute bei  $\text{NaI}$  am höchsten. Allerdings ist hier die Absorptionswahrscheinlichkeit etwas geringer als beim  $\text{BGO}$ , welches eine höhere effektive Ordnungszahl besitzt. Die Abklingzeit sollte möglichst kurz sein, damit hohe Zählraten möglich sind.

### 7.2.2 Kollimatoren

Um die Verteilung der Aktivität im Körper messen zu können, muss nicht nur die Zahl der Photonen, sondern auch ihr Ursprung bestimmt werden können. Man benötigt somit die Information aus welcher Richtung ein Photon kommt. Da für  $\gamma$ -Strahlung keine Linsen zur Verfügung stehen, ist es nicht möglich, sie direkt abzubilden. Eine einfache (wenn auch ineffiziente) Möglichkeit liegt darin, nur Photonen aus einer bestimmten Richtung auf den Detektor zu lassen. Dafür verwendet man Kollimatoren.

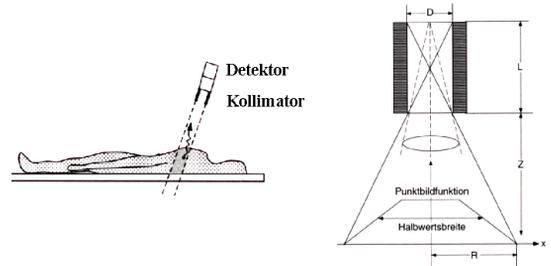


Abbildung 7.7: Kollimatoren: Prinzip und Abbildungsfunktion. [10]

Ein Kollimator lässt nur Strahlung aus einer bestimmten Raumrichtung durch. In der Figur ist die Punktbildfunktion gezeigt, welche man misst, wenn eine ideale punktförmige Quelle im Abstand  $Z$  vor dem Detektor hindurch bewegt wird. Der Radius  $R$  dieses Bildes ist

$$R = \frac{D}{L} \left( Z + \frac{L}{2} \right)$$

Je kleiner  $D$  wird, desto höher die Auflösung, aber desto geringer ist auch die Empfindlichkeit.

Mit einer Kombination von Blenden ist es auch möglich, die Ortsauflösung zu verbessern und sogar eine gewisse Lokalisierung der Empfindlichkeit auf der Achse zu erreichen. Man bezeichnet dies als fokussierende Kollimatoren.

### 7.2.3 Diskrimination

Bei der Wechselwirkung von  $\gamma$  Strahlung mit Gewebe dominiert der Compton Effekt. Dabei wer-

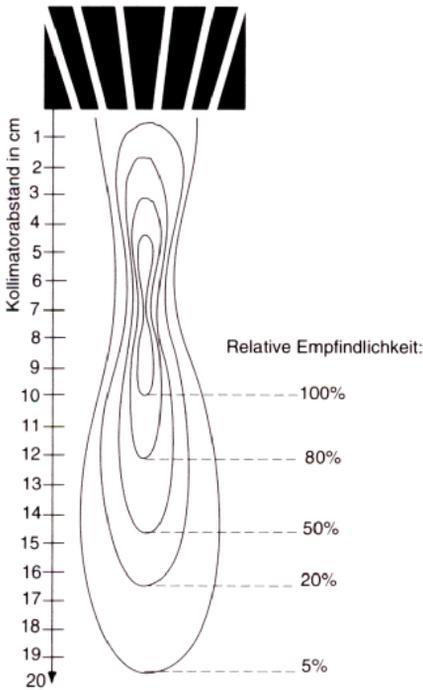


Abbildung 7.8: Fokussierender Kollimator. [10]

den die  $\gamma$ -Quanten nicht absorbiert, sondern nur gestreut. Nach der Streuung können sie immer noch auf dem Detektor eintreffen. Allerdings hat ihre Ausbreitungsrichtung dann keine Information mehr über den Entstehungsort, sie tragen deshalb nicht mehr zum Signal bei, sondern nur zum Rauschen.

