

1. Einführung

Die Nuklearmedizin umfaßt die Bereiche

- bildgebende und Funktionsdiagnostik
- Therapie
- klinische Chemie

mit Hilfe radioaktiver Substanzen. Es kommen sowohl INVIVO- als auch INVITRO-Methoden zur Anwendung.

1.1. INVIVO-Methoden

Geeignete radioaktive Stoffe reichern sich nach Inkorporation im menschlichen Organismus organspezifisch an. Gemessen wird

- der zeitliche Verlauf der Aktivitätsanreicherung zur Beurteilung der Organfunktion oder
- die räumliche Verteilung der Aktivität zur Beurteilung von Lage und Ausdehnung von Organen oder krankhaften Prozessen.

1.2. INVITRO-Methoden

Reagenzglasmethoden mit radioaktiven Substanzen

1.3. Strahlenschutz in der Nuklearmedizin

Die Anwendung radioaktiver Substanzen in der Medizin macht umfangreiche Schutzmaßnahmen für Patienten und das anwendende Personal erforderlich.

Das Ziel ist jede unbeabsichtigte

- Kontamination von Menschen und Gegenständen durch radioaktive Stoffe und
- Inkorporation radioaktiver Stoffe

zu vermeiden. Die Aufnahme radioaktiver Stoffe kann über den Magen und Darm-Trakt, die Atemwege oder den Blutkreislauf (Hautverletzungen, insbesondere an den Händen!) erfolgen.

Deshalb ist während des praktischen Unterrichtes in Nuklearmedizin

- *Essen (auch Kaugummi)*
- *Rauchen*
- *Schminken verboten!*
- *ein geschlossener, langärmliger Kittel zu tragen.*
- *nach Abschluss der Messungen eine Kontaminationskontrolle von Händen und Kleidung durchzuführen.*

2. Wichtige Begriffe in der Nuklearmedizin

Atom

Atome bestehen aus einem positiv geladenen Atomkern und einer negativ geladenen Elektronenhülle, durch die die chemischen Eigenschaften des Atoms festgelegt sind. Atome sind elektrisch neutral.

Atomkern (Nukleus)

Die für nuklearmedizinische Methoden wichtigen Vorgänge spielen sich im Atomkern ab. Der Atomkern setzt sich aus Protonen und Neutronen, den Kernbausteinen oder Nukleonen, zusammen.

Proton

Nukleon mit einer positiven elektrischen Elementarladung

Die Zahl der Protonen in einem Kern wird auch als Kernladungszahl oder Ordnungszahl Z eines Elementes bezeichnet; sie ist gleich der Zahl der Elektronen in der Atomhülle.

Beispiel: ${}_Z X$ X: Symbol des Elements

Neutron

elektrisch neutrales Nukleon

Zusammen mit der Protonenzahl Z ergibt die Neutronenzahl N die Massenzahl A des Atoms.

Beispiel: ${}_{Z}^{P+N} X = {}_{Z}^A X$

Die Ordnungszahl ist durch das Symbol des Elementes bereits festgelegt und wird meistens weggelassen.

Beispiel: ${}_{6}^{12} C \rightarrow {}^{12}C$ oder C-12

Nuklid

Atomart, deren Kern durch eine bestimmte Protonen- und Neutronenzahl gekennzeichnet ist.

Ein Nuklid wird eindeutig durch die Angabe der Ordnungszahl Z und der Massenzahl A festgelegt.

Alle zur Zeit bekannten Nuklide sind in der Karlsruher Nuklidkarte verzeichnet.

Isotope

Nuklide mit gleicher Ordnungszahl Z aber unterschiedlicher Massenzahl A .

Beispiel: ${}_{6}^{12} C$ und ${}_{6}^{14} C$

${}^{12}C$ und ${}^{14}C$ sind also Isotope. Die meisten Elemente sind Gemische aus verschiedenen Isotopen des Atoms. Da ihre Atomhülle identisch ist, haben Isotope gleiche chemische Eigenschaften. Sie unterscheiden sich jedoch in ihren physikalischen Eigenschaften.

