

## Nuklearmedizin

Als Nuklearmedizin bezeichnet man die Anwendung von offenen radioaktiven Stoffen in medizinischer Diagnostik, Therapie und Wissenschaft.



1

## Nuklearmedizin

Isotopendiagnostik

Therapie

Strahlentherapie

in vivo

in vitro

2

**George de Hevesy** (geboren György Hevesy)

(\* 1. August 1885 in Budapest;  
† 5. Juli 1966 in Freiburg im Breisgau),  
war ein ungarischer Chemiker.



Hevesy studierte Chemie, Mathematik und Physik in Budapest, Berlin und Freiburg. Anschließend arbeitete er unter anderem bei Ernest Rutherford und Friedrich Adolf Paneth. In Kopenhagen entdeckte 1922 er gemeinsam mit Dirk Coster 1922 das Element Hafnium. Er ist einer der **Begründer der Radiochemie und Erfinder der Tracermethode**, mit der chemische Elemente durch die Beimischung ihrer radioaktiven Isotope analytisch gekennzeichnet werden. Er hat auch die Neutronenaktivierungsanalyse als analytisches Verfahren eingeführt. Von 1926 bis 1934 war er Professor an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Nach der Machtübernahme durch die Nationalsozialisten floh er nach Kopenhagen und 1943 weiter nach Stockholm. Im gleichen Jahr wurde ihm der **Nobelpreis für Chemie** verliehen. Bis 1961 arbeitete er in Stockholm und wandte sich physiologischen und klinischen Fragestellungen auf dem Gebiet der Radiobiologie zu.

3

## Wichtige Charakteristiken der nuklearmedizinischen Methoden

- ✓ die nuklearmedizinischen Methoden sind Funktionsorientiert (im ggt. z.B. zur Rtg.-CT, Sonographie, Kernspintomographie); z.B.: Durchblutung, Stoffwechsel und Vitalität der Organen/Tumoren;
- ✓ Anreicherung und Verteilung der Radiopharmaka im Zielorgan;
- ✓ Zeitliche/r Aufnahme/Abbau des dem Organismus entsprechenden Radiopharmakon;
- ✓ Vergleich der Funktion der paarigen Organe



4

## Physikalische Aspekte bei der Auswahl von in vivo applizierten Isotopen

### ! Schutz des Patienten vor den Strahlungsschädigungen !

- Überlegungen hauptsächlich in der Diagnostik
- In der Strahlentherapie:  
Schutz der übrigen Körperteile

5

## Strahlenschutz in der Isotopendiagnostik

- ✓ Zielsetzung: Heilen!
- ✓ Die Aufgabe ist die durch die Isotopendiagnostik verursachten Strahlungsschädigungen zu minimalisieren.

- ✓ Bedingung der Anwendung:

Schaden der  
Isotopdiagnostischen  
Verfahren



Vorhersehbare  
Schaden ohne  
Durchführung der  
isotopdiagnostischen  
Untersuchung

6

## Physikalische Aspekte bei der Auswahl von in vivo applizierten Isotopen

### 1. Typ des Elementes

Das Isotop soll in dem Zielorgan aufgenommen werden  
(z.B. I in Schilddrüse, Fe in Erythrozyten)

Problem: bei vielen Organen gibt es kein solches Isotop,  
was spezifisch in dem Organ ausgeschieden wird.

Lösung: markierte Moleküle (Radiopharmaka)

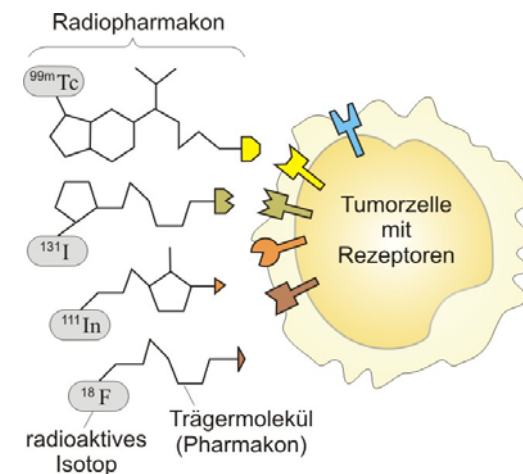
Radiopharmaka sind pharmakologisch wirksame Substanzen, die mit einem radioaktiven Isotop markiert sind.

Sie folgen im Körper dem durch das Pharmakon vorgegebenen Weg und erlauben durch das strahlende Label eine Verfolgung von außen (bei Gamma-strahlenden Nuklidern)

oder wirken eine gezielte therapeutische Wirkung am Zielort aus (bei Beta- oder Alpha-strahlendem Isotop).

7

## Radiopharmaka



Das strahlende Isotop wird an ein Pharmakon gebunden, das Radiopharmakon koppelt sich dann an die Zielzelle

8

## Beispiele für Anwendung von Radiopharmaka

- $^{133}\text{Xe}$  — Untersuchung der Lungenventilation
- $^{123}\text{I}$  — Schilddrüsenszintigraphie (Natriumjodid) , Tumorszintigraphie (markiertes Meta-iodo-benzylguanidin, MIBG)
- $^{131}\text{I}$  — Schilddrüsenszintigraphie (Natriumjodid)
- $^{99\text{m}}\text{Tc}$  — Herzmuskelperfusion (markiertes Methoxy-isobutyl-isonitril, MIBI), Hirnperfusion, Entzündungsprozesse (markiertes Hexamethylen- propylamin-oxim, HMPAO)

9

## Physikalische Aspekte bei der Auswahl von in vivo applizierten Isotopen

### 2. Die Halbwertszeit

$$\Lambda = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N$$

N ~ Strahlenbelastung!