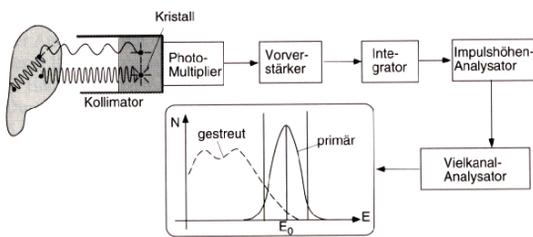


Abbildung 7.9: Unterscheidung zwischen direkt detektierter  $\gamma$  Strahlung und gestreuter Strahlung durch Messung der Energie. [10]

Es ist deshalb nützlich, zwischen solchen  $\gamma$ -Quanten, die direkt auf den Detektor gelangen und damit nützliche Information enthalten und solchen, welche auf dem Weg gestreut wurden zu unterscheiden.

den. Dies kann über eine Energiemessung erreicht werden: bei jedem Streuvorgang verlieren die  $\gamma$ -Quanten einen Teil ihrer Energie. Da die Anzahl der optischen Photonen, welche im Szintillationsdetektor erzeugt werden, von der Energie des auftreffenden  $\gamma$ -Quants abhängt, kann man die Energie aus dem elektronischen Signal messen. Man verwendet dafür einen Integrator und einen Impulshöhen-Analysator. Setzt man eine genügend hohe Schranke, so misst man nur noch nicht oder nur wenig gestreute  $\gamma$  Strahlung.

Wie stark der Effekt der Streuung ist hängt u.a. vom Untersuchungsgebiet ab. Bei Untersuchungen am Herzen wird mehr Streustrahlung registriert als bei Schädeluntersuchungen.

### 7.2.4 Gamma-Kamera

Die Gamma-Kamera ist das wichtigste nuklearmedizinische Messinstrument. Der Messkopf besteht aus Kollimator, Szintillationskristall und der Ortungselektronik. Ziel ist es, die Aktivitätsverteilung in einem großen Bereich des Körpers simultan zu erfassen. Anger entwickelte eine Kamera, bei der mit relativ wenigen Photomultipliern eine relativ hohe Ortsauflösung möglich ist. Benutzt wird dabei ein Widerstandsnetzwerk zur Messung.

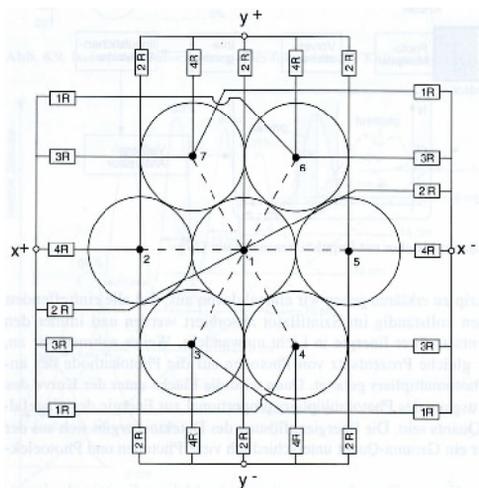


Abbildung 7.10: Ortsbestimmung mit der Gamma-kamera. [10]

Das Widerstandsnetzwerk ist so ausgelegt, dass die Verteilung der Lichtintensität in den PMTs, welche durch einen gegebenen Lichtpuls erzeugt wird, die Quelle des Blitzes lokalisiert.

Die Qualität der Gamma-Kamera hängt entscheidend von der gleichmäßigen und stabilen Empfindlichkeit der Photomultiplier ab. Daher wird eine regelmäßige Kalibration durchgeführt und Korrekturverfahren benutzt.

Bei der Gamma-Kamera (Anger-Kamera) werden heute 37 bis 100 Photomultiplier benutzt. Der Durchmesser beträgt 20 bis 50 cm, die Dicke des Szintillatorkristalls ist 6 mm für 200 keV bis zu 12 mm für Vernichtungsstrahlung (511 keV). Die Ortsauflösung beträgt 3 bis 5 mm.

