

# Einführung in die Biophysik

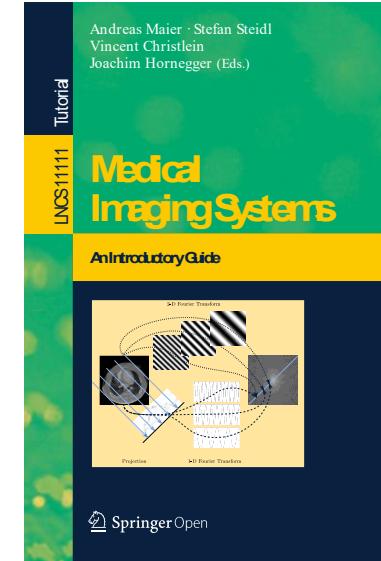
## Vorlesung 1 – klinische Bildgebung

**Profs. Julia Herzen, Andreas Bausch, Ulrich Gerland**  
School of Natural Sciences  
[julia.herzen@tum.de](mailto:julia.herzen@tum.de), [abausch@tum.de](mailto:abausch@tum.de), [gerland@tum.de](mailto:gerland@tum.de)

# Inhalt

## Teil I: Überblick über klinische Bildgebung

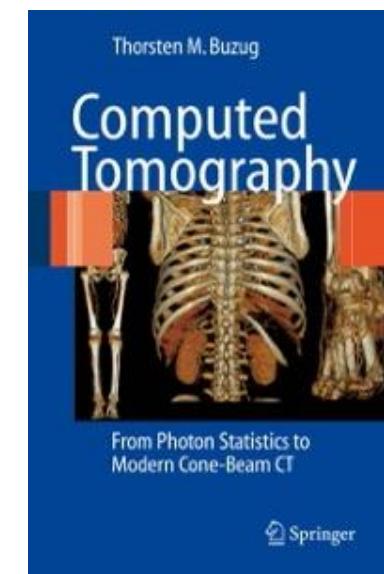
- MRT
- SPECT/PET
- Ultraschall
- Röntgenbildgebung



<https://link.springer.com.eaccess.tum.edu/book/10.1007/978-3-319-96520-8>

## Teil II: Spektrale Röntgenbildgebung

- Röntgendetektoren
- Konzepte spektraler Bildgebung
- Anwendungen

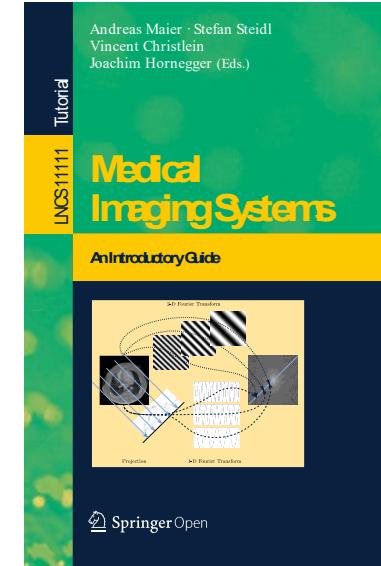


<https://link.springer.com.eaccess.tum.edu/book/10.1007/978-3-540-39408-2>

# Inhalt

## Teil I: Überblick über klinische Bildgebung

- MRT
- SPECT/PET
- Ultraschall
- Röntgenbildgebung



<https://link.springer.com.eaccess.tum.edu/book/10.1007/978-3-319-96520-8>

## Chapter 6

## Teil II: Spektrale Röntgenbildgebung

- Röntgendetektoren
- Konzepte spektraler Bildgebung
- Anwendungen

# Magnetresonanz Bildgebung: Grundlagen

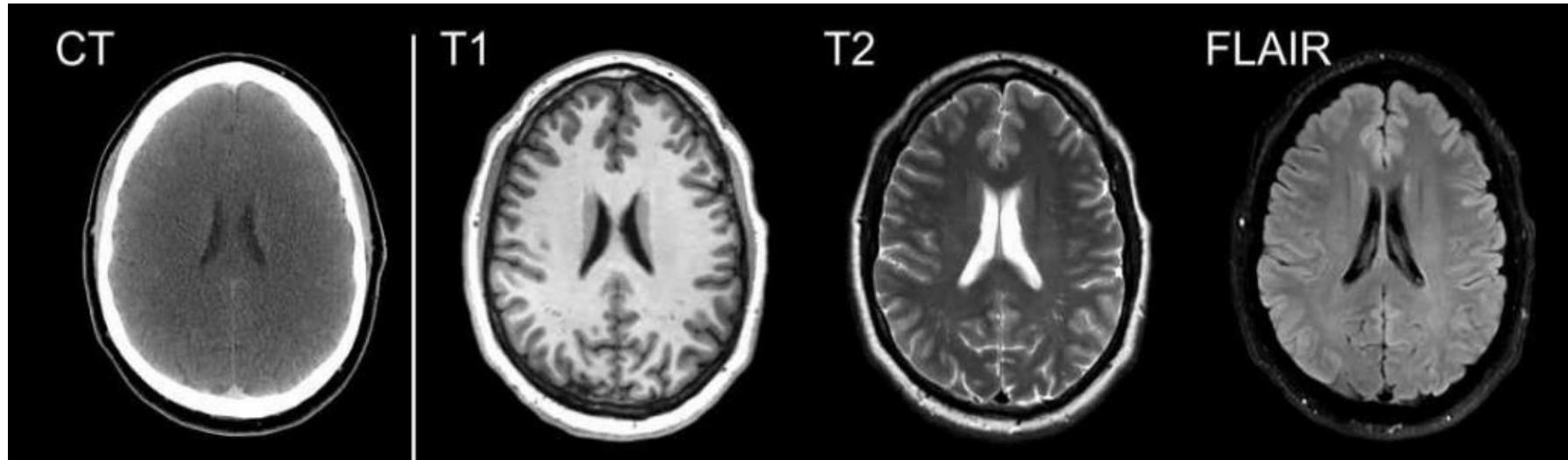
Fragen, die Sie am Ende jeder behandelten Methode beantworten können sollten:

- Was erzeugt den Kontrast?
- Wie erhält man die Ortsauflösung?

ausführlichere Behandlung in folgenden Vorlesungen im Master:

- Biomedical Physics I (Prof. Pfeiffer)
- Physics of Magnetic Resonance Imaging I (Prof. Schilling/Prof. Karampinos)

# Motivation: Weichteilkontrast bei MRT



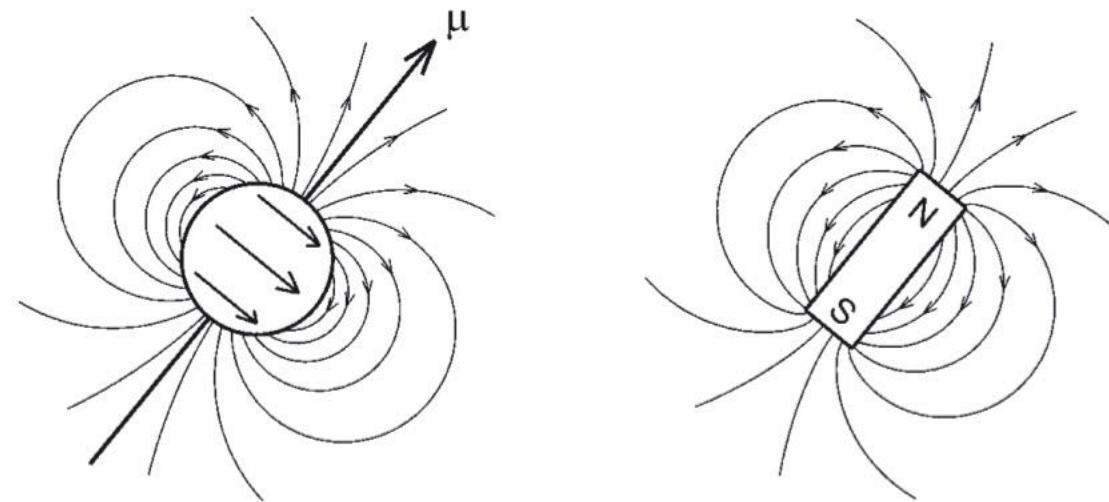
## Was bietet MRT?

