



# Physik und Technik in der Nuklearmedizin

Bestrahlungsplanung

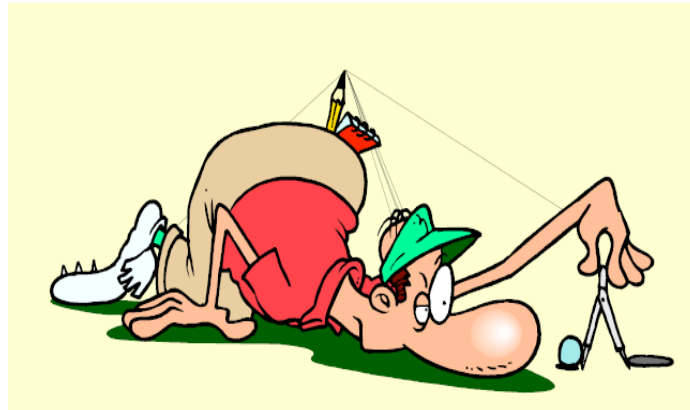
Grundlagen:

Quantifizierende Bildgebung

Dosimetrie und Dosisberechnung in der Nuklearmedizin

J. Kupferschläger, Dipl.-Phys.

# Quantifizierende Bildgebung



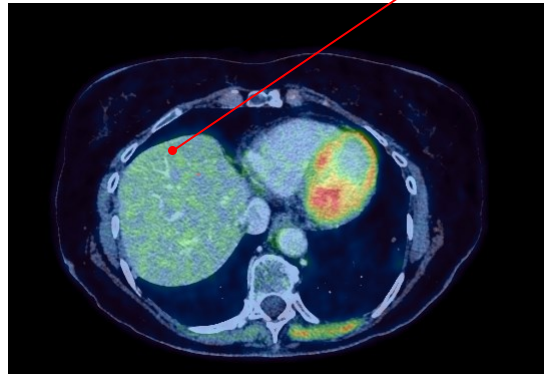
**= Suche und finde das Bq**

# Quantifizierende Bildgebung: Einflussfaktoren und Korrekturen

| Effekt                | Ursache                      | Korrektur nötig/möglich? |
|-----------------------|------------------------------|--------------------------|
| Schwächung            | Comptonstreuung              | Unbedingt/ja             |
| Streuung              | Comptonstreuung              | Unbedingt/ja             |
| Auflösung             | Abbildungssystem             | Ja/eingeschränkt         |
| Rauschen              | Stochastischer Messprozess   | Ja/schaug'n mer mal      |
| Bewegung              | Atmung, Peristaltik, Patient | Ja/schaug'n mer mal      |
| Zufällige Konzidenzen | PET-spezifisch               | Unbedingt/ja             |
| Und vieles mehr       |                              | ?????                    |

# Quantifizierende Bildgebung: Schwächung

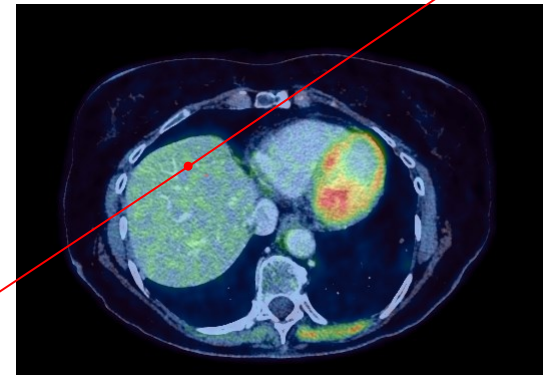
Gammakamera  
(2D/3D)



$$f(x,y) = \exp \left[ - \int_{(x,y)}^{\text{Detektor}} \mu(x',y') dL \right]$$

ortsabhängig!

PET



$$f_1(x,y) = \exp \left[ - \int_{(x,y)}^{\text{Detektor1}} \mu(x',y') dL \right]$$

$$f_2(x,y) = \exp \left[ - \int_{(x,y)}^{\text{Detektor2}} \mu(x',y') dL \right]$$

$$f = f_1 \cdot f_2 = \exp \left[ - \int_{\text{Detektor1}}^{\text{Detektor2}} \mu(x',y') dL \right]$$

ortsunabhängig

# Quantifizierende Bildgebung:

## Ermittlung von Schwächungskoeffizienten ( $\mu$ -map)

### CT

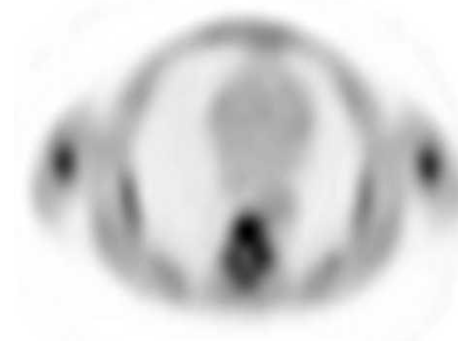


- liefert erstmal nur HU
  - Umrechnung in  $\mu$ -map
  - Energiekorrektur
- Vorsicht bei KM

### Transmissionsmessung mit radioaktiven Quellen

PET :  $^{68}\text{Ge}$

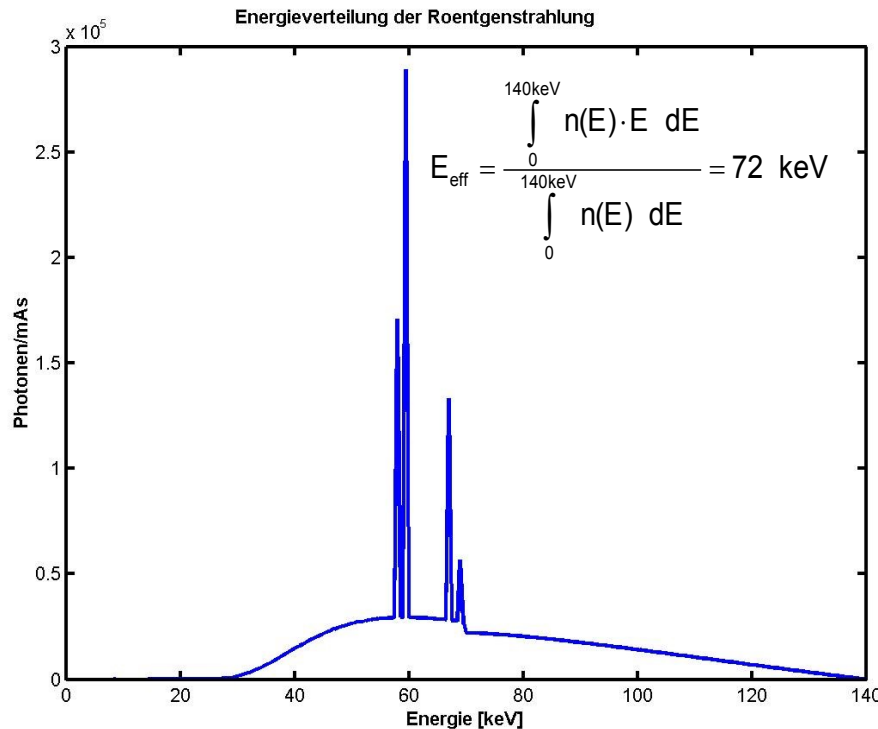
SPECT:  $^{153}\text{Gd}$



- liefert direkt die  $\mu$ -map bei Energie E
  - erfordert Energiekorrektur
- Teuer, Rauschbehaftet

# Quantifizierende Bildgebung:

## Umrechnung der CT-Einheiten (HU) in Schwächungskoeffizienten ( $\mu$ )



$$HU = \frac{\mu_{\text{Gewebe}} - \mu_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot 1000$$

Energiekorrektur :

$HU < 0$  (Mischung aus Luft und Wasser)

$$\mu(E) = \mu_{\text{H}_2\text{O}}(E) + \frac{(\mu_{\text{H}_2\text{O}}(E) - \mu_{\text{air}}(E)) \cdot HU}{1000}$$

$HU \geq 0$  (Mischung aus Wasser und Knochen)

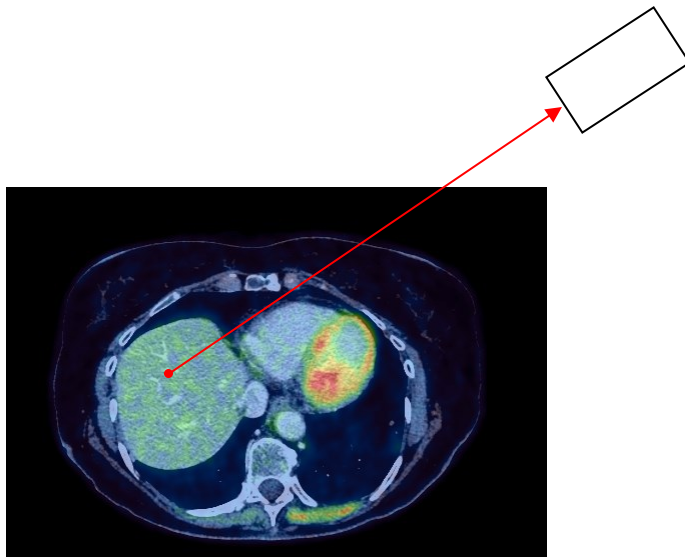
$$\mu(E) = \mu_{\text{H}_2\text{O}}(E) + \frac{(\mu_{\text{bone}}(E) - \mu_{\text{H}_2\text{O}}(E)) \cdot HU}{1000} \cdot Q$$

$$Q = \frac{\mu_{\text{H}_2\text{O}}(E_{\text{eff}})}{\mu_{\text{bone}}(E_{\text{eff}}) - \mu_{\text{H}_2\text{O}}(E_{\text{eff}})}$$

# Quantifizierende Bildgebung: Schwächungskorrektur: SPECT

Voraussetzung: Kenntnis der  $\mu$ -map (Schwächungskarte): Bildmatrizen der linearen Schwächungskoeffizienten für die entsprechende Energie.

- Transmissionsmessung mit Linienquellen
- CT: Wandlung der HU in  $\mu$ -Werte



$$f(x, y) = \exp \left[ - \int_{(x, y)}^{\text{Detektor}} \mu(x', y') dL \right]$$

Korrektur (nicht analytisch):

Berechnung der Schwächungsfaktoren  $f$  für alle Bildpunkte und Projektionen

Einbinden dieser Faktoren in eine iterative Rekonstruktion:  $f \rightarrow w_{ij}$

$$a_j^{(k+1)} = a_j^{(k)} \cdot \frac{1}{\sum_i w_{ij}} \cdot \sum_i w_{ij} \cdot \frac{m_i}{n_i^{(k)}}$$

$$w_{ij} = \text{geom}_{ij} \cdot \text{atten}_{ij}$$

Alternativ (und ungenauer): Chang-Verfahren

Berechnung der Schwächungsfaktoren  $f$  für alle Bildpunkte und Projektionen

Ausmittlung für jeden Bildpunkt über alle Projektionen

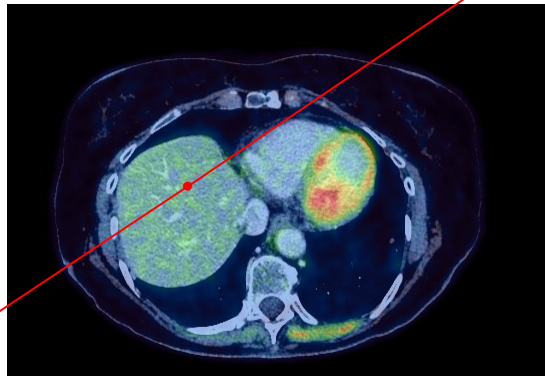
Multiplikation des nicht korrigierten Bildes mit den Mittelwerten

# Quantifizierende Bildgebung: Schwächungskorrektur: PET

Voraussetzung: Kenntnis der  $\mu$ -map (Schwächungskarte): Bildmatrizen der linearen Schwächungskoeffizienten für 511 keV

- Transmissionsmessung mit Linienquellen
- CT: Wandlung der HU in  $\mu$ -Werte

PET



1

2

Korrektur (analytisch):

Vorwärtsprojektion der  $\mu$ -map in die PET-Projektionen

Erstellen von Korrektursinogrammen  $acf = 1/f$

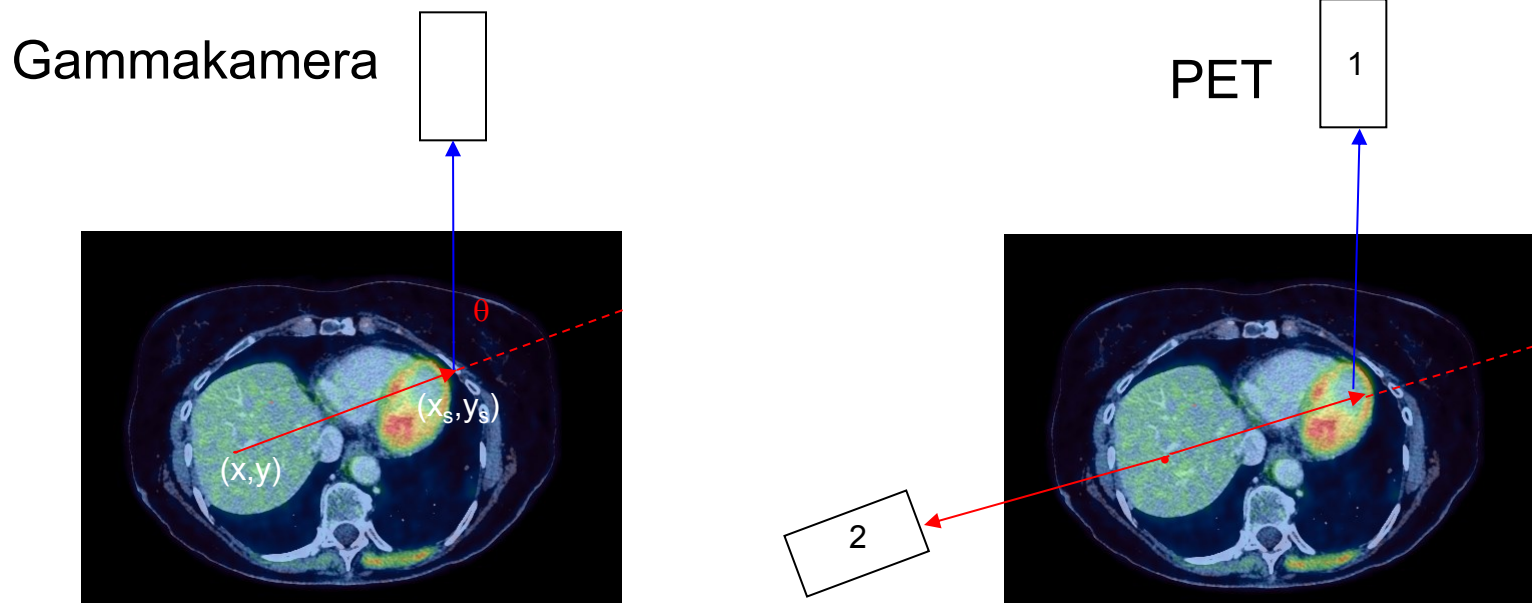
Multiplikation der PET-Sinogramme mit den  $acf$

$$m_i^{ac} = m_i \cdot acf$$

$$a_j^{(k+1)} = a_j^{(k)} \cdot \frac{1}{\sum_i w_{ij}} \cdot \sum_i w_{ij} \cdot \frac{m_i^{ac}}{n_i^{(k)}}$$

$$f = f_1 \cdot f_2 = \exp \left[ - \int_{\text{Detektor1}}^{\text{Detektor2}} \mu(x', y') dL \right]$$

# Quantifizierende Bildgebung: Streuung



Wahrscheinlichkeit  $p_s$  für die Streuung 1. Ordnung bei  $(x_s, y_s)$  unter dem Winkel  $\theta$

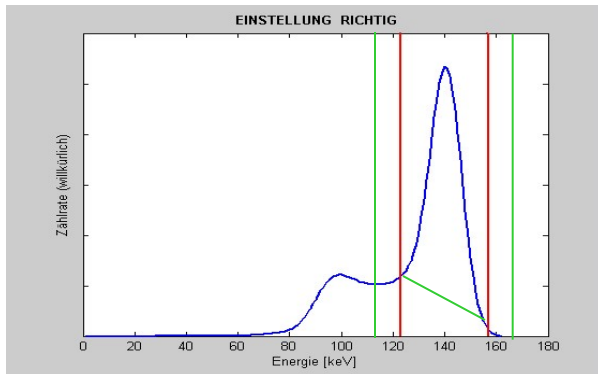
$$p_s \sim \frac{\mu(x_s, y_s)}{r^2} \cdot \exp\left(-\int_{(x,y)}^{(x_s, y_s)} \mu(x', y') dL\right) \cdot \exp\left(-\int_{(x_s, y_s)}^{\text{Detektor}} \mu(x', y') dL'\right) \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta)$$

Analytische Lösung nicht möglich; aber Näherungen für die 1. Ordnung in der Streuung.

# Quantifizierende Bildgebung: Streukorrektur

## Gammakamera

### Triple-Energy-Window



Messung in 3 Energiefenstern und Interpolation des Streustrahlanteils im Photopeakbereich. Anschließend Subtraktion. Aus der Skizze

$$N_{scatter} = \frac{1}{2} \left( \frac{N_{down}}{\Delta E_{down}} + \frac{N_{up}}{\Delta E_{up}} \right) \cdot \Delta E_{photo}$$

Einfach implementierbar

Ungenau aber brauchbar

## PET

Modellbasierte Korrektur

(Ollinger et.al, Werling et.al.)

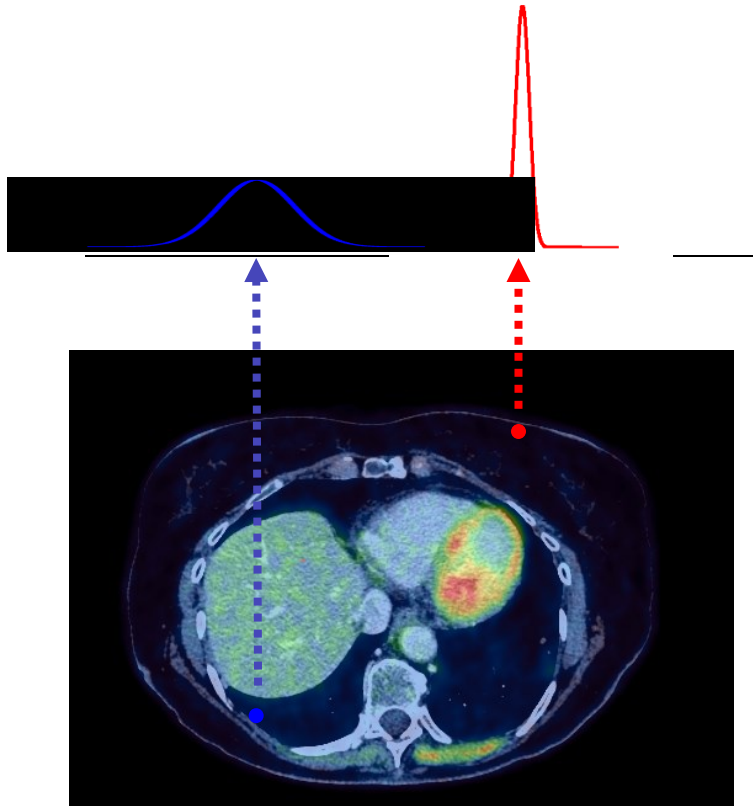
Voraussetzung:  $\mu$ -map

- Monte-Carlo basiert
- Halbanalytisch
- ausgewählte Streuzentren
- anschließend Interpolation

„gute“ Näherung für Streuung 1. Ordnung

für SPECT nicht geeignet  
(Mehrfachstreuung)

# Quantifizierende Bildgebung: Auflösung (PSF)



Korrektur:

Berechnung der PSF aller Bildpunkte (Berechnung der Abbildungswahrscheinlichkeiten  $p$ )

Speichern in einem Lookup-Table (LUT)

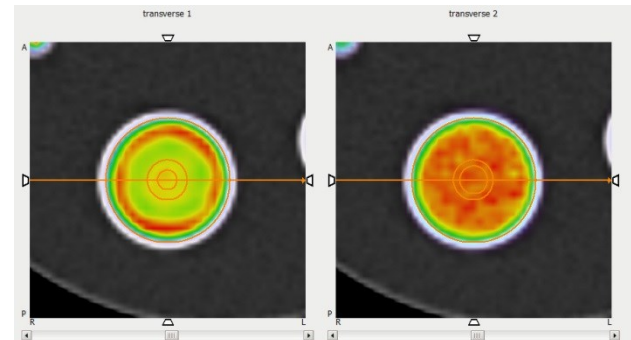
Einbinden der  $p$  in die iterative Schleife:  $p \rightarrow w_{ij}$

oder:

Iterative Dekonvolution im postprocessing

→ gute Auflösung, gute Kontraste

→ aber: Artefakte (Gibbs-Oszillationen)



# Meßtechniken und Aktivitätsmessung

- **Messsonde**
  - einfache Kalibrierung Zählrate → Aktivität
  - Nur Biokinetik möglich. Einfluss benachbarter Organe nicht bekannt (Blut, Speicheldrüsen)
- **einfache planare Szintigraphie und Ganzkörperszintigraphie**
  - Biodistribution über den ganzen Körper
  - Schwächungskorrektur (SK) i.A. nicht möglich. Aktivitätszuordnung ?
- **Conjugate Counting (planar und Ganzkörper)**
  - Biodistribution über den ganzen Körper
  - Näherung für die Schwächungskorrektur (SK) möglich.
- **SPECT**
  - Biodistribution + SK
  - zeitaufwendig
- **PET**
  - Biodistribution+SK + hohe Empfindlichkeit und Auflösung
  - zu teuer
  - Ungenügende Substitution von Therapienukliden

# Quantifizierende Bildgebung: das 2D-Problem

Aktivitätsverteilung  $a(x,y)$  und Schwächungsverteilung  $\mu(x,y)$   
sind unbekannt  
ohne Schwächung:

$$A = N_1(x) = N_2(x) = \int_0^L dy a(x,y)$$

mit Schwächung

$$N_1(x) = \int_0^L dy a(x,y) \cdot \exp\left(-\int_y^L dy' \mu(x,y')\right)$$

$$N_2(x) = \int_0^L dy a(x,y) \cdot \exp\left(-\int_0^y dy' \mu(x,y')\right)$$

Beziehung zwischen  $A$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  ?