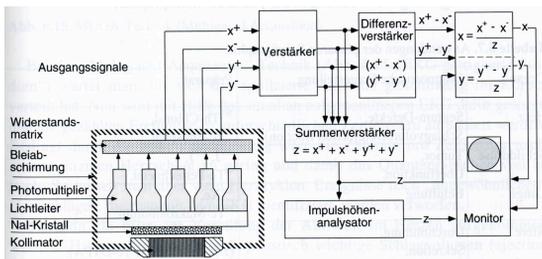


Abbildung 7.11: Schema einer Gamma-Kamera. [10]

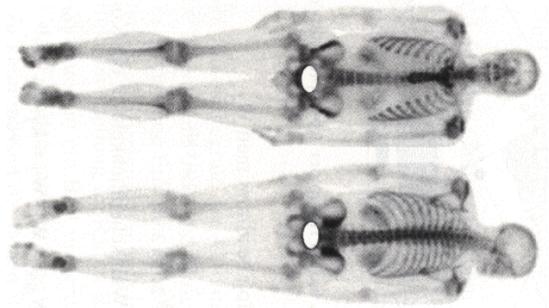


Abbildung 7.12: Kankörper Scintigramme; oben: ventral; unten: dorsal. [10]

da es ein reiner Gammastrahler ist mit einer kurzen Abklingdauer.

untersuchtes Organ	Radiopharmakon	applizierte Aktivität MBq	Energiedosis/Untersuchung kritisches Organ mGy	Gonaden mGy
Schilddrüse	<sup>99m</sup> Tc-Perthchnetat	37	6	0,2
	<sup>131</sup> Jodid	1,85	500	0,3
Hirn	<sup>99m</sup> Tc-Perthchnetat (TcO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	370	60	2
Lungen	<sup>99m</sup> Tc-MAA	74	5	0,05
Leber/Milz	<sup>99m</sup> Tc-S-Kolloid	111	12	0,15
	<sup>99m</sup> Tc-S-Kolloid	111	3	0,15
Nieren	<sup>99m</sup> Tc-DMSA	74	1	0,4
Knochen	<sup>99m</sup> Tc-DPD	444	5	3

Abbildung 7.13: Anwendungen der Szintigraphie und resultierende Strahlenbelastung. [10]

## 7.3 Nuklearmedizinische Verfahren

### 7.3.1 Planare Szintigraphie

Bei der planaren Szintigraphie wird die Gamma-Kamera über dem zu untersuchenden Organ gehalten und die **Aktivitätsverteilung** aufgenommen. Fokussierende Kollimatoren können benutzt werden um die Empfindlichkeit in einer vorgegebenen Tiefe zu erhöhen. Die planare Szintigraphie entspricht dem Projektionsröntgen: man misst Linienintegrale der Aktivität, anstelle der Linienintegrale der Abschwächungskoeffizienten.

Am häufigsten wird <sup>99m</sup>Tc eingesetzt, welches mit dem Blut mitgespült wird und nicht am Stoffwechsel teilnimmt. Die Strahlenbelastung ist akzeptabel,

Mit typischen Dosen von einigen mGy (je nach Anwendung) ist die Strahlenbelastung vergleichbar oder geringer als bei Röntgenaufnahmen.

Angewendet wird die planare Szintigraphie zur Organ-Diagnostik, der Entdeckung von Tumoren in Knochen und Schilddrüse, sowie bei Herz-, Lungen- und Nierenuntersuchungen (Schlagvolumen Herz, Belüftung Lunge, Durchblutung, etc. Niere).

Eine mögliche Anwendung sind Herzuntersuchungen: man bringt ein Tc Präparat in die Vene ein und misst die Zeit, welche die Aktivität benötigt, um von der rechten (via die Lunge) in die linke Herzkammer zu gelangen. Trifft die Aktivität zu früh ein deutet das auf einen Septumdefekt hin.

Eine weitere mögliche Anwendung ist die Messung des Herzvolumens: Dazu triggert man die Scintillationsmessung mit Hilfe des EKGs und misst die Aktivität im Herzen für unterschiedliche Zeiten während des Herzzyklus. Um genügend Signal zu erhalten muss über eine große Zahl von Herzschlägen gemittelt werden.