Bei gleichgroßer Aktivität ist eine geringere Menge des Isotops mit kürzerer Halbwertszeit erforderlich

Charakteristische Zeit des zu Untersuchenden biologischen Prozesses !  
Transportierungsproblemen bei sehr kurzen Halbwertszeit!

10

## Physikalische Aspekte bei der Auswahl von in vivo applizierten Isotopen

### 3. Die Aktivität

Strahlenbelastung  $\leftrightarrow$  Bildqualität

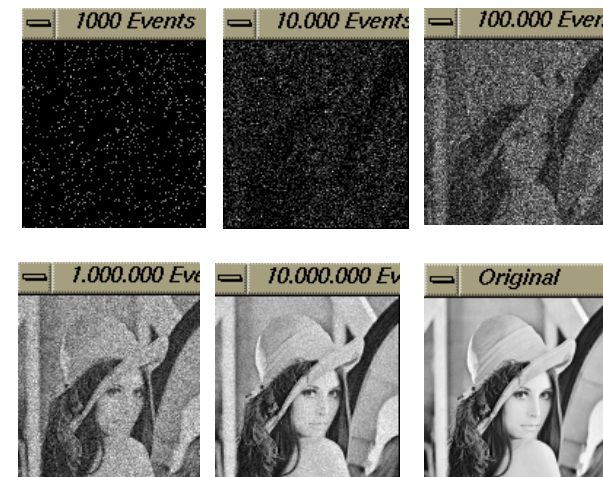
Möglichst kleine Aktivität

Möglichst große Aktivität

Anzahl der detektierten  $\gamma$ -Photonen folgt einer Poisson-Verteilung  $\sigma^2 = \mu$

11

### Bildqualität $\leftrightarrow$ Strahlenbelastung



12

Organ/	Bildgebung/Test	Aktivität(MBq)
Skelett	Knochen/Knochenmark	600/400
Herz	Perfusion/Vitalität/Ventrikuläre Funktion	800/75/600
Schilddrüse	Speicherungskurve und Scan	3-50
Hirn	Blutfluß	500
	Benzodiazepin-Rezeptoren	185
	Dopamin-Rezeptoren	185
Nieren	unterschiedliche Methoden	30-150
Lunge	Perfusion	100
	Ventilation	1000

13

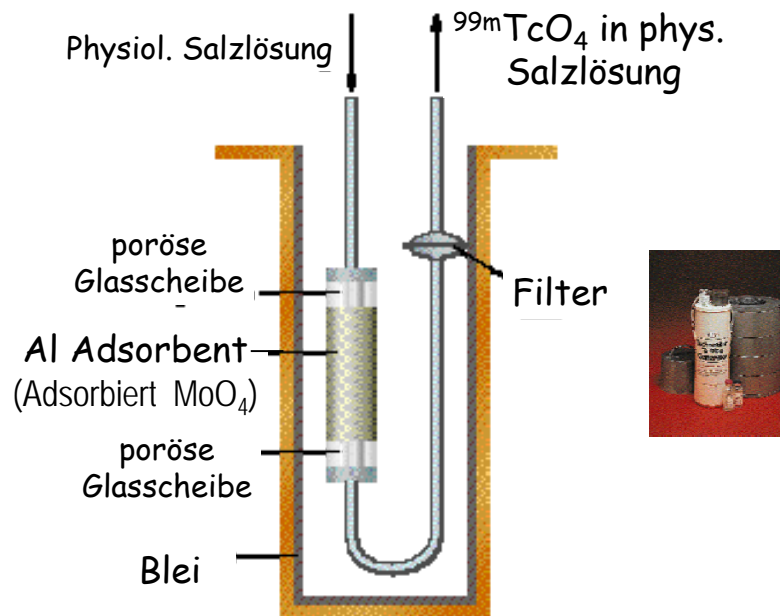
## Physikalische Aspekte bei der Auswahl von in vivo applizierten Isotopen

### 4. Charakter der Strahlung

Das ideale Isotop für die Diagnostik ist der reine  $\gamma$ -Strahler (siehe Ionisationsvermögen, Reichweite)

Die Kernisomerie ist von großer Bedeutung  
→ siehe Technetiumgenerator

14



15

## Physikalische Aspekte bei der Auswahl von in vivo applizierten Isotopen

### 5. Die Photonenenergie der $\gamma$ -Strahlung

Bei geringer Photonenenergie: die Strahlung wird schon von dünnen Schichten vollkommen absorbiert