Sonderfall:  $a(x,y) = a \cdot \delta(y - y_0)$  und  $\mu(x,y') = \mu = \text{constans}$ , dann ist

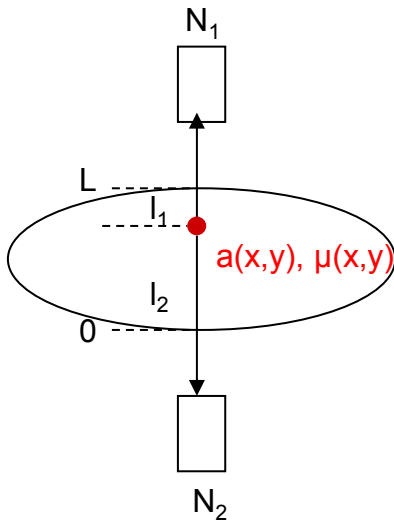
$$A = a$$

$$N_1(x) = a \cdot \int_0^L dy \delta(y - y_0) \exp(-\mu(L - y)) = a \cdot \exp(-\mu l_1)$$

$$N_2(x) = a \cdot \int_0^L dy \delta(y - y_0) \exp(-\mu y) = a \cdot \exp(-\mu l_2)$$

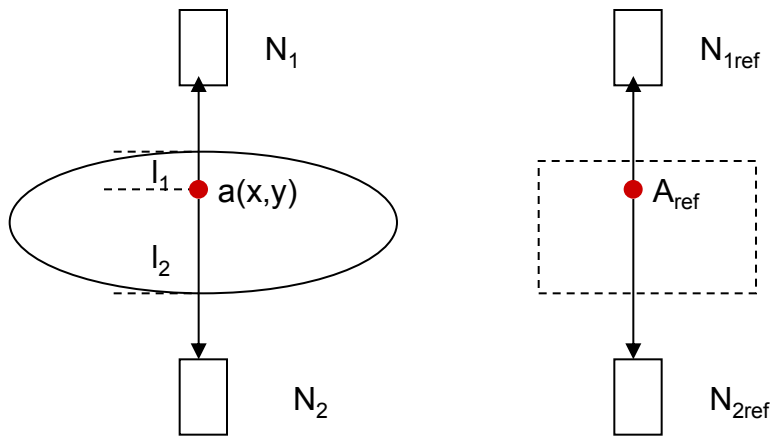
$$\Rightarrow N_1(x) \cdot N_2(x) = a^2 \cdot \exp(-\mu L) \Rightarrow a \sim \sqrt{N_1(x) \cdot N_2(x)}$$

$\Rightarrow$  Lösung durch Bildung des geometrischen Mittels



# Quantifizierende Bildgebung: Näherungslösungen für das 2D-Problem

- Conjugate Counting und Mittelwertbildung
  - Referenzmessung mit bekannter Aktivität  $A_{\text{ref}}$
  - Nachteil: Schwächung nicht ans Objekt angepasst



$$A_{\text{ref}} = \text{cal} \cdot \sqrt{N_{1\text{ref}} \cdot N_{2\text{ref}}}$$

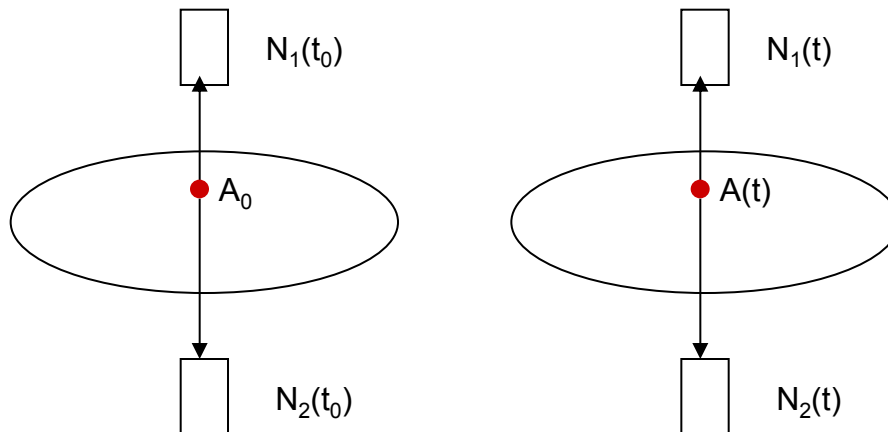
$$\Rightarrow a(x,y) \approx \text{cal} \cdot \sqrt{N_1 \cdot N_2}$$

oder

$$A = \int a(x,y) dy \approx \text{cal} \cdot \sqrt{N_1 \cdot N_2}$$

# Quantifizierende Bildgebung: Näherungslösungen für das 2D-Problem

- Conjugate Counting und Mittelwertbildung
  - Referenzmessung des Objekts direkt nach Applikation
    - Gesamtmenge  $A_0$  ist bekannt
  - Vorteil: Schwächung berücksichtigt
  - Nachteil: Biodistribution vernachlässigt



$$A_0 = cal \cdot \sqrt{N_1(t_0) \cdot N_2(t_0)}$$

oder

$$A(t) \approx cal \cdot \sqrt{N_1(t) \cdot N_2(t)}$$

$$\{A(t) = cal(t) \cdot \sqrt{N_1(t) \cdot N_2(t)}\}$$

# Aktivitätsmessung bei ECT: What about PET ?

- Eigentlich Methode der Wahl:
  - hochempfindlich, hochauflösend
  - Alle Korrekturen sind möglich
    - Schwächung separierbar, deswegen analytische Korrektur
    - Streuung kann in guter Näherung auf die 1. Ordnung eingeschränkt werden
    - quantitatives Verfahren
- Einschränkungen im Fall der Bestrahlungsplanung
  - Verfügbarkeit des Scanners
  - Kosten der Radiopharmaka
  - geeignete Radiopharmaka nicht immer verfügbar
    - Bsp: [68-Ga]-Dotatate ↔ [177-Lu]-Dotatate, 124-I ↔ 131-I
  - intratherapeutische Kontrolle ??
  - Kurzlebigkeit der Positronenemitter

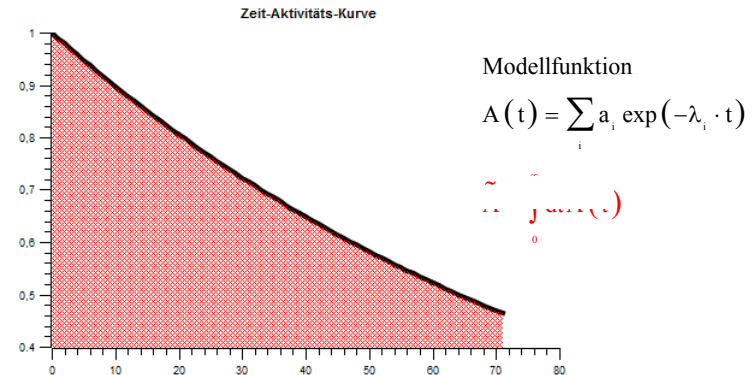
# MIRD\*: Die Selbstbestrahlung

\*Medical Internal Radiation Dose



Voraussetzungen:

- Masse  $m$
- Zeit-Aktivitäts-Kurve
- reiner  $\beta$ -Strahler
- kein Metabolismus



Fläche unter der Kurve  $(0 - \infty) =$   
Anzahl aller Kernzerfälle nach Applikation =  
**kumulierte Aktivität  $\widetilde{A}$  [ $Bq \cdot s$ ]**

Pro Kernzerfall wird eine definierte Menge  
Energie  $e$  emittiert

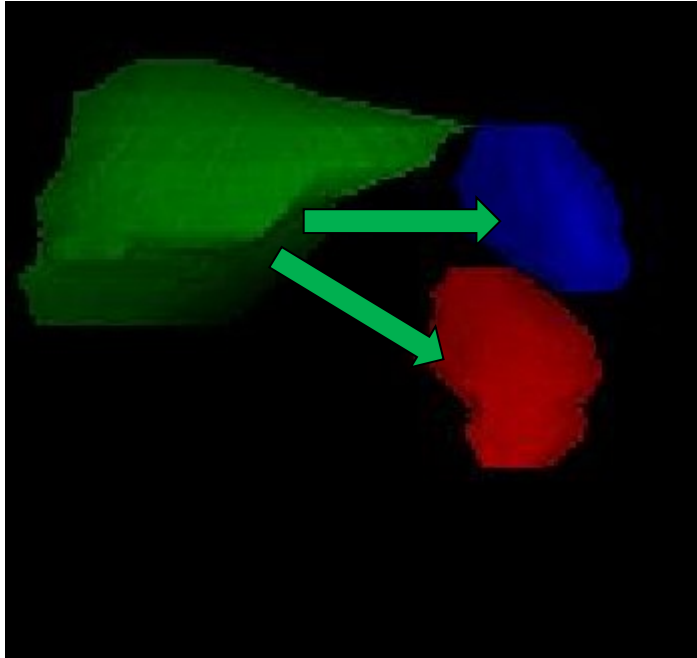
Gesamtenergie  $E = e \cdot \widetilde{A}$

Dosis  $D = \frac{E}{m} = \frac{e \cdot \widetilde{A}}{m}$

Spezifische Dosis  $d = \frac{D}{A_{app}} = \frac{e}{m} \cdot \frac{\widetilde{A}}{A_{app}} = \frac{e}{m} \cdot \tau$

**$\tau$ : Verweilzeit im Organ**

# MIRD: Die Fremdbestrahlung



Voraussetzungen:

- Massen  $m$
- Zeit-Aktivitäts-Kurve
- $\gamma$ - und  $\beta$ -Strahler
- Quellorgan Leber
- Zielorgane Niere, Milz

$$d(\text{Niere} \leftarrow \text{Leber}) \sim \frac{e_{\text{Leber}}}{m_{\text{Niere}}} \cdot \tau_{\text{Leber}}$$

$$d(\text{Niere} \leftarrow \text{Leber}) = \varphi(\text{Niere} \leftarrow \text{Leber}) \cdot \frac{e_{\text{Leber}}}{m_{\text{Niere}}} \cdot \tau_{\text{Leber}}$$

$\varphi(\text{Niere} \leftarrow \text{Leber})$ : absorbierter Bruchteil

$$\varphi(\text{Niere} \leftarrow \text{Leber}) = \frac{\text{Energie absorbiert in der Niere}}{\text{Energie emittiert in der Leber}}$$

Definition:  $S$  – Wert ( $S$  – Value)

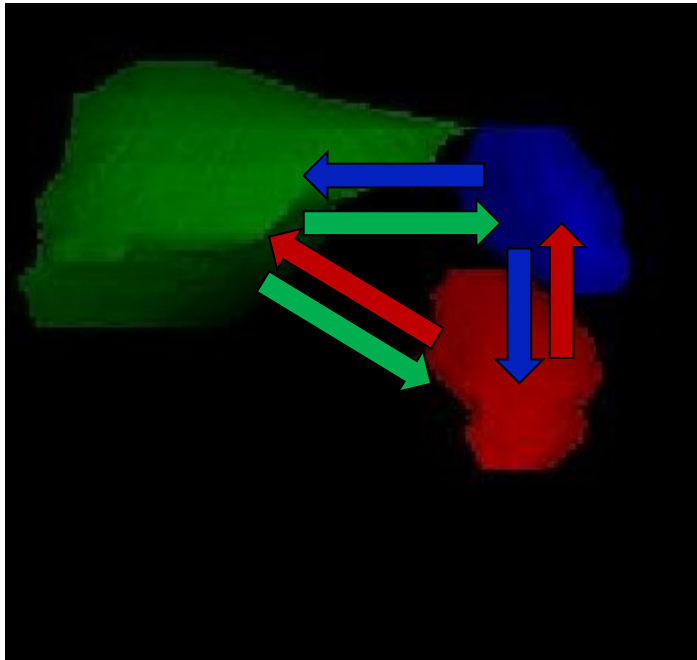
$$S(\text{Niere} \leftarrow \text{Leber}) = \varphi(\text{Niere} \leftarrow \text{Leber}) \cdot \frac{e_{\text{Leber}}}{m_{\text{Niere}}}$$

$$d(\text{Niere} \leftarrow \text{Leber}) = S(\text{Niere} \leftarrow \text{Leber}) \cdot \tau_{\text{Leber}}$$

und analog

$$d(\text{Milz} \leftarrow \text{Leber}) = S(\text{Milz} \leftarrow \text{Leber}) \cdot \tau_{\text{Leber}}$$

# MIRD: Das gesamte Konzept



$$d(\text{Leber}) = d(\text{Leber} \leftarrow \text{Leber}) + d(\text{Leber} \leftarrow \text{Niere}) + d(\text{Leber} \leftarrow \text{Milz})$$

$$d(\text{Milz}) = d(\text{Milz} \leftarrow \text{Leber}) + d(\text{Milz} \leftarrow \text{Niere}) + d(\text{Milz} \leftarrow \text{Milz})$$

$$d(\text{Niere}) = d(\text{Niere} \leftarrow \text{Leber}) + d(\text{Niere} \leftarrow \text{Niere}) + d(\text{Niere} \leftarrow \text{Milz})$$

verallgemeinert

$$d(\text{Ziel}) = \sum_{\text{Quelle}} S(\text{Ziel} \leftarrow \text{Quelle}) \cdot \tau_{\text{Quelle}}$$

Messung

- Tabellenwerk
- Programme
  - Olinda, MIRDOSE

Voraussetzungen:

- Massen  $m$
- Zeit-Aktivitäts-Kurve
- $\gamma$ - und  $\beta$ -Strahler
- Quellorgane Leber, Niere, Milz
- Zielorgane Leber, Niere, Milz

# MIRD: Bestimmung der absorbierten Energie

Ausgangspunkt: bekannte Biokinetik

$$A_h(t) = \sum_{i=1}^n A_{hi} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t)$$

Definition der kumulierten Aktivität:

$$\tilde{A}_h = \int_0^{\infty} A_h(t) dt \quad (\text{Gesamtzahl aller Kernzerfälle nach Verabreichung})$$

Pro Kernzerfall wird eine bestimmte Energiemenge  $\Delta E$  freigesetzt

$$\Rightarrow E_{\text{total}} = \tilde{A}_h \cdot E$$

$$\text{für reine } \beta^-, \beta^+ : E_{\text{total}} = \tilde{A}_h \cdot E_{\beta, \text{ave}}$$

$$\text{für reine } \gamma : E_{\text{total}} = \tilde{A}_h \cdot E_{\gamma}$$

Finden beide Zerfälle und unterschiedliche  $\gamma$ -Emissionen statt:

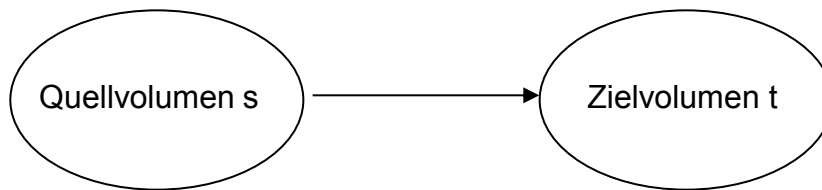
$$E_{\text{total}} = \tilde{A}_h \left( \sum_{i=1}^N \eta_i \cdot E_{\gamma i} + E_{\beta, \text{ave}} \right) \quad (\eta_i : \text{branching-ratio})$$

$$E_{\text{total}} = \tilde{A}_h \cdot E_{\text{eff}}$$

$$E_{h, \text{abs}} = \phi \cdot E_{\text{total}} \quad (\phi : \text{absorbierter Bruchteil})$$

# MIRD\*: Der absorbierte Bruchteil $\phi$ emittierter Strahlung

## Unterscheidung



Definition :

$$\phi(t \leftarrow s) = \frac{\text{Energiebetrag absorbiert im Zielvolumen } t}{\text{Energiebetrag emittiert im Quellvolumen } s} = \frac{E_{t,\text{abs}}}{E_{s,\text{total}}}$$

Beispiele :

reiner  $\beta$ -Strahler, Anreicherung nur in der Leber

$$\phi(\text{Leber} \leftarrow \text{Leber}) = 1$$

$$\phi(\text{andere Organe} \leftarrow \text{Leber}) = 0$$

reiner  $\gamma$ -Strahler, Anreicherung in der Leber

$$\phi(\text{Leber} \leftarrow \text{Leber}) = 0,16$$

$$\phi(\text{Milz} \leftarrow \text{Leber}) = 0,00062$$

# MIRD: spezifische absorbierte Fraktion und Dosis

Spezifische absorbierte Fraktion  $\Phi$

$$\Phi(t \leftarrow s) = \frac{\varphi(t \leftarrow s)}{m_t}$$

S – Wert

$$S(t \leftarrow s) = \Phi(t \leftarrow s) \cdot E_{\text{eff}}$$

$$E_{\text{eff}} = \eta_{\beta} \cdot E_{\beta, \text{ave}} + \sum_{i=1}^N \eta_i \cdot E_{\gamma i}$$

$\Rightarrow$  Dosis im Zielorgan

$$D(t \leftarrow s) = \tilde{A}_s \cdot S(t \leftarrow s)$$

$$\frac{D(t \leftarrow s)}{A_{\text{admin}}} = \tau_s \cdot S(t \leftarrow s)$$

$$\tau_s = \frac{\tilde{A}_s}{A_{\text{admin}}} \text{ Verweilzeit im Quellvolumen}$$

$$\frac{D(t)}{A_{\text{admin}}} = \sum_s \tau_s \cdot S(t \leftarrow s)$$

S-Werte sind tabelliert für Standardgeometrien:

- Erwachsener (male)
- Erwachsener (female)
- Kind 15a
- Kind 10a
- Kind 5a
- Kind 1a
- Neugeborenes
- Schwangere 3 Monate
- Schwangere 6 Monate
- Schwangere 9 Monate

Oder über kommerzielle Software

- OLINDA
- MIRDOSE

# Beispiel: Standardphantome

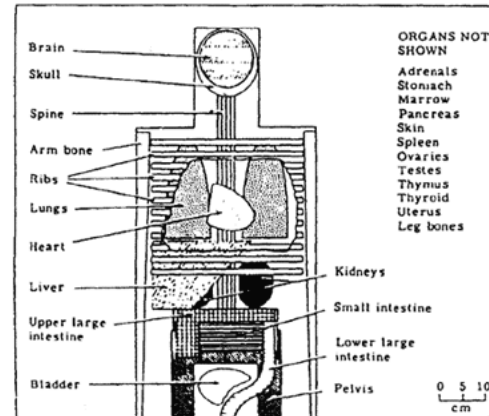
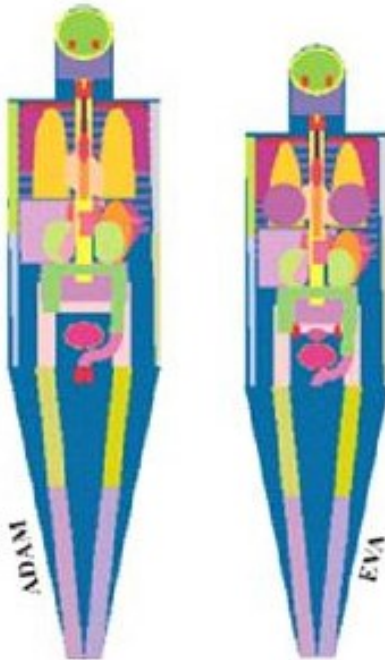
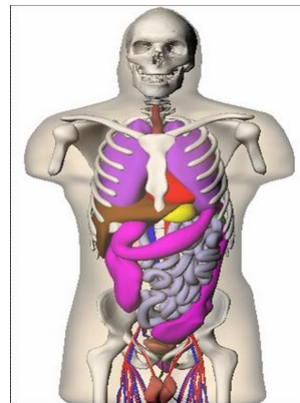
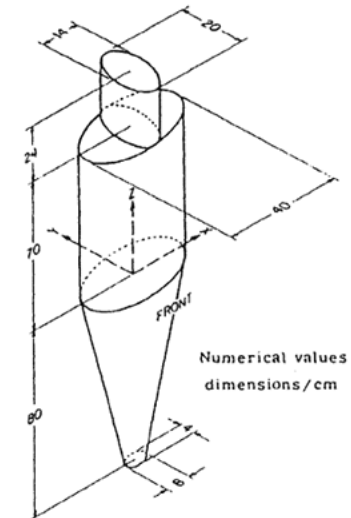


Fig. B.9. (a) Disposition of organs in human phantom of Snyder *et al.* (1969). This shows the anterior view of principal organs in head and trunk of phantom.