Beobachtet man Anreicherung von Aktivität in Knochen, so deutet dies auf möglichen Krebs hin.

### 7.3.2 Single Photon Emission Computer Tomography (SPECT)

SPECT ist ein **Schnittbildverfahren**, ähnlich der Röntgen-CT. Bei der SPECT wird das Linienintegral über die Aktivitätsdichte gemessen, anstelle von Schwächungskoeffizienten:

$$\text{Signal} \propto \int dl A(x, y, z).$$

Die einzelnen Messungen sind identisch mit denjenigen der planaren Szintigraphie; typischerweise verwendet man eine Gamma-Kamera. Es können die gleichen Rekonstruktionsverfahren benutzt werden wie bei der Röntgen-CT. Wegen der relativ schlechten Ortsauflösung der Gamma-Kamera werden weniger Messpunkte pro Projektion aufgenommen. Üblich sind 100 bis 200 Projektionen mit 128\*128 Pixel.

Es gibt mehrere Bauformen eines SPECT-Gerätes: mit 1, 2, oder 3 Messköpfen, die kreisförmig oder elliptisch um den Patienten rotieren.

### 7.3.3 Bildrekonstruktion

Das am häufigsten eingesetzte Rekonstruktionsverfahren ist die gefilterte Rückprojektion. Dabei wird eine Abschneidung bei relativ niedrigen Ortsfrequenzen durchgeführt wegen dem hohen Quantenrauschen der Messwerte. Man erzielt so 10 bis 15 mm Bildauflösung. Bessere Bilder erhält man durch das iterative Rekonstruktionsverfahren, wenn die Absorptionsprozesse im Körper mit berücksichtigt werden.

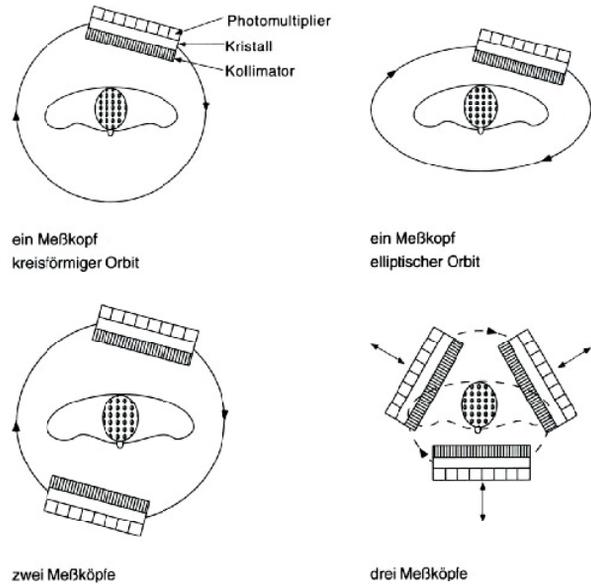


Abbildung 7.14: SPECT. [10]

Eine direkte Rekonstruktion des Bildes erzeugt eine Reihe von Artefakten. Die wichtigsten Ursachen sind

- Die Kollimatoren messen nicht echte Linienintegrale der Aktivität
- Die  $\gamma$ -Strahlung wird auf dem Weg zum Detektor teilweise absorbiert
- Gestreute Strahlung wird nicht vollständig unterdrückt.

Als Beispiel für den Effekt der Absorption betrachten wir die 140 keV Strahlung von  $^{99}\text{Tc}$ . Liegt die Quelle der Aktivität 5 cm unter der Körperoberfläche, so werden ca. 50% der Strahlung im Körper absorbiert. In einer anderen Blickrichtung liegen z.B. 15 cm Gewebe über der Quelle, so dass in dieser Richtung nur noch 10% der Strahlung den Detektor erreicht. Wird dies bei der Rekonstruktion nicht berücksichtigt, so erhält man Artefakte.