Radionuklide

Nuklide sind nur bei einer bestimmten Kombination von Protonen und Neutronen stabil. Bei Abweichungen von diesem Verhältnis wandeln sich die Atomkerne spontan, unter Emission von Strahlung um. Diese instabilen Nuklide werden als Radionuklide bezeichnet.

radioaktive Strahlung

bei spontanen Kernumwandlungen freiwerdende Strahlung

Man unterscheidet i.a.

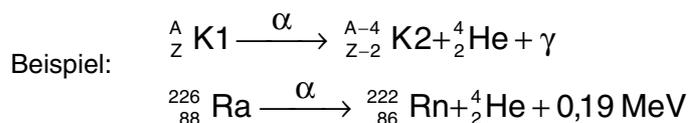
- Korpuskular- oder Teilchenstrahlung (α -, β^- -, β^+ -Strahlung)

- elektromagnetische Wellenstrahlung (γ -Strahlung).

α -Zerfall

Bei Radionukliden mit hoher Massenzahl und relativem Protonenüberschuß (gegenüber einem stabilen Nuklid) können spontan He-4-Kerne, sog. α -Teilchen, emittieren. Das dadurch entstehende Tochternuklid hat eine um 2 verringerte Ordnungszahl und eine um 4 verringerte Massenzahl.

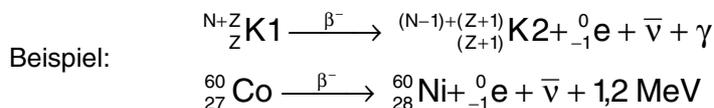
Der Kern des Tochternuklids befindet sich i.d.R. in einem angeregten Zustand. Die Anregungsenergie wird als γ -Strahlung abgegeben.



β^- -Zerfall:

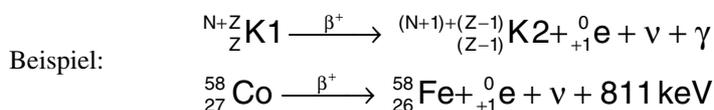
Radionuklide mit relativem Neutronenüberschuß (gegenüber stabilen Nukliden) können durch Umwandlung eines Neutrons in ein Proton in ein Tochternuklid mit gleicher Massenzahl und einer um 1 größeren Ordnungszahl übergehen. Dabei werden ein Elektron, das β^- -Teilchen, und ein Antineutrino emittiert.

Auch bei diesem Zerfall befindet sich der Tochterkern i.d.R. in einem angeregten Zustand. Die Anregungsenergie wird in Form von γ -Strahlung frei.

 **β^+ -Zerfall**

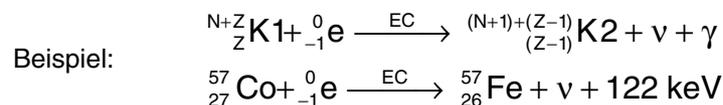
Radionuklide mit relativem Protonenüberschuß können durch Umwandlung eines Protons in ein Neutron in ein Tochternuklid mit gleicher Massenzahl und einer um 1 niedrigeren Ordnungszahl übergehen. Dabei werden ein Positron, das β^+ -Teilchen, und ein Neutrino emittiert. β^+ -Zerfall ist nur möglich, wenn die Bindungsenergie-differenz zwischen Mutter- und Tochternuklid mindestens 1,022 MeV beträgt. Diese Energie ist den Ruhmassen des frei werdenden Positrons und Hüllenelektrons äquivalent.

Falls sich der Tochterkern in einem angeregten Zustand befindet, wird die Anregungsenergie in Form von γ -Strahlung frei.

**Electroncapture (EC)**

Electroncapture (Elektroneneinfang, K-Einfang) führt zum gleichen Ergebnis wie β^+ -Zerfall und findet auch bei Kernen mit Protonenüberschuß statt. Dabei wird ein Elektron aus der Atomhülle, i.d.R. aus der K-Schale, vom Atomkern eingefangen und bildet dort mit einem Proton ein Neutron. Dabei wird ein Neutrino emittiert. EC tritt neben β^+ -Zerfall auf. Wenn die Bindungsenergie-differenz zwischen Mutter- und Tochterkern kleiner als 1,022 MeV ist, kann ausschließlich EC auftreten.