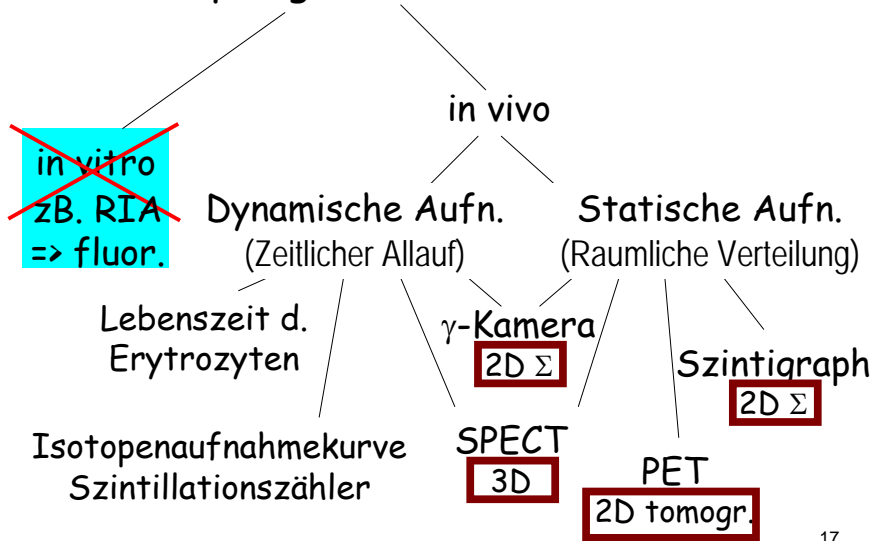
Bei zu hoher Photonenenergie: die Strahlung wird auch im Detektor nicht absorbiert (keine Wechselwirkung)

Optimum: einige 100 keV

$$E_{\gamma} (^{99\text{m}}\text{Tc}) = 140 \text{ keV}$$

16

## Isotopdiagnostische Verfahren



17

## Nuklearmedizin

### 1. In vitro Laboruntersuchungen

RIA: Radioimmunoassay

R. Yalow - 1977, Nobelpreis für Medizin und Physiologie

Anwendung von radioaktiv markierten Substanzen/Liganden  
radioaktiv markiertes Antigen

RIA-Test: Der Test basiert auf einer Kompetitionsreaktion zwischen dem radioaktiv markierten und dem unmarkierten Antigen um den Antikörper

•sehr genaue bestimmung der Konzentration von z.B. Hormonen, Enzymen, Tumorantigenen, Infektionsantigenen, Arzneimitteln und DNA

•heute: statt Radioaktivität, sind Fluoreszenzmethoden oft benützt.

**keine Strahlenbelastung für die Patienten**

## Nuklearmedizin

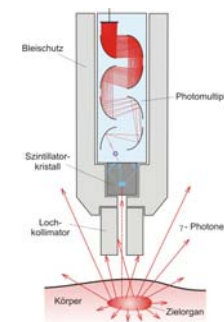
### 2. Volumenbestimmung von Körperräumen

- das Gesamtvolumen des Wassers
- das Blutplasmavolumen
- die Menge der austauschbaren Natriumionen
- die mittlere Lebensdauer der Erythrozyten
- die Kinetik der Eisen- und Kalziumaufnahme

19

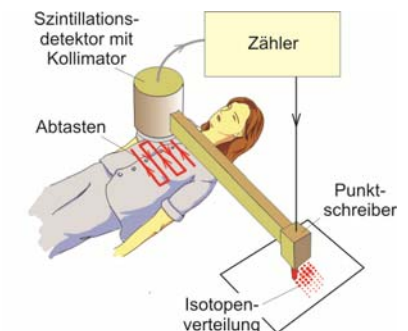
## Nuklearmedizinische Techniken

### Szintillationsmesskopf



Der Lochkollimator gestattet nur das Detektieren der in Lochrichtung einfallenden  $\gamma$ -Photonen