Eine Möglichkeit, dieses Problem zu korrigieren besteht darin, zwei Messungen in entgegengesetzter Richtung zu vergleichen. Ohne Absorptionsdifferenzen sollten die beiden identische Linienintegrale ergeben. Berücksichtigt man die Absorption im Gewebe und nimmt zunächst einmal an, dass das Gewebe

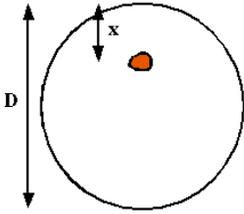


Abbildung 7.15: Prinzip der Absorptionskorrektur.

(bezüglich Absorption) homogen sei, so erhält man im gezeigten System für die Strahlung, welche einen Detektor vorn (oben) erreicht, den Wert

$$S_A = k \cdot A \cdot e^{-\mu x},$$

wobei  $k$  einen Kalibrierungsfaktor,  $A$  die Aktivität am Ort  $x$ , und  $\mu$  den mittleren Schwächungskoeffizienten des Gewebes darstellt.

Eine entsprechende Messung in der entgegengesetzten Richtung ergibt

$$S_P = k \cdot A \cdot e^{-\mu(D-x)}.$$

Die unerwünschte Abhängigkeit von der Position  $x$  kann somit eliminiert werden indem man das geometrische Mittel bildet:

$$S_{GM} = \sqrt{S_A \cdot S_P} = k \cdot A \cdot e^{-\mu D/2}.$$

Eine genaue Korrektur setzt voraus, dass man den Abschwächungskoeffizienten kennt. Dieser kann z.B. durch eine entsprechende Transmissionsmessung bestimmt werden.

Im Rahmen des iterativen Rekonstruktionsverfahrens kann man die Abschwächungskoeffizienten so anpassen, dass man ein optimales Bild erhält.

Eine mögliche Anwendung ist die Validierung von Herzmuskulatur, z.B. nach einem Herzinfarkt: wenn ein Gewebe noch durchblutet ist und damit Aktivität zeigt, so ist es noch vital.

### 7.3.4 Positron-Emissions-Tomographie (PET)

In der PET wird die Molekülmarkierung mit einem Positronenstrahler vorgenommen. Man erhält bei der

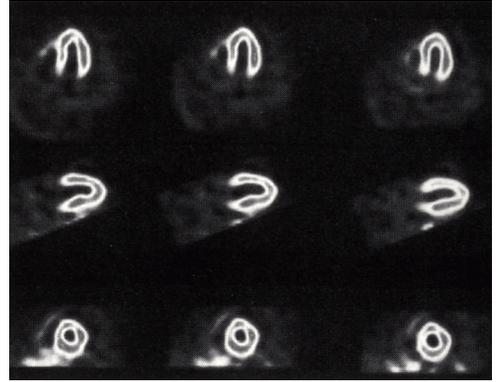


Abbildung 7.16: SPECT Schnittbild des Herzes. [10]

Annihilation von Positronen mit Elektronen zwei 511 keV Gamma-Quanten. Denn wenn ein langsames Positron auf ein Elektron trifft, dann erhält man einen Winkel von etwa 180 Grad zwischen den beiden Gamma-Quanten mit einer Gaußförmigen Winkelverteilung mit einer Halbwertsbreite von etwa 0,3 Grad. Die mittlere freie Weglänge der Positronen beträgt einige Millimeter.

Isotope	half-life (min)	Maximum positron energy (MeV)	Positron range in water (FWHM in mm)	Production method
$^{11}\text{C}$	20.3	0.96	1.1	cyclotron
$^{13}\text{N}$	9.97	1.19	1.4	cyclotron
$^{15}\text{O}$	2.03	1.70	1.5	cyclotron
$^{18}\text{F}$	109.8	0.64	1.0	cyclotron
$^{68}\text{Ga}$	67.8	1.89	1.7	generator
$^{82}\text{Rb}$	1.26	3.15	1.7	generator

Abbildung 7.17: Die wichtigsten PET Kerne.

Die wichtigsten Strahler sind kurzlebig mit einer Halbwertszeit von 10 bis 100 Minuten:  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{30}\text{P}$  und vor allem  $^{18}\text{F}$ . Der Vorteil von kurzlebigen Strahlern sind eine geringe Strahlenbelastung des Patienten, der Nachteil die häufigere Nachlieferung des Präparats.