Falls sich der Tochterkern in einem angeregten Zustand befindet, wird die Anregungsenergie in Form von γ -Strahlung frei.

 **γ -Strahlung**

Die γ -Strahlung tritt als Folge der oben beschriebenen Kernzerfälle auf, sie stammt also aus dem Atomkern (im Gegensatz zu Röntgenstrahlung). Die γ -Strahlung ist energiereiche elektromagnetische Wellenstrahlung (ca. 50keV - 3 MeV). Die bei einem radioaktiven Zerfall emittierte γ -Strahlung besitzt entweder nur eine Energie (monoenergetisch) oder wenige diskrete Energien (Linienspektrum).

In der nuklearmedizinischen Meßtechnik wird nahezu ausschließlich die γ -Strahlung der Radionuklide ausgenutzt. Elektromagnetische Wellenstrahlung zeigt in vielen Fällen Teilchencharakter. Man spricht deshalb auch von (γ -)Quanten oder Photonen.

Strahlenenergie

Spontane Kernumwandlungen können nur dann stattfinden, wenn dabei Energie frei wird. Diese Zerfallsenergie tritt als kinetische Energie der emittierten Teilchen und als Photonenenergie auf.

Die für Strahlenenergien üblicherweise verwendete Energieeinheit ist das Elektronenvolt (eV).

1 eV ist die Energie, die eine Elementarladung gewinnt, wenn sie eine Potentialdifferenz von einem Volt durchläuft. Die normalerweise vorkommenden Größenordnungen sind keV (10^3 eV) oder MeV (10^6 eV).

Aktivität

Als Aktivität A eines radioaktiven Stoffes bezeichnet man die Zahl der Zerfälle pro Zeiteinheit.

SI-Einheit: $[A] = 1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Bq}$

übliche Größenordnungen: kBq, Mbq

Eine Aktivität $A = 2,5 \text{ kBq}$ bedeutet also 2500 Zerfälle pro Sekunde.

Früher übliche Einheit: 1 Ci (Curie, Aktivität von 1 g Ra-226)

Umrechnung: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \rightarrow 1 \text{ mCi} = 37 \text{ MBq}, 1 \text{ Bq} = 1/37 \text{ nCi}$

Übungsaufgaben 1, 2**Halbwertszeit (HWZ)**

Die HWZ T ist ein Maß für die Geschwindigkeit der Aktivitätsabnahme. Während der Zeit T, wird jeweils die Hälfte der vorhandenen Radionuklide umgewandelt.

Beispiel: $T_{\text{Co-57}} = 270 \text{ d}$

3. Bedienung des Bohrlochszintillations - (BLZ-) Meßplatzes

Die BLZ-Meßsonde liefert Spannungsimpulse, deren Höhe proportional zur Energie der Photonen ist, die den Impuls ausgelöst haben. Die Aufgabe des BLZ-Meßplatzes ist die Zählung dieser Impulse in Abhängigkeit von ihrer Höhe.

Spannungsversorgung

Sowohl die Spannungsversorgung der Meßelektronik (Power Supply) als auch die Hochspannungsversorgung der Meßsonde (HV-Supply) sollen eingeschaltet bleiben, damit das Gerät stabile Meßwerte liefert.

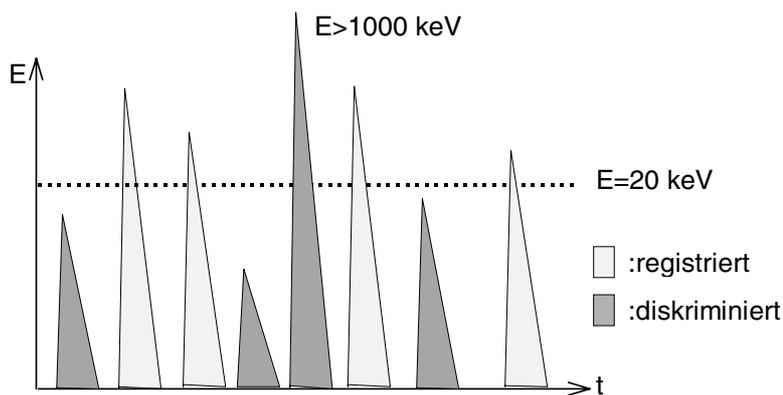
Diskriminator

Am Diskriminator wird festgelegt, welche Strahlenenergien gemessen werden. Es gibt zwei prinzipiell unterschiedliche Meßmethoden:

1. Integralmessung:

Hier wird ein unterer Energieschwellwert eingestellt. Alle γ -Quanten, deren Energie diese Schwelle überschreitet, werden registriert. Die obere Energiegrenze wird durch den Meßbereich des Gerätes festgelegt (sie beträgt z.B. im Meßbereich (MB) $\times 1$ 1000 keV).

Das gezeichnete Beispiel zeigt, was die Einstellung $E = 20$ keV bewirkt.



2. Differentialmessung:

Hier wird ein oberer und ein unterer Energieschwellwert eingestellt, und zwar indem man die mittlere Energie E einstellt und ein dazu symmetrisches Energiefenster ΔE (window).

BEISPIEL:

Es soll der Bereich von 20 - 100 keV (E_1 - E_2) untersucht werden.

Berechnung der mittleren Energie E :

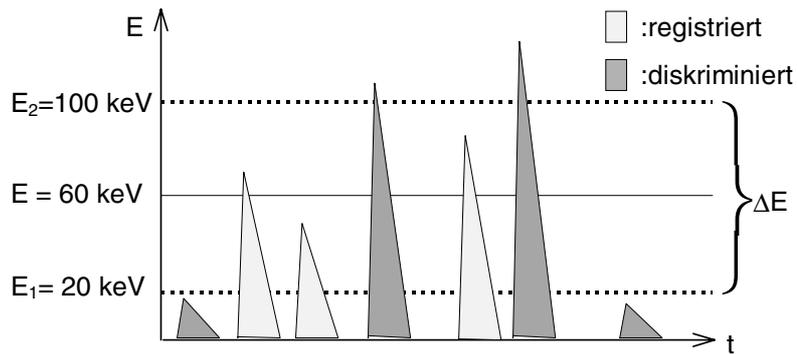
$$E = E_1 + \frac{1}{2} \Delta E = 20 \text{ keV} + \frac{1}{2} \cdot (100 - 20) \text{ keV}$$

$$E = 20 \text{ keV} + 40 \text{ keV} = 60 \text{ keV}$$

Einstellung am Diskriminator:

$$E = 60 \text{ keV}, \Delta E = 80 \text{ keV}$$

Folgendes Diagramm soll die Wirkung dieser Einstellung verdeutlichen:



Um einen möglichst großen Energiebereich abdecken zu können, lassen sich am Diskriminator unterschiedliche Faktoren einstellen. Der entsprechende Schalter hat die Funktion eines Meßbereichsschalters für die Energie.

Meßbereich	Energiebereich
x0,2	2 - 200 keV
x1	10 - 1000 keV
x2	20 - 2000 keV

Der Faktor ist so zu wählen, daß der zu untersuchende Energiebereich möglichst im mittleren Drittel des eingestellten Energiebereiches liegt. Der eingestellte Energiewert muß mit dem eingestellten Faktor multipliziert werden, um die tatsächlich eingestellte Energie zu erhalten. Umgekehrt muß die gewünschte Energie durch den Faktor geteilt werden, um den Einstellwert zu bekommen.

BEISPIEL: Int., $E = 40 \text{ keV}$
 $40 \text{ keV} \rightarrow \text{MB } x0,2$
 Energieeinstellung: $E = 40 \text{ keV} / 0,2 = 40 \text{ keV} \cdot 5 = 200 \text{ keV}$
 Diskriminatoreinstellung: $x0,2$; $E = 200 \text{ keV}$

BEISPIEL: Diff., $E = 900 - 1500 \text{ keV}$
 $\Delta E = E_2 - E_1 = (1500 - 900) \text{ keV} = 600 \text{ keV}$
 $E = E_1 + \frac{1}{2} \cdot \Delta E = (900 + 300) \text{ keV} = 1200 \text{ keV} \rightarrow \text{MB } x2$
 Energieeinstellung: $E = 1200 \text{ keV} / 2 = 600 \text{ keV}$
 $\Delta E = 600 \text{ keV} / 2 = 300 \text{ keV}$
 Diskriminatoreinstellung: $x2$; $E = 600 \text{ keV}$; $\Delta E = 300 \text{ keV}$

AUFGABE:

Es soll der Energiebereich $E = 50 - 70 \text{ keV}$ untersucht werden. Welche Diskriminatoreinstellung muß vorgenommen werden?