### Szintigraph



Funktionsprinzip des Szintigraphen

20

## Nuklearmedizinische Techniken

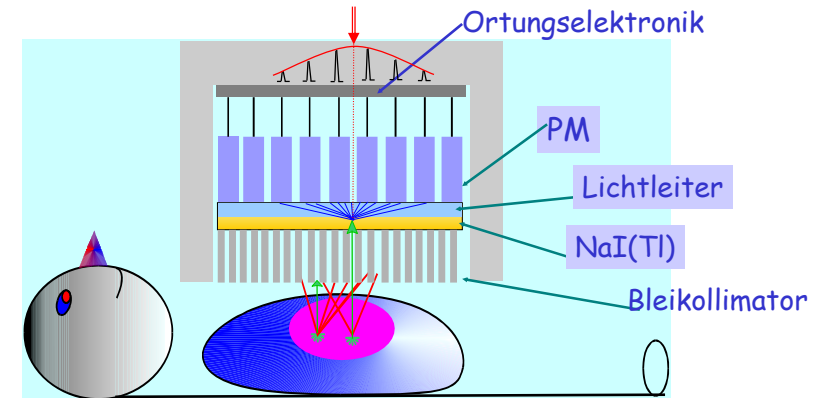
### Gammakamera

Erfinder: Hal Anger

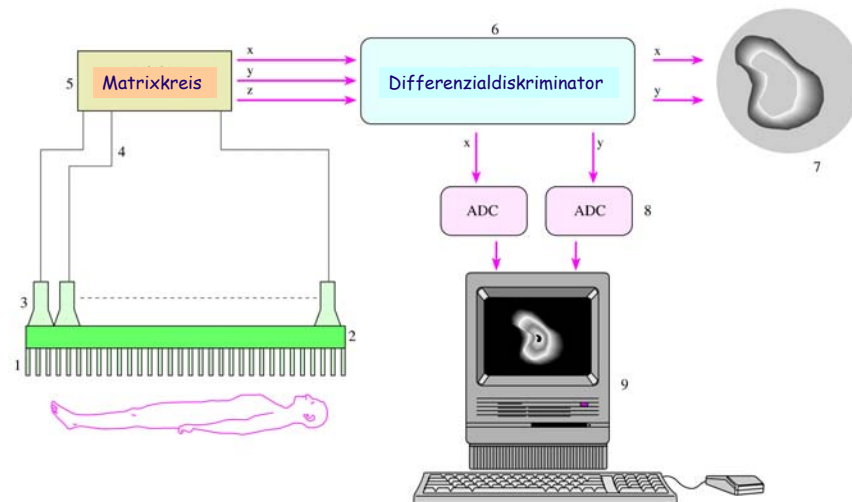


21

räumliche Auflösung — Bleikollimator  
nur Strahlen parallel mit der Kollimatorachse  
können durchdringen



22



23

## Messverfahren mit Gammakamera

### Arten der Szintigraphie:

- Planare Szintigraphie
- Sequenzszintigraphie
- Funktionsszintigraphie
- SPECT (Single Photon Emission Computed Tomographie)

Statische Szintigramme: Summationsbild einer Langzeitaufnahme

- Feststellung der Form, Größe, metabolischen Aktivität von Organen
- zweidimensionale Projektion der Anreicherung der Isotope in einzelnen Organen

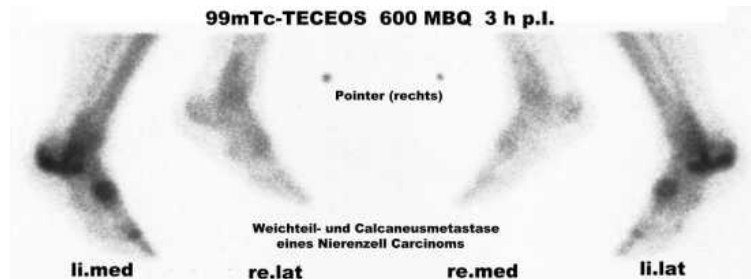
Dynamische Szintigramme: filmartige Verlaufaufnahme

- Kinetik der Metabolism in den Organen

24



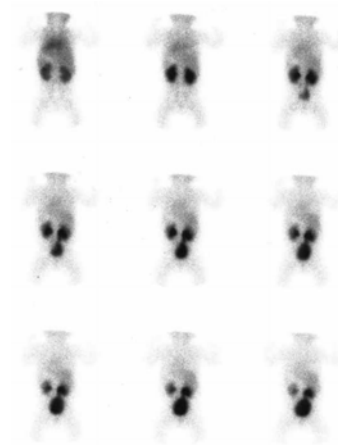
## Planare Szintigraphie



Aufnahme von einem Körperabschnitt zu einem definierten Zeitpunkt. Das dreidimensionale zu untersuchende Organ wird zweidimensional abgebildet. Sehr oft werden dabei Aufnahmen von zwei Ansichten angefertigt

25

## Sequenzszintigraphie

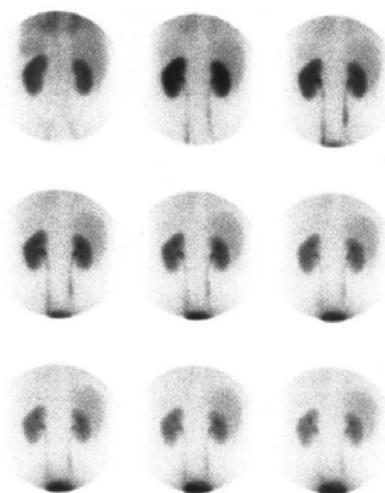


Es handelt sich um eine **fortlaufende Aufnahmeserie** mit Erstellung mehrerer, **zeitlich aufeinanderfolgender Einzelbilder**.

In den Abbildungen ist eine Sequenz von Nierenaufnahmen mit zeitgerechtem Aktivitätsdurchsatz durch das Parenchym nach Gabe von 70 MBq Tc-99m-MAG3 mit neun Bildern bei einer Aufnahmezeit von 120 Sekunden dargestellt.

26

## Sequenzszintigraphie



$^{99m}\text{Tc}$ -MAG3  
(Mercaptoacetyltriglycine)

zeitliche Folge von Nierenaufnahmen eines Säuglings

27

## Funktionsszintigraphie:

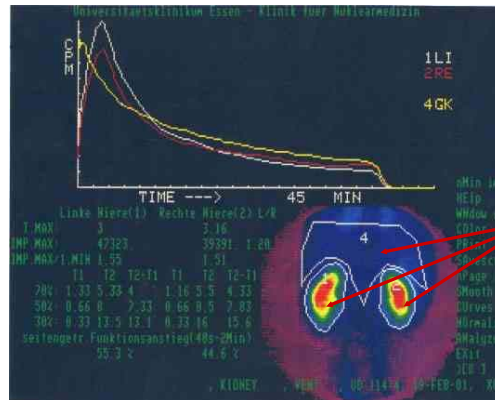
**Auswertung** der Tracerkinetik einer **Sequenzszintigraphie** über **Festlegung** von **Regions of Interest (ROI)** am Bildsichtgerät und Berechnung von **Funktionskurven**.