- 3D nicht-invasive Bildgebung
- hoher Weichteilkontrast
- keine ionisierende Strahlung

## Was sind die Schwierigkeiten?

- sehr komplex, relativ langsam, schlechtere Auflösung (verglichen zu RöntgenCT)

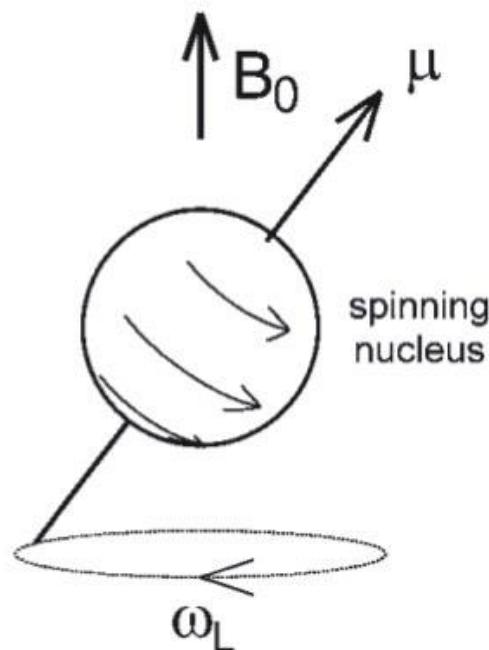
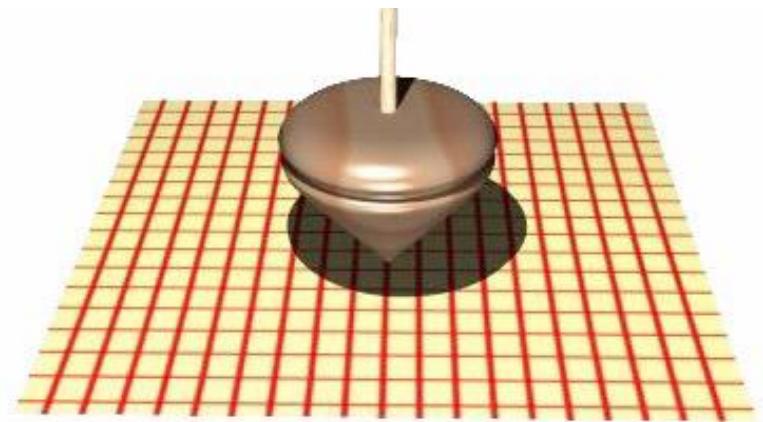
# Nuklearer Spin



- Materie besteht aus Atomen
- Atome bestehen aus Nukleus und Elektronen
- Atome besitzen:  
Masse, elektrische Ladung und magnetisches Moment (Bahndrehimpuls Elektronen + **nuklearer Spin**)

# Spin Präzession

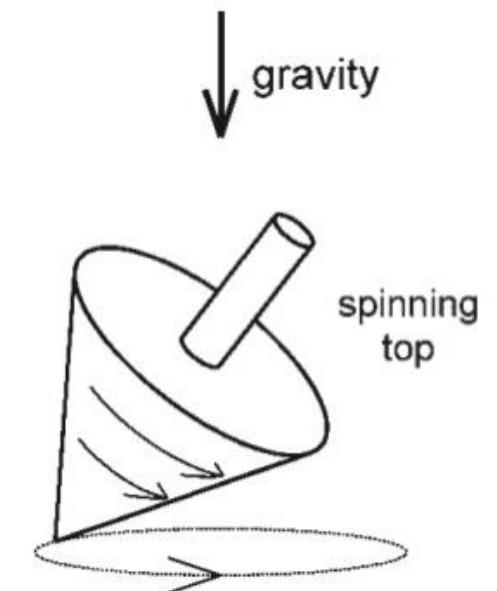
Im externen Magnetfeld **präzessiert der nukleare Spin**  
analog zum rotierenden Kreisel im Gravitationsfeld der Erde



Larmor Frequenz

$$\omega_L = -\gamma B_0$$

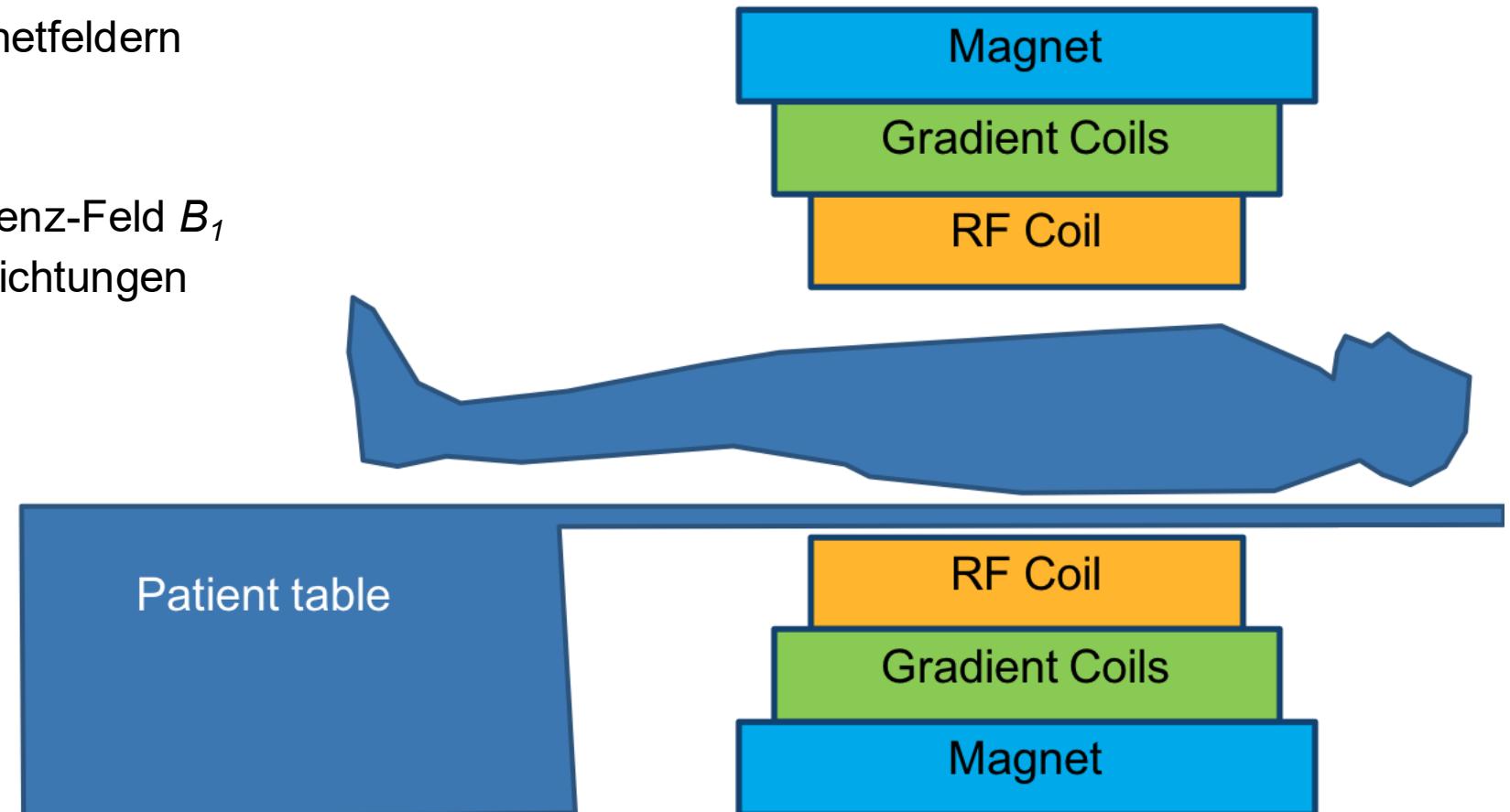
$\gamma$ : Gyromagnetisches Verhältnis  
 $B_0$ : äußeres Magnetfeld