$\Delta E = E_2 - E_1 = (70 - 50) \text{ keV} = 20 \text{ keV}$
 $E = E_1 + \frac{1}{2} \cdot \Delta E = (50 + 10) \text{ keV} = 60 \text{ keV} \rightarrow x2$
 Energieeinstellung: $E = 60 \text{ keV} / 0,2 = 300 \text{ keV}$
 $\Delta E = 20 \text{ keV} / 0,2 = 100 \text{ keV}$
 Diskriminatoreinstellung: Diff.; $x0,2$; $E = 300 \text{ keV}$; $\Delta E = 100 \text{ keV}$

Übungsaufgabe 3

Ratemeter

Das Ratemeter dient zur Analoganzeige der Zählrate. Die Anzeige erfolgt in cts/min (übliche Abkürzung: cpm). Eingestellt werden kann die Empfindlichkeit (Meßbereiche) und die Trägheit (Zeitkonstante) der Anzeige. Der Testknopf dient zur Überprüfung des Vollausschlages.

Scaler/Timer

Der Scaler/Timer liefert eine digitale Anzeige des Meßergebnisses. Zwei Betriebsarten sind möglich:

1. TIME-Vorwahl:

Das Meßgerät stoppt nach einer eingestellten Meßzeit und zeigt die Impulszahl an.
Es werden maximal 980000 Impulse angezeigt!

2. COUNT-Vorwahl:

Das Meßgerät stoppt nach dem Erreichen der vorgewählten Impulszahl und zeigt die Meßdauer an.
Es werden maximal 980000 min angezeigt

MESSUNGEN

1. Vergleich zwischen Analog- und Digitalmessung

Parameter: Nuklid: J-125
Arbeitsspannung: ca. 800 V (analog kal.)
Energie: E > 20 keV
Diskriminatoreinstellung: Int., x0,2; E = 100 keV

1.1. Analogmessung:

Empfindlichkeit so wählen, daß eine %-Anzeige zustande kommt.

a) Integrationszeitkonstante $\tau_a = 2$ s: $I_{Ra} = \dots\dots\dots$ cpm

b) Integrationszeitkonstante $\tau_b = 10$ s: $I_{Rb} = \dots\dots\dots$ cpm

1.2. Digitalmessung:

TIME: 1 min

n	I [cpm]
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

$\bar{I} = \dots\dots\dots$ cpm
 $s = \dots\dots\dots$ cpm
 VK = $\dots\dots\dots$ %

Ergebnis:

Die Analoganzeige ermöglicht eine schnelle Übersichtsmessung und die Beobachtung von Veränderungen der Impulsrate.

Die Digitalanzeige ermöglicht ein genaues Ablesen der Impulszahl.

TEST des Ratemeters:

Einstellung 1000 cts, Testknopf drücken → Anzeige 100 %

2. Vergleich von TIME- und COUNT-Vorwahl

Parameter und Diskriminatoreinstellung wie unter 1.

2.1. TIME-Vorwahl:

siehe 1.2.

2.2. COUNT-Vorwahl:

COUNTS: 100 000

n	N
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

\bar{t} = min

s = min

VK =%

Ergebnis:

Die Impulsraten sind bei beiden Messungen nicht konstant. Der statistische Fehler der Messung ist nicht nur durch die bei der jeder Messung auftretenden statistischen Schwankungen, wie z.B. Ablesefehler und elektronische Rauscheffekte, zu erklären, sondern entsteht im wesentlichen durch den zufälligen Charakter des Kernzerfalls.