1. Sequenzaufnahme
2. Funktionsauswertung durch Festlegung von ROI

28

## Funktionsszintigraphie:

Aus der vorigen Abbildung ergeben sich nach Durchführung der ROI-Technik folgende **Funktionskurven** für die beiden Nieren, aus der sich eine seitengleiche regelrechte tubuläre Sekretionsleistung der Nieren und kein Anhalt für eine Harnabflußbehinderung ergibt.

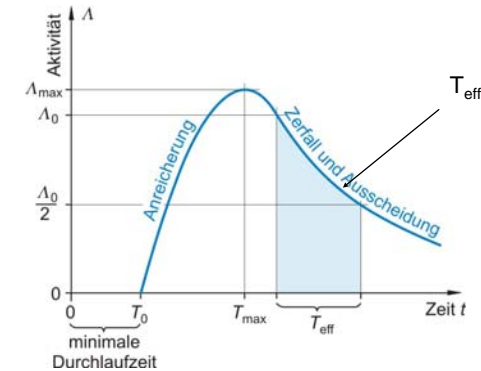


29

## Funktionsszintigraphie:

### ZEIT-AKTIVITÄTS-KURVE

Die zeitliche Verfolgung der Stoffwechselprozesse im Organ erfolgt durch Aufnahmen der Zeit-Aktivitäts-Kurve.



s. Praktikum: Isotopendiagnostik

30

## Biologische und effektive Halbwertszeit

$\lambda_{phys}$  - physikalische Zerfallskonstante  
(Zerfallswahrscheinlichkeit)  
 $\lambda_{biol}$  - biologische „Zerfallskonstante“  
(Ausscheidungswahrscheinlichkeit)

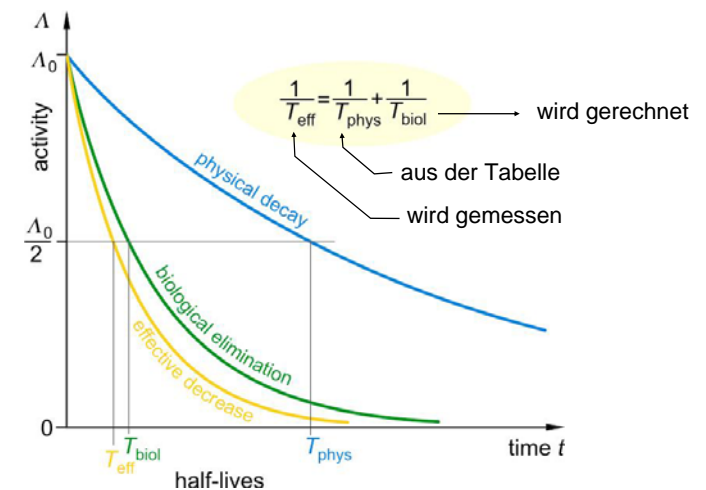
Sei  $\lambda_{eff} \cdot \Delta t$  die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Kern während  $\Delta t$  zerfällt oder ausgeschieden wird.

$$\frac{\Delta N_{eff}}{N} = \frac{\Delta N_{phys}}{N} + \frac{\Delta N_{biol}}{N} \Rightarrow \lambda_{eff} = \lambda_{phys} + \lambda_{biol} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{phys}} + \frac{1}{T_{biol}}$$

31

## Biologische und effektive Halbwertszeit



32



## Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)



– das nuklearmedizinische Analogon zur Röntgen-Computer-Tomographie (CT)

- Dabei werden aus dem Patienten emittierte Einzelphotonen (Gammaquanten) gemessen.
- Die Untersuchung findet unter verschiedenen Winkeln statt → Ein bis zu drei Gammakamera rotieren um die zu untersuchende Region.
- Schnittbilder werden durch das Verfahren der gefilterten Rückprojektion rekonstruiert.
- Erzeugt werden dabei überlagerungsfreie Bilder und dreidimensionale Darstellungen der Aktivitätsverteilung.

33

## Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)



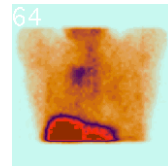
mehrere Detektoren ermöglichen eine kürzere Aufnahmezeit, bessere Auflösung

Gammakameras

- Sequenzszintigraphie
- Funktionsszintigraphie

34

## Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)



1. Myocard-SPECT zur Untersuchung der Vitalität des Herzmuskelgewebes. Das verwendete Radiopharmakon ist meist Tc-99m MIBI.
2. Knochen-SPECT zur Lokalisation von Regionen mit verändertem Knochenstoffwechsel in der Skelettszintigraphie
3. Hirnfunktions-SPECT (FP-CIT und IBZM-SPECT) zur Diagnostik und Differenzierung von Parkinsonsyndromen und gegenüber weiteren degenerativen Hirnerkrankungen
4. Octreotid-SPECT im Rahmen der Somatostatinrezeptorszintigraphie bei neuroendokrinen Tumoren
5. MIBG-SPECT bei adrenergen Tumoren z. B. des Nebennierenmarkes, sog. Phäochromozytom