# MRT System

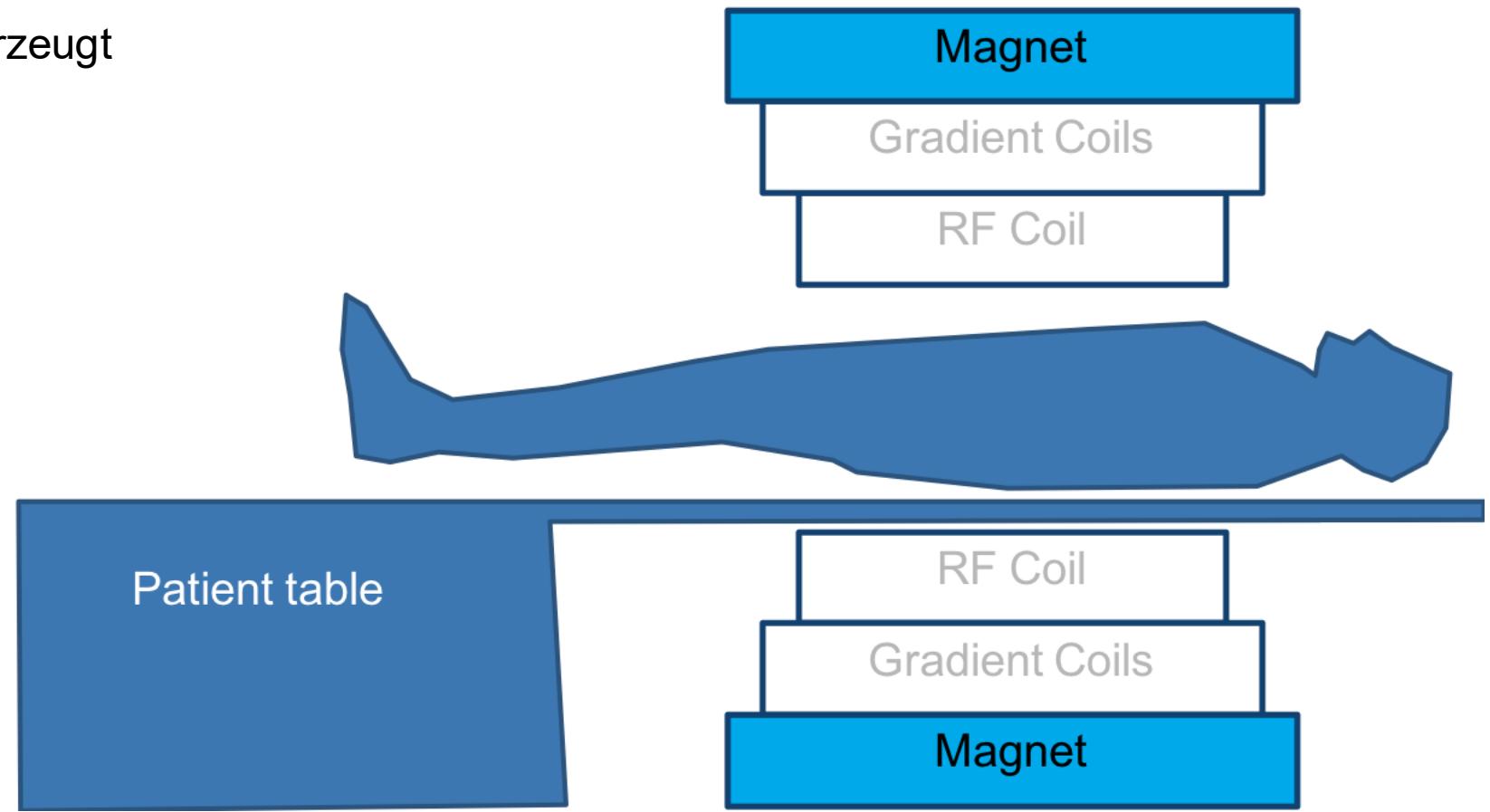
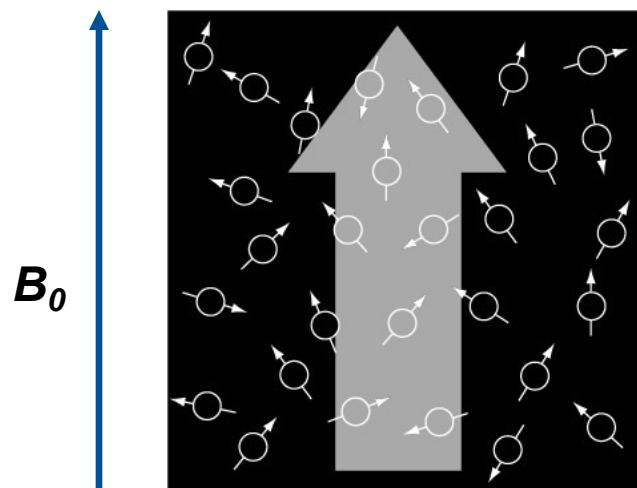
Man benötigt drei Typen von Magnetfeldern um ein MRT Bild zu erzeugen

1. ein statisches Magnetfeld  $B_0$
2. ein zeitabhängiges Radiofrequenz-Feld  $B_1$
3. ein Gradientenfeld in alle Ortsrichtungen



