



Dosimetrische Konzepte der Nuklearmedizin

Dr. Roberto Mini

In der Medizin verwendete Radionuklide

Nuklearmedizin

- Nuklearmedizinische Diagnostik**
- Nuklearmedizinische Therapie**



In der Medizin verwendete Radionuklide

Nuklearmedizin

Offene radioaktive Strahlenquellen

Strahlenquellen, die radioaktive Stoffe enthalten und die sich ausbreiten und Kontamination verursachen können

- nehmen am Stoffwechsel teil
- Kontamination, Inhalation, Inkorporation



Applikationsformen nuklearmedizinischer Pharmaka

Verteilungsformen (Tracer-Kinetik)

aktiver Transport,	der Tracer selbst ist stoffwechselaktiv (I-131 in der Schilddrüse, Tl-201 im Herz) und reichert sich unter Energieverbrauch an,
passiver Transport	der Tracer ist nicht stoffwechselaktiv und wandert passiv z.B. durch Konvektion (markierte Erythrozyten im Blutstrom) oder Diffusion (Tc-99m-DTPA in Nierenkapillaren),
Partikelfixation	mechanische Ablagerung der Aktivität (Aerosole mit Tc-99m werden zur Lungenuntersuchung eingeatmet).



In der Medizin verwendete Radionuklide

Nuklearmedizinische Diagnostik

Für die nuklearmedizinische Diagnostik verwendet man aus applikationstechnischen und strahlenschutz Gründen mit Vorteil **reine Gamma-Strahler mit einer kurzen Halbwertszeit**. Diese werden in einer Trägersubstanz mit einem spezifischen metabolischen Verhalten eingebunden:

Tc-99m

$E_{\gamma}=0.140 \text{ MeV}$

Xe-133

$E_{\gamma}=0.365 \text{ MeV}$

.....



In der Medizin verwendete Radionuklide

Nuklearmedizinische Therapie

Für die nuklearmedizinische Therapie verwendet man hauptsächlich **reine Beta- oder kombinierte Beta-Gamma-Strahler**. Diese können ebenfalls in eine Trägersubstanz mit einem spezifischen metabolischen Verhalten eingebunden werden :

I-131

$E_{\gamma}=0.365 \text{ MeV}$

P-32

$E_{\beta}=1.71 \text{ MeV}$

.....



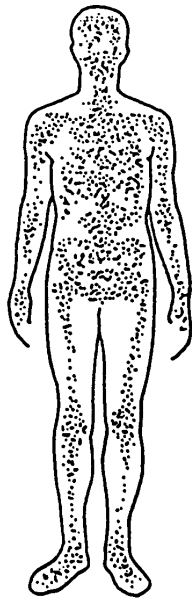
Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

Bei den Applikationen offener radioaktiver Strahlenquellen der Nuklearmedizin entstehen meist sehr komplexe radiologische Verhältnisse, die eine einfache Dosisbestimmung in den meisten Fällen verunmöglichen.

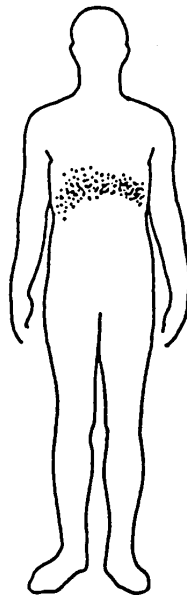
Ist die Verteilung der Radionuklide im Körper eines Patienten genügend genau bekannt, lassen sich die resultierenden Dosisverteilungen am genauesten anhand von Monte Carlo-Berechnungen ermitteln.



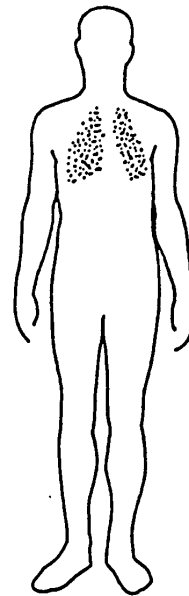
Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen



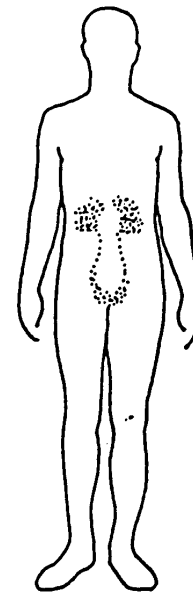
^{99m}Tc -Diphosphonate



^{99m}Tc -Sulfur Colloid

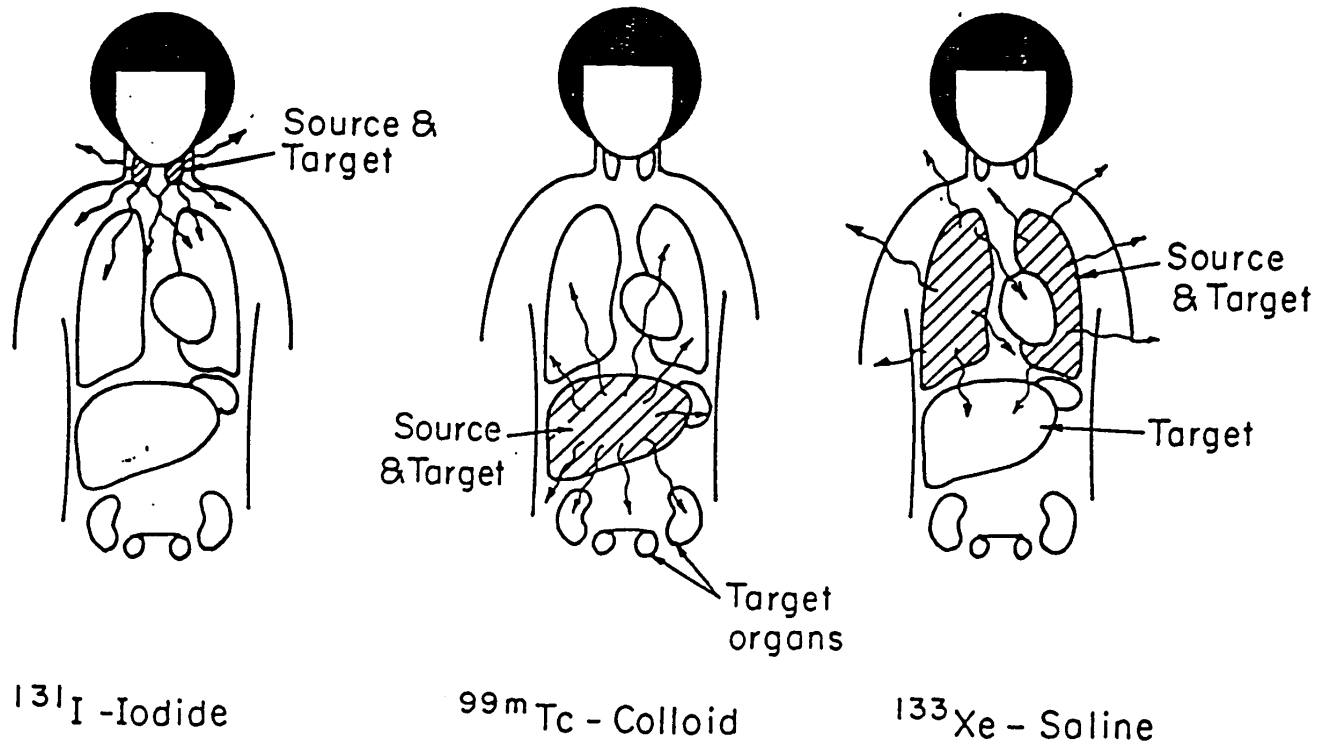


^{99m}Tc -Macroaggregates



^{99m}Tc -DTPA

Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

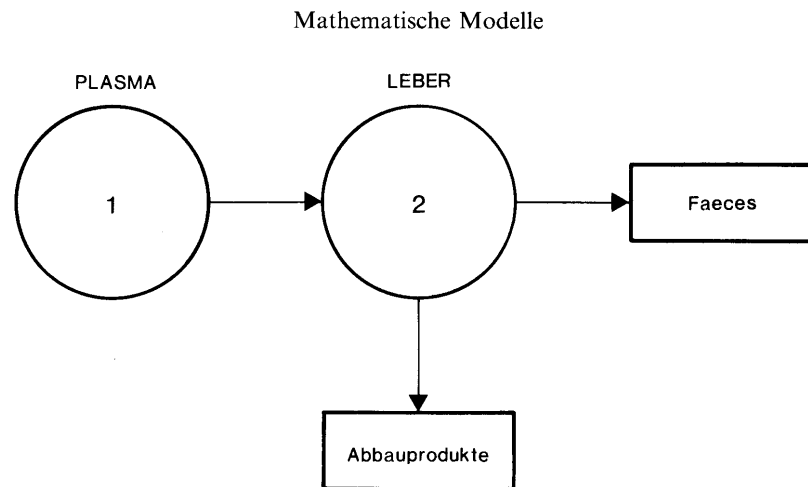


Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

$$\text{Dosis} = \text{"Biokinetik"} \otimes \text{"Physik"}$$

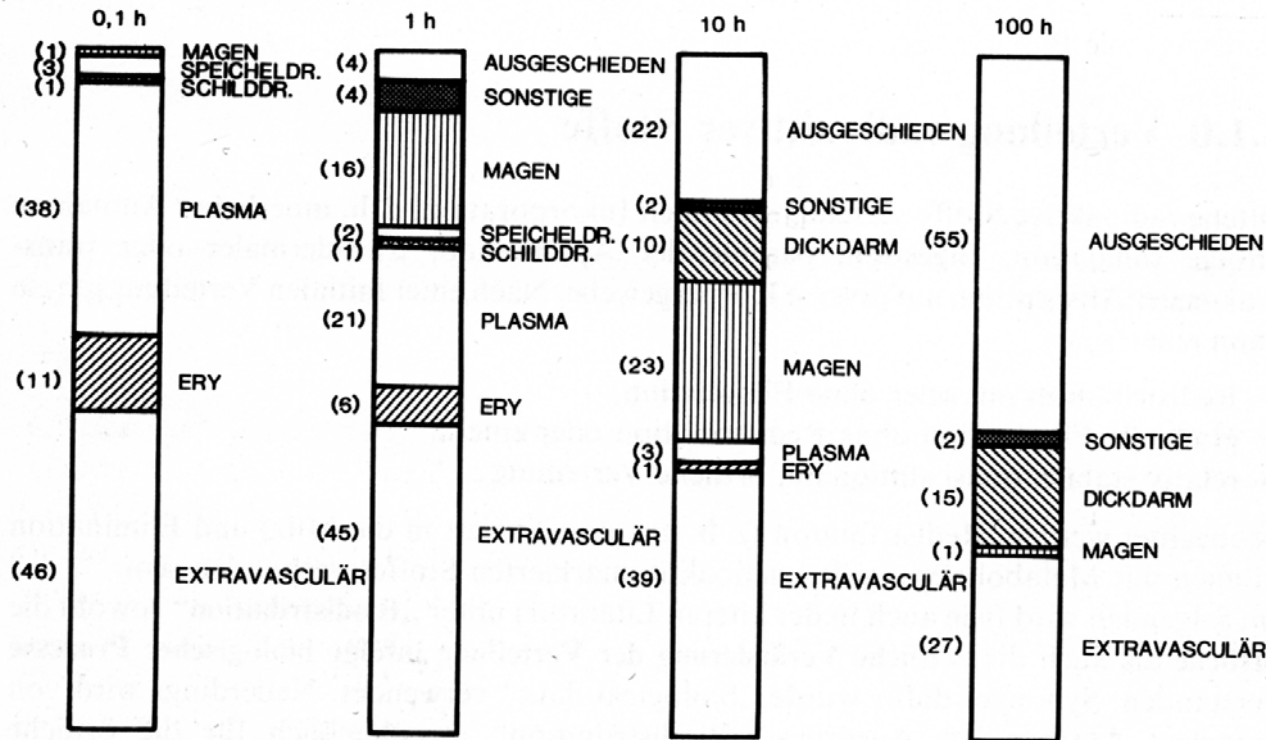


Dosimetrie bei der Applikation radioaktiver Strahlenquellen



Compartment-Modell. Durch internationale Konvention werden Compartments als Kreise dargestellt, Übergänge durch Pfeile, außerhalb des Compartment-Modells gelegene Räume durch Kästchen.

Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen



Biodistribution von Natrium-Pertechnetat. Die Verteilung der Substanz auf diverse anatomische Regionen ändert sich im Laufe der Zeit. Die Säulen repräsentieren die relative Verteilung einer verabreichten Menge von ^{99m}Tc -Pertechnetat zu vier verschiedenen Zeitpunkten nach der Injektion. Die in Klammern stehenden Zahlenwerte bedeuten Prozentsätze der verabreichten Menge von ^{99m}Tc -Pertechnetat, die für den physikalischen Zerfall korrigiert wurden (nach LATHROP 1976).

Dosimetrie bei der Applikation radioaktiver Strahlenquellen

Dosimetrie inkorporierter radioaktiver Strahlenquellen

MIRD-Konzept

(S-Faktoren)

Medical Internal Radiation Dose Committee
(Kommission der Amerikanischen Gesellschaft für
Nuklearmedizin)



Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

Die Strahlenbelastung im menschlichen Körper durch inkorporierte offene Radionuklide ergibt sich grundsätzlich aus drei Komponenten:

- a) die biologische Komponente**
- b) die strahlenphysikalische Komponente**
- c) die geometrische Komponente**



Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

Die Strahlenbelastung im menschlichen Körper durch inkorporierte offene Radionuklide ergibt sich grundsätzlich aus drei Komponenten:

a) die biologische Komponente

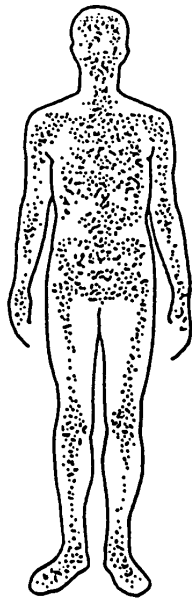
Diese umfasst die Verteilung des Radionuklides auf die Organe und Gewebe und deren Aufenthaltsdauer (Biodistribution und Biokinetik)

b) die strahlenphysikalische Komponente

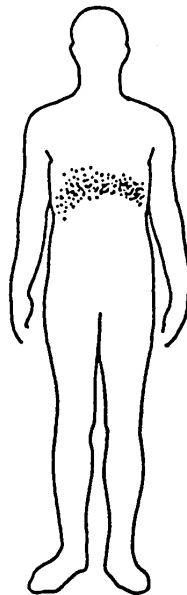
c) die geometrische Komponente



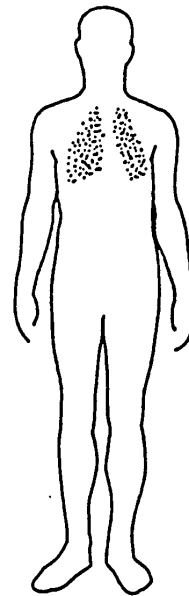
Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen



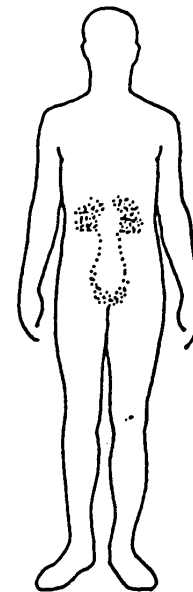
^{99m}Tc -Diphosphonate



^{99m}Tc -Sulfur Colloid



^{99m}Tc -Macroaggregates

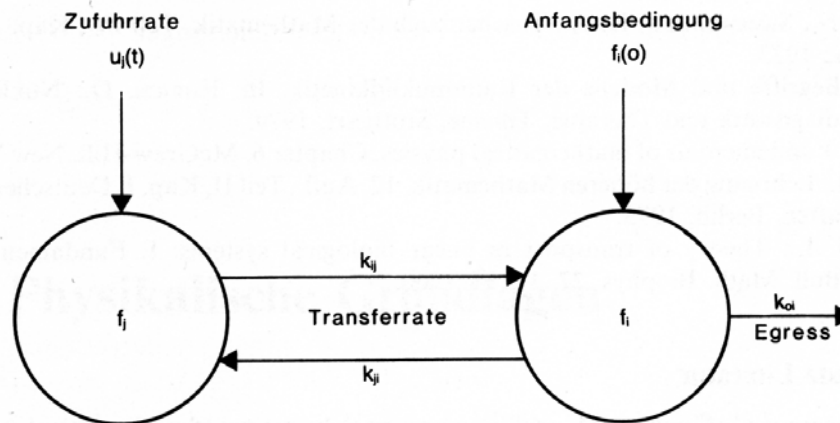


^{99m}Tc -DTPA

Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

Bei Funktionsanalysen ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Verteilung der radionuklide durch die organspezifische metabolische Prozesse zeitlich variiert (Aufnahme, Einlagerung, Ausscheidung)

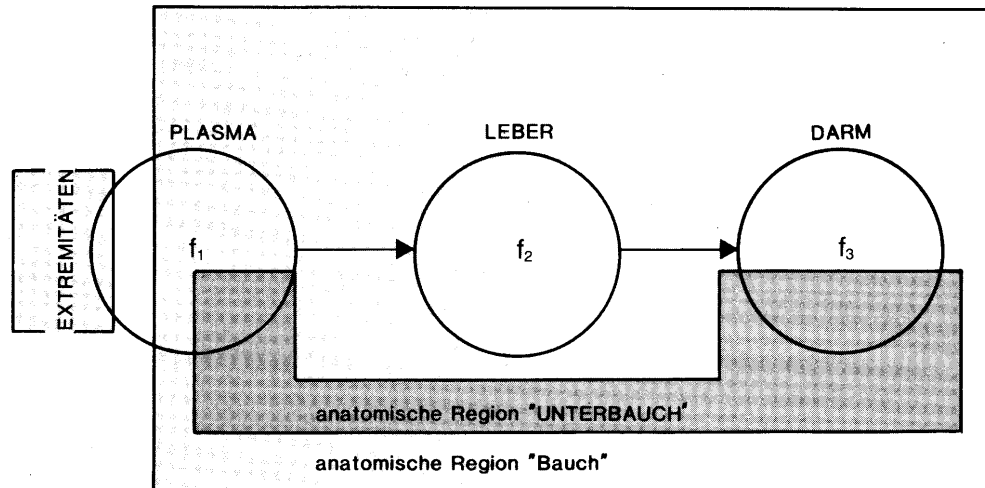
Graphische Darstellung und Nomenklatur



Compartment-Modell. Graphische Veranschaulichung des Gleichungssystems (4-65). Pfeile ohne speziell gekennzeichneten Anfangspunkt bedeuten externe Substanzzufuhr, solche ohne definierten Endpunkt irreversiblen Egress aus dem Gesamtsystem (nach BERMAN 1976).

Dosimetrie bei der Applikation radioaktiver Strahlenquellen

Mathematische Modelle



Identifikationskoeffizienten. Anatomische Regionen haben häufig Anteil an mehreren Compartments und umgekehrt. So befinden sich beispielsweise Teile des Compartments „PLASMA“ wie auch Teile des Compartments „DARM“ in der anatomischen Region „UNTERBAUCH“. Die anatomische Region „BAUCH“ hingegen umfaßt einen größeren Teil des Compartments „PLASMA“ und den gesamten „DARM“. Das Compartment „LEBER“ liegt zur Gänze im Bauch, hingegen hat das Compartment „PLASMA“ Anteil an den Extremitäten und dem Bauch. Der Rest des Plasmas befindet sich in Kopf und Thorax.

Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

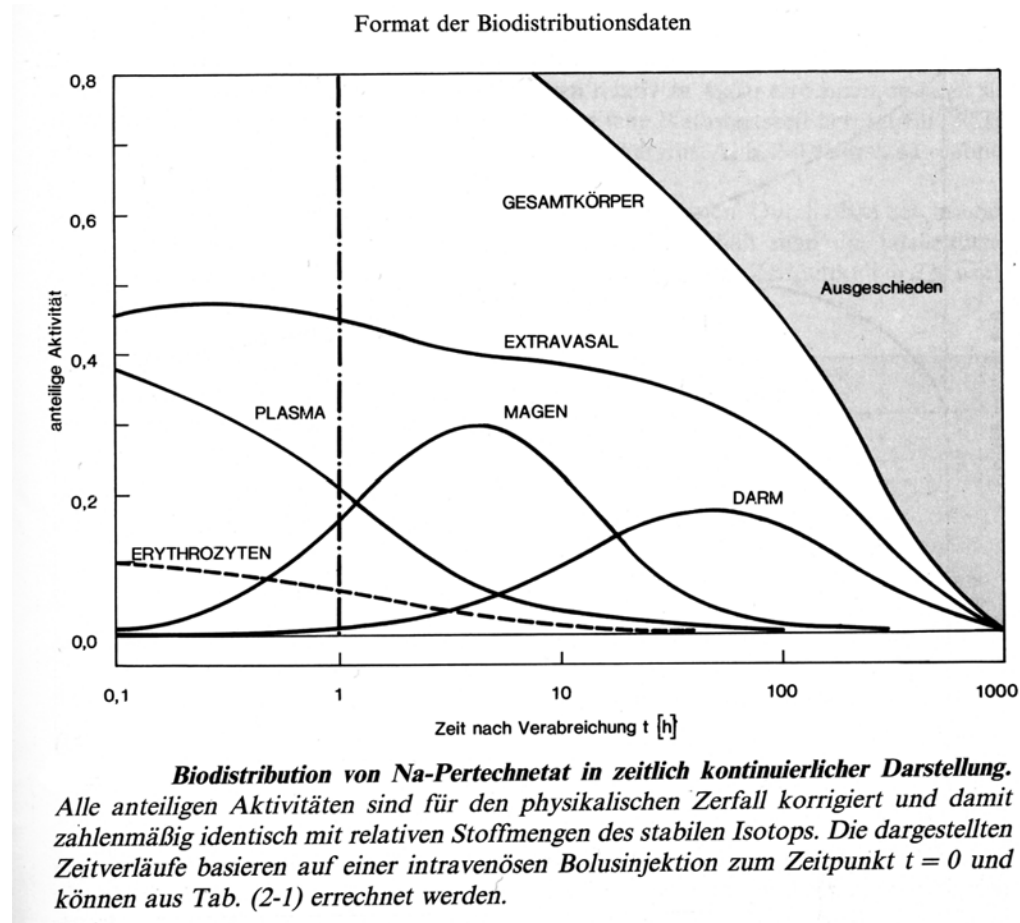
Die Ermittlung der Strahlenbelastung im menschlichen Körper erfolgt

- durch Messung der Radioaktivität im menschlichen Körper als Ganzes, in Organen oder Körperflüssigkeiten zu jeweils verschiedenen Zeitpunkten nach der Verabreichung der Radionuklide.

- Anreicherungszeiten
- Verweildauer
- Ausscheidungsgeschwindigkeiten
(biologische HWZ)



Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen



Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

Biodistributionsdaten der anteiligen Aktivitäten $\alpha_h(t)$ der Organgruppen h nach einmaliger intravenöser Verabreichung von Natrium-Pertechnetat
(nach LATHROP et al. 1976)

Organgruppen h	α_{h1}	α_{h2}	α_{h3}	α_{h4}
	$\lambda_1 = 7,92 \text{ h}^{-1}$	$\lambda_2 = 0,630 \text{ h}^{-1}$	$\lambda_3 = 0,0702 \text{ h}^{-1}$	$\lambda_4 = 0,00396 \text{ h}^{-1}$
EXTRAVASAL (EV)	-0,0739	0,0962	0,0	0,402
DARM	0,0	0,0107	-0,231	0,220
PLASMA	0,093	0,301	0,0497	0,00582
ERYTHROZYTEN (ERY)	0,026	0,0860	0,0142	0,00132
SPEICHELDRÜSEN (SPD)	0,0	0,0300	0,00632	0,000546
MAGEN	0,0345	-0,477	0,424	0,0191
SCHILDDRÜSE (THYR)	-0,0199	0,0165	0,00307	0,000268
GESAMTKÖRPER (TOT)	0,0	0,0661	0,259	0,675

Biodistribution und Biokinetik

h = Index für Organgruppe (Magen, Plasma, etc.).

$\alpha_h(t)$ = anteilige Aktivität der Organgruppe h zum Zeitpunkt t.

λ_j = Eliminationskonstante des j-ten Exponentialtermes.

α_{hj} = Gewichtungsfaktor des j-ten Exponentialtermes für Organgruppe h.

Die anteilige Aktivität der Organgruppe h ist folgendermaßen definiert:

$$\alpha_h(t) = \alpha_{h1} e^{-\lambda_1 t} + \alpha_{h2} e^{-\lambda_2 t} + \alpha_{h3} e^{-\lambda_3 t} + \alpha_{h4} e^{-\lambda_4 t}$$



Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

Die Strahlenbelastung im menschlichen Körper durch inkorporierte offene Radionuklide ergibt sich grundsätzlich aus drei Komponenten:

a) die biologische Komponente

b) die strahlenphysikalische Komponente

Sie umfasst die von der Art und der Menge des Radionuklides durch Strahlenemission abgegebene Energie und deren Absorption in den einzelnen Organen und Geweben.

c) die geometrische Komponente



In der Nuklearmedizin hauptsächlich verwendete Radioisotope

Nuklid	HWZ	Strahlung	γ -Energie	Verwendung
Tc-99m	6 h	γ	140 keV	Szintigraphie
I-123	13,2 h	γ	159 keV	Szintigraphie
I-125	60 d	γ	30 keV	In Vitro-Tests (Radioimmunoassays)
I-131	8 d	γ, β^-	364 keV	Therapie
Tl-201	73 h	γ	72 keV	Szintigraphie
F-18	110 m	β^+	511 keV	Positronenemissionstomographie (PET)
O-15	2 m	β^+	511 keV	Positronenemissionstomographie (PET)

Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

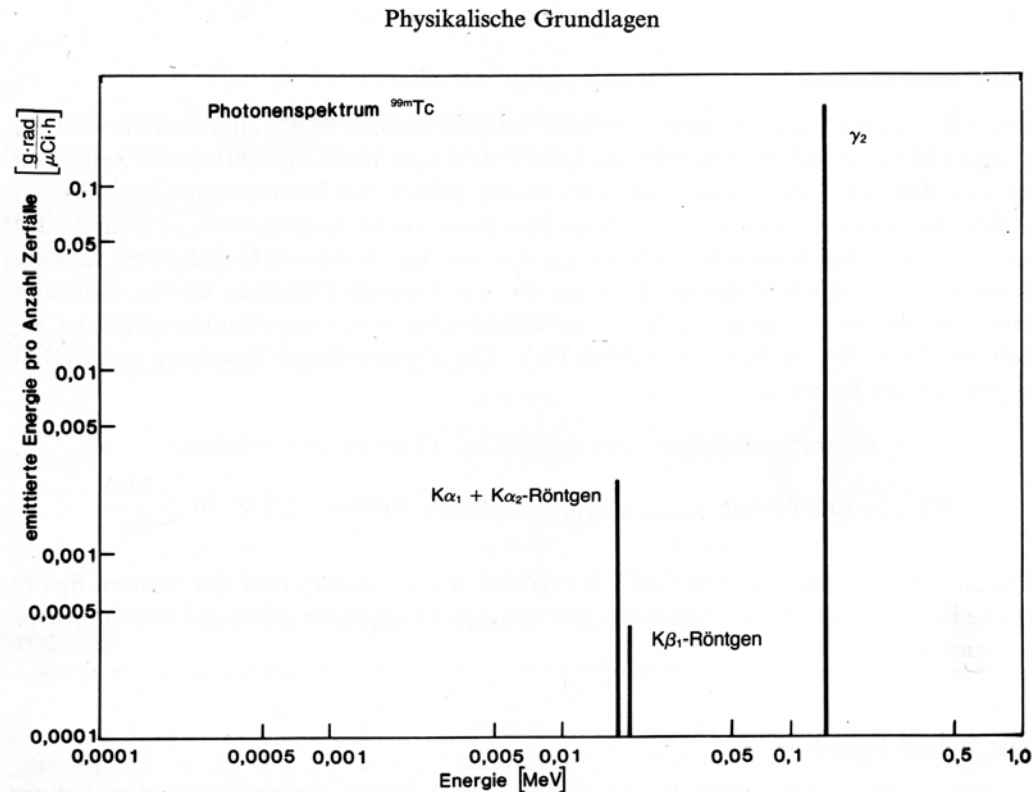
Die Ermittlung der Strahlenbelastung im menschlichen Körper erfolgt

- anhand der physikalischen Daten über den Zerfall der applizierten Radionuklide und der dabei entstehenden Strahlungen

- physikalische HWZ
- Art und Energie der emittierten Strahlung
- Strahlenintensität

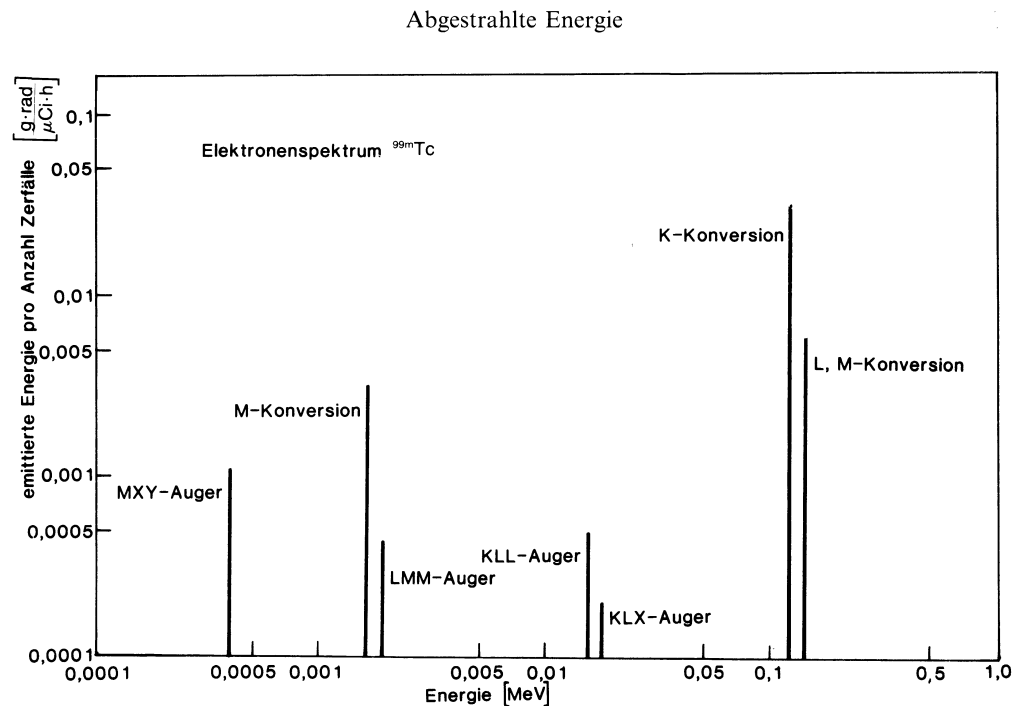


Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen



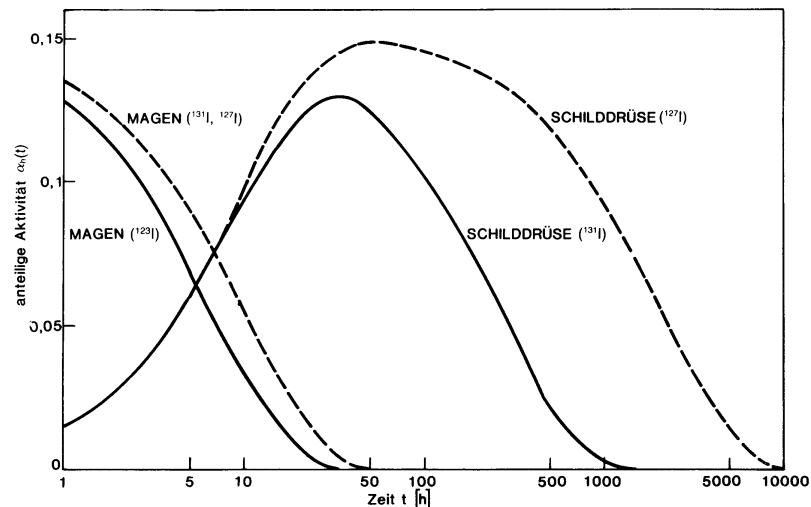
Emissionsspektrum von $^{99m}\text{Technetium}$.

Dosimetrie bei der Applikation radioaktiver Strahlenquellen



Dosimetrie bei der Applikation radioaktiver Strahlenquellen

Effektive HWZ



Jodkinetik nach oraler Verabreichung. Die strichlierten Linien bedeuten anteilige Aktivitäten (identisch mit anteiligen Verteilungsfunktionen für das stabile Isotop ^{127}J) für eine maximale Schilddrüsenakkumulation von 15% (nach etwa 50 Stunden). Infolge des physikalischen Zerfalls ist die tatsächliche Aktivität der Schilddrüse relativ zur applizierten Aktivität geringer (durchgezogene Kurve für ^{131}J). Die anteilige Aktivität des Magens klingt bereits infolge der Biokinetik so rasch ab, daß der physikalische Zerfall für ^{131}J vernachlässigt werden kann. Für das kürzerlebige Isotop ^{123}J ist die tatsächlich vorhandene Aktivität relativ zu A_0 jedoch deutlich geringer als die anteilige Aktivität.

Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

Die Strahlenbelastung im menschlichen Körper durch inkorporierte offene Radionuklide ergibt sich grundsätzlich aus drei Komponenten:

a) die biologische Komponente

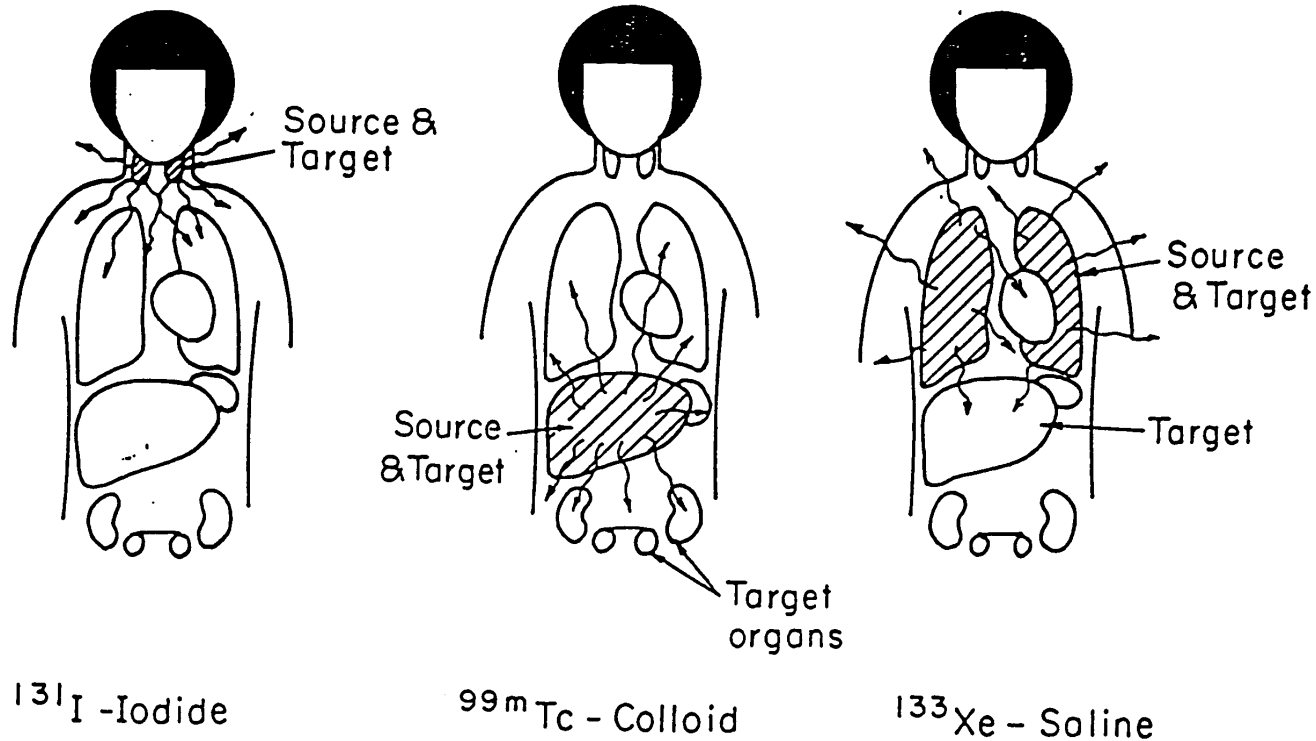
b) die strahlenphysikalische Komponente

c) die geometrische Komponente

Diese berücksichtigt Form und Masse der Organe sowie die geometrische Lagebeziehung zwischen den strahlenden und den bestrahlten Organen



Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen



Dosimetrie bei der Applikation radioaktiver Strahlenquellen

Einfache Dosisabschätzungen bei inkorporierter Gammastrahlern

- Die Dosimetrie von Gamma-Strahlern ist stark von den räumlichen Verhältnissen (Anatomie, Radionuklidverteilung) abhängig.
- Nur ein kleiner Teil der Energie wird am Emissionsort (Organ) deponiert.

Falls das Radionuklid in einem punktförmigen Depot konzentriert ist, lassen sich die Dosen wie folgt abschätzen:

$$D(r) = K_{\gamma} * t_{a \rightarrow w} * A * k(r) / r^2$$

K_{γ} : Gamma-Dosisleistungskonstante;

$k(r)$: Absorptionskorrektur-Faktor

$t_{a \rightarrow w}$: Verhältnis der Massenenergieabsorptionskoeff.



Dosimetrie bei der Applikation radioaktiver Strahlenquellen

Einfache Dosisabschätzung bei inkorporierten Beta- oder Alpha-Strahlern unter folgenden Bedingungen:

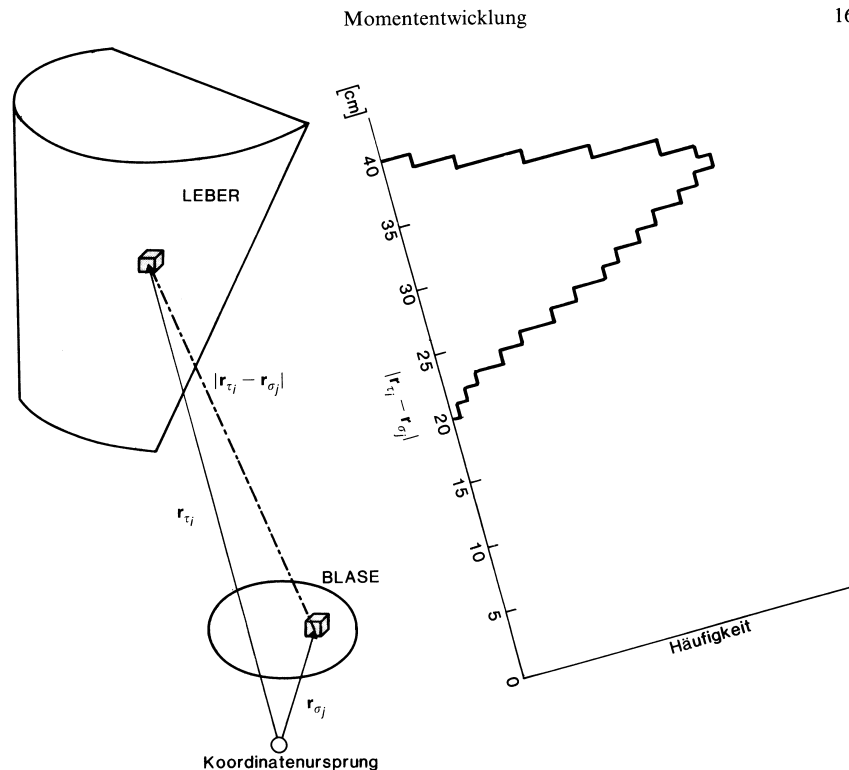
- die Radionuklide sind homogen in einem Organ verteilt
- die Abmessungen des Organes sind gross gegenüber der Reichweite der emittierten Strahlenteilchen (α, β)

$$D = A \cdot E \cdot t / G$$

A: Aktivität; E=Energie der Strahlenteilchen
G: Masse des Organes; t: Expositionszeit

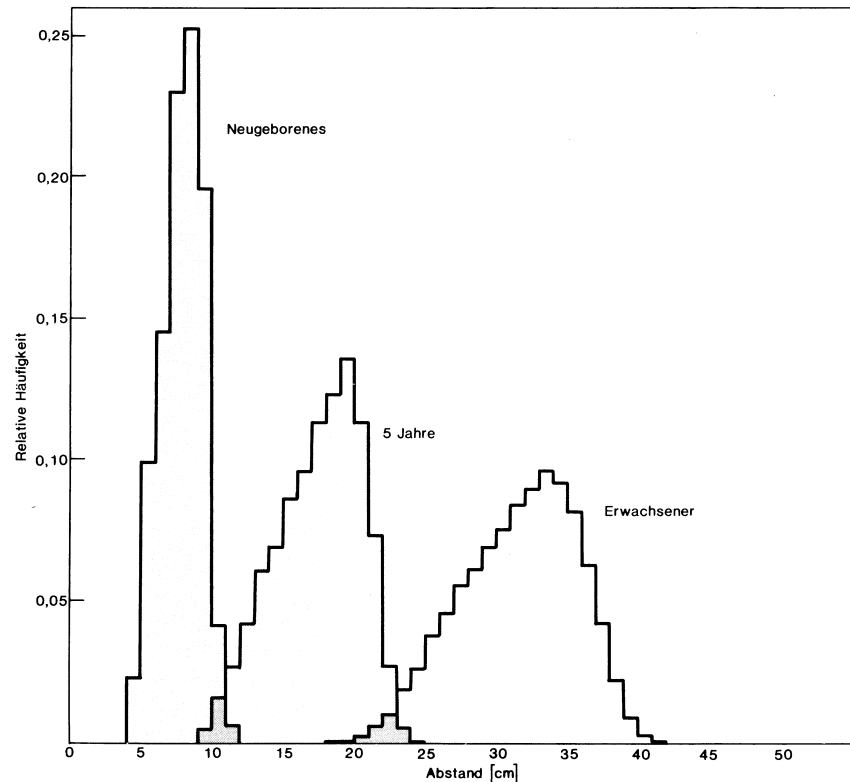


Dosimetrie bei der Applikation radioaktiver Strahlenquellen



Abstandshistogramm für das Organpaar (Harnblase, Leber). Beide Organe des mathematischen Phantoms werden zunächst in kleine, fiktive Teilvolumina zerlegt. Aus der Differenz der Ortsvektoren ergibt sich deren Abstand (strichpunktierte Linie). Aus allen möglichen Kombinationen zweier Teilvolumina in Ziel- bzw. Quellorgan erhält man die Häufigkeitsverteilung der Abstände (Abstandshistogramm).

Dosimetrie bei der Applikation radioaktiver Strahlenquellen



Altersabhängigkeit des Abstandshistogrammes für das Organpaar Leber/Harnblase. Jedes der drei Histogramme umspannt einen Distanzbereich von etwa 1:2, der mittlere Abstand der Organe steigt jedoch (natürlicherweise) mit zunehmendem Alter. Dieser Trend beeinflusst den relationsspezifischen Teil der S-Werte.

**Absorbierte Fraktionen ϕ [dimensionslos] in verschiedenen Organen für eine gleichverteilte
Photonenquelle in der Leber**

(Auszug aus SNYDER W. S. et al.: MIRD pamphlet no. 5)

Zielorgane	Photonenenergie [MeV]				
	0,010	0,020	0,100	0,200	0,500
LEBER	0,967	0,784	0,165	0,158	0,157
LUNGE	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,859 \cdot 10^{-2}$	$0,101 \cdot 10^{-1}$	$0,923 \cdot 10^{-2}$	$0,838 \cdot 10^{-2}$
MILZ	—	—	$0,606 \cdot 10^{-3}$	$0,645 \cdot 10^{-3}$	$0,619 \cdot 10^{-3}$
GESAMT- KÖRPER	0,996	0,984	0,454	0,415	0,407

Fehlende Werte konnten nur mit großer Unsicherheit ($> 50\%$) ermittelt werden.

**Absorbierte Fraktionen ϕ [dimensionslos] in verschiedenen Organen für eine gleichverteilte
Photonenquelle in der Milz**

(Auszug aus SNYDER W. S. et al.: MIRD pamphlet no. 5)

Zielorgan	Photonenenergie [MeV]				
	0,010	0,020	0,100	0,200	0,500
LEBER	—	—	$0,718 \cdot 10^{-2}$	$0,692 \cdot 10^{-2}$	$0,566 \cdot 10^{-2}$
LUNGE	—	$0,455 \cdot 10^{-2}$	$0,910 \cdot 10^{-2}$	$0,772 \cdot 10^{-2}$	$0,812 \cdot 10^{-2}$
MILZ	0,944	0,625	$0,709 \cdot 10^{-1}$	$0,735 \cdot 10^{-1}$	$0,769 \cdot 10^{-1}$
GESAMT- KÖRPER	0,996	0,987	0,449	0,412	0,407

Fehlende Werte konnten nur mit großer Unsicherheit ($> 50\%$) ermittelt werden.



Dosimetrie bei der Applikation offener radioaktiver Strahlenquellen

Die Ermittlung der Strahlenbelastung im menschlichen Körper erfolgt

c) aufgrund der Absorptionsangaben von anthropomorphen Modellen (Absorptionskoeffizienten)

-nuklid- und geometriespezifische
Absorptionsdosisleistungen

(S-Faktoren)



Dosimetrie inkorporierter offener Strahlenquellen mit Hilfe der sog. S-Faktoren

Berücksichtigung nur einer Quelle

In diesem Fall ist die Dosis durch folgende Formel gegeben:

$$\bar{D}_{(\tau \leftarrow \sigma)} = \tilde{A}_{\sigma} \cdot S_{(\tau \leftarrow \sigma)}$$

Dabei bedeuten:

$\bar{D}_{(\tau \leftarrow \sigma)}$ = mittlere Dosis [rad] oder [Gy] im Zielorgan τ durch Bestrahlung aus der Quellregion σ (die „Quellregion“ wird meist mit einem Organ identifiziert)

\tilde{A}_{σ} = kumulierte Aktivität [$\mu\text{Ci} \cdot \text{h}$] oder [$\text{MBq} \cdot \text{h}$] in der Quellregion

Mehrere Quellen

$$\bar{D}_{\tau} = \sum_i \tilde{A}_{\sigma_i} \cdot S_{(\tau \leftarrow \sigma_i)}$$

$$\bar{D}_{\tau} = \sum_i \bar{D}_{(\tau \leftarrow \sigma_i)}$$



Dosimetrie inkorporierter offener Strahlenquellen mit Hilfe der sog. S-Faktoren

S-Faktor = Absorptionsdosis pro kumulierter Aktivität [rad/ μ Ci · h] für
 $T_p = 6,03 \text{ h}$

 ^{99m}Tc

Zielorgane	Quellregionen									
	NEBEN- NIEREN	BLASE (Inhalt)	Magen-Darm-Trakt				NIEREN	LEBER	LUNGE	ANDERE GEWEBE (Muskeln)
			MAGEN (Inhalt)	DÜNN- DARM (Inhalt)	OBERER DICK- DARM (Inhalt)	UNTERER DICK- DARM (Inhalt)				
NEBENNIEREN	3,1E-03	1,5E-07	2,7E-06	1,0E-06	9,1E-07	3,6E-07	1,1E-05	4,5E-06	2,7E-06	1,4E-06
BLASENWAND	1,3E-07	1,6E-04	2,7E-07	2,6E-06	2,2E-06	6,9E-06	2,8E-07	1,6E-07	3,6E-08	1,8E-06
SKELETT (insgesamt)	2,0E-06	9,2E-07	9,0E-07	1,3E-06	1,1E-06	1,6E-06	1,4E-06	1,1E-06	1,5E-06	9,8E-07
MAGENWAND	2,9E-06	2,7E-07	1,3E-04	3,7E-06	3,8E-06	1,8E-06	3,6E-06	1,9E-06	1,8E-06	1,3E-06
DÜNNDARM	8,3E-07	3,0E-06	2,7E-06	7,8E-05	1,7E-05	9,4E-06	2,9E-06	1,6E-06	1,9E-07	1,5E-06
OBERER DICKDARM (Wand)	9,3E-07	2,2E-06	3,5E-06	2,4E-05	1,3E-04	4,2E-06	2,9E-06	2,5E-06	2,2E-07	1,6E-06
UNTERER DICKDARM (Wand)	2,2E-07	7,4E-06	1,2E-06	7,3E-06	3,2E-06	1,9E-04	7,2E-07	2,3E-07	7,1E-08	1,7E-06
NIEREN	1,1E-05	2,6E-07	3,5E-06	3,2E-06	2,8E-06	8,6E-07	1,9E-04	3,9E-06	8,4E-07	1,3E-06
LEBER	4,9E-06	1,7E-07	2,0E-06	1,8E-06	2,6E-06	2,5E-07	3,9E-06	4,6E-05	2,5E-06	1,1E-06
LUNGE	2,4E-06	2,4E-08	1,7E-06	2,2E-07	2,6E-07	7,9E-08	8,5E-07	2,5E-06	5,2E-05	1,3E-06
ROTES MARK	3,6E-06	2,2E-06	1,6E-06	4,3E-06	3,7E-06	5,1E-06	3,8E-06	1,6E-06	1,9E-06	2,0E-06
ANDERE GEWEBE (Muskeln)	1,4E-06	1,8E-06	1,4E-06	1,5E-06	1,5E-06	1,7E-06	1,3E-06	1,1E-06	1,3E-06	2,7E-06
EIERSTÖCKE	6,1E-07	7,3E-06	5,0E-07	1,1E-05	1,2E-05	1,8E-05	1,1E-06	4,5E-07	9,4E-08	2,0E-06
PANKREAS	9,0E-06	2,3E-07	1,8E-05	2,1E-06	2,3E-06	7,4E-07	6,6E-06	4,2E-06	2,6E-06	1,8E-06
HAUT	5,1E-07	5,5E-07	4,4E-07	4,1E-07	4,1E-07	4,8E-07	5,3E-07	4,9E-07	5,3E-07	7,2E-07
MILZ	6,3E-06	6,6E-07	1,0E-05	1,5E-06	1,4E-06	8,0E-07	8,6E-06	9,2E-07	2,3E-06	1,4E-06
HODEN	3,2E-08	4,7E-06	5,1E-08	3,1E-07	2,7E-07	1,8E-06	8,8E-08	6,2E-08	7,9E-09	1,1E-06
SCHILDDRÜSE	1,3E-07	2,1E-09	8,7E-08	1,5E-08	1,6E-08	5,4E-09	4,8E-08	1,5E-07	9,2E-07	1,3E-06
GEBÄRMUTTER	1,1E-06	1,6E-05	7,7E-07	9,6E-06	5,4E-06	7,1E-06	9,4E-07	3,9E-07	8,2E-08	2,3E-06
GESAMTKÖRPER	2,2E-06	1,9E-06	1,9E-06	2,4E-06	2,2E-06	2,3E-06	2,2E-06	2,2E-06	2,0E-06	1,9E-06

Anhang: S-Werte



Dosimetrie inkorporierter offener Strahlenquellen mit Hilfe der sog. S-Faktoren

S-Faktor = Absorptionsdosis pro kumulierter Aktivität [rad/ $\mu\text{Ci} \cdot \text{h}$] für
 $T_p = 6,03 \text{ h}$

 $^{99\text{m}}\text{Tc}$

Zielorgane	Quellregionen									
	EIER-STÖCKE	PAN-KREAS	Skelett			HAUT	MILZ	HODEN	SCHILDDRÜSE	GESAMT-KÖRPER
			ROTES MARK	KORTIKALIS	SPONGIOSA					
NEBENNIEREN	3,3E-07	9,1E-06	2,3E-06	1,1E-06	1,1E-06	6,8E-07	6,3E-06	3,2E-08	1,3E-07	2,3E-06
BLASENWAND	7,2E-06	1,4E-07	9,9E-07	5,1E-07	5,1E-07	4,9E-07	1,2E-07	4,8E-06	2,1E-09	2,3E-06
SKELETT (insgesamt)	1,5E-06	1,5E-06	4,0E-06	1,2E-05	1,0E-05	9,9E-07	1,1E-06	9,2E-07	1,0E-06	2,5E-06
MAGENWAND	8,1E-07	1,8E-05	9,5E-07	5,5E-07	5,5E-07	5,4E-07	1,0E-05	3,2E-08	4,5E-08	2,2E-06
DÜNNDARM	1,2E-05	1,8E-06	2,6E-06	7,3E-07	7,3E-07	4,5E-07	1,4E-06	3,6E-07	9,3E-09	2,5E-06
OBERER DICKDARM (Wand)	1,1E-05	2,1E-06	2,1E-06	6,9E-07	6,9E-07	4,6E-07	1,4E-06	3,1E-07	1,1E-08	2,4E-06
UNTERER DICKDARM (Wand)	1,5E-05	5,7E-07	2,9E-06	1,0E-06	1,0E-06	4,8E-07	6,1E-07	2,7E-06	4,3E-09	2,3E-06
NIEREN	9,2E-07	6,6E-06	2,2E-06	8,2E-07	8,2E-07	5,7E-07	9,1E-06	4,0E-08	3,4E-08	2,2E-06
LEBER	5,4E-07	4,4E-06	9,2E-07	6,6E-07	6,6E-07	5,3E-07	9,8E-07	3,1E-08	9,3E-08	2,2E-06
LUNGE	6,0E-08	2,5E-06	1,2E-06	9,4E-07	9,4E-07	5,8E-07	2,3E-06	6,6E-09	9,4E-07	2,0E-06
ROTES MARK	5,5E-06	2,8E-06	3,1E-05	4,1E-06	9,1E-06	9,5E-07	1,7E-06	7,3E-07	1,1E-06	2,9E-06
ANDERE GEWEBE (Muskeln)	2,0E-06	1,8E-06	1,2E-06	9,8E-07	9,8E-07	7,2E-07	1,4E-06	1,1E-06	1,3E-06	1,9E-06
EIERSTÖCKE	4,2E-03	4,1E-07	3,2E-06	7,1E-07	7,1E-07	3,8E-07	4,0E-07	0,0	4,9E-09	2,4E-06
PANKREAS	5,0E-07	5,8E-04	1,7E-06	8,5E-07	8,5E-07	4,4E-07	1,9E-05	5,5E-08	7,2E-08	2,4E-06
HAUT	4,1E-07	4,0E-07	5,9E-07	6,5E-07	6,5E-07	1,6E-05	4,7E-07	1,4E-06	7,3E-07	1,3E-06
MILZ	4,9E-07	1,9E-05	9,2E-07	5,8E-07	5,8E-07	5,4E-07	3,3E-04	1,7E-08	1,1E-07	2,2E-06
HODEN	0,0	5,5E-08	4,5E-07	6,4E-07	6,4E-07	9,1E-07	4,8E-08	1,4E-03	5,0E-10	1,7E-06
SCHILDDRÜSE	4,9E-09	1,2E-07	6,8E-07	7,9E-07	7,9E-07	6,9E-07	8,7E-08	5,0E-10	2,3E-03	1,5E-06
GEBÄRMUTTER	2,1E-05	5,3E-07	2,2E-06	5,7E-07	5,7E-07	4,0E-07	4,0E-07	0,0	4,6E-09	2,6E-06
GESAMTKÖRPER	2,6E-06	2,6E-06	2,2E-06	2,0E-06	2,0E-06	1,3E-06	2,2E-06	1,9E-06	1,8E-06	2,0E-06

Anhang: S-Werte



Dosimetrie inkorporierter offener Strahlenquellen mit Hilfe der sog. S-Faktoren

¹³¹I

S-Faktor = Absorptionsdosis pro kumulierter Aktivität [rad/μCi·h] für
T_p = 193 h

Zielorgane	Quellregionen									
	NEBEN- NIEREN	BLASE (Inhalt)	Magen-Darm-Trakt				NIEREN	LEBER	LUNGE	ANDERE GEWEBE (Muskeln)
			MAGEN (Inhalt)	DÜNN- DARM (Inhalt)	OBERER DICK- DARM (Inhalt)	UNTERER DICK- DARM (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



Dosimetrie inkorporierter offener Strahlenquellen mit Hilfe der sog. S-Faktoren

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

$T_p = 193 \text{ h}$

¹³¹I

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	2,2E-02	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



Absorptionsdosis für verschiedene Organgruppen nach einer einmaligen oralen Gabe von Natriumjodid bei einem euthyreoten Erwachsenen. a = maximale Akkumulation [%]
(aus: MIRD/dose estimate report no. 5, 1975)

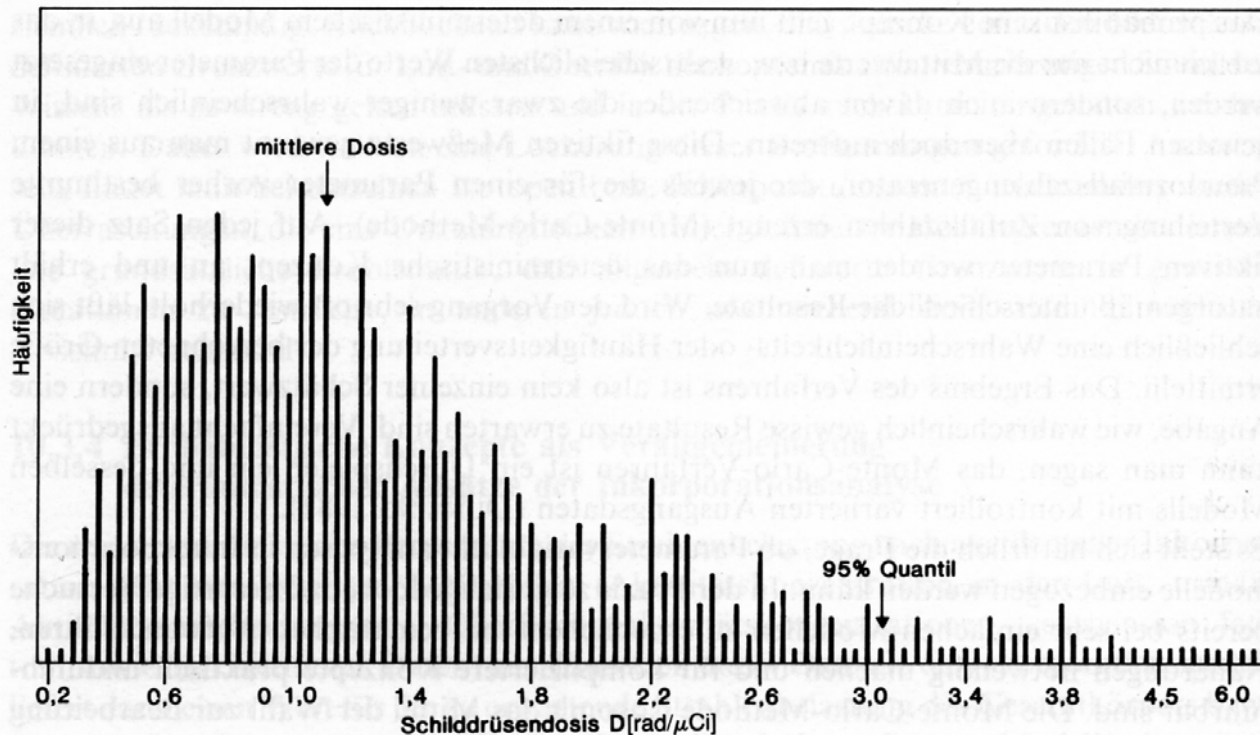
Organgruppe	a	Absorbierte Dosis[rad/mCi]						
		123J	124J	125J	126J	130J	131J	132J
LEBER	5	0,029	0,36	0,087	0,25	0,32	0,20	0,14
	15	0,028	0,45	0,22	0,45	0,30	0,35	0,13
	25	0,027	0,55	0,36	0,65	0,29	0,48	0,13
OVARIIEN	5	0,036	0,33	0,029	0,14	0,34	0,14	0,14
	15	0,034	0,31	0,033	0,15	0,31	0,14	0,14
	25	0,031	0,30	0,039	0,15	0,29	0,14	0,13
ROTES MARK	5	0,030	0,27	0,044	0,16	0,23	0,14	0,094
	15	0,030	0,36	0,077	0,26	0,23	0,20	0,092
	25	0,030	0,46	0,12	0,37	0,23	0,26	0,091
MAGEN (Wand)	5	0,25	2,4	0,27	1,5	2,4	1,7	1,2
	15	0,23	2,2	0,26	1,4	2,2	1,6	1,2
	25	0,21	2,0	0,26	1,3	2,0	1,4	1,1
HODEN	5	0,013	0,18	0,015	0,088	0,18	0,084	0,078
	15	0,012	0,18	0,018	0,094	0,17	0,085	0,076
	25	0,012	0,17	0,024	0,10	0,16	0,088	0,074
SCHILDDRÜSE	5	2,4	180,0	140,0	320,0	22,0	260,0	2,3
	15	7,5	530,0	450,0	960,0	68,0	800,0	7,4
	25	13,0	890,0	790,0	1600,0	120,0	1300,0	13,0
GANZKÖRPER	5	0,025	0,36	0,11	0,28	0,25	0,24	0,10
	15	0,027	0,59	0,29	0,61	0,27	0,47	0,10
	25	0,029	0,83	0,49	0,95	0,29	0,71	0,11

Das bedeutet: Die kumulierte Aktivität in der Schilddrüse ist so groß, als wäre die gesamte applizierte Aktivität A_0 dort 36,3 Stunden verharret. (Tatsächlich ist nur ein Teil von A_0 , dieser aber länger verharret). Da die Schilddrüse massiv anreichert, ist ihre Strahlenbelastung weitgehend eine „Selbstdosis“. Man berücksichtigt daher in guter Näherung keine weiteren Strahlungsquellen und entnimmt $S_{(THYR \leftarrow THYR)}$ aus Tabellen (MIRD pamphlet no. 11, 1975).



Dosimetrie bei der Applikation radioaktiver Strahlenquellen

Dosimetrie inkorporierter offener Strahlenquellen mit Hilfe der sog. S-Faktoren



Probabilistische Dosisbestimmung. Individuelle Variabilität der Parameter führt zu unterschiedlicher Schilddrüsenbelastung bei gleicher inkorporierter Aktivität [$\text{rad}/\mu\text{Ci}$]. Für ^{131}J ist in einer Population von erwachsenen Individuen mit der oben gezeigten Häufigkeitsverteilung für die Dosis pro μCi zu rechnen.

Strahlenbelastung nuklearmedizinischer Untersuchungen

Röntgendiagnostik	mSv	Nuklearmedizinische Diagnostik
CT Abdomen →	— 20 —	← Herz Tl-201 Chlorid
CT Thorax →	— 10 —	← Hirn Tc-99m HMPAO
Kolonkontrasteinlauf →		
Urogramm →	— 5 —	← Leber Tc-99m HIDA
Magen-Dünndarm Passage →	natürlicher	← Herz Tc-99m Erythrozyten
LWS 2 Ebenen →	Strahlen-	← Skelett Tc-99m Phosphonat
Abdomen-Übersicht →	pegel	
Becken-Übersicht →	— 1 —	← Nieren Tc-99m MAG3
BWS 2 Ebenen →		← Lunge Tc-99m Mikrosphären
		← Schilddrüse Tc-99m Perchnetat
	— 0,5 —	← Nieren Tc-99m DMSA
Schädel 2 Ebenen →		← Nieren I-123 Hippuran
		← Schillingtest Co-57 Vit. B ₁₂
Thorax 2 Ebenen →	— 0,1 —	← Clearance Cr-51 EDTA



Dosimetrische Konzepte der Nuklearmedizin