Deutsches Krebsforschungszentrum, Heidelberg  
Nuklearmedizinische Klinik und Poliklinik der TU München  
Klinik für Nuklearmedizin des Universitätsklinikums Essen

35

## PET: Positronen Emissions Tomographie



Bild einer typischen Positronen-Emissions-Tomographie-Einrichtung

36

## Radioisotope für PET

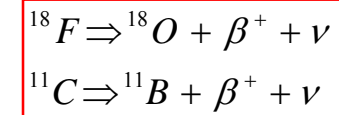
Isotop	Markermolekül	Was wird nachgewiesen	Klinische Bedeutung
$^{18}\text{F}$	Desoxyglukose	Glukosestoffwechsel	Stoffwechselveränderungen, Tumoren
$^{18}\text{F}$	$^{18}\text{F}$ -Ion	Knochenstoffwechsel	Veränderungen des Knochensystems
$^{11}\text{C}$	Aminosäuren	Aminosäurenstoffwechsel	Stoffwechselveränderungen, Tumoren
$^{11}\text{C}$	Raclopride	Dopamin-(D <sub>2</sub> ) Rezeptor	Parkinson-Krankheiten
$^{15}\text{O}$	$^{15}\text{O}$ -markierte Gase	Oxygenstoffwechsel	Messung des Oxygenstoffwechsels
$^{15}\text{O}$	Butanol	Blutzirkulation, Blutvolumen	Messung des Oxygenstoffwechsels
$^{15}\text{O}$	Wasser	Blutzirkulation, Blutvolumen	z. B. Untersuchung eines Stroke-betroffenen Gebietes
$^{13}\text{N}$	Ammoniak	Blutzirkulation	Messung der Herzmuskelvitalität

37

## In der PET verwendete Radioisotope

Kurzlebige Isotope:

$^{18}\text{F}$  (T=110 min),  $^{11}\text{C}$  (T=21 min),  $^{13}\text{N}$  (T=10 min),  $^{15}\text{O}$  (T=2min)

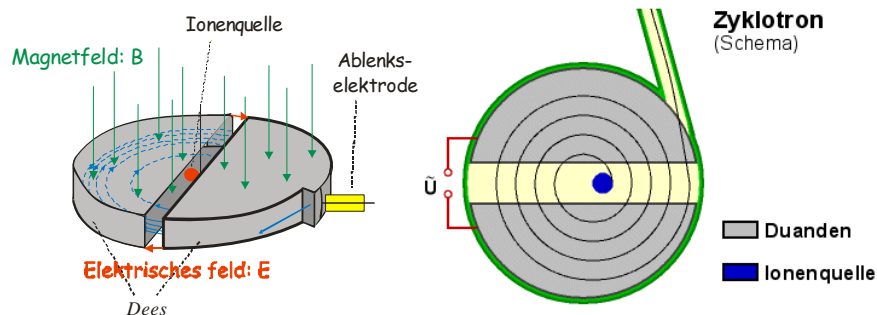


Die Herstellung ist am Applikationsort notwendig.

Die Verwendung von  $^{11}\text{C}$  erfordert daher, dass sich ein **Zyklotron** in **relativer Nähe des PET-Systems** befindet. Die Verwendung von  $^{13}\text{N}$  oder  $^{15}\text{O}$  erfordert sogar, dass sich das **Zyklotron** in **unmittelbarer Nähe des PET-Scanners** befindet.