# Beispiel: Standardphantom Adam

Phantom organ masses (g) for the Adult Male

| Next Phantom            | Previous Phantom   |
|-------------------------|--------------------|
| 16.3                    | Adrenals           |
| 1420.0                  | Brain              |
| 351.0                   | Breasts            |
| 10.5                    | Gallbladder Wall   |
| 167.0                   | LLI Wall           |
| 677.0                   | Small Intestine    |
| 158.0                   | Stomach Wall       |
| 220.0                   | ULI Wall           |
| 316.0                   | Heart Wall         |
| 299.0                   | Kidneys            |
| 1910.0                  | Liver              |
| 1000.0                  | Lungs              |
| 28000.0                 | Muscle             |
| 8.71                    | Ovaries            |
| Alpha Weight Factor     | Beta Weight Factor |
| 5.0                     | 1.0                |
| Multiply all masses by: | 1.0                |

\*\* = Modified by user

Hit <ret> to see changes immediately, or just DONE at end

|                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| 94.3                 | Pancreas             |
| 1120.0               | Red Marrow           |
| 120.0                | Osteogenic Cells     |
| 3010.0               | Skin                 |
| 183.0                | Spleen               |
| 39.1                 | Testes               |
| 20.9                 | Thymus               |
| 20.7                 | Thyroid              |
| 47.6                 | Urinary Bladder Wall |
| 79.0                 | Uterus               |
| 0.0                  | Fetus                |
| 0.0                  | Placenta             |
| 73700.0              | Total Body           |
| Photon Weight Factor | Reset organ values   |
| 1.0                  | DONE                 |

# Beispiel: S-Werte für $^{131}\text{I}$

$^{131}\text{I}$

S-Faktor = Absorptionsdosis pro kumulierter Aktivität [ $\text{rad}/\mu\text{Ci} \cdot \text{h}$ ] für  
 $T_p = 193 \text{ h}$

| Zielorgane              | Quellregionen    |                   |                   |                           |                                     |                                      |         |         |         |                               |
|-------------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|-------------------------------|
|                         | NEBEN-<br>NIEREN | BLASE<br>(Inhalt) | Magen-Darm-Trakt  |                           |                                     |                                      | NIEREN  | LEBER   | LUNGE   | ANDERE<br>GEWEBE<br>(Muskeln) |
|                         |                  |                   | MAGEN<br>(Inhalt) | DÜNN-<br>DARM<br>(Inhalt) | OBERER<br>DICK-<br>DARM<br>(Inhalt) | UNTERER<br>DICK-<br>DARM<br>(Inhalt) |         |         |         |                               |
| NEBENNIEREN             | 3,1E-02          | 6,1E-07           | 6,3E-06           | 3,9E-06                   | 2,7E-06                             | 1,4E-06                              | 3,2E-05 | 1,4E-05 | 6,9E-06 | 4,2E-06                       |
| BLASENWAND              | 3,3E-07          | 1,2E-03           | 1,0E-06           | 8,5E-06                   | 5,6E-06                             | 1,7E-05                              | 1,0E-06 | 7,4E-07 | 1,8E-07 | 5,0E-06                       |
| SKELETT (insgesamt)     | 4,1E-06          | 1,8E-06           | 1,8E-06           | 2,5E-06                   | 2,2E-06                             | 3,2E-06                              | 3,0E-06 | 2,3E-06 | 3,0E-06 | 3,0E-06                       |
| MAGENWAND               | 8,2E-06          | 8,8E-07           | 9,7E-04           | 9,9E-06                   | 1,0E-05                             | 5,0E-06                              | 9,4E-06 | 5,4E-06 | 5,2E-06 | 3,9E-06                       |
| DÜNNDARM                | 2,6E-06          | 7,6E-06           | 7,3E-06           | 6,0E-04                   | 4,6E-05                             | 2,6E-05                              | 7,8E-06 | 4,6E-06 | 6,9E-07 | 4,4E-06                       |
| OBERER DICKDARM (Wand)  | 2,8E-06          | 6,6E-06           | 9,5E-06           | 6,5E-05                   | 1,1E-03                             | 1,2E-05                              | 8,1E-06 | 7,0E-06 | 9,1E-07 | 4,6E-06                       |
| UNTERER DICKDARM (Wand) | 8,4E-07          | 2,0E-05           | 3,6E-06           | 1,9E-05                   | 8,4E-06                             | 1,7E-03                              | 2,4E-06 | 8,1E-07 | 2,6E-07 | 4,8E-06                       |
| NIEREN                  | 3,2E-05          | 9,6E-07           | 9,5E-06           | 8,7E-06                   | 7,7E-06                             | 2,5E-06                              | 1,5E-03 | 1,1E-05 | 2,7E-06 | 4,0E-06                       |
| LEBER                   | 1,4E-05          | 7,2E-07           | 5,6E-06           | 5,1E-06                   | 7,1E-06                             | 9,0E-07                              | 1,1E-05 | 3,0E-04 | 6,8E-06 | 3,1E-06                       |
| LUNGE                   | 6,7E-06          | 1,1E-07           | 5,0E-06           | 8,5E-07                   | 8,9E-07                             | 2,8E-07                              | 2,5E-06 | 6,8E-06 | 4,5E-04 | 3,7E-06                       |
| ROTES MARK              | 7,5E-06          | 4,1E-06           | 3,2E-06           | 7,9E-06                   | 6,9E-06                             | 9,7E-06                              | 7,6E-06 | 3,3E-06 | 3,8E-06 | 4,1E-06                       |
| ANDERE GEWEBE (Muskeln) | 4,2E-06          | 5,0E-06           | 3,9E-06           | 4,4E-06                   | 4,1E-06                             | 4,8E-06                              | 4,0E-06 | 3,1E-06 | 3,7E-06 | 1,9E-05                       |
| EIERSTÖCKE              | 1,6E-06          | 1,9E-05           | 1,4E-06           | 2,7E-05                   | 3,4E-05                             | 5,0E-05                              | 3,4E-06 | 9,6E-07 | 4,0E-07 | 5,6E-06                       |
| PANKREAS                | 2,4E-05          | 7,9E-07           | 5,0E-05           | 5,8E-06                   | 5,8E-06                             | 2,0E-06                              | 1,8E-05 | 1,2E-05 | 7,5E-06 | 5,0E-06                       |
| HAUT                    | 1,8E-06          | 1,7E-06           | 1,5E-06           | 1,4E-06                   | 1,4E-06                             | 1,6E-06                              | 1,8E-06 | 1,6E-06 | 1,8E-06 | 2,4E-06                       |
| MILZ                    | 1,8E-05          | 5,6E-07           | 2,7E-05           | 4,4E-06                   | 3,7E-06                             | 2,5E-06                              | 2,4E-05 | 2,7E-06 | 6,2E-06 | 4,1E-06                       |
| HODEN                   | 1,7E-07          | 1,4E-05           | 1,3E-07           | 1,0E-06                   | 1,2E-06                             | 5,7E-06                              | 3,9E-07 | 3,0E-07 | 5,7E-08 | 3,4E-06                       |
| SCHILDDRÜSE             | 5,2E-07          | 2,1E-08           | 3,9E-07           | 9,5E-08                   | 1,0E-07                             | 4,1E-08                              | 2,4E-07 | 5,7E-07 | 3,0E-06 | 3,8E-06                       |
| GEBÄRMUTTER             | 3,4E-06          | 4,3E-05           | 2,4E-06           | 2,5E-05                   | 1,3E-05                             | 1,7E-05                              | 2,6E-06 | 1,2E-06 | 2,7E-07 | 5,9E-06                       |
| GESAMTKÖRPER            | 1,1E-05          | 5,9E-06           | 6,7E-06           | 1,0E-05                   | 8,2E-06                             | 8,8E-06                              | 1,1E-05 | 1,1E-05 | 9,9E-06 | 9,8E-06                       |

Anhang: S-Werte

# Beispiel: S-Werte für 131-I

| Zielorgane              | Quellregionen |           |            |             |            |         |         |         |              |               |
|-------------------------|---------------|-----------|------------|-------------|------------|---------|---------|---------|--------------|---------------|
|                         | EIER-STÖCKE   | PAN-KREAS | Skelett    |             |            | HAUT    | MILZ    | HODEN   | SCHILD-DRÜSE | GESAMT-KÖRPER |
|                         |               |           | ROTES MARK | KORTI-KALIS | SPON-GIOSA |         |         |         |              |               |
| NEBENNIEREN             | 1,4E-06       | 2,3E-05   | 6,1E-06    | 4,3E-06     | 4,3E-06    | 2,1E-06 | 1,8E-05 | 1,7E-07 | 5,2E-07      | 1,2E-05       |
| BLASENWAND              | 1,9E-05       | 5,0E-07   | 2,1E-06    | 1,6E-06     | 1,6E-06    | 1,7E-06 | 4,5E-07 | 1,4E-05 | 2,1E-08      | 1,1E-05       |
| SKELETT (insgesamt)     | 2,9E-06       | 2,8E-06   | 2,5E-05    | 9,2E-05     | 6,5E-05    | 2,4E-06 | 2,3E-06 | 2,0E-06 | 2,2E-06      | 1,0E-05       |
| MAGENWAND               | 2,3E-06       | 5,0E-05   | 2,9E-06    | 1,6E-06     | 1,6E-06    | 1,7E-06 | 2,7E-05 | 2,5E-07 | 2,6E-07      | 1,1E-05       |
| DÜNNDARM                | 3,3E-05       | 5,1E-06   | 7,4E-06    | 2,2E-06     | 2,2E-06    | 1,5E-06 | 3,9E-06 | 1,4E-06 | 3,4E-08      | 1,1E-05       |
| OBERER DICKDARM (Wand)  | 3,1E-05       | 6,1E-06   | 5,8E-06    | 2,0E-06     | 2,0E-06    | 1,5E-06 | 3,7E-06 | 9,7E-07 | 3,5E-08      | 1,1E-05       |
| UNTERER DICKDARM (Wand) | 4,0E-05       | 1,5E-06   | 8,4E-06    | 2,8E-06     | 2,8E-06    | 1,6E-06 | 1,9E-06 | 7,8E-06 | 3,4E-08      | 1,1E-05       |
| NIEREN                  | 3,0E-06       | 1,8E-05   | 6,5E-06    | 2,6E-06     | 2,6E-06    | 2,0E-06 | 2,4E-05 | 2,4E-07 | 1,4E-07      | 1,1E-05       |
| LEBER                   | 1,7E-06       | 1,2E-05   | 2,8E-06    | 1,9E-06     | 1,9E-06    | 1,8E-06 | 3,0E-06 | 1,4E-07 | 4,0E-07      | 1,1E-05       |
| LUNGE                   | 2,7E-07       | 6,8E-06   | 3,4E-06    | 2,8E-06     | 2,8E-06    | 1,9E-06 | 6,2E-06 | 4,0E-08 | 2,9E-06      | 1,0E-05       |
| ROTES MARK              | 9,8E-06       | 5,4E-06   | 2,3E-04    | 1,0E-05     | 1,0E-04    | 2,3E-06 | 3,5E-06 | 1,6E-06 | 2,4E-06      | 1,1E-05       |
| ANDERE GEWEBE (Muskeln) | 5,6E-06       | 5,0E-06   | 3,6E-06    | 3,0E-06     | 3,0E-06    | 2,4E-06 | 4,1E-06 | 3,4E-06 | 3,8E-06      | 9,8E-06       |
| EIERSTÖCKE              | 3,9E-02       | 1,1E-06   | 8,4E-06    | 2,6E-06     | 2,6E-06    | 1,1E-06 | 2,4E-06 | 0,0     | 4,1E-08      | 1,1E-05       |
| PANKREAS                | 1,5E-06       | 4,7E-03   | 4,6E-06    | 2,8E-06     | 2,8E-06    | 1,6E-06 | 5,4E-05 | 1,6E-07 | 2,4E-07      | 1,1E-05       |
| HAUT                    | 1,4E-06       | 1,4E-06   | 2,0E-06    | 2,3E-06     | 2,3E-06    | 1,6E-04 | 1,6E-06 | 4,3E-06 | 2,4E-06      | 8,3E-06       |
| MILZ                    | 1,8E-06       | 5,4E-05   | 2,4E-06    | 2,2E-06     | 2,2E-06    | 1,8E-06 | 2,6E-03 | 2,3E-07 | 3,6E-07      | 1,1E-05       |
| HODEN                   | 0,0           | 2,0E-07   | 1,1E-06    | 1,7E-06     | 1,7E-06    | 2,6E-06 | 2,4E-07 | 1,3E-02 | 7,2E-09      | 1,0E-05       |
| SCHILDDRÜSE             | 4,1E-08       | 4,7E-07   | 2,3E-06    | 2,8E-06     | 2,8E-06    | 2,3E-06 | 3,8E-07 | 7,2E-09 |              | 9,7E-06       |
| GEBÄRMUTTER             | 5,4E-05       | 1,8E-06   | 5,8E-06    | 1,7E-06     | 1,7E-06    | 1,4E-06 | 1,2E-06 | 0,0     | 3,8E-08      | 1,1E-05       |
| GESAMTKÖRPER            | 1,2E-05       | 1,1E-05   | 1,0E-05    | 9,9E-06     | 9,9E-06    | 8,3E-06 | 1,1E-05 | 9,8E-06 | 9,5E-06      | 9,9E-06       |

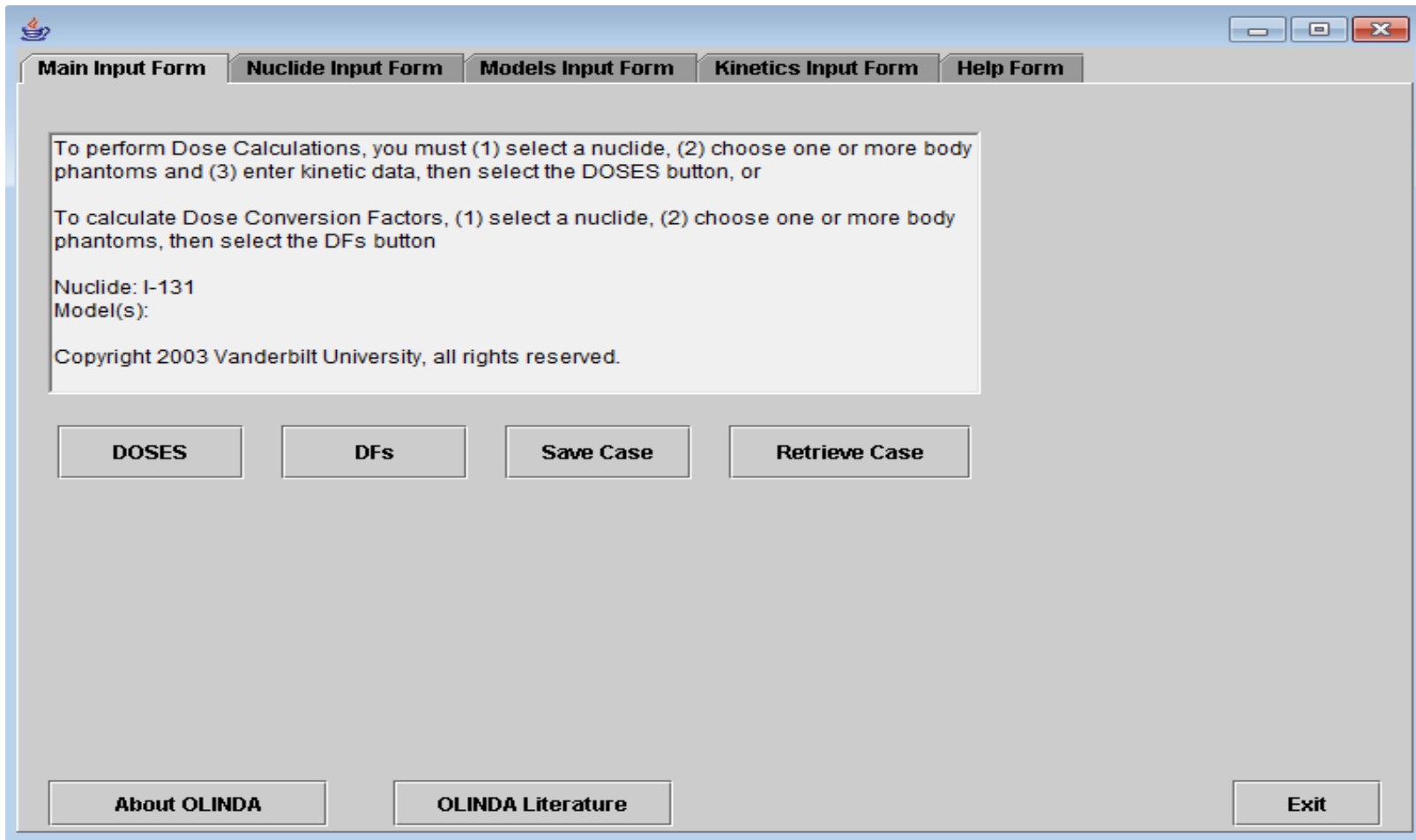
Anhang: S-Werte

# Beispiel: Tabellenwerte für die Dosis

| (Adults): dose per unit administered activity organs receiving the highest radiation dose, gonad dose and the effective dose for some commonly used diagnostic and therapeutic radiopharmaceuticals |            |         |          |            |              |          |            |              |          |              |    |          |             |          |                                             |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------|----------|------------|--------------|----------|------------|--------------|----------|--------------|----|----------|-------------|----------|---------------------------------------------|----------|
| Radiopharmaceutical                                                                                                                                                                                 | First      |         |          | Second     |              |          | Third      |              |          | Gonadal Dose |    |          | Marrow Dose |          | Effective Dose or Effective Dose Equivalent |          |
|                                                                                                                                                                                                     | Organ Dose |         |          | Organ Dose |              |          | Organ Dose |              |          | Gonadal Dose |    |          | Marrow Dose |          | Effective Dose or Effective Dose Equivalent |          |
|                                                                                                                                                                                                     | mGy/MBq    | Organ   | rad/mCi  | mGy/MBq    | Organ        | rad/mCi  | mGy/MBq    | Organ        | rad/mCi  | mGy/MBq      |    | rad/mCi  | mGy/MBq     | rad/mCi  | mSv/MBq                                     | rem/mCi  |
| I-131 Sodium Iodide (5% Uptake)                                                                                                                                                                     | 7,20E+01   | Thyroid | 2,66E+02 | 5,80E-01   | Bladder Wall | 2,15E+00 | 4,50E-01   | Stomach Wall | 1,67E+00 | 4,40E-02     | ov | 1,63E-01 | 3,80E-02    | 1,41E-01 | 2,30E+00                                    | 8,51E+00 |
|                                                                                                                                                                                                     |            |         |          |            |              |          |            |              |          | 2,90E-02     | ts | 1,07E-01 |             |          |                                             |          |
| I-131 Sodium Iodide (15% Uptake)                                                                                                                                                                    | 2,10E+02   | Thyroid | 7,77E+02 | 5,20E-01   | Bladder Wall | 1,92E+00 | 4,60E-01   | Stomach Wall | 1,70E+00 | 4,30E-02     | ov | 1,59E-01 | 5,40E-02    | 2,00E-01 | 6,60E+00                                    | 2,44E+01 |
|                                                                                                                                                                                                     |            |         |          |            |              |          |            |              |          | 2,80E-02     | ts | 1,04E-01 |             |          |                                             |          |
| I-131 Sodium Iodide (25% Uptake)                                                                                                                                                                    | 3,60E+02   | Thyroid | 1,33E+03 | 4,60E-01   | Bladder Wall | 1,70E+00 | 4,60E-01   | Stomach Wall | 1,70E+00 | 4,30E-02     | ov | 1,59E-01 | 7,00E-02    | 2,59E-01 | 1,10E+01                                    | 4,07E+01 |
|                                                                                                                                                                                                     |            |         |          |            |              |          |            |              |          | 2,70E-02     | ts | 9,99E-02 |             |          |                                             |          |
| I-131 Sodium Iodide (35% Uptake)                                                                                                                                                                    | 5,00E+02   | Thyroid | 1,85E+03 | 4,60E-01   | Stomach Wall | 1,70E+00 | 4,00E-01   | Bladder Wall | 1,48E+00 | 4,20E-02     | ov | 1,55E-01 | 8,60E-02    | 3,18E-01 | 1,50E+01                                    | 5,55E+01 |
|                                                                                                                                                                                                     |            |         |          |            |              |          |            |              |          | 2,60E-02     | ts | 9,62E-02 |             |          |                                             |          |
| I-131 Sodium Iodide (45% Uptake)                                                                                                                                                                    | 6,40E+02   | Thyroid | 2,37E+03 | 4,60E-01   | Stomach Wall | 1,70E+00 | 3,40E-01   | Bladder Wall | 1,26E+00 | 4,20E-02     | ov | 1,55E-01 | 1,00E-01    | 3,70E-01 | 1,90E+01                                    | 7,03E+01 |
|                                                                                                                                                                                                     |            |         |          |            |              |          |            |              |          | 2,60E-02     | ts | 9,62E-02 |             |          |                                             |          |
| I-131 Sodium Iodide (55% Uptake)                                                                                                                                                                    | 7,90E+02   | Thyroid | 2,92E+03 | 4,60E-01   | Stomach Wall | 1,70E+00 | 2,90E-01   | Bladder Wall | 1,07E+00 | 4,10E-02     | ov | 1,52E-01 | 1,20E-01    | 4,44E-01 | 2,40E+01                                    | 8,88E+01 |
|                                                                                                                                                                                                     |            |         |          |            |              |          |            |              |          | 2,60E-02     | ts | 9,62E-02 |             |          |                                             |          |

# OLINDA\* : Main Input

(\*Organ Level Internal Dose Assessment)



The screenshot shows the 'Main Input Form' window of the OLINDA software. The window has a title bar with standard Windows controls (minimize, maximize, close) and a menu bar with the following options: Main Input Form, Nuclide Input Form, Models Input Form, Kinetics Input Form, and Help Form. The main content area contains a text box with instructions: 'To perform Dose Calculations, you must (1) select a nuclide, (2) choose one or more body phantoms and (3) enter kinetic data, then select the DOSES button, or To calculate Dose Conversion Factors, (1) select a nuclide, (2) choose one or more body phantoms, then select the DFs button'. Below this text, it displays 'Nuclide: I-131' and 'Model(s):'. At the bottom of the text box, it says 'Copyright 2003 Vanderbilt University, all rights reserved.' Below the text box, there are four buttons: 'DOSES', 'DFs', 'Save Case', and 'Retrieve Case'. At the bottom of the window, there are three buttons: 'About OLINDA', 'OLINDA Literature', and 'Exit'.