Der Zerfall wird nachgewiesen indem man  $\gamma$ -Detektoren rund um den Patienten anbringt und nach Koinzidenzen sucht. Mit einem typischen Zeitfenster von 10-20 ns werden nur Ereignisse berücksichtigt, welche von Annihilationsprozessen stammen. Der

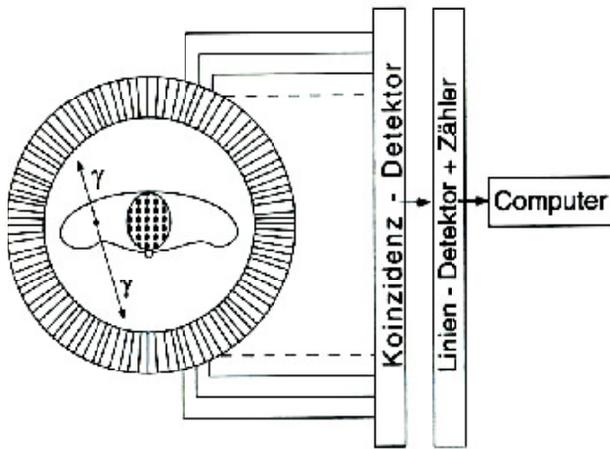


Abbildung 7.18: PET.

Ort muss dann auf der Verbindungsgeraden zwischen den beiden Detektoren liegen.

Die Detektoren müssen an die relativ hohe Energie von 511 keV angepasst sein, um eine hohe Nachweiswahrscheinlichkeit zu erreichen. Das Standardmaterial ist  $Bi_4Ge_3O_{12}$  (BGO), welches eine relativ gute Lichtausbeute und eine kurze Abklingdauer aufweist. Meist werden mehrere Szintillatorkristalle mit einer Gamma-Kamera verbunden, um den Ort zu bestimmen, an dem das  $\gamma$ -Quant eintrifft. Die Messgenauigkeit für den Auftreffpunkt beträgt etwa 2 mm.

Ein Detektorring umfasst heute bei einem Durchmesser von 1 m rund 600 Detektoren. Meist werden mehrere Ringe verwendet, um mehr als eine Schicht gleichzeitig messen zu können.

Im Gegensatz zu SPECT benötigt man bei PET keine Kollimatoren. Deshalb ist die Ausbeute wesentlich höher und damit die notwendige Aktivität deutlich kleiner.

### 7.3.5 Auflösung

Die räumliche Auflösung wird bei einer PET Messung durch mehrere Faktoren bestimmt:

- Die freie Weglänge der Positronen (einige mm.)

- Der endliche Impuls von Elektron / Positron, welcher zu einer Winkelverteilung um  $180^\circ$  führt; die Halbwertsbreite beträgt ca.  $0.3^\circ$ .
- Endliche Auflösung bei der Positionsbestimmung der  $\gamma$ -Quanten in den Detektoren. Hier trägt z.B. auch bei, dass die Strahlung nicht senkrecht auf die Detektoren einfällt, sondern schräg durch diese durchläuft. Dies führt z.B. dazu, dass die Lokalisierung von Quellpunkten außerhalb des Zentrums schlechter ist als im Zentrum.

Physikalisch möglich ist eine Auflösung von 2 bis 3 mm, technisch wird eine Ortsauflösung von 5 mm erreicht.

### 7.3.6 Bildrekonstruktion

Die Rekonstruktion des Bildes erfolgt ähnlich wie bei SPECT und CT: man kann sowohl Rückprojektion wie auch iterative Verfahren verwenden.