38

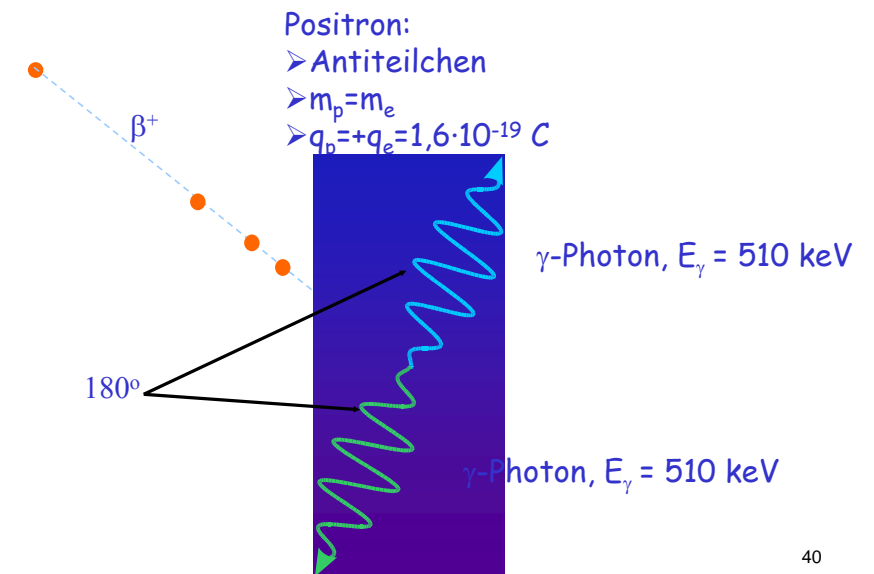
## Das Zyklotron



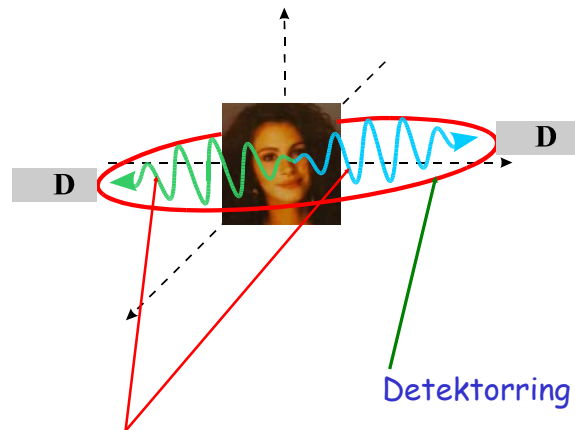
<http://www.zyklotron.iskp.uni-bonn.de/zyklo/technik/technik.html>

39

## PET: Positronen Emissions Tomographie



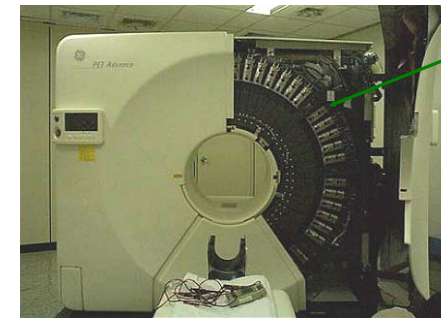
40



Diejenige  $\gamma$ -Photonen werden registriert, die fast gleichzeitig (Koinzidenzmessung innerhalb von 20 ns) die entgegengerichteten Detektoren erreichen.

41

## PE-Tomographie



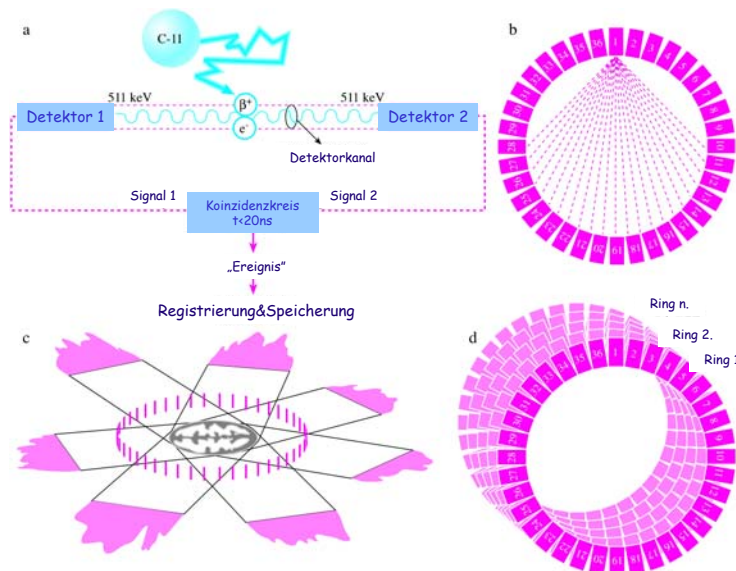
Detektorring  
(mehrere  
Szintillationsmessköpfe)

- Sequenzaufnahmen
- Darstellung physiologischer Aspekte

tomographische Aufnahmen von einzelnen Schichten;  
Bildherstellung in beliebiger Ebenen des dreidimensionalen Raums

42

## PE-Tomographie



43

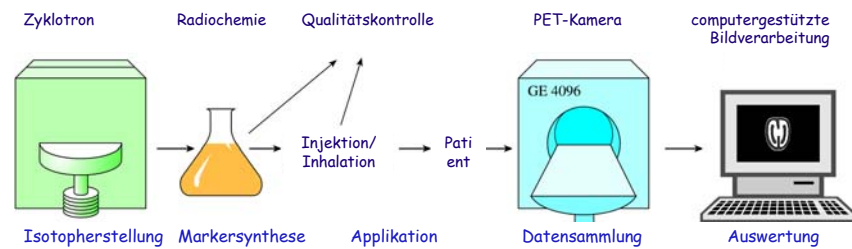
## PE-Tomographie

Breite Anwendungsgebiete in der klinischen Praxis:

- kardiologische, neurologische, psychiatrische, onkologische usw. Untersuchungen
- Frühe Diagnose und Differentialdiagnose von Tumoren
- Beurteilung der Tumorprogression, der Rezidive bzw. Metastasen
- Lokalisierung von Epilepsieherden usw. → humane Gehirnforschung

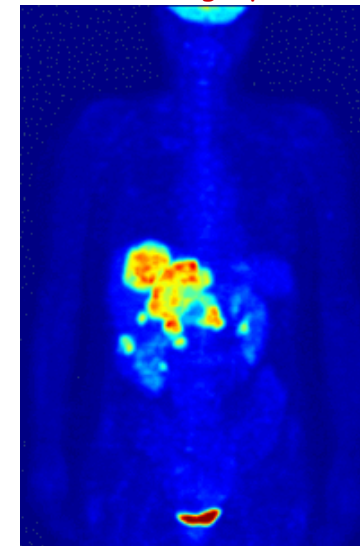
44

## PE-Tomographie



45

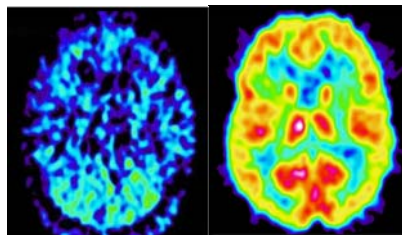
## PE-Tomographie



$^{18}\text{F}$ -FDG-Ganzkörperaufnahme

46

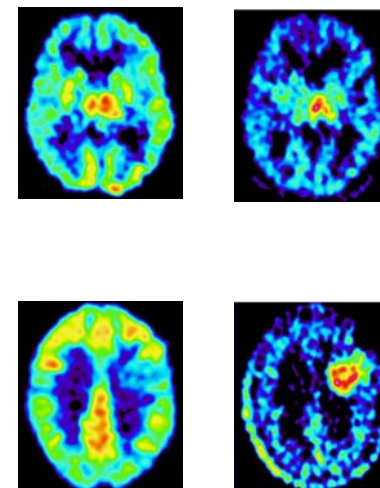
## PE-Tomographie



Mit  $^{18}\text{F}$ -FDG und  $^{11}\text{C}$ -Methionin erstellte PET-Durchschnittsbilder  
(Aufnahme aus dem PET-Zentrum der DEOEC, mit Genehmigung von Prof. Lajos Trón)

47

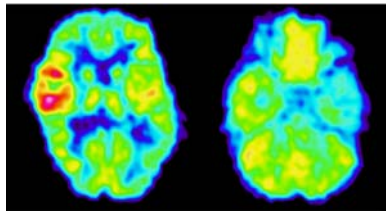
## PE-Tomographie



Hirntumor. PET Aufnahmen mit den Radiopharmaka  $^{18}\text{F}$ -FDG und  $^{11}\text{C}$ -Methionin  
(Aufnahme aus dem PET-Zentrum der DEOEC, mit Genehmigung von Prof. Lajos Trón)

48

## PE-Tomographie



$^{18}\text{F}$ -FDG PET Aufnahme des menschlichen Gehirns während eines Epilepsieanfalls (links) und in der anfallfreien Phase (rechts)  
(Aufnahme aus dem PET-Zentrum der DEOEC, mit Genehmigung von Prof. Lajos Trón)

49

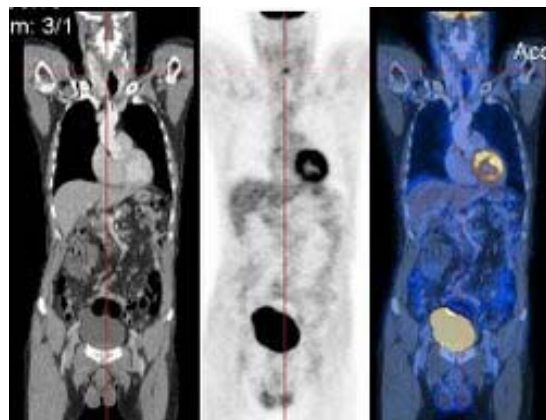
## PE-Tomographie

*Vorteil:* Informationen über die Funktion, die Stoffwechselprozesse der lebenden Organismen → funktionelle bildgebende Verfahren

*Nachteil:* die Auflösung in der transaxiale Ebene 5 mm  
in axialer Richtung 6 mm  
die Morphologie des Körpers lässt sich nur grob beurteilen

Beseitigt mit den **Bildfusionsverfahren**  
Superposition der MRT- oder CT-Aufnahme mit der PET-Aufnahme → **morphologische und funktionelle Bildgebung**

50



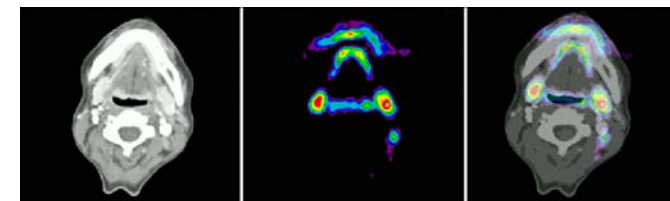
CT

PET

CT-PET

51

## PE-Tomographie



CT

$^{11}\text{C}$ -metionin-PET

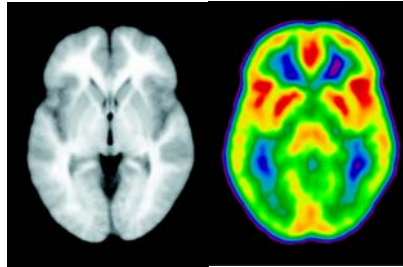
CT-PET

Primärtumor-Suche  
Mestastatische Lymphknoten an der rechten Halsseite  
(Aufnahme aus dem PET-Zentrum der DEOEC, mit Genehmigung von Prof. Lajos Trón)

52

## PE-Tomographie

MRT-Aufnahme + PET-aufnahme



T<sub>1</sub>-gewichtete MRT-Durchschnittsaufnahme und mit <sup>15</sup>O-Butanol erstellte  
PET-Durchschnittsaufnahme  
(Aufnahme aus dem PET-Zentrum der DEOEC, mit Genehmigung von Prof.  
Lajos Trón)