**Main Input Form** | Nuclide Input Form | Models Input Form | Kinetics Input Form | Help Form

To perform Dose Calculations, you must (1) select a nuclide, (2) choose one or more body phantoms and (3) enter kinetic data, then select the DOSES button, or  
To calculate Dose Conversion Factors, (1) select a nuclide, (2) choose one or more body phantoms, then select the DFs button

Nuclide: I-131  
Model(s):

Copyright 2003 Vanderbilt University, all rights reserved.

**DOSES**   **DFs**   **Save Case**   **Retrieve Case**

**About OLINDA**   **OLINDA Literature**   **Exit**

# OLINDA\* : Nuklidauswahl

(\*Organ Level Internal Dose Assessment)

The screenshot shows the OLINDA software interface with the 'Nuclide Input Form' tab selected. The interface includes a periodic table on the left and a list of nuclides on the right. The nuclide I-131 is selected. A text box provides a URL for decay data.

| Element | Nuclide |
|---------|---------|
| Fm      | I-120   |
| Fr      | I-120   |
| Ga      | I-121   |
| Gd      | I-122   |
| Ge      | I-123   |
| H       | I-124   |
| Hf      | I-125   |
| Hg      | I-126   |
| Ho      | I-128   |
| I       | I-129   |
| In      | I-130   |
| Ir      | I-131   |
| K       | I-132m  |
| Kr      | I-132   |
| La      | I-133   |
| Lu      | I-134   |

To see a listing of the decay data for any element, go to <http://hps.org/publicinformation/radardecaydata.cfm>

# OLINDA\* : Model Input

(\*Organ Level Internal Dose Assessment)

**Main Input Form** | Nuclide Input Form | Models Input Form | Kinetics Input Form | Help Form

|                                                 |                          |
|-------------------------------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> Adult Male             | <b>Prostate Gland</b>    |
| <input type="checkbox"/> Adult Female           | <b>Peritoneal Cavity</b> |
| <input type="checkbox"/> 15-year-old            | <b>Spheres</b>           |
| <input type="checkbox"/> 10-year-old            | <b>Head Model</b>        |
| <input type="checkbox"/> 5-year-old             | <b>Kidney Model</b>      |
| <input type="checkbox"/> 1-year-old             |                          |
| <input type="checkbox"/> Newborn                |                          |
| <input type="checkbox"/> 3 month pregnant woman |                          |
| <input type="checkbox"/> 6 month pregnant woman |                          |
| <input type="checkbox"/> 9 month pregnant woman |                          |

# OLINDA\* : Kinetics Input

(\*Organ Level Internal Dose Assessment)

The previously used quantity of residence time was confusing to many users. This was only a measure of the number of disintegrations occurring in a source organ. This code works with the number of disintegrations per unit activity administered (uCi-hr/uCi or Bq-hr/Bq), either entered directly, or as calculated from formulas. This is mathematically equivalent to residence times, but is perhaps easier to understand. You may also enter data from a kinetic model, involving values of activity and half-lives, and fit them to a function.

Enter the number of disintegrations for the source organs, or use some of the special options below.

Note: for the Tot Body/Rem. Body field - enter value for Rem. Body if any other organ has been chosen.

|          |        |                   |        |
|----------|--------|-------------------|--------|
| Adrenals | 0.0000 | Ovaries           | 0.0000 |
| Brain    | 0.0000 | Pancreas          | 0.0000 |
| Breasts  | 0.0000 | Red Mar.          | 0.0000 |
| GB Cont  | 0.0000 | CortBone          | 0.0000 |
| LLI Cont | 0.0000 | TrabBone          | 0.0000 |
| SI Cont  | 0.0000 | Spleen            | 0.0000 |
| StomCont | 0.0000 |                   |        |
| ULI Cont | 0.0000 | Thymus            | 0.0000 |
| HeartCon | 0.0000 | Thyroid           | 0.0000 |
| Hrt Wall | 0.0000 | UB Cont           | 0.0000 |
| Kidneys  | 0.0000 | Uterus            | 0.0000 |
| Liver    | 0.0000 |                   |        |
| Lungs    | 0.0000 |                   |        |
| Muscle   | 0.0000 | Tot Body/Rem Body | 0.0000 |

Get setup (stp) file

☒ Bone Activity on Bone Surfaces

☐ Bone Activity in Bone Volume

Voiding Bladder Model

ICRP GI Model

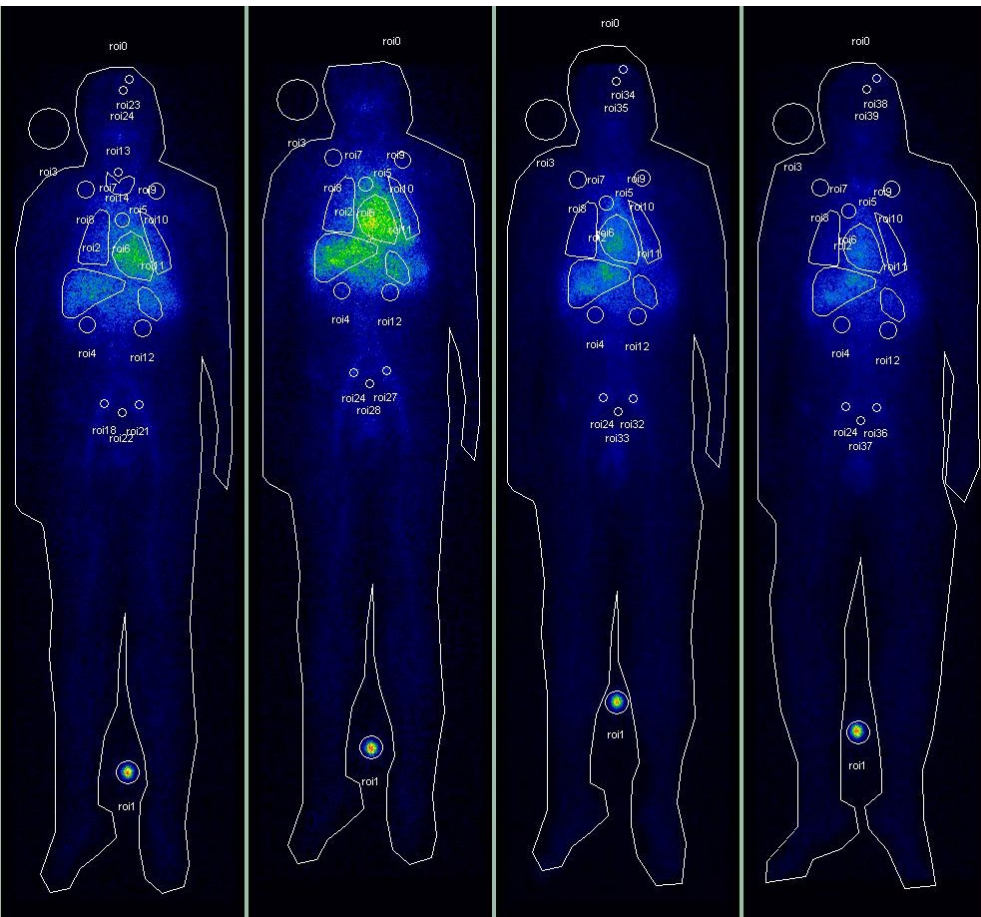
Fractions and Half-times

Fit data to Model

Show me some examples

Clear All Data

# Beispiel: GD2-AK



| Organ                 | Verweilzeit [h] | Halbwertszeit [h] | Dosis [mGy/MBq] |
|-----------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| Ganzkörper            | 83,8            | 57,3              | 0,55 (effektiv) |
| Restkörper            | 72,9            | 61,3              |                 |
| Leber                 | 3,1             | 49,1              | 0,3             |
| Herz                  | 2,3             | 75,2              | 0,6             |
| Lunge                 | 2,2             | 43,3              | 0,35            |
| Milz                  | 0,4             | 27,5              | 0,38            |
| Schilddrüse           | 1,2             | 192               | 6,8             |
| Knochenmark           | k.A.            |                   | 0,18            |
| Blut                  | 32,5            | 22,5              |                 |
| Tumor (Schädel)       | 0,05            | 31,6              | 0,5 (13 ml)*    |
| Tumor (Becken rechts) | 0,16            | 22,2              | 1,5 (13 ml)*    |
| Tumor (Becken links)  | 0,1             | 33,8              | 1 (13 ml)*      |
| Tumor (BWS)           | 2,4             | 33,8              | 5 (60 ml)*      |

# Problemstellung

## ○ Exakte Bestimmung (Messung!)

- der Aktivitätsmengen im Zielorgan
- der Aktivitätsmengen in strahlenempfindlichen Organen
- Zeit-Aktivitäts-Kurven (TAC)

## ○ Unterscheidung

- prätherapeutisch
  - Ersatz des therapeutischen Radiopharmakons (Abbildung an Gammakameras, Messonden oder PET)
- intratherapeutisch
  - direkte Beobachtung der Therapiepharmaka (direkt über Gammastrahlung ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ ), indirekt über Bremsstrahlung ( $^{90}\text{Y}$ ))

# Rechenmodelle für die Dosimetrie

- Analytisch aufgrund von Messungen
  - Exakt
  - Näherungen
- Monte Carlo
  - Simulation von besonderen Gegebenheiten
    - Benachbarte Organe
    - Tiefendosis ins benachbarte Gewebe
    - Brücken zwischen Tumorgewebe

# Rechenmodelle

## Analytisch: die kumulierte Aktivität

### ○ Voraussetzungen

- Organaktivitäten, Tumoraktivitäten  $A_h(t_k)$  sind bekannt (aus Bildgebung, Messsonden etc.) (d.h. DDZ  $\rightarrow$  Aktivität)
- reiner  $\beta$ - Strahler: Quellorgan = Zielorgan
- Vernachlässigung der Dosis in benachbarten Regionen

Modellfunktion für Organ

$$A_h^{Modell}(t) = \sum_{i=1}^M a_i \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t)$$

M: Anzahl der Exponentialterme

Die Parameter  $a_i, \lambda_i$  erhält man durch Minimierung der Testfunktion

$$\Delta = \sum_{k=1}^N \left( A^{Modell}(t_k) - A_h(t_k) \right)^2 \equiv Min, \text{ und damit die kumulierte Aktivität}$$

N: Anzahl der Meßpunkte

$$\tilde{I}_n = \int_0^\infty A^{Modell}(t) dt = \sum_{i=1}^M \frac{a_i}{\lambda_i} = \frac{1}{\ln(2)} \cdot \sum_{i=1}^M a_i \cdot T_i^H$$

$T_i^H$  : effektive Halbwertszeit für den i-ten Exponentialterm ( $T_i^H$  in [s],  $a_i$  in [Bq])

bzw

$\tilde{I}_n \sim \dots$  numerischer Integration der  $A_h(t_k)$  {Vorsicht !!!!}

Definition: DDZ = Dumme Dimensionslose Zahl (counts)

# Rechenmodelle: Analytisch

## Beispiel: Radiojodtherapie

| $t_k$<br>[h] | $A_{GK}$<br>[MBq] | $A_{RK}$<br>[MBq] |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 0            | 0                 | 0                 |
| 19           | 555               | 24                |
| 43           | 481               | 26                |
| 67           | 412               | 29                |
| 91           | 344               | 30                |
| 114          | 295               | 28                |

Modell

$$A_{SD}(t) = a_1 \cdot e^{-\lambda_1 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

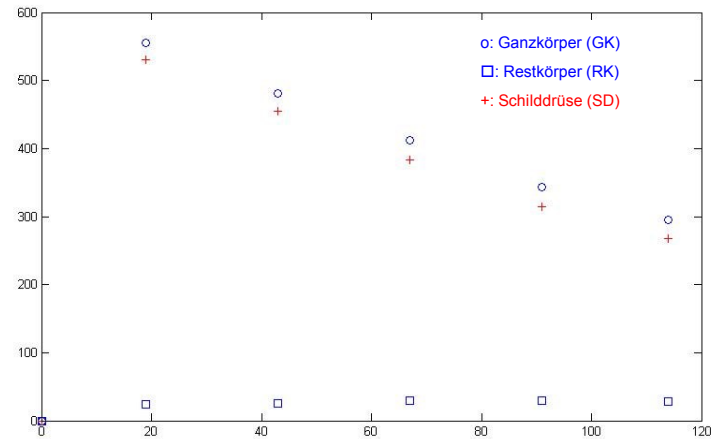
Aus

$$\sum_{k=1}^6 (A_{SD}(t_k) - (A_{GK}(t_k) - A_{RK}(t_k)))^2 \equiv \text{Min}$$

$$a_1 = 614 \text{ MBq}$$

$$\lambda_1 = 0,0072 \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda_2 = 1,3 \text{ h}^{-1}$$

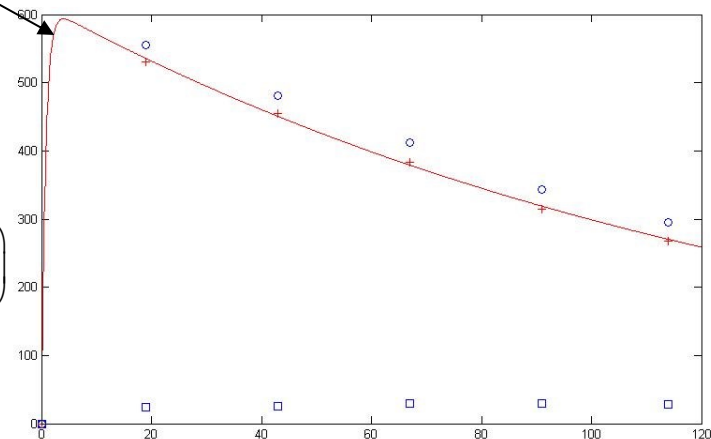


kumulierte Aktivität  $\tilde{A}_{SD}$

$$\tilde{A}_{SD} = \int_0^{\infty} A_{SD}(t) dt = a_1 \cdot \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)$$

$$\tilde{A}_{SD} = \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot \left( 1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \right) \approx \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot \left( 1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) = \frac{614 \text{ MBq}}{0,0072 \text{ h}^{-1}} \cdot \left( 1 - \frac{0,0072 \text{ h}^{-1}}{1,3 \text{ h}^{-1}} \right)$$

$$\tilde{A}_{SD} = 78 \text{ MBq} \cdot \text{h} = 3,07 \cdot 10^{14} \text{ Bq} \cdot \text{s}$$



# Rechenmodelle

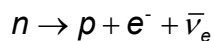
## Analytisch: absorbierte Energie $E_{\text{abs}}$

### ○ Voraussetzungen

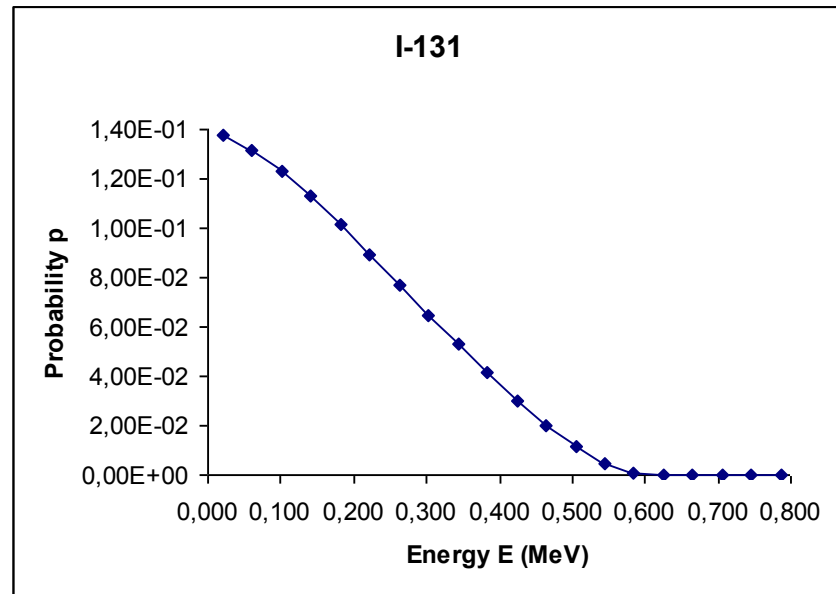
- kumulierte Aktivität ist bekannt
- reiner  $\beta$ - Strahler
- Quellorgan = Zielorgan; absorbiertes Bruchteil  $\phi = 1$

zur Erinnerung:

$\beta$ -Zerfall liefert ein kontinuierliches  
Spektrum der Elektronenstrahlung!



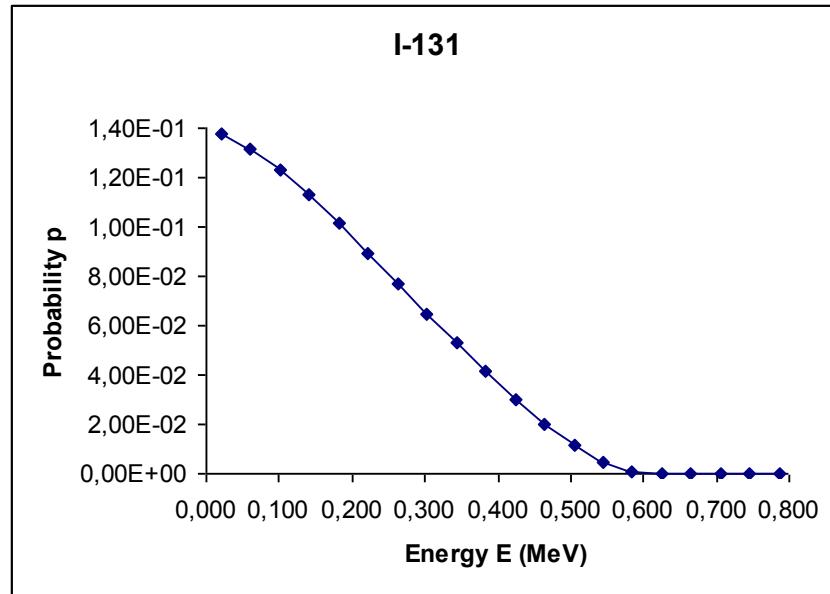
Frage: Wieviel Energie/Kernzerfall kann an die  
Elektronen übertragen werden?



# Rechenmodelle (Beispiel Radiojodtherapie)

## Analytisch: absorbierte Energie $E_{abs}$

| E [MeV] | p        |
|---------|----------|
| Average |          |
| 0,0202  | 1,38E-01 |
| 0,0605  | 1,31E-01 |
| 0,1009  | 1,23E-01 |
| 0,1412  | 1,13E-01 |
| 0,1816  | 1,02E-01 |
| 0,2219  | 8,94E-02 |
| 0,2623  | 7,70E-02 |
| 0,3026  | 6,47E-02 |
| 0,3429  | 5,30E-02 |
| 0,3833  | 4,15E-02 |
| 0,4236  | 3,03E-02 |
| 0,4640  | 2,00E-02 |
| 0,5043  | 1,12E-02 |
| 0,5447  | 4,55E-03 |
| 0,5850  | 8,55E-04 |
| 0,6254  | 1,15E-04 |
| 0,6657  | 6,94E-05 |
| 0,7060  | 4,13E-05 |
| 0,7464  | 1,73E-05 |
| 0,7867  | 2,96E-06 |



$$E_{\beta,ave} = \sum_i p_i E_i = 0,182 \text{ MeV}$$

(für unser Beispiel gilt)

$$E_{abs} = E_{\beta,ave} \cdot \tilde{I}_{\beta} \cdot t = 0,182 \text{ MeV} \cdot 3,07 \cdot 10^{14} \text{ Bq} \cdot s$$

$$E_{abs} = 3,07 \cdot 10^{14} \cdot 0,182 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}$$

$$E_{abs} = 8,94 \text{ J}$$

# Rechenmodelle

## Analytisch: Organdosis D

$$D = \frac{E_{abs}}{m_h}$$

$m_h$  aus

- CT
- MRT
- US
- ECT

schichtweise aus  $ROI$ 's (genau/zeitaufwendig)

oder Berechnung als Ellipsoid (US, VT, MRT)

bzw. schwellwertbasiertes VOI (ECT)

mit  $m_h \approx V_h$

Zusammenfassung

- Berechnung der kumulierten Aktivität
  - $\tilde{A}_h = \int A(t) dt$
- Berechnung der absorbierten Energie
  - $E_{abs} = \tilde{A}_h \cdot E_{\beta,ave}$
- Berechnung der Organdosis
  - $D = \frac{E_{abs}}{m_h} = \frac{\tilde{A}_h}{m_h} \cdot E_{\beta,ave}$

Unser Beispiel:  $m_h = 25 \text{ ml (US)}$

$$D_{SD} = \frac{E_{abs}}{m_{SD}} = \frac{8,94 \text{ J}}{25 \text{ ml}} \approx \frac{8,94 \text{ J}}{0,025 \text{ kg}} = 358 \text{ Gy (Hoppla !!!)}$$

Alternative Formulierung:

Wegen

$$D = \frac{\tilde{A}_h}{m_h} \cdot E_{\beta,ave} = \frac{1}{m_h} \cdot \int_0^\infty A(t) dt \cdot E_{\beta,ave} = \int_0^\infty \frac{A(t)}{m_h} dt \cdot E_{\beta,ave}$$

Die  $\frac{A(t)}{m_h} = c(t)$  (in Bq/ml) entsprechen einer Aktivitätskonzentration in einer ROI (VOI) im Zielorgan aus einem ECT!!!  
 $\Rightarrow$  Dosis ohne Bestimmung der Organmasse!!

$$D_{ave} = \int_0^\infty c_{h,ave}(t) dt \cdot E_{\beta,ave}$$

$$D_{max} = \int_0^\infty c_{h,max}(t) dt \cdot E_{\beta,ave}$$

# Rechenmodelle

## Analytisch: Berücksichtigung von $\gamma$ -Strahlung

Ansatz

$$E_{abs} = \tilde{A}_h \left( E_{\beta,ave} + \sum_i \eta_i \cdot \varphi_i \cdot E_{\gamma,i} \right)$$

i: i-te  $\gamma$ -Komponente

$\eta_i$ : branching ratio

$\varphi_i$ : absorbiertes Bruchteil

$E_{\gamma,i}$ :  $\gamma$ -Energie

$$E_{abs} = \tilde{A}_h E_{\beta,ave} \underbrace{\left( 1 + \sum_i \eta_i \cdot \varphi_i \cdot \varepsilon_i \right)}_{k_{\beta,\gamma}}$$

$$\varepsilon_i = \frac{E_{\gamma,i}}{E_{\beta,ave}}$$

Bemerkung:

Falls gemischte Zerfälle stattfinden

( $\alpha + \beta^- + \beta^+ + EC$ ) muss natürlich

die branching ratio für den  $\beta^-$ -Zerfall berücksichtigt werden:

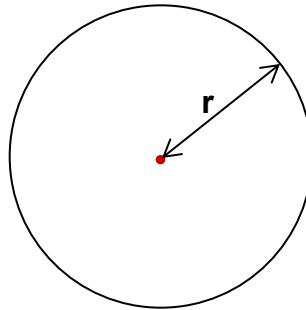
$$E_{abs} = \tilde{A}_h E_{\beta,ave} \left( \eta_{\alpha,\beta^+} \cdot \frac{E_{\alpha,\beta^+}}{E_{\beta,ave}} + \eta_{\beta^-} + \sum_i \eta_i \cdot \varphi_i \cdot \varepsilon_i \right)$$

Berechnung der absorbierten Fraktion  $\varphi_i$

Näherungsmodell:

Zentrierte Punktquelle in einem kugelförmigen Volumen V,

$$\text{mit } r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}}$$



Anwendung des Schwächungsgesetzes

$$I(r) = I_0 \cdot \exp(-\mu_{tot}(E_{\gamma,i}) \cdot r)$$

d.h. der Bruchteil  $\frac{I_0 - I(r)}{I_0}$  verschwindet (?)