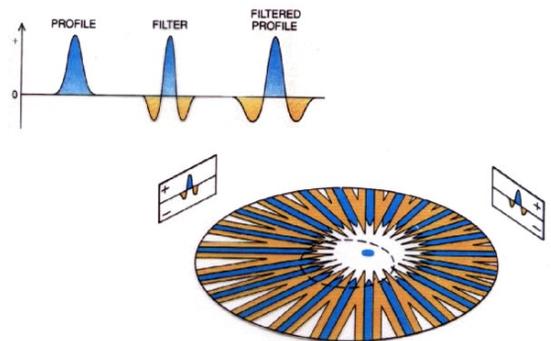


Abbildung 7.19: Gefilterte Rückprojektion

Bei der Rückprojektion verwendet man Filter um die Auflösung zu verbessern.

Iterative Verfahren berechnen jeweils anhand eines Modells für das Objekt die beobachteten Signale. Dabei kann z.B. die Absorption im Gewebe mit berücksichtigt werden. Man optimiert die Parameter, welche das Objekt beschreiben, bis eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen gerechnetem und gemessenem Signal erreicht wird. Dieses Verfahren ist wesentlich aufwändiger als die Rückprojektion, liefert aber schärfere Bilder.

$^{18}\text{F}$  fluorodeoxyglucose PET an Alzheimer Patient

Rückprojektion

Maximum Likelihood

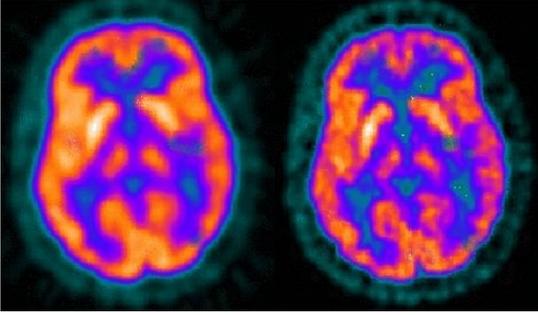


Abbildung 7.20: Vergleich unterschiedlicher Bildrekonstruktionsverfahren.

Abbildungsfehler entstehen auf ähnliche Weise wie bei SPECT:

- Absorption im Gewebe
- Zufällige Koinzidenzen bei hohen Zählraten
- Nachweis von gestreuten Quanten

Da bei PET immer in 2 Richtungen auf der gleichen Linie detektiert wird ist hier die Absorptionskorrektur wesentlich einfacher und präziser. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon, welches an der Position  $x$  erzeugt wurde, den Detektor 1 erreicht, ist

$$w_1 \propto \exp\left(-\int_x^{x_1} \mu(l) dl\right).$$

Die entsprechende Wahrscheinlichkeit dass das zweite Photon den zweiten Detektor erreicht ist

$$w_2 \propto \exp\left(-\int_{x_2}^x \mu(l) dl\right).$$

Damit wird die Wahrscheinlichkeit für den Koinzidenzfall

$$w = w_1 w_2 \propto \exp\left(-\int_{x_1}^{x_2} \mu(l) dl\right).$$

Es tritt somit nur noch das Linienintegral  $\int_{x_1}^{x_2} \mu(l) dl$  auf und die Abhängigkeit von der Position auf dieser Linie verschwindet.

Sie ist exakt wenn man mit einer Transmissionsmessung die Integrale  $\int \mu(x) dx$  entlang dem Messpfad bestimmt.

## 7.3.7 Anwendungen

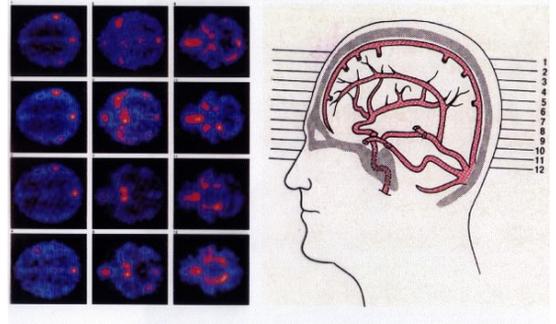


Abbildung 7.21: Durchblutungsmessung im Gehirn

PET wird verwendet für

- Onkologie: Tumor Erkennung und Lokalisierung
- Neurologie: Gehirnfunktion, Epilepsie, Alzheimer
- Kardiologie: Durchblutung und Stoffwechsel des Herzes
- Pharmaforschung: Aufklärung der Wirkungsweise von Medikamenten