3. Impulsstatistik

Parameter: Nuklid: J-125

Arbeitsspannung: ca. 800 V (analog kal.)

Energie: E = 35 keV, ΔE = 50 keV

Diskriminatoreinstellung: Diff., x0,2; E = 175 keV ΔE = 250 keV

3.1. Messung mit großer Impulszahl (TIME: 1 min):

n	N
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

\bar{N} =

s =

VK =%

3.2. Messung mit kleiner Impulszahl (TIME: 0,1 min):

n	N
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

$$\bar{N} = \dots\dots\dots$$

$$s = \dots\dots\dots$$

$$VK = \dots\dots\dots\%$$

Ergebnis:

Der relative Fehler der Messung ist bei kleiner Impulszahl größer. Bei 3.2. müßte die Meßzeit entsprechend verlängert werden, um die gleiche relative Meßgenauigkeit zu erreichen wie unter 3.1.

Aus der Zerfallstatistik ergibt sich:

absoluter Fehler: \sqrt{N}

relativer Fehler: $\frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$

prozentualer Fehler: $\frac{1}{\sqrt{N}} \cdot 100\%$

Vergleich der gemessenen statistischen Fehler mit den Fehlern aufgrund der Zerfallsstatistik:

	$s = \dots\dots\dots$	$VK = \dots\dots\dots\%$
3.1.:	$\sqrt{N} = \dots\dots\dots$	$\frac{1}{\sqrt{N}} \cdot 100\% = \dots\dots\dots\%$
	$s = \dots\dots\dots$	$VK = \dots\dots\dots\%$
3.2.:	$\sqrt{N} = \dots\dots\dots$	$\frac{1}{\sqrt{N}} \cdot 100\% = \dots\dots\dots\%$

Bei nuklearmedizinischen Untersuchungen sind nur Impulszahlen akzeptabel, bei denen der Fehler auf Grund der Zerfallsstatistik kleiner als 1% ist, weil die Genauigkeit der Meßgeräte in dieser Größenordnung liegt und somit der Gesamtfehler der Messung nicht unzulässig erhöht wird.

Berechnung der Impulszahl, die mindestens erforderlich ist, damit der statistische Fehler der Messung <1% wird:

$$\frac{1}{\sqrt{N}} \cdot 100\% = 1\%$$

$$\frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1\%}{100\%}$$

$$\sqrt{N} = 100$$

$$N = 10000$$

Übungsaufgabe 4

4. Aufbau und Funktionsweise einer Szintillationsmeßsonde

Der Strahlennachweis erfolgt in der Nuklearmedizin fast ausschließlich mit Szintillationsdetektoren, in denen die Energie der absorbierten Photonen in energieproportionale elektrische Impulse umgesetzt wird. Dies erfolgt in mehreren Einzelschritten:

Absorption der Photonenenergie

- Anregung des Szintillators (NaJ(Tl)-Kristall)
- Licht (Szintillationen)
- Elektronen aus der Fotokathode
- Impulse aus dem Fotomultiplier (SEV)

4.1. Absorption der Photonenenergie:

Für die Energien der in der Nuklearmedizin verwendeten Nuklide können folgende Absorptionsprozesse auftreten:

Fotoanregung

Das γ -Quant überträgt seine Energie vollständig auf ein gebundenes Hüllenelektron. Wenn die Photonenenergie gleich der Differenz der Bindungsenergie zwischen zwei Elektronenschalen ist, wird das Elektron in die Schale mit der kleineren Bindungsenergie angehoben.

Fotoionisation:

Das γ -Quant überträgt seine Energie vollständig auf ein gebundenes Hüllenelektron. Wenn die Photonenenergie größer als die Bindungsenergie des Elektrons ist, wird das Elektron aus dem Atom herausgelöst.

Compton-Effekt:

Das γ -Quant überträgt einen Teil seiner Energie auf ein schwach gebundenes Elektron. Das Elektron wird aus dem Atom herausgelöst und es entsteht ein Photon mit geringerer Energie.

Darüberhinaus sind klassische Streuung und Paarbildung möglich. Sie spielen bei nuklearmedizinischen Anwendungen keine Rolle.