(Streuung, Absorption)

Daraus ergibt sich die absorbierte Fraktion

$$\varphi_i = \frac{\mu_{en}(E_{\gamma,i})}{\mu_{tot}(E_{\gamma,i})} \cdot \frac{I_0 - I(r)}{I_0} = \frac{\mu_{en}(E_{\gamma,i})}{\mu_{tot}(E_{\gamma,i})} \cdot \left( 1 - \exp(-\mu_{tot}(E_{\gamma,i}) \cdot r) \right)$$

mit

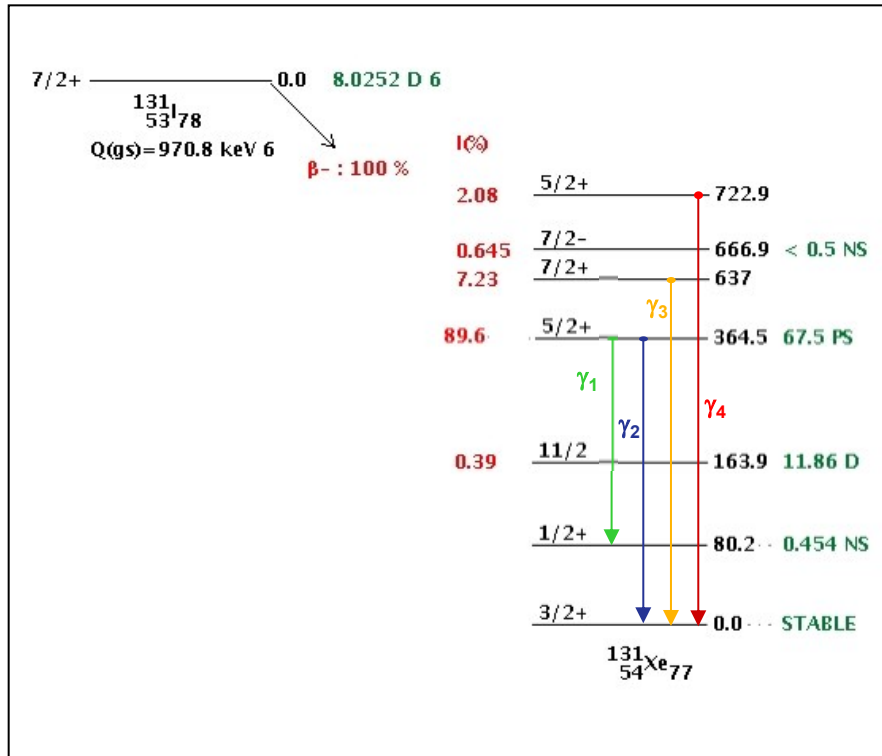
$\mu_{en}(E_{\gamma,i})$ : (linearer) Energieabsorptionskoeffizient

$\mu_{tot}(E_{\gamma,i})$ : (linearer) Absorptionskoeffizient

als Schwächungsmedium wird Wasser vorausgesetzt!

# Rechenmodelle (Beispiel 131-I)

## Analytisch: Berücksichtigung von $\gamma$ -Strahlung



Quellennachweis

Zerfallsschema:

[http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indx\\_dec.jsp](http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indx_dec.jsp)

$\eta$ :

<http://www.nndc.bnl.gov/mird/>

$\mu_{\text{tot}}$ :

<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>

$\mu_{\text{en}}$ :

<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>

| $E_\gamma$ [keV] | $\eta$ | $\varepsilon$ | $\mu_{\text{tot}}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ] | $\mu_{\text{en}}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ] | $\varphi$ | $\eta \cdot \varepsilon \cdot \varphi$ |
|------------------|--------|---------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-----------|----------------------------------------|
| 284              | 0,061  | 1,56          | 0,121                                   | 0,032                                  | 0,049     | 0,005                                  |
| 364              | 0,815  | 2             | 0,11                                    | 0,032                                  | 0,049     | 0,080                                  |
| 637              | 0,072  | 3,5           | 0,087                                   | 0,033                                  | 0,052     | 0,013                                  |
| 722              | 0,018  | 3,97          | 0,082                                   | 0,032                                  | 0,050     | 0,004                                  |
|                  |        |               |                                         |                                        | $\sum_i$  | 0,101                                  |

Berechnung für ein Volumen

$V = V_{\text{norm}} = 20 \text{ ml}$  (Standard-SD)  
entsprechend  $r = 1,68 \text{ cm}$ .

$$\varphi_i = \frac{\mu_{\text{en}}(E_{\gamma,i})}{\mu_{\text{tot}}(E_{\gamma,i})} \cdot (1 - \exp(-\mu_{\text{tot}}(E_{\gamma,i}) \cdot r))$$

# Rechenmodelle

## Analytisch: Vereinfachungen/Näherungen

Betrachten noch einmal die kumulierte Aktivität  $\tilde{A}_h$

$$\tilde{A}_h = \sum_{i=1}^M \frac{a_i}{\lambda_i} = \frac{1}{\ln(2)} \cdot \sum_{i=1}^M a_i \cdot T_i^H$$

Oft ist die Beschränkung der Kinetik auf einen monoexponentiellen Term ausreichend:

$$\tilde{A}_h = \frac{1}{\ln(2)} \cdot \underbrace{A_h^{\text{Modell}}(t=0)}_{A_h^0} \cdot T_{\text{eff}}^H$$

Damit ergibt sich die absorbierte Energie im Zielorgan

$$E_{\text{abs}} = \tilde{A}_h \cdot E_{\beta, \text{ave}} \left( 1 \cdot \sum_i \lambda_i \cdot T_i^H \cdot \tilde{A}_h \cdot E_{\beta, \text{ave}} \cdot k_{\beta, \gamma} \right)$$

$$E_{\text{abs}} = \frac{1}{\ln(2)} \cdot A_h^0 \cdot T_{\text{eff}}^H \cdot E_{\beta, \text{ave}} \cdot k_{\beta, \gamma}$$

$E_{\beta, \text{ave}}$ ,  $k_{\beta, \gamma}(V)$  und  $\ln(2)$  sind bekannt, bzw. aus Tabellenwerk und einer vorgegebenen Geometrie entnehmbar und können im Sinne einer Nuklidkonstanten  $K(^M X, V)$  zusammengefasst werden:

$$E_{\text{abs}} = A_h^0 \cdot T_{\text{eff}}^H \cdot K(^M X, V)$$

üblicherweise wird  $E_{\beta, \text{ave}}$  in MeV angegeben, so dass

$$E_{\beta, \text{ave}} [J] = E_{\beta, \text{ave}} [\text{MeV}] \cdot \frac{10^6 \text{ eV}}{\text{MeV}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{J}{\text{eV}}$$

$$E_{\beta, \text{ave}} [J] = E_{\beta, \text{ave}} [\text{MeV}] \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \frac{J}{\text{MeV}}$$

$$K(^M X, V) [J] = \frac{k_{\beta, \gamma}(V)}{\ln(2)} \cdot E_{\beta, \text{ave}} [\text{MeV}] \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \frac{J}{\text{MeV}}$$

$$K(^M X, V) [J] = k_{\beta, \gamma}(V) \cdot E_{\beta, \text{ave}} [\text{MeV}] \cdot 2,31 \cdot 10^{-13} \frac{J}{\text{MeV}}$$

Analog wird Aktivität und Halbwertszeit behandelt

$$A_h^0 [\text{Bq}] = A_h^0 [\text{MBq}] \cdot \frac{10^6 \text{ Bq}}{\text{MBq}}$$

$$T_{\text{eff}}^H [\text{s}] = T_{\text{eff}}^H [\text{d}] \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = T_{\text{eff}}^H [\text{d}] \cdot 86400 \frac{\text{s}}{\text{d}}$$

Insgesamt

$$E_{\text{abs}} [J] = A_h^0 [\text{Bq}] \cdot T_{\text{eff}}^H [\text{s}] \cdot K(^M X, V) [J]$$

$$E_{\text{abs}} [J] = A_h^0 [\text{MBq}] \cdot T_{\text{eff}}^H [\text{d}] \cdot k_{\beta, \gamma}(V) \cdot E_{\beta, \text{ave}} [\text{MeV}] \cdot 0,02J$$

Damit ergibt sich die Organdosis

$$D = \frac{E_{\text{abs}} [J]}{m [\text{kg}]} = \frac{E_{\text{abs}} [J]}{m [\text{g}] \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}} = \frac{E_{\text{abs}} [J]}{m [\text{g}]} \cdot 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

$$D = \frac{A_h^0 \cdot T_{\text{eff}}^H}{m} \cdot (k_{\beta, \gamma}(V) \cdot 20 \cdot E_{\beta, \text{ave}}) \text{ Gy} \frac{\text{g}}{\text{MBq} \cdot \text{d} \cdot \text{MeV}}$$

also im Wesentlichen

$$D = \frac{A_h^0 \cdot T_{\text{eff}}^H}{m} \cdot C(V, E_{\beta, \text{ave}}) \quad [\text{EINHEITEN!!!!}]$$

# Rechenmodelle

## Analytisch: Vereinfachungen/Näherungen; Beispiele

$^{131}\text{I}$

$$D[\text{Gy}] = \frac{A_h^0 \cdot T_{\text{eff}}^H}{m} \cdot C(V, E_{\beta, \text{ave}}) \quad [\text{EINHEITEN!!!!}]$$

$$E_{\beta, \text{ave}} = 0,182 \text{ MeV}$$

$$V = 20 \text{ ml}$$

$$\Rightarrow C = 1,101 \cdot 0,182 \cdot 20 = 4 \text{ Gy}$$

$$\Rightarrow D = \frac{A_h^0 \cdot T_{\text{eff}}^H}{m} \cdot 4 \text{ Gy}$$

$$D = \frac{A_{\text{app}} \cdot \text{uptake} \cdot T_{\text{eff}}^H}{m} \cdot 4 \text{ Gy}$$

$$D[\text{Gy}] = \frac{A_{\text{app}} [\text{MBq}] \cdot \text{uptake} [\%] \cdot T_{\text{eff}}^H [\text{d}]}{m [\text{g}]} \cdot 0,04$$

(Marinelli-Formel)

Vergleich bei gleicher Masse ( $m = 20 \text{ g}$ ), gleicher HWZ ( $T^H = 2,67 \text{ d}$ ) und gleicher Aktivität ( $A_h = 300 \text{ MBq}$ )

$$D(^{131}\text{I}) = 160 \text{ Gy}$$

$$D(^{90}\text{Y}) = 745 \text{ Gy}$$

$^{90}\text{Y} - \text{SIRT}$

$$D[\text{Gy}] = \frac{A_h^0 \cdot T_{\text{eff}}^H}{m} \cdot C(V, E_{\beta, \text{ave}}) \quad [\text{EINHEITEN!!!!}]$$

$$E_{\beta, \text{ave}} = 0,93 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow C = 1,0 \cdot 0,93 \cdot 20 = 18,6 \text{ Gy}$$

$$\Rightarrow D_{\text{Tumor}} = \frac{A_{\text{tumor}}^0 \cdot T_{\text{eff}}^H}{m_{\text{Tumor}}} \cdot 18,6 \text{ Gy}$$

$$\text{mit } T_{\text{eff}}^H = T_{\text{phys}}^H = 2,67 \text{ d}$$

$$D_{\text{Tumor}} = \frac{A_{\text{tumor}}^0}{m_{\text{Tumor}}} \cdot 49,67 \text{ Gy}$$

Dosissschätzung (obere Grenze) bei fehlender Kinetik:

$$T_{\text{eff}}^H = \frac{T_{\text{phys}}^H \cdot T_{\text{biol}}^H}{T_{\text{phys}}^H + T_{\text{biol}}^H} \leq T_{\text{phys}}^H \Rightarrow D[\text{Gy}] \leq \frac{A_h^0 \cdot T_{\text{phys}}^H}{m} \cdot C(V, E_{\beta, \text{ave}}) = D_{\text{estimate}}$$

(erfordert gute Schätzung von  $A_h^0$ )

# Rechenmodelle (Beispiel)

## Methodenvergleich: Näherung vs. exakt vs. ganz exakt

Ausgangssituation (Radiojodtherapie):

$$A_{\text{app}} = 800 \text{ MBq}$$

$$m_{\text{SD}} = 25 \text{ g (aus US)}$$

Grund für die Abweichung von Rechnung und OLINDA:

Vernachlässigung von Konversions- und Augerelektronen

| Radiations | $y(i)$<br>(Bq·s) <sup>-1</sup> | E(i)<br>(MeV)             | $y(i) \times E(i)$     |
|------------|--------------------------------|---------------------------|------------------------|
| β- 1       | $2.08 \times 10^{-02}$         | $6.936 \times 10^{-02} *$ | $1.44 \times 10^{-03}$ |
| β- 2       | $6.45 \times 10^{-03}$         | $8.694 \times 10^{-02} *$ | $5.61 \times 10^{-04}$ |
| β- 3       | $7.23 \times 10^{-02}$         | $9.662 \times 10^{-02} *$ | $6.99 \times 10^{-03}$ |
| β- 4       | $8.96 \times 10^{-01}$         | $1.916 \times 10^{-01} *$ | $1.72 \times 10^{-01}$ |
| β- 6       | $3.90 \times 10^{-03}$         | $2.832 \times 10^{-01} *$ | $1.10 \times 10^{-03}$ |
| γ 1        | $2.62 \times 10^{-02}$         | $8.019 \times 10^{-02}$   | $2.10 \times 10^{-03}$ |
|            |                                |                           |                        |
| γ 3        | $2.69 \times 10^{-03}$         | $1.772 \times 10^{-01}$   | $4.77 \times 10^{-04}$ |
| γ 6        | $6.12 \times 10^{-02}$         | $2.843 \times 10^{-01}$   | $1.74 \times 10^{-02}$ |
|            |                                |                           |                        |
| γ 11       | $2.73 \times 10^{-03}$         | $3.258 \times 10^{-01}$   | $8.89 \times 10^{-04}$ |
| γ 13       | $8.15 \times 10^{-01}$         | $3.645 \times 10^{-01}$   | $2.97 \times 10^{-01}$ |
|            |                                |                           |                        |
| γ 15       | $3.59 \times 10^{-03}$         | $5.030 \times 10^{-01}$   | $1.81 \times 10^{-03}$ |
| γ 16       | $7.16 \times 10^{-02}$         | $6.370 \times 10^{-01}$   | $4.56 \times 10^{-02}$ |
| γ 17       | $2.17 \times 10^{-03}$         | $6.427 \times 10^{-01}$   | $1.39 \times 10^{-03}$ |
| γ 18       | $1.77 \times 10^{-02}$         | $7.229 \times 10^{-01}$   | $1.28 \times 10^{-02}$ |
| Kα1 X-ray  | $2.68 \times 10^{-02}$         | $2.978 \times 10^{-02}$   | $7.98 \times 10^{-04}$ |
| Kα2 X-ray  | $1.45 \times 10^{-02}$         | $2.946 \times 10^{-02}$   | $4.26 \times 10^{-04}$ |
| Auger-L    | $5.62 \times 10^{-02}$         | $3.430 \times 10^{-03} *$ | $1.93 \times 10^{-04}$ |

# Rechenmodelle:

## Generalisierung durch MIRD und Re-Individualisierung

$$\frac{D(t)}{A_{\text{admin}}} = \sum_s \tau_s \cdot S(t \leftarrow s)$$

$\tau_s$  aus Messung und Fit

S-Werte aus Tabellen (für Referenzphantome) oder

direkte Dosisberechnung mit kommerzieller Software (OLINDA, MIRDOSE) (für Referenzphantome)

Berücksichtigung individueller Organmassen oder Tumorkläsionen:

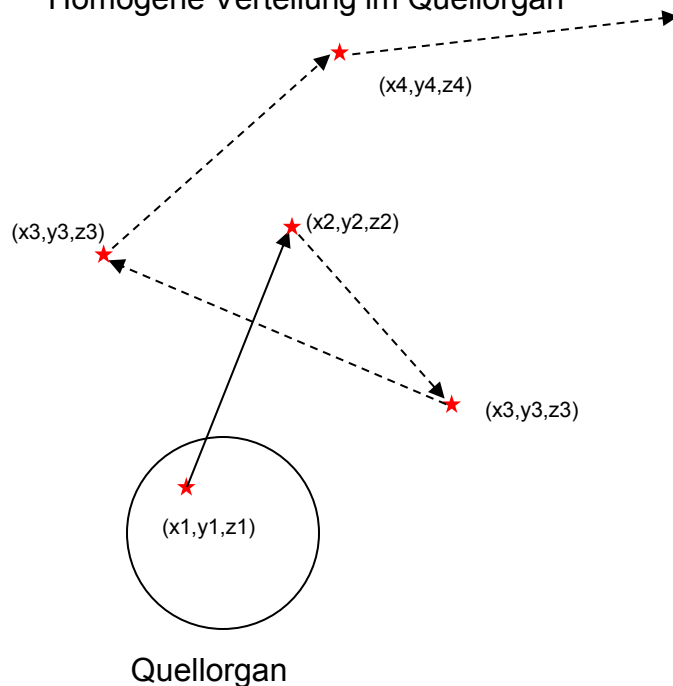
| Strahlungsart   | S-Werte                                                                            | Dosis                                                                              |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha, \beta$ | $S_m = S_{\text{ref}} \cdot \frac{m_{\text{ref}}}{m}$                              | $D_m = D_{\text{ref}} \cdot \frac{m_{\text{ref}}}{m}$                              |
| $\gamma$        | $S_m = S_{\text{ref}} \cdot \left( \frac{m_{\text{ref}}}{m} \right)^{\frac{2}{3}}$ | $D_m = D_{\text{ref}} \cdot \left( \frac{m_{\text{ref}}}{m} \right)^{\frac{2}{3}}$ |

# Monte-Carlo-Simulation für die Dosimetrie in der Nuklearmedizin: Gammastrahlung

Voraussetzungen:

Bekannte Biodistribution: kumulierte Aktivität in den Quellorganen ist bekannt, und deren Masse

Homogene Verteilung im Quellorgan



Ablaufschema

Simuliere N Kernzerfälle für jedes Quellorgan

für jeden Kernzerfall

1. Würfeln des Emissionsortes und der Emissionsrichtung  $\Omega$

2. Würfeln des WW-ortes  $(x, y, z)$  aufgrund des Schwächungsgesetzes. Zuordnung zu einem Zielorgan.

3. Würfeln der WW (Photo oder Compton)

Photo:  $\Delta E = E_\gamma - E_{\text{Bindung}}$

$E_{\text{abs,Ziel}} = E_{\text{abs,Ziel}} + \Delta E$

nächster Kernzerfall, weiter bei 1)

Compton: würfeln der Streurichtung  $\Omega_{\text{scatter}}$  (Klein-Nishina)

Berechnung der Energie des gestreuten Photons  $E_{\gamma, \text{scatter}}$

$\Delta E = E_{\gamma, \text{inc}} - E_{\gamma, \text{scatter}}$

$E_{\text{abs,Ziel}} = E_{\text{abs,Ziel}} + \Delta E$

Weiter bei 2) mit  $E_\gamma = E_{\gamma, \text{scatter}}$  und  $\Omega = \Omega_{\text{scatter}}$

oder Abbruch  $\rightarrow$  nächster Kernzerfall, weiter bei 1)

(Bedingungen?)