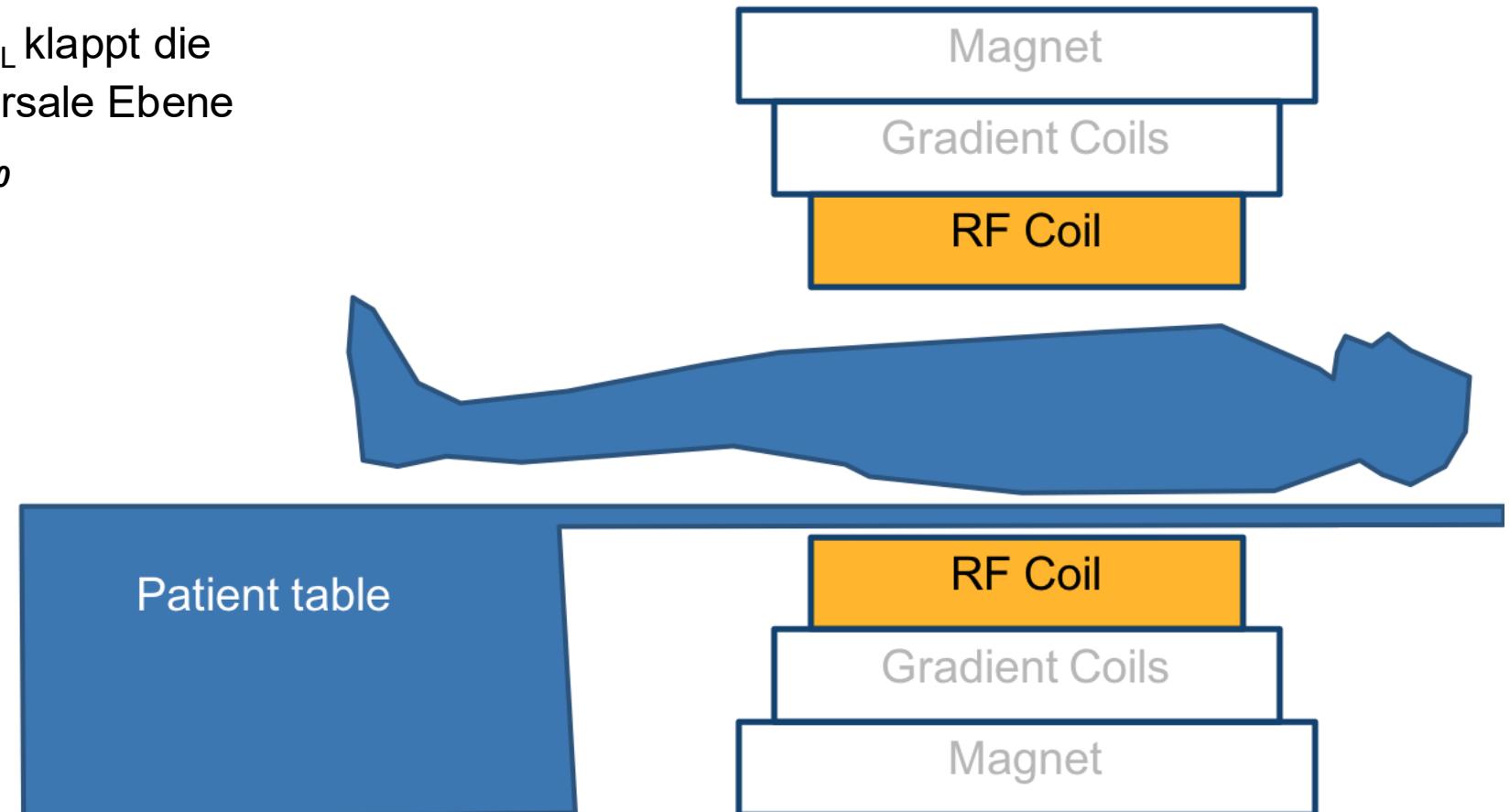
# statisches Magnetfeld $B_0$

richtet  $N$  nukleare Spins aus und erzeugt  
eine effektive Magnetisierung  $M$

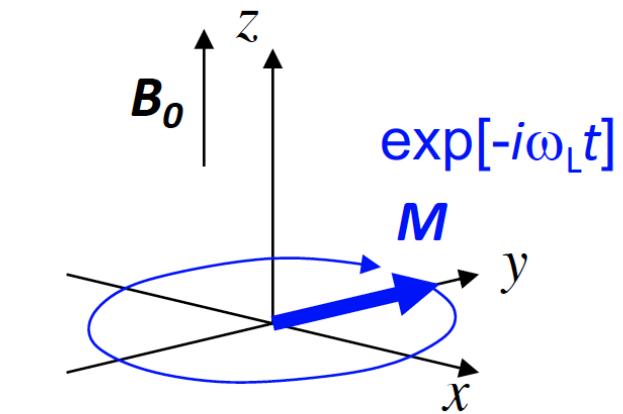
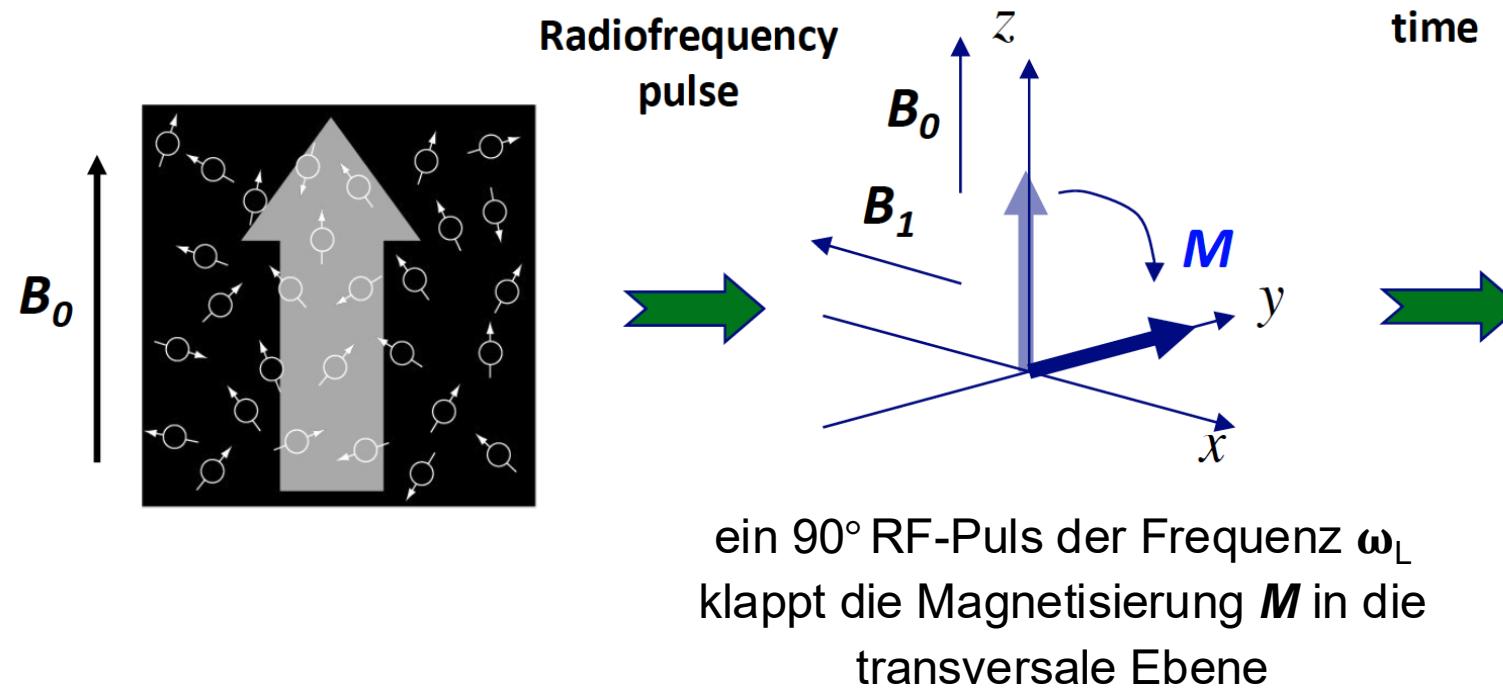
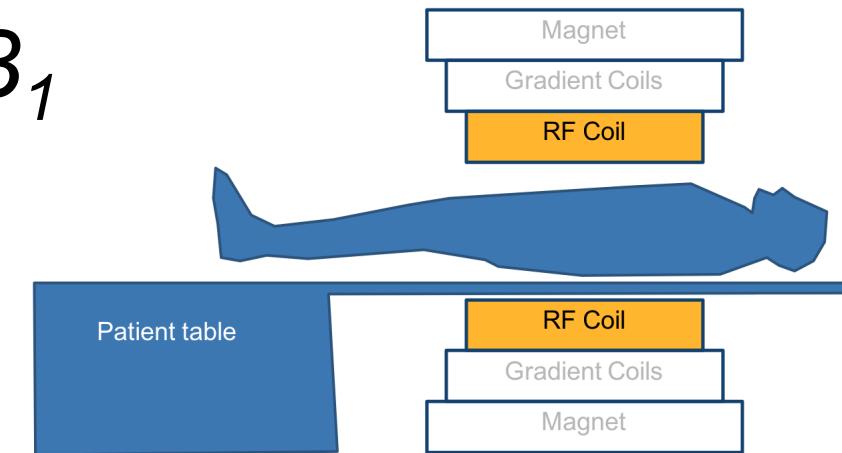


# zeitabhängiges Radiofrequenz-Feld $B_1$

- ein  $90^\circ$  RF-Puls der Frequenz  $\omega_L$  klappt die Magnetisierung  $\mathbf{M}$  in die transversale Ebene
- $\mathbf{M}$  relaxiert und prezidiert um  $\mathbf{B}_0$

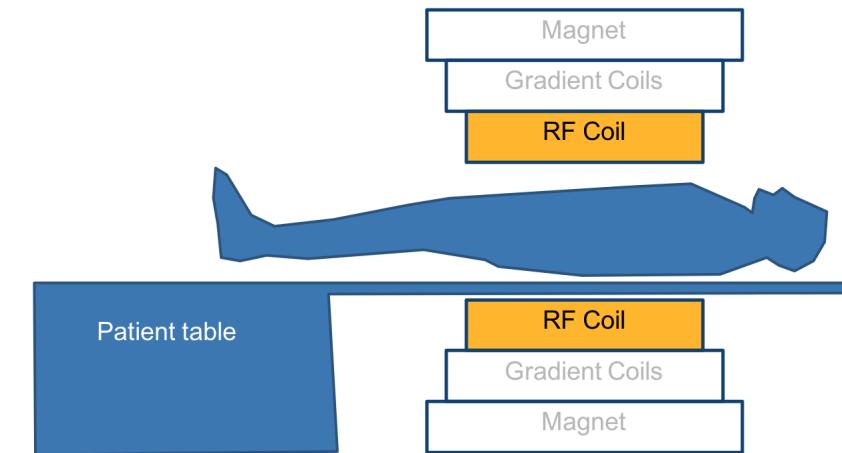
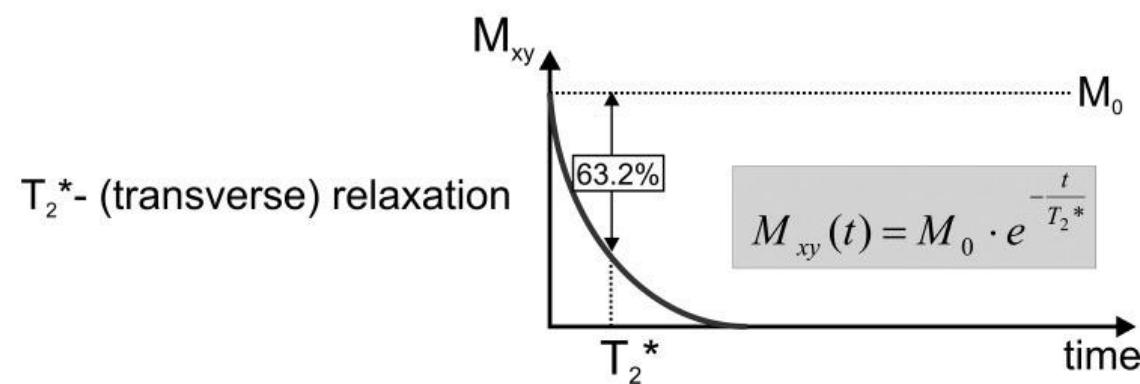
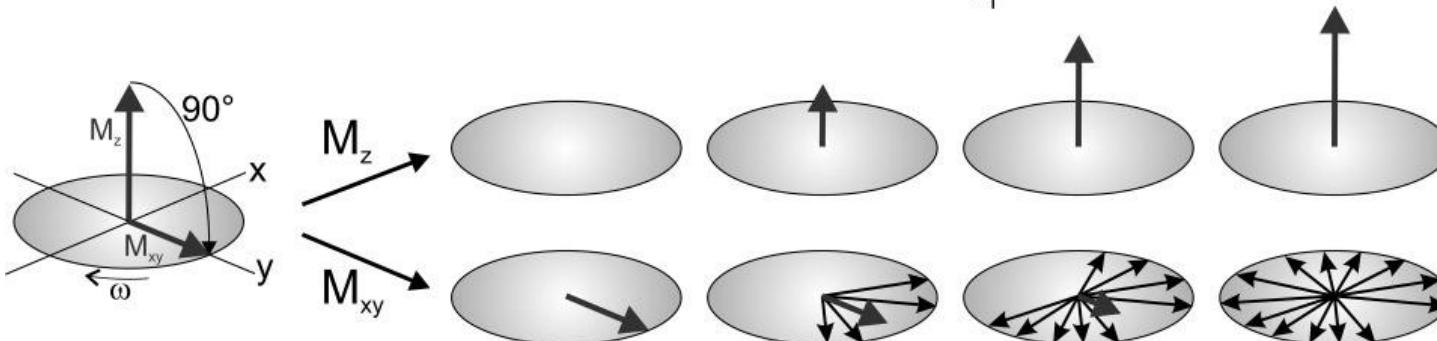
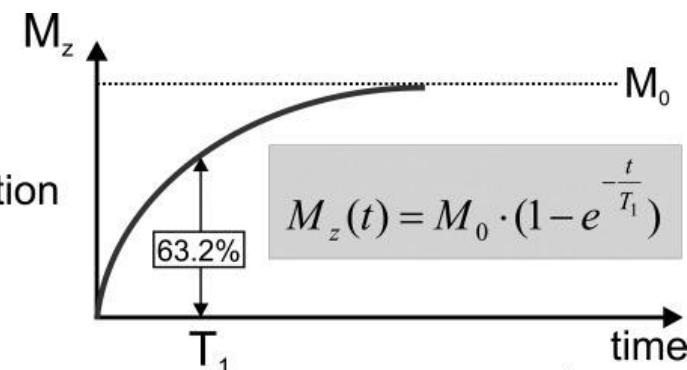


# zeitabhängiges Radiofrequenz-Feld $B_1$



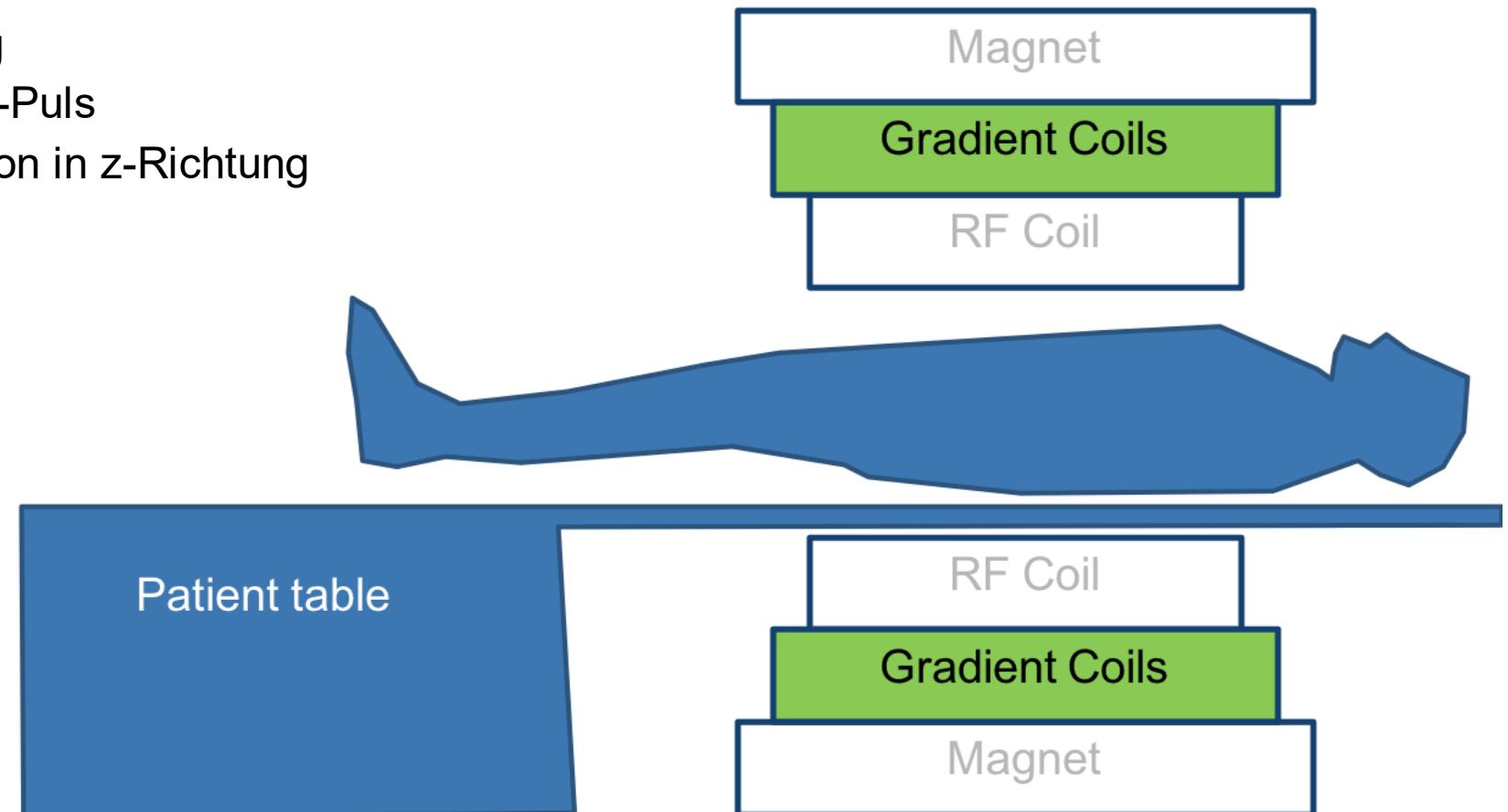
$M$  relaxiert und prezidiert um  $B_0$

# $T_1 / T_2$ relaxation



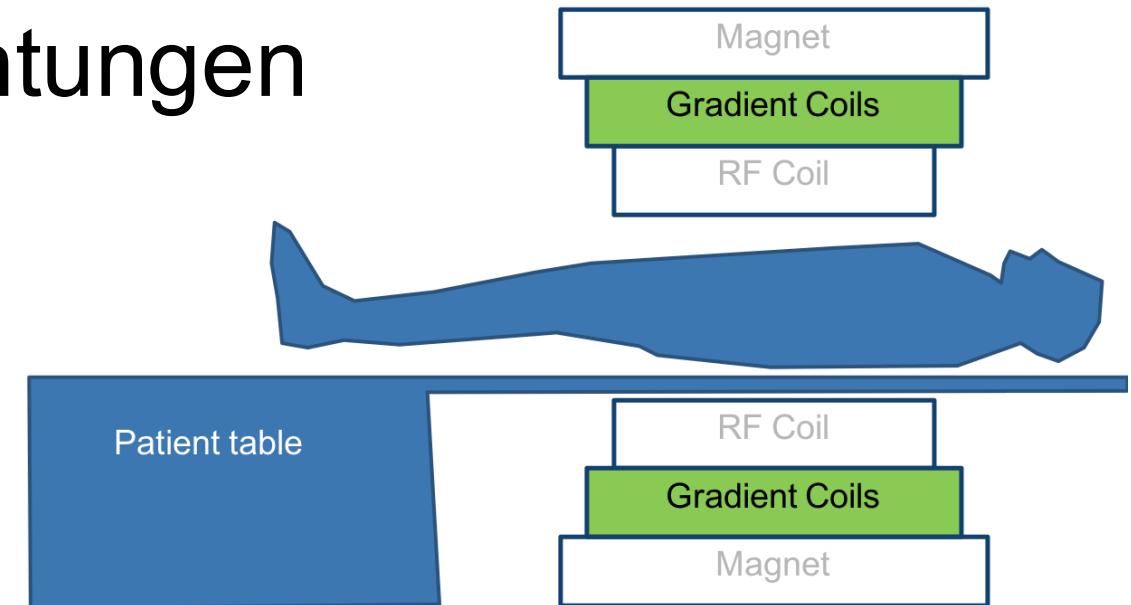
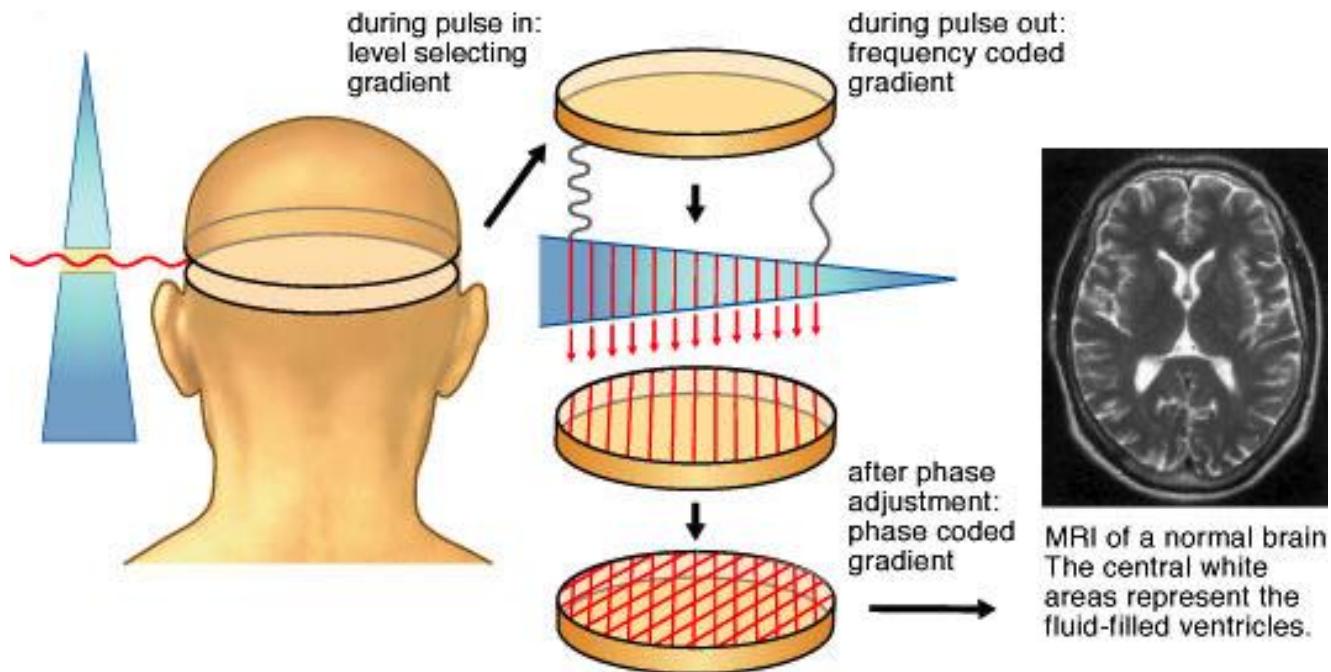
# Gradientenfeld in alle Ortsrichtungen

- ein Gradientenfeld in z-Richtung
- und ein frequenzabhängiger RF-Puls ermöglichen eine Schichtselektion in z-Richtung



# Gradientenfeld in alle Ortsrichtungen

- ein Gradientenfeld in z-Richtung
- und ein frequenzabhängiger RF-Puls ermöglichen eine Schichtselektion in z-Richtung



# Referenzen für weitere Information

## **Video Tutorial von Sir Paul Callaghan zum Prinzip von MRT**

<http://www.magritek.com/support/videos/>

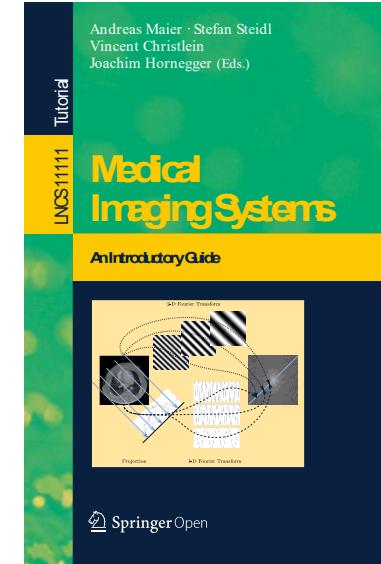
## **Bücher über MRT**

- “Principles of Magnetic Resonance Imaging: A Signal Processing Perspective” by Zhi-Pei Liang and Paul C. Lauterbur.
- “Magnetic Resonance Imaging Physical Principles and Sequence Design” 2. Ed. by: Robert W. Brown, Y.-C. Norman Cheng, E. Mark Haacke, Michael R. Thompson, Ramesh Venkatesan

# Inhalt

## Teil I: Überblick über klinische Bildgebung

- MRT
- SPECT/PET
- Ultraschall
- Röntgenbildgebung



<https://link.springer.com.eaccess.tum.edu/book/10.1007/978-3-319-96520-8>

## Chapter 10

## Teil II: Spektrale Röntgenbildgebung

- Röntgendetektoren
- Konzepte spektraler Bildgebung
- Anwendungen

# SPECT/PET Bildgebung: Grundlagen

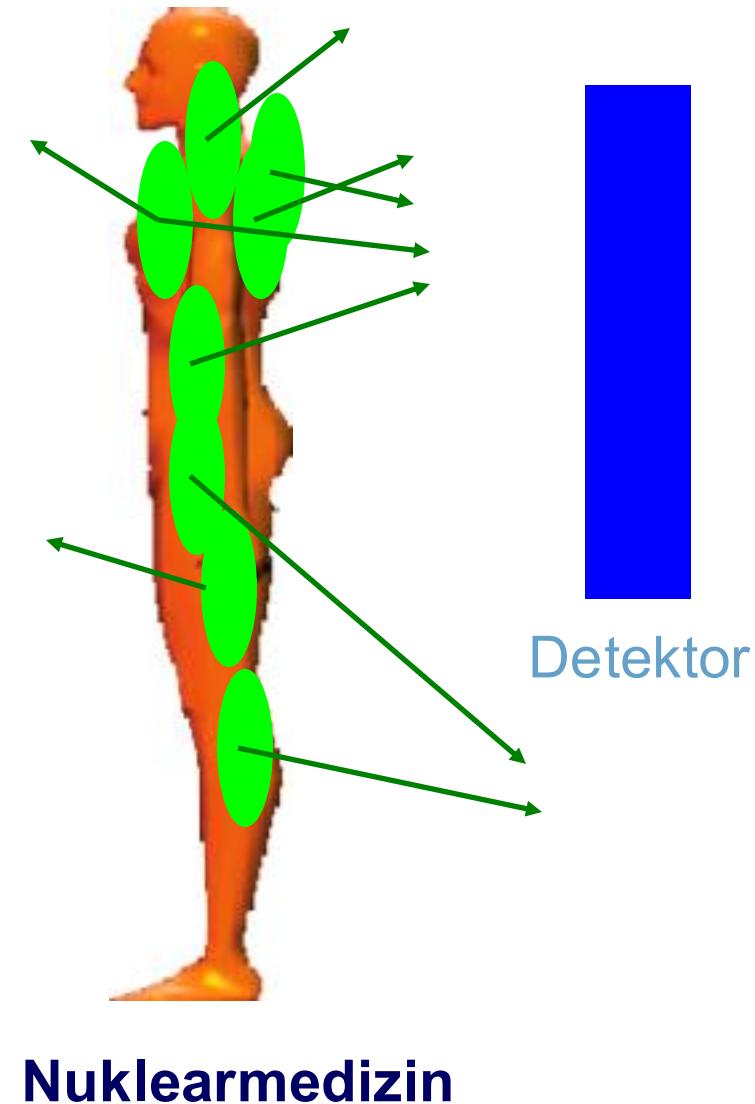
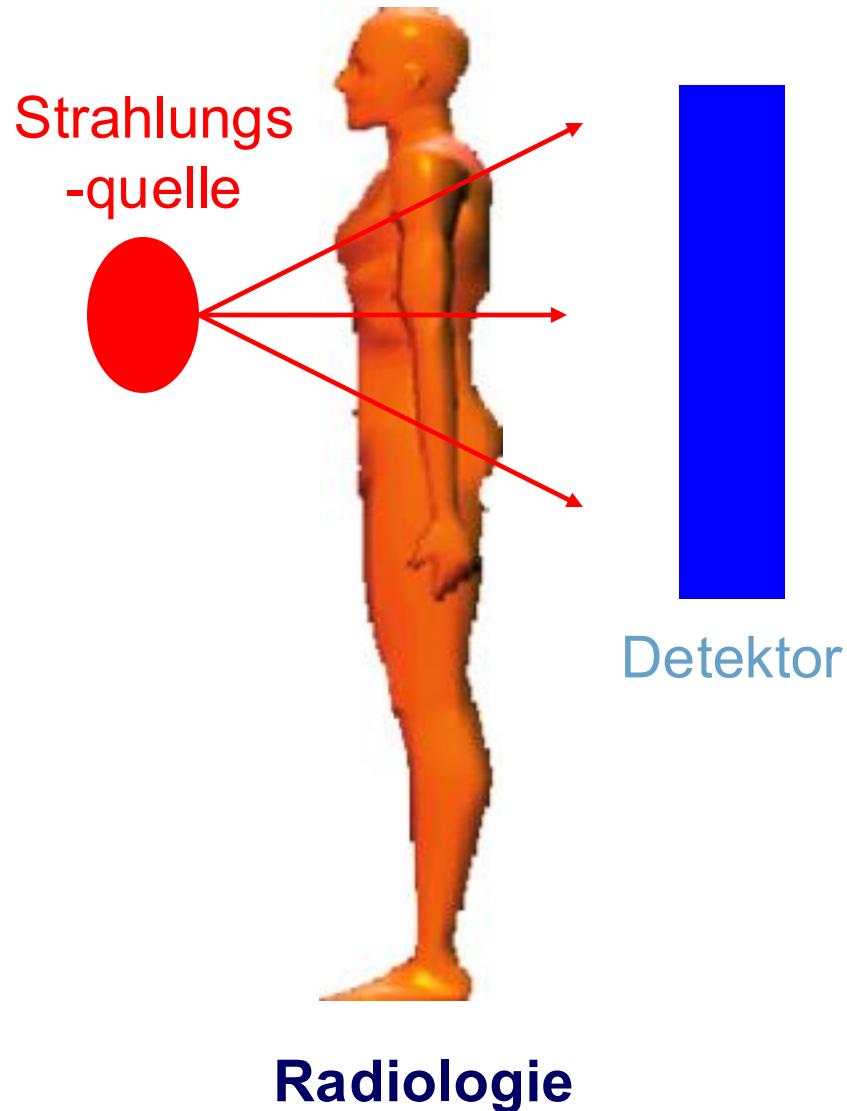
Fragen, die Sie am Ende jeder behandelten Methode beantworten können sollten:

- Was erzeugt den Kontrast?
- Wie erhält man die Ortsauflösung?

ausführlichere Behandlung in folgenden Vorlesungen im Master:

- Biomedical Physics I (Prof. Pfeiffer)
- Einführung in die Theranostic: Konzepte, Implementierung, klinische Anwendung (Prof. Nekolla)

# Vergleich: Radiologische und Nuklearmedizinische Bildgebung



- Der Tracer (Radiopharmaka) beeinflusst nicht die zu untersuchenden physiologischen Vorgänge
- Möglich durch hohe Sensitivität, typisch verwendete Menge von  $^{18}\text{F}$ -FDG:  $6 \times 10^{-12} \text{ mol} \equiv 1 \text{ ng}$

	CT	MRT	Nuk. Med.
Ortsauflösung (mm)	< 1	< 1	5 – 15
Sensitivität (ng/l)	1000 000	1000	1-10

## Reichweite in Gewebe für verschiedene Strahlungstypen:

	Energie	Reichweite
$\alpha$	<b>einige MeV</b>	$< 1 \text{ mm}$
$\beta$	<b>100 keV – 1 MeV</b>	$\sim \text{einige mm}$
$\gamma$	<b>100 – 500 keV</b>	$> \text{einige cm}$

=> nur  $\gamma$ -Strahlen sind sinnvoll einsetzbar !

# Welche Radionuklide eignen sich ?

## Wünschenswerte Charakteristiken:

- Nur  $\gamma$ -Strahlung ( $\alpha$  &  $\beta$  würde hohe Dosis im Körper erzeugen)
- Möglichst kurze, aber logistisch noch sinnvolle Halbwertszeit

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfall	Energie
$^{99m}\text{Tc}$	6 h	$\gamma$	140 keV
$^{201}\text{TI}$	73 h	$\gamma$	70 keV
$^{123}\text{I}$	13 h	$\gamma$	159 keV
$^{18}\text{F}$	110 min	$e^+, \gamma\gamma$	511 keV
$^{11}\text{C}$	20 min	$e^+, \gamma\gamma$	511 keV
$^{13}\text{N}$	10 min	$e^+, \gamma\gamma$	511 keV

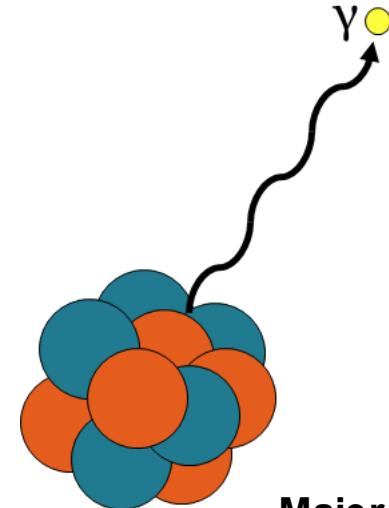
SPECT

PET

## Grundlegende physikalische Prinzipien:

**Szintigrafie & SPECT („Single Photon Emission Tomography“)**

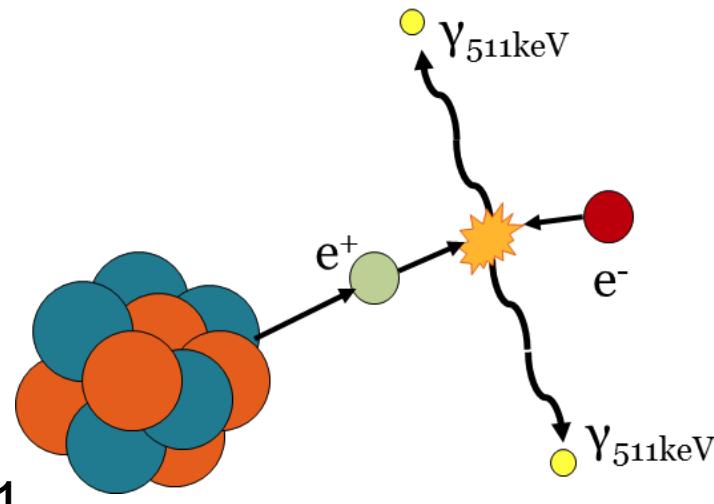
Detektion einzelner  $\gamma$ -Quanten



Maier, Fig. 10.1

**PET („Positron Emission Tomography“)**

Koinzidenz-Detektion von zwei 511 keV  $\gamma$ -Quanten  $\beta^+/\text{e}^-$  Annihilation



Maier, Fig. 10.1

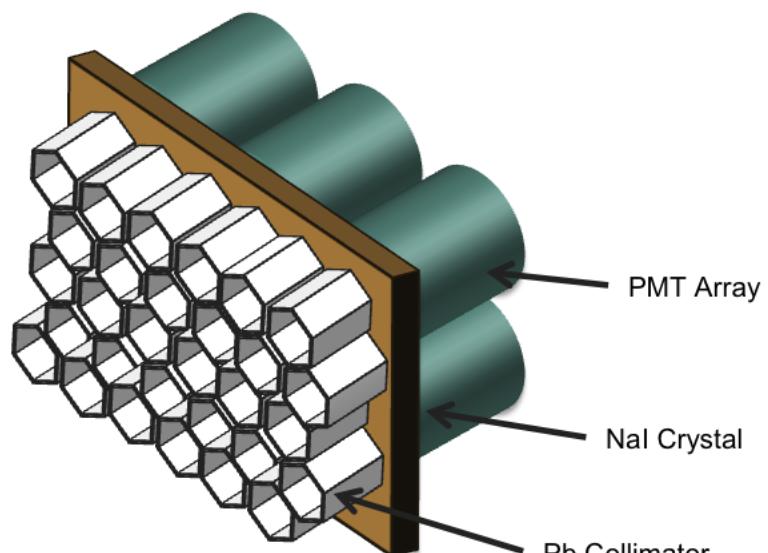
## Dominierende Effekte bei typischen Gammaenergien der Nuklearmedizin:

- Compton-Effekt
- Photo-Effekt

## Abhangigkeit der Wechselwirkung von:

- Energie des Gammaquants
- Dichte des Materials
- Kernladungszahl des Materials
- Dicke des Materials