Berechnung der Dosis im Zielorgan:

$$D_{\text{Ziel} \leftarrow \text{Quelle}} = \frac{\tilde{I}_{\text{Quelle}}}{N} \cdot \frac{m_{\text{abs,Ziel}}}{m_{\text{Ziel}}}$$

$$D_{\text{Ziel, total}} = \sum_{\text{Quelle}} D_{\text{Ziel} \leftarrow \text{Quelle}}$$

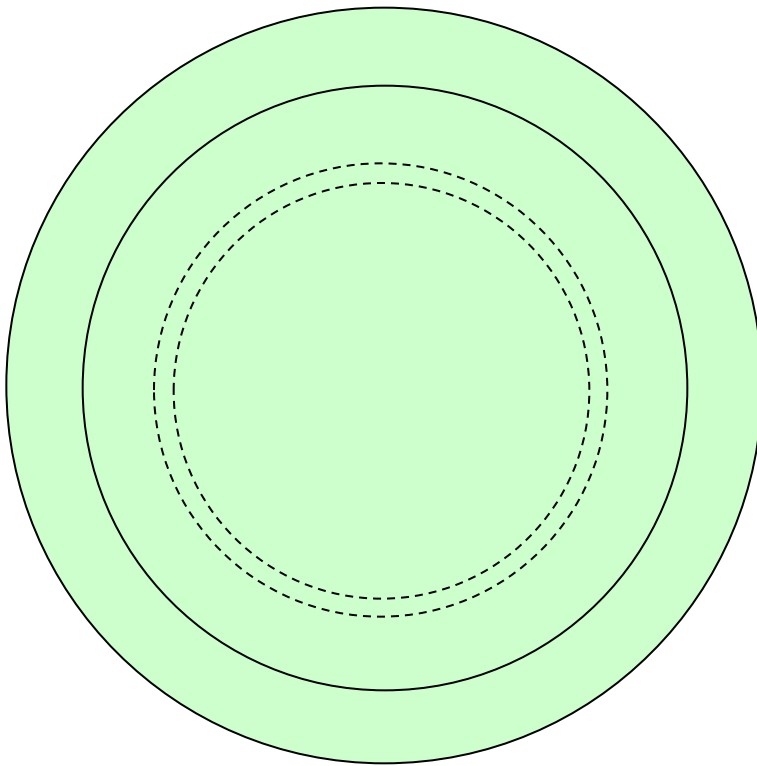
# Monte-Carlo-Simulation für die Dosimetrie in der Nuklearmedizin: Betastrahlung (Näherung)

Voraussetzungen:

Modell: Kugelförmige Verteilung Radius R

Kugelförmiger Aussenraum Ra

$T^H$  vorausgesetzt (Physikalisch)



Unterteilung der Kugel in Kugelschichten (layer) der Dicke d

Simulation von N Kernzerfällen

für jeden Kernzerfall

1. Würfeln des Emissionsortes und der Emissionsrichtung  $\Omega$
2. Zuordnung zum Layer
3. Würfeln der Betaenergie aufgrund des Energiespektrums
4. CSDA-Tracking des Elektrons und Berechnung des Energieverlustes  $\Delta E$  in jedem durchquerten layer:

$$E_{\text{elektron}} = E_{\text{elektron}} - \Delta E$$

$$E_{\text{abs,layer}} = E_{\text{abs,layer}} + \Delta E$$

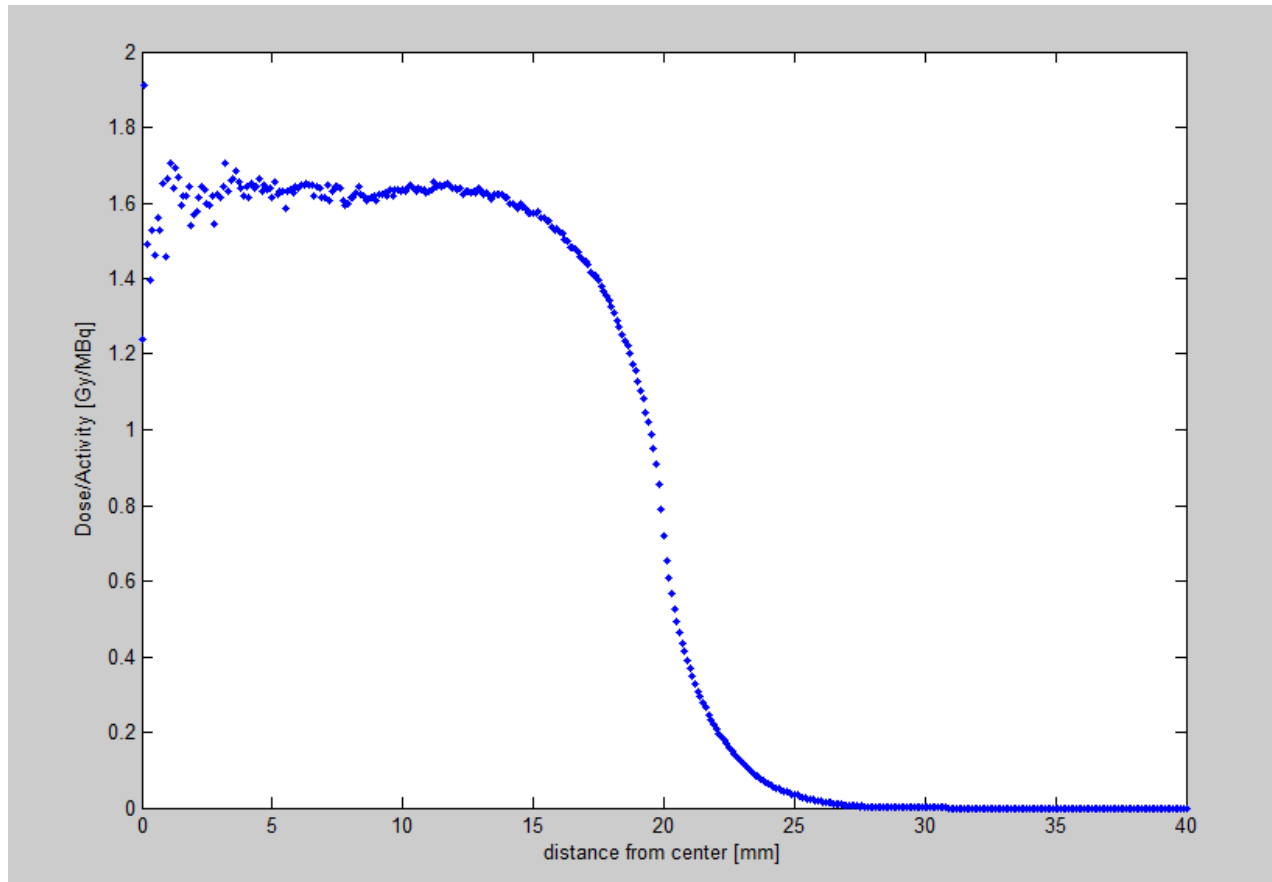
bis  $E_{\text{elektron}} < E_{\text{min}}$  Nächster Kernzerfall und weiter mit 1

Berechnung der radialen Dosisverteilung  $D_{\text{layer}}$ :

$$D_{\text{layer}} = \frac{\tilde{I}_{\text{total}}}{N} \cdot \frac{e_{\text{abs,layer}}}{m_{\text{layer}}}$$
$$\Rightarrow \frac{D_{\text{layer}}}{A_{\text{total}}} = \frac{\tilde{I}_{\text{total}}}{A_{\text{total}}} \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{E_{\text{abs,layer}}}{m_{\text{layer}}} = \frac{T^H}{\ln 2} \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{E_{\text{abs,layer}}}{m_{\text{layer}}}$$

# Monte-Carlo-Simulation für die Dosimetrie in der Nuklearmedizin: Betastrahlung (Beispiel)

Beta-Tiefendosis für  $^{90}\text{Y}$ ,  $R=20\text{ mm}$ ,  $T^H = 64,1\text{ h}$



# Vorgehensweise für die Dosimetrie

## Schritt 1: Akquisition

### ○ (Prätherapeutisch)/Intratherapeutisch:

- mindestens 2 Ganzkörpermessungen (2D)
- plus Initialmessung direkt nach Applikation

**optional/obligatorisch**

- mitlaufende Standardaktivität zur Empfindlichkeitskalibrierung bzw. Plausibilitätskontrolle (Scan-Geschwindigkeit)

**Oder**

- mindestens 2 SPECT/CT (Aktivitätskalibrierung, Korrekturen!!) (3D)

**Oder**

- Kombination SPECT/CT + GK (2.5D)
- Strenges Protokoll/Buchführung
  - Aktivität, Kalibrierzeit, Scanzeit, Scandauer, Standard, Archivierung

# Vorgehensweise für die Dosimetrie

## Schritt 2: Auswertung/Strategie

2D

- ROIs (Manuell)
- anterior+posterior
- **Ganzkörper**
- **Hintergrund**
- **Standard**
- **Leber**
- **Tumor**
- andere Organe
  - Milz
  - Niere
  - Lunge
  - Herz
  - WS
- Statistik
  - Mittelwert
  - Total Counts
  - Fläche
- geometrisches Mittel (ant/post)

Mon Jul 09 2007 16:39:07  
Duration: 716.63 sec



3D

- VOIs (Isokontur)
- **Leber**
- **Tumor**
- **Milz**
- **Niere**
- andere Organe
  - Lunge
  - Herz
  - WS
- Statistik
  - Mittelwert
  - Maximum
  - Total
  - Volumen



HERMES



**ROIs/VOIs müssen auf jeden Datensatz exakt reproduziert werden!!!**

**⇒ Alignment der Datensätze**

# Vorgehensweise für die Dosimetrie

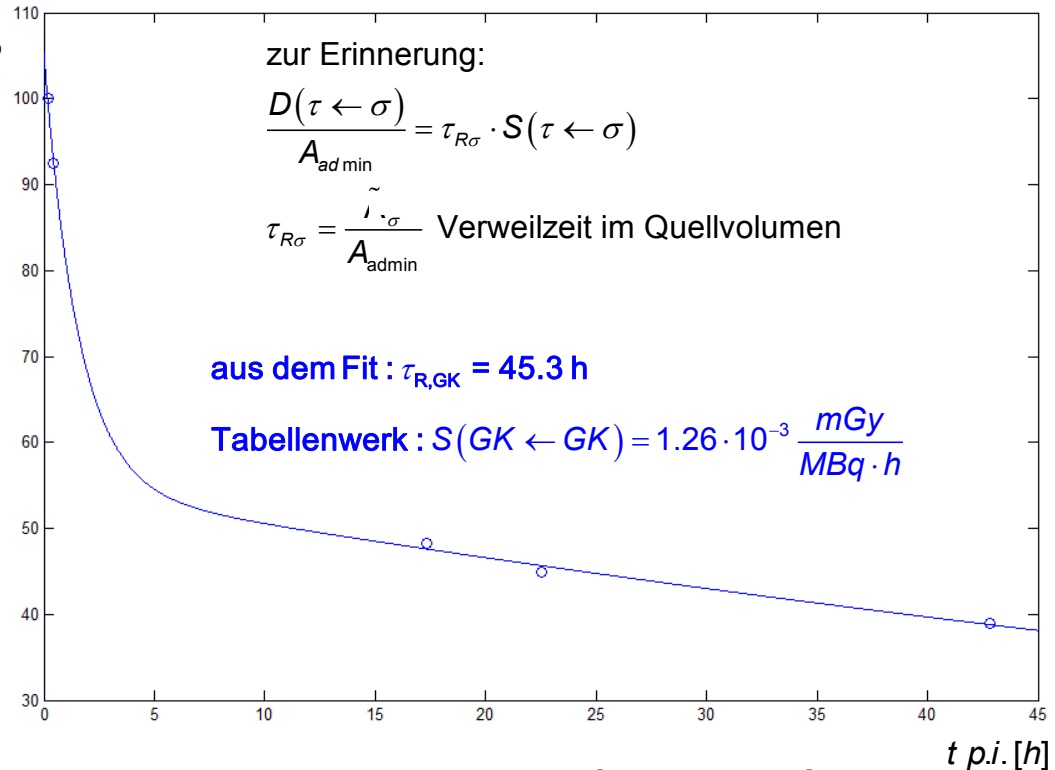
## Schritt 3: Erzeugung der TACs+Dosisermittlung

Beispiel: PRRT mit [177Lu]-DOTATATE, GK

Mon Jul 09 2007 16:39:07  
Duration: 716.63 sec

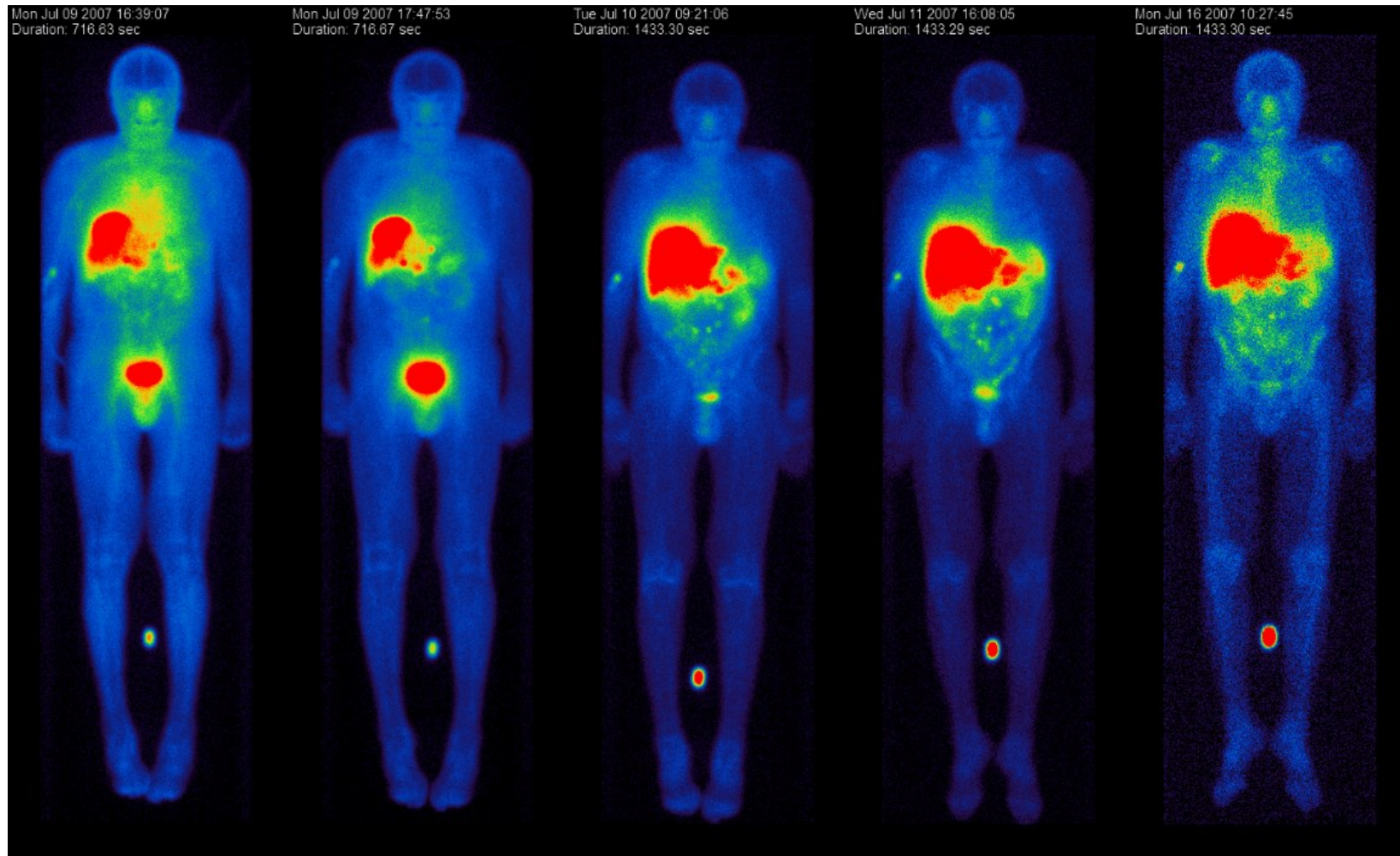


$$\frac{A_{GK}}{A_{admin}} \cdot 100\%$$

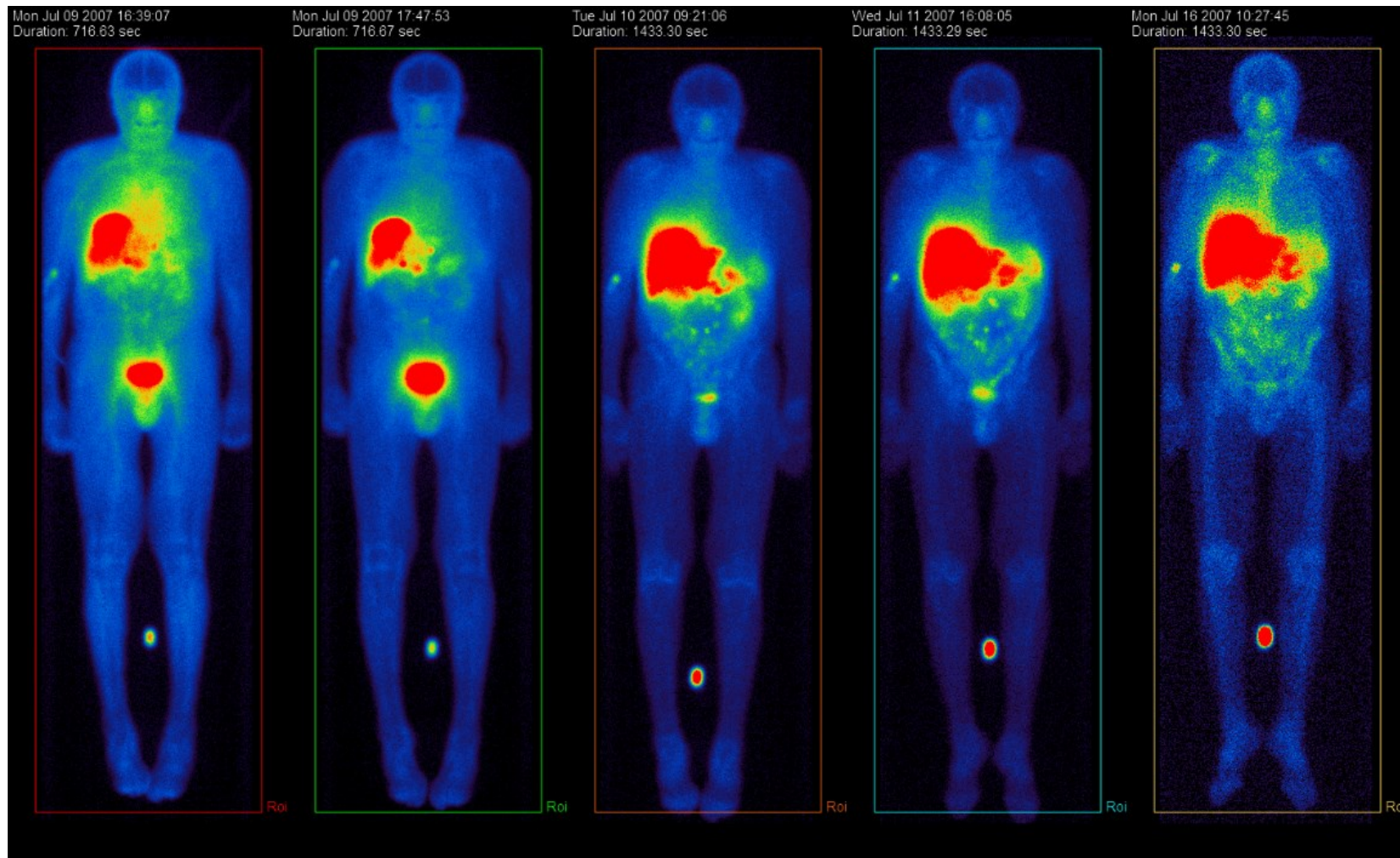


$$\Rightarrow D(GK \leftarrow GK) = 45.3 \text{ h} \cdot 1.26 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mGy}}{\text{MBq} \cdot \text{h}} = 0.057 \frac{\text{mGy}}{\text{MBq}}$$

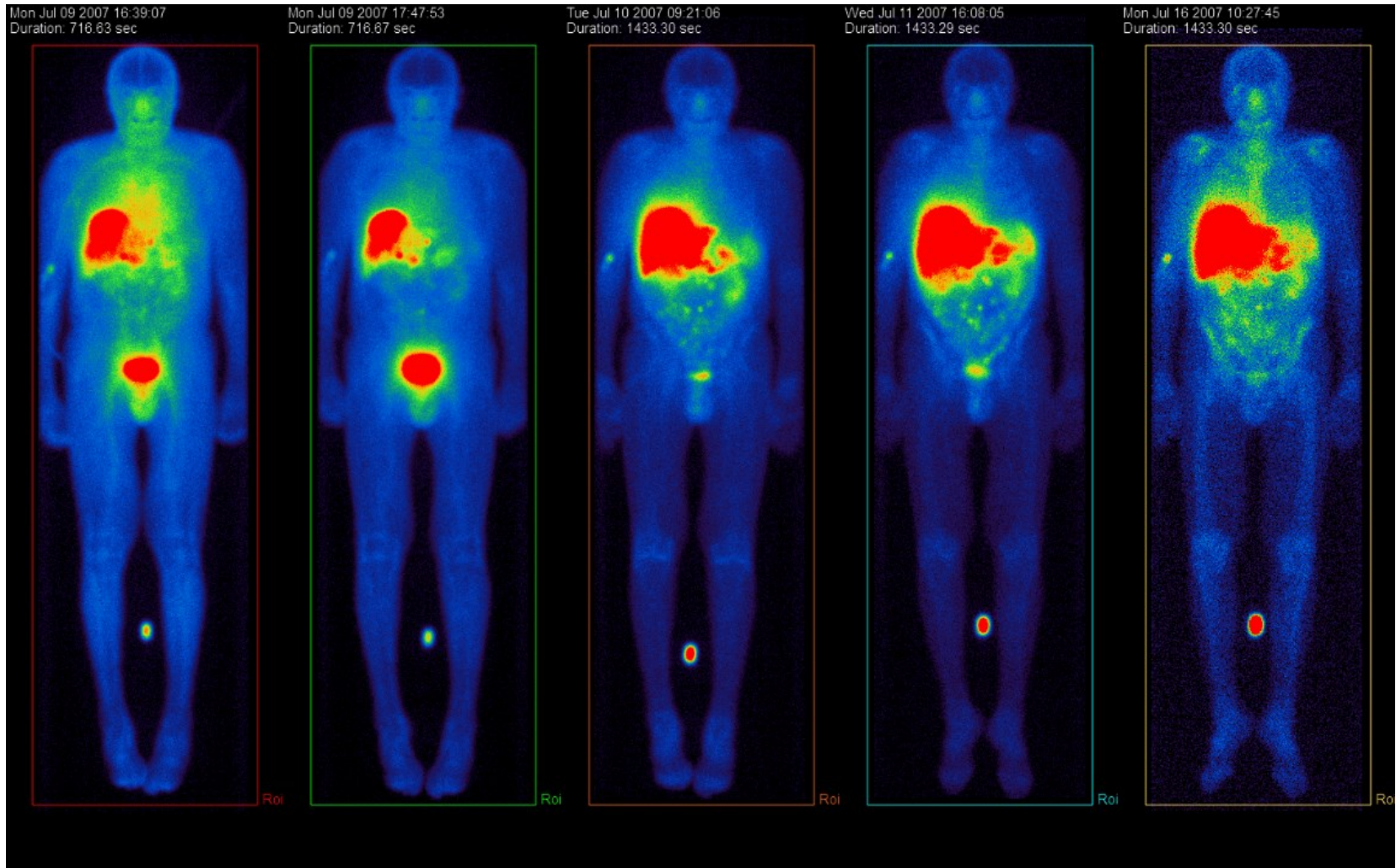
# Beispiel: PRRT mit [177Lu]-DOTATATE Alignment



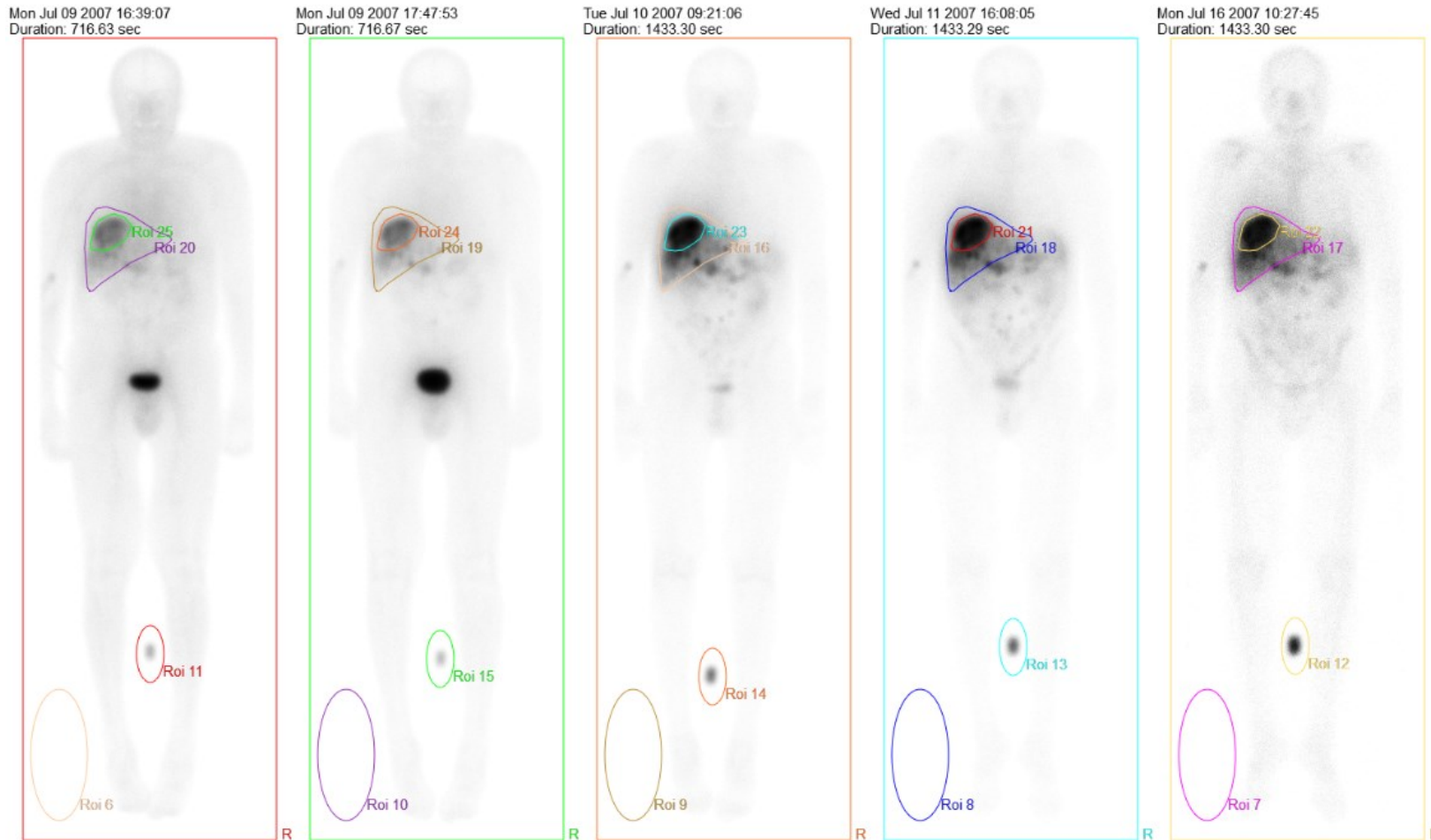
# Beispiel: PRRT mit [177Lu]-DOTATATE no Alignment



# Beispiel: PRRT mit [177Lu]-DOTATATE Alignment



# Beispiel: PRRT mit [177Lu]-DOTATATE ROIs



$$Counts_{Netto,GK} = Counts_{Brutto,GK} - Counts_{ave,BG} \cdot Area_{GK} - Counts_{Netto,Std}$$

$$Counts_{Netto,Std} = Counts_{Brutto,Std} - Counts_{ave,BG} \cdot Area_{Std}$$

# Beispiel: PRRT mit [177Lu]-DOTATATE

## Zerfallsschema 177Lu

| Radiations | y(i)<br>(Bq-s) <sup>-1</sup> | E(i)<br>(MeV)             | y(i)×E(i)              |
|------------|------------------------------|---------------------------|------------------------|
| β- 1       | 1.16×10 <sup>-01</sup>       | 4.766×10 <sup>-02</sup> * | 5.53×10 <sup>-03</sup> |
| β- 3       | 9.00×10 <sup>-02</sup>       | 1.117×10 <sup>-01</sup> * | 1.01×10 <sup>-02</sup> |
| β- 4       | 7.94×10 <sup>-01</sup>       | 1.494×10 <sup>-01</sup> * | 1.19×10 <sup>-01</sup> |
| γ 1        | 1.72×10 <sup>-03</sup>       | 7.164×10 <sup>-02</sup>   | 1.23×10 <sup>-04</sup> |
| γ 2        | 6.17×10 <sup>-02</sup>       | 1.129×10 <sup>-01</sup>   | 6.97×10 <sup>-03</sup> |
| ce-K, γ 2  | 5.12×10 <sup>-02</sup>       | 4.760×10 <sup>-02</sup>   | 2.44×10 <sup>-03</sup> |
| ce-L, γ 2  | 6.73×10 <sup>-02</sup>       | 1.017×10 <sup>-01</sup> a | 6.84×10 <sup>-03</sup> |
| ce-M, γ 2  | 1.67×10 <sup>-02</sup>       | 1.103×10 <sup>-01</sup> a | 1.85×10 <sup>-03</sup> |
| ce-N+, γ 2 | 4.80×10 <sup>-03</sup>       | 1.124×10 <sup>-01</sup> a | 5.40×10 <sup>-04</sup> |
| γ 3        | 4.69×10 <sup>-04</sup>       | 1.367×10 <sup>-01</sup>   | 6.42×10 <sup>-05</sup> |
| γ 4        | 1.04×10 <sup>-01</sup>       | 2.084×10 <sup>-01</sup>   | 2.16×10 <sup>-02</sup> |
| ce-K, γ 4  | 5.70×10 <sup>-03</sup>       | 1.430×10 <sup>-01</sup>   | 8.15×10 <sup>-04</sup> |
| ce-L, γ 4  | 9.74×10 <sup>-04</sup>       | 1.971×10 <sup>-01</sup> a | 1.92×10 <sup>-04</sup> |
| γ 5        | 2.01×10 <sup>-03</sup>       | 2.497×10 <sup>-01</sup>   | 5.01×10 <sup>-04</sup> |
| γ 6        | 2.10×10 <sup>-03</sup>       | 3.213×10 <sup>-01</sup>   | 6.76×10 <sup>-04</sup> |
| Kα1 X-ray  | 2.81×10 <sup>-02</sup>       | 5.579×10 <sup>-02</sup>   | 1.57×10 <sup>-03</sup> |
| Kα2 X-ray  | 1.61×10 <sup>-02</sup>       | 5.461×10 <sup>-02</sup>   | 8.77×10 <sup>-04</sup> |
| Kβ X-ray   | 1.18×10 <sup>-02</sup>       | 6.320×10 <sup>-02</sup> * | 7.43×10 <sup>-04</sup> |
| L X-ray    | 3.06×10 <sup>-02</sup>       | 7.900×10 <sup>-03</sup> * | 2.42×10 <sup>-04</sup> |
| Auger-L    | 8.70×10 <sup>-02</sup>       | 6.180×10 <sup>-03</sup> * | 5.38×10 <sup>-04</sup> |

Listed X, γ, and γ<sup>±</sup> Radiations

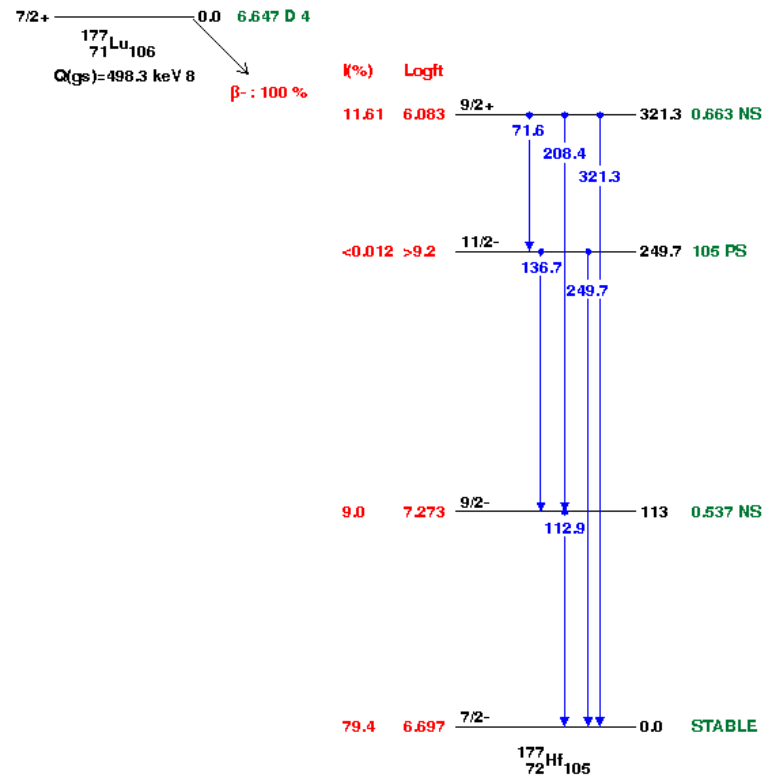
Listed β, ce, and Auger Radiations

Omitted β, ce, and Auger Radiations\*\*

Listed Radiations

Omitted Radiations\*\*

|                        |
|------------------------|
| 3.71×10 <sup>-04</sup> |
| 1.81×10 <sup>-01</sup> |
| 3.71×10 <sup>-04</sup> |



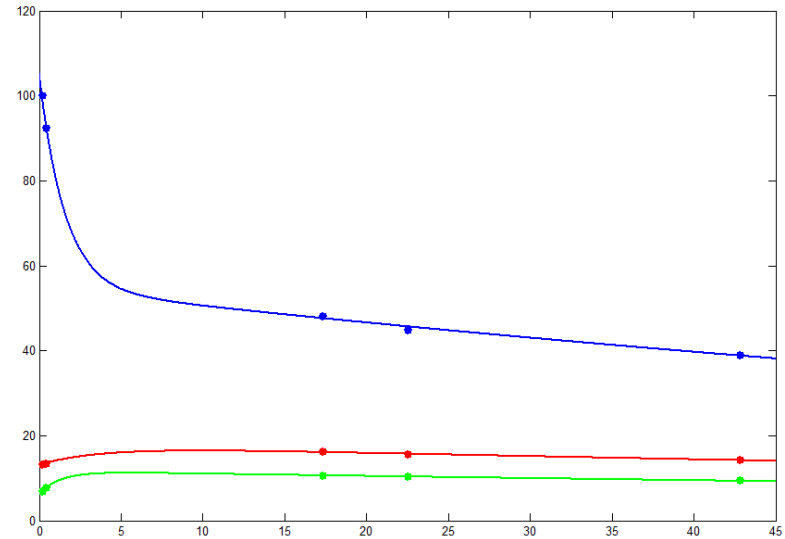
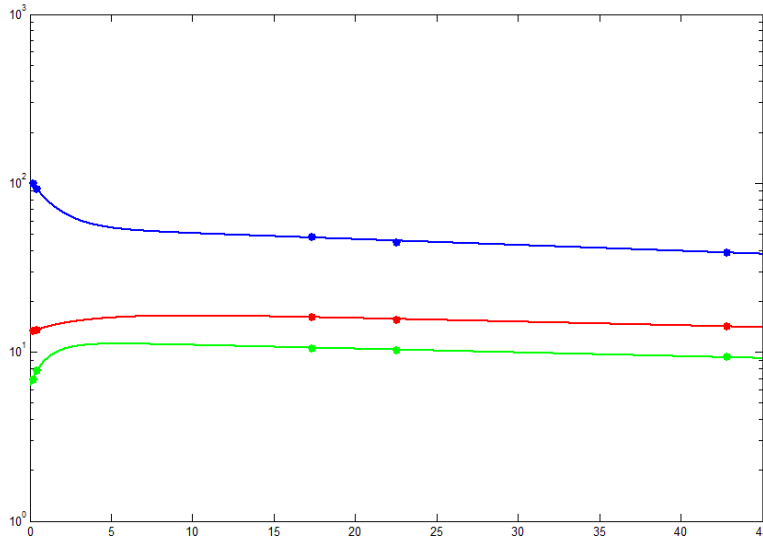
# Beispiel: PRRT mit [177Lu]-DOTATATE

## S-Werte 177Lu (Auszug)

| OLINDA - Organ Level                | Internal Dose                 | Assessment Code |            |          |          |          |          |          |           |          |          |          |          |          |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Dose Conversion Factors (mGy/MBq-s) | Nuclide: Lu-177 (6.73E00 day) |                 | Adult Male |          |          |          |          |          |           |          |          |          |          |          |
|                                     | Adrenals                      | Kidneys         | Liver      | Lungs    | Muscle   | Ovaries  | Pancreas | Red Mar. | CortBoneS | Thymus   | Thyroid  | UB Cont  | Uterus   | TotBody  |
| Adrenals                            | 1,46E-03                      | 2,01E-07        | 1,22E-07   | 6,38E-08 | 3,11E-08 | 9,92E-09 | 3,00E-07 | 6,74E-08 | 2,99E-08  | 1,61E-08 | 2,24E-09 | 2,74E-09 | 5,88E-09 | 3,57E-07 |
| Brain                               | 1,39E-10                      | 5,71E-11        | 2,65E-10   | 2,24E-09 | 6,15E-09 | 6,67E-12 | 1,62E-10 | 2,30E-08 | 3,34E-08  | 2,19E-09 | 3,69E-08 | 2,78E-12 | 5,77E-12 | 3,45E-07 |
| Breasts                             | 1,35E-08                      | 5,70E-09        | 1,91E-08   | 6,48E-08 | 1,20E-08 | 7,94E-10 | 1,69E-08 | 1,47E-08 | 8,91E-09  | 6,75E-08 | 8,01E-09 | 4,45E-10 | 8,95E-10 | 3,39E-07 |
| Gallbladder Wall                    | 9,31E-08                      | 1,08E-07        | 2,41E-07   | 2,02E-08 | 3,28E-08 | 2,76E-08 | 2,15E-07 | 3,09E-08 | 1,20E-08  | 7,62E-09 | 8,59E-10 | 1,00E-08 | 3,06E-08 | 3,59E-07 |
| LLI Wall                            | 5,95E-09                      | 1,50E-08        | 4,06E-09   | 1,01E-09 | 3,68E-08 | 3,12E-07 | 1,17E-08 | 5,51E-08 | 2,02E-08  | 5,27E-10 | 7,88E-11 | 1,60E-07 | 1,36E-07 | 3,58E-07 |
| Small Intestine                     | 1,97E-08                      | 5,77E-08        | 3,14E-08   | 3,76E-09 | 3,08E-08 | 2,54E-07 | 3,77E-08 | 5,04E-08 | 1,57E-08  | 1,48E-09 | 1,55E-10 | 5,88E-08 | 2,30E-07 | 3,59E-07 |
| Stomach Wall                        | 7,58E-08                      | 6,93E-08        | 3,98E-08   | 3,22E-08 | 2,99E-08 | 1,55E-08 | 3,50E-07 | 2,25E-08 | 1,09E-08  | 9,72E-09 | 1,30E-09 | 6,08E-09 | 1,47E-08 | 3,55E-07 |
| ULI Wall                            | 2,35E-08                      | 5,77E-08        | 5,05E-08   | 5,02E-09 | 3,03E-08 | 2,28E-07 | 4,42E-08 | 4,26E-08 | 1,38E-08  | 1,74E-09 | 2,72E-10 | 4,30E-08 | 1,13E-07 | 3,58E-07 |
| Heart Wall                          | 7,66E-08                      | 2,12E-08        | 6,41E-08   | 1,21E-07 | 2,53E-08 | 2,01E-09 | 9,56E-08 | 2,97E-08 | 1,57E-08  | 2,04E-07 | 1,14E-08 | 6,50E-10 | 1,81E-09 | 3,55E-07 |
| Kidneys                             | 2,01E-07                      | 8,03E-05        | 8,13E-08   | 1,80E-08 | 2,73E-08 | 1,89E-08 | 1,37E-07 | 4,71E-08 | 1,73E-08  | 5,08E-09 | 1,06E-09 | 6,04E-09 | 1,72E-08 | 3,53E-07 |
| Liver                               | 1,22E-07                      | 8,13E-08        | 1,29E-05   | 5,47E-08 | 2,09E-08 | 1,03E-08 | 1,06E-07 | 2,45E-08 | 1,34E-08  | 1,61E-08 | 2,60E-09 | 3,47E-09 | 8,99E-09 | 3,54E-07 |
| Lungs                               | 6,43E-08                      | 1,81E-08        | 5,63E-08   | 2,39E-05 | 2,61E-08 | 1,75E-09 | 4,67E-08 | 3,05E-08 | 1,85E-08  | 7,95E-08 | 2,37E-08 | 3,26E-10 | 1,30E-09 | 3,50E-07 |
| Muscle                              | 3,11E-08                      | 2,73E-08        | 2,09E-08   | 2,59E-08 | 8,72E-07 | 3,93E-08 | 3,42E-08 | 2,53E-08 | 2,08E-08  | 2,94E-08 | 3,24E-08 | 3,59E-08 | 3,94E-08 | 3,47E-07 |
| Ovaries                             | 9,92E-09                      | 1,89E-08        | 1,03E-08   | 1,75E-09 | 3,93E-08 | 2,72E-03 | 1,06E-08 | 5,78E-08 | 1,80E-08  | 6,56E-10 | 8,84E-11 | 1,45E-07 | 4,21E-07 | 3,61E-07 |
| Pancreas                            | 3,00E-07                      | 1,37E-07        | 1,06E-07   | 4,66E-08 | 3,42E-08 | 1,06E-08 | 2,53E-04 | 4,05E-08 | 1,78E-08  | 1,61E-08 | 2,25E-09 | 4,13E-09 | 1,07E-08 | 3,60E-07 |
| Red Marrow                          | 6,85E-08                      | 4,74E-08        | 2,31E-08   | 3,07E-08 | 2,53E-08 | 5,78E-08 | 3,87E-08 | 1,19E-05 | 5,60E-08  | 2,29E-08 | 2,19E-08 | 2,19E-08 | 3,76E-08 | 2,67E-07 |
| Osteogenic Cells                    | 6,88E-08                      | 4,07E-08        | 3,07E-08   | 4,24E-08 | 4,68E-08 | 4,18E-08 | 4,13E-08 | 5,58E-06 | 1,33E-05  | 3,11E-08 | 4,95E-08 | 2,49E-08 | 3,10E-08 | 1,08E-06 |
| Skin                                | 9,53E-09                      | 1,11E-08        | 1,02E-08   | 1,13E-08 | 1,63E-08 | 8,70E-09 | 8,36E-09 | 1,21E-08 | 1,37E-08  | 1,28E-08 | 1,27E-08 | 1,11E-08 | 8,36E-09 | 3,36E-07 |
| Spleen                              | 1,26E-07                      | 1,85E-07        | 1,97E-08   | 4,52E-08 | 2,87E-08 | 1,06E-08 | 3,63E-07 | 2,48E-08 | 1,35E-08  | 9,53E-09 | 2,33E-09 | 2,69E-09 | 7,25E-09 | 3,54E-07 |
| Testes                              | 5,20E-10                      | 1,05E-09        | 5,30E-10   | 1,35E-10 | 2,77E-08 | 0,00E+00 | 8,53E-10 | 8,51E-09 | 1,13E-08  | 7,43E-11 | 1,04E-11 | 1,05E-07 | #####    | 3,47E-07 |
| Thymus                              | 1,61E-08                      | 5,08E-09        | 1,61E-08   | 7,75E-08 | 2,94E-08 | 6,56E-10 | 1,61E-08 | 2,35E-08 | 1,34E-08  | 1,14E-03 | 4,26E-08 | 2,85E-10 | 6,11E-10 | 3,51E-07 |
| Thyroid                             | 2,24E-09                      | 1,06E-09        | 2,60E-09   | 2,35E-08 | 3,24E-08 | 8,84E-11 | 2,25E-09 | 2,07E-08 | 2,10E-08  | 4,26E-08 | 1,15E-03 | 3,91E-11 | 8,34E-11 | 3,51E-07 |
| Urinary Bladder Wall                | 2,28E-09                      | 5,61E-09        | 3,51E-09   | 4,61E-10 | 3,86E-08 | 1,49E-07 | 4,27E-09 | 2,45E-08 | 1,08E-08  | 2,89E-10 | 3,95E-11 | 5,74E-05 | 3,52E-07 | 3,57E-07 |
| Uterus                              | 5,88E-09                      | 1,72E-08        | 8,99E-09   | 1,30E-09 | 3,94E-08 | 4,21E-07 | 1,07E-08 | 4,16E-08 | 1,35E-08  | 6,11E-10 | 8,34E-11 | 3,42E-07 | 3,03E-04 | 3,61E-07 |
| Total Body                          | 3,58E-07                      | 3,54E-07        | 3,54E-07   | 3,50E-07 | 3,48E-07 | 3,62E-07 | 3,61E-07 | 3,53E-07 | 3,49E-07  | 3,51E-07 | 3,52E-07 | 6,74E-08 | 3,62E-07 | 3,49E-07 |

# Beispiel: PRRT mit [177Lu]-DOTATATE

## TACs und Dosis



GK :  $\tau_{GK} = 45,3h$

Leber + Tumor :  $\tau_{Leber+Tumor} = 18,7h$

Tumor :  $\tau_{Tumor} = 12,3h$

$\Rightarrow \tau_{Leber} = (18,7 - 12,3)h = 6,4h$

$$S(GK \leftarrow GK) = 1,26 \cdot 10^{-3} \frac{mGy}{MBq \cdot h}$$

$$S(Leber \leftarrow Leber) = 4,46 \cdot 10^{-2} \frac{mGy}{MBq \cdot h}$$

$$S(Tumor \leftarrow Tumor) = ?$$

$$S(Tumor \leftarrow Tumor) = S(Leber \leftarrow Leber) \cdot \frac{m_{Leber}}{m_{Tumor}}$$

$$S(Tumor \leftarrow Tumor) = 4,46 \cdot 10^{-2} \frac{mGy}{MBq \cdot h} \cdot \frac{1800g}{200g} = 0,4 \frac{mGy}{MBq \cdot h}$$

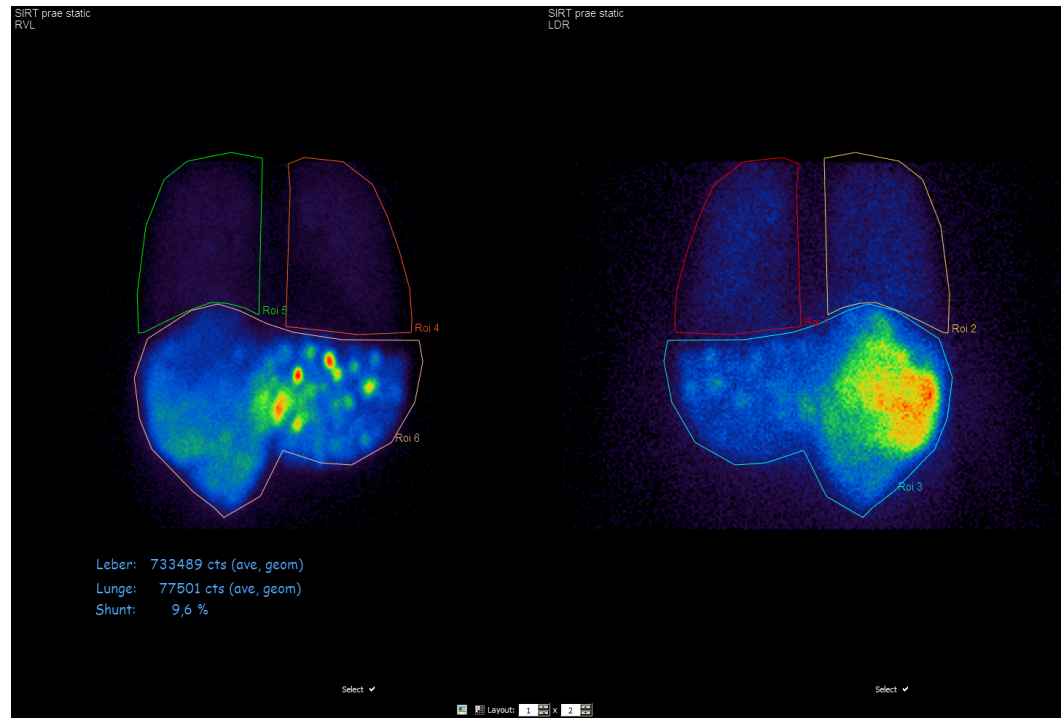
$$D_{GK} = 0,057 \frac{mGy}{MBq}$$

$$D_{Leber} = 0,29 \frac{mGy}{MBq}$$

$$D_{Tumor} = 4,9 \frac{mGy}{MBq}$$

# Beispiel2: Planung einer SIRT (SirSpheres) mit [99m-Tc]-MAA

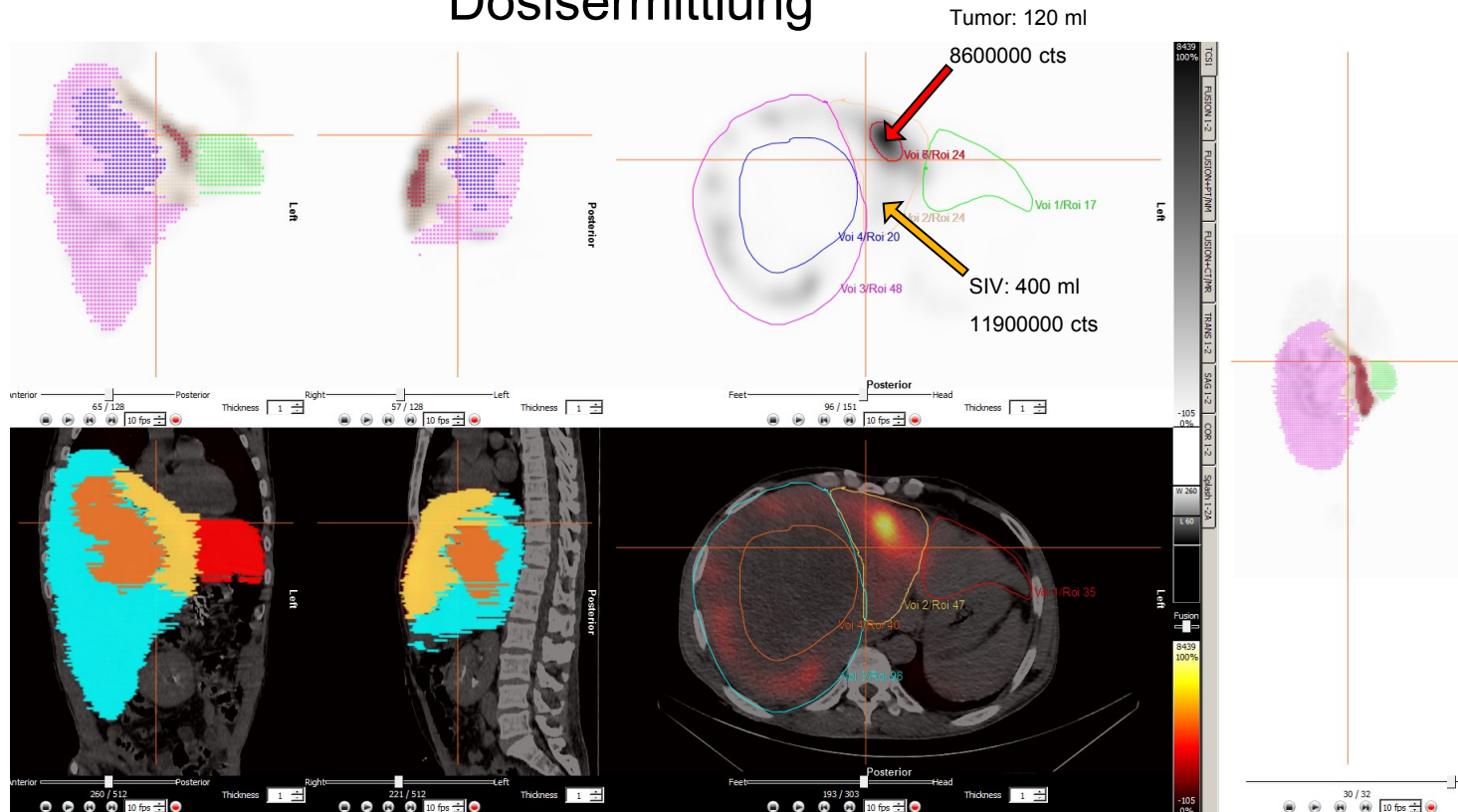
## Ermittlung des Lungen Shunts (LS):



|                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| $LS < 10\%$           | keine Aktivitätsreduktion  |
| $10\% \leq LS < 15\%$ | Aktivitätsreduktion um 20% |
| $15\% \leq LS < 20\%$ | Aktivitätsreduktion um 40% |
| $LS \geq 20\%$        | Kontraindikation           |

# Beispiel2: Planung einer SIRT (SirSpheres) mit [99m-Tc]-MAA

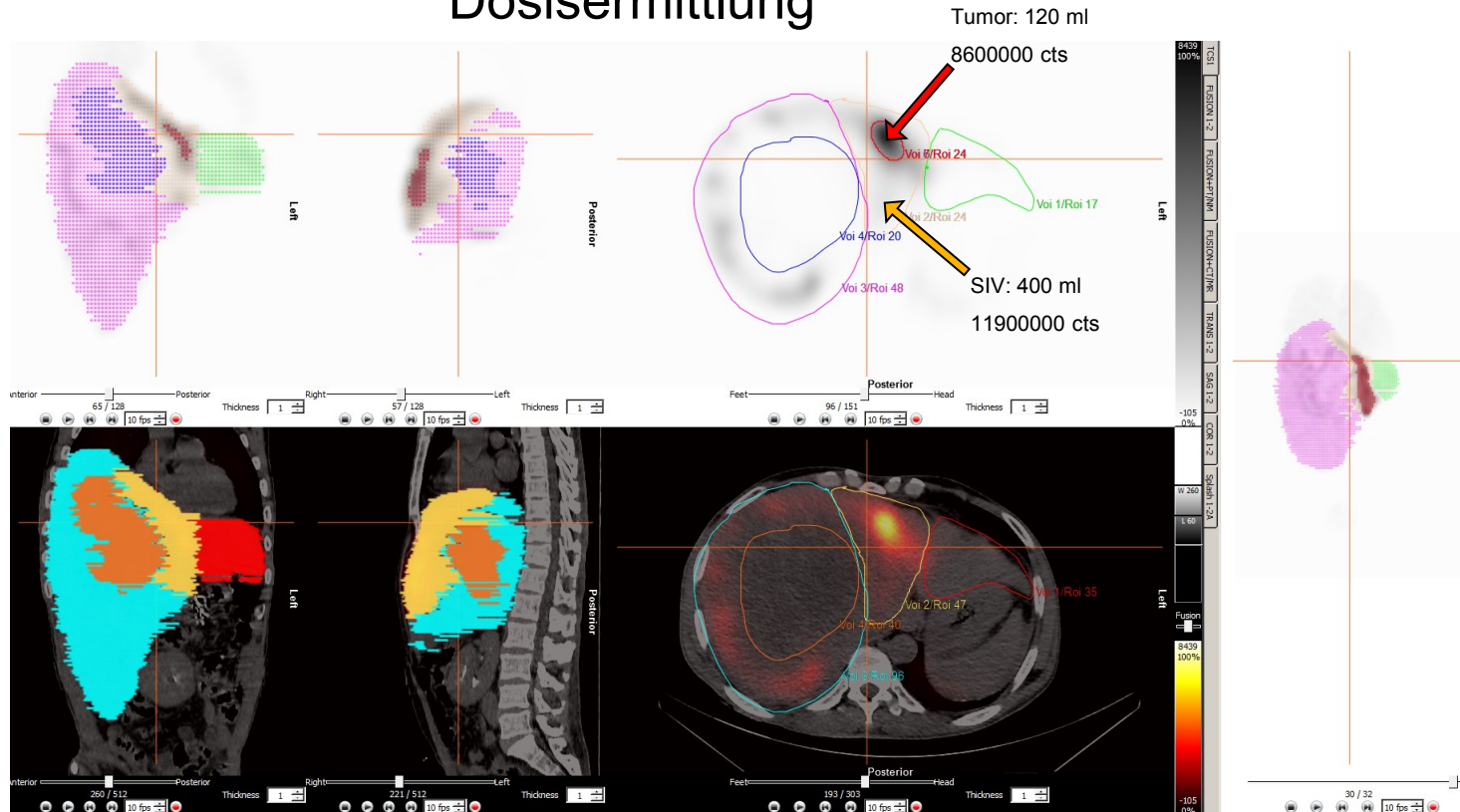
## Dosisermittlung



$$D_{\text{Läsion}} = \frac{A_{\text{Läsion}} [\text{MBq}]}{m_{\text{Läsion}} [\text{g}]} \cdot 50 \text{ Gy} \sim \frac{A_{\text{Läsion}} [\text{GBq}]}{V_{\text{Läsion}} [\text{ml}]} \cdot 50000 \text{ Gy} \Rightarrow \frac{D_{\text{Läsion}}}{A_{\text{admin}} [\text{GBq}]} = \frac{A_{\text{Läsion}} [\text{GBq}]}{A_{\text{admin}} [\text{GBq}]} \cdot \frac{50000 \text{ Gy}}{V_{\text{Läsion}} [\text{ml}]}$$

# Beispiel2: Planung einer SIRT (SirSpheres) mit [99m-Tc]-MAA

## Dosisermittlung



$$\frac{D_{Läsion}}{A_{admin} [GBq]} = \frac{A_{Läsion} [GBq]}{A_{admin} [GBq]} \cdot \frac{50000 Gy}{V_{Läsion} [ml]} = \frac{Cts_{Läsion} [GBq]}{Cts_{admin} [GBq]} \cdot \frac{50000 Gy}{V_{Läsion} [ml]}$$

$$\frac{D_{SIV}}{A_{admin} [GBq]} = \frac{50000}{400} \frac{Gy}{GBq} = 125 \frac{Gy}{GBq} \text{ und } \frac{D_{Tumor}}{A_{admin} [GBq]} = \frac{86}{119} \cdot \frac{50000}{120} \frac{Gy}{GBq} = 300 \frac{Gy}{GBq}$$

# Beispiel2: Planung einer SIRT (SirSpheres) mit [99m-Tc]-MAA

## Dosimetrieprotokoll nach SIRTeX®

| Patient | geb. Datum | Gewicht/kg | Größe/cm | BSA  |
|---------|------------|------------|----------|------|
|         |            |            |          | 1,85 |

|                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MAA-Scan am:<br>10.04.2017 | Ascites: ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/><br>alle Tumoren erreicht: ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/><br>Anzahl von Läsionen: _____ oder > 10 <input type="checkbox"/><br>keine Studie <input type="checkbox"/> CIRT <input type="checkbox"/> Soramic <input type="checkbox"/> |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Simulation in 2 Positionen (SIV, RL). Ausgedehnte Raumforderung (ca. 1600 ml) im RL ohne Speicherung (Nekrose?). Diffuse Anreicherungen im RL mit moderatem Uptake in den Randgebieten der Raumforderung. Gutes Targeting in SIV. Lungenschunt ca. 15 % (ECT).  
 Dosisreduktion wg. Shunt?  
 Tumorlast (30% SIV, 26% RL) ok?  
 Gewichtung o.k. (75% RL ohne Raumforderung, 15% SIV)

|        | Tumoranteil: | Volumen/ml | Lungenschunt | Shuntredukti | Dosisreduktion |
|--------|--------------|------------|--------------|--------------|----------------|
| SIV    | 30%          | 400        | 15%          | 0,8          | 0%             |
| SVIII* | 26%          | 2300       |              |              | 0%             |

\* ohne Raumforderung

Volumen Gesamtleber ca. 3000 ml (ohne Raumforderung)

$$\text{Aktivität [GBq]} = \text{BSA} - 0,2 + \frac{\text{Tumolvolumen}}{\text{Gesamtvolumen (Leber)}}$$

### Behandlung

BSA-Methode:

Tübinger Empfehlung (x 1,1):

Tabelle:

| SIV  | SVIII* |
|------|--------|
| 1,56 | 1,53   |
| 1,72 | 1,68   |
| 1,90 | 1,90   |

Bemerkungen:

gewählte Aktivität nach modifiziert BSA:

|      |      |
|------|------|
| 1,60 | 1,60 |
|------|------|

Aufteilung:

Behandlungsdatum:

zu applizierende Aktivität Y90 in MBq:

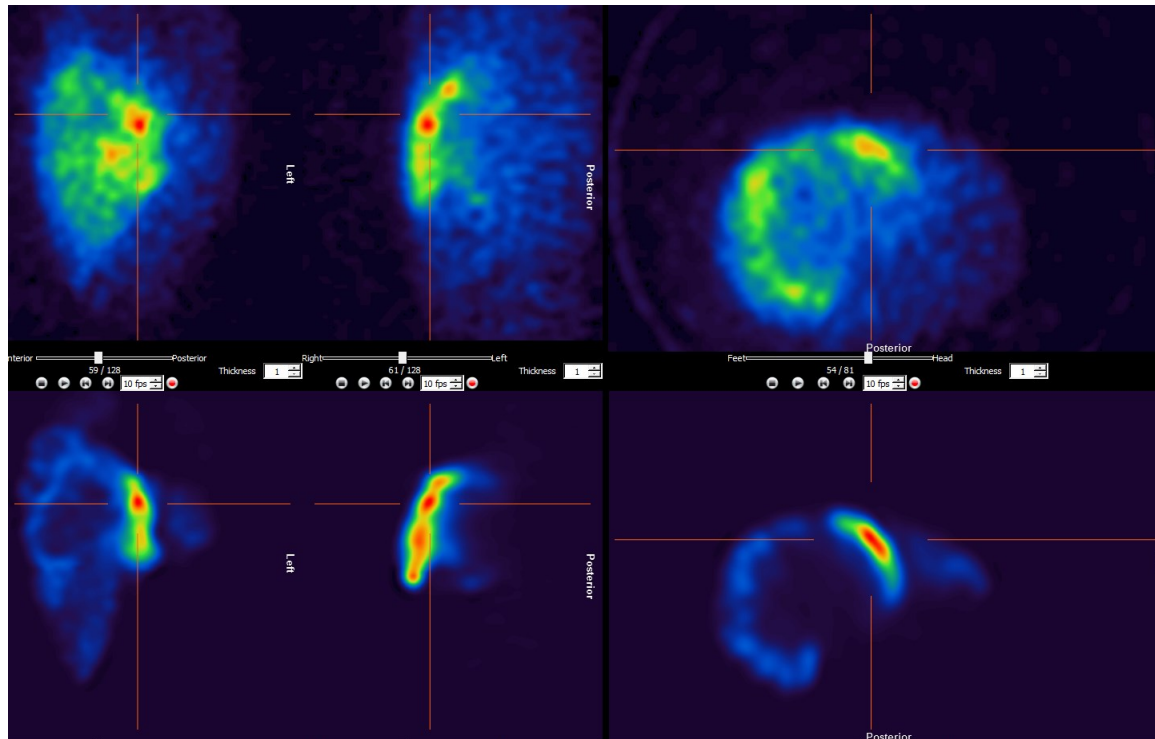
verordnete Aktivität Y90 in MBq

### Dosis

|            |            |
|------------|------------|
| 13%        | 75%        |
| 19.04.2017 | 19.04.2017 |
| 208        | 1200       |
| 300        | 50         |
| 250/450    | 40/70      |
| 130        | 22         |
| 8          | 8          |

Gy/GBq Tumor  
 Gy/GBq Tumor Min/Max  
 Gy/GBq Leber ges.  
 Gy/GBq Lunge

# Beispiel2. SIRT: Intratherapeutische Kontrolle (Bremsstrahlbildgebung)



Therapie

Planung



UNIVERSITÄTS  
KLINIKUM  
TÜBINGEN

Universitätsklinikum Tübingen

**Kompetenz  
mit Herz**

[www.uniklinikum-tuebingen.de](http://www.uniklinikum-tuebingen.de)

**Vielen Dank**  
**für Ihre Aufmerksamkeit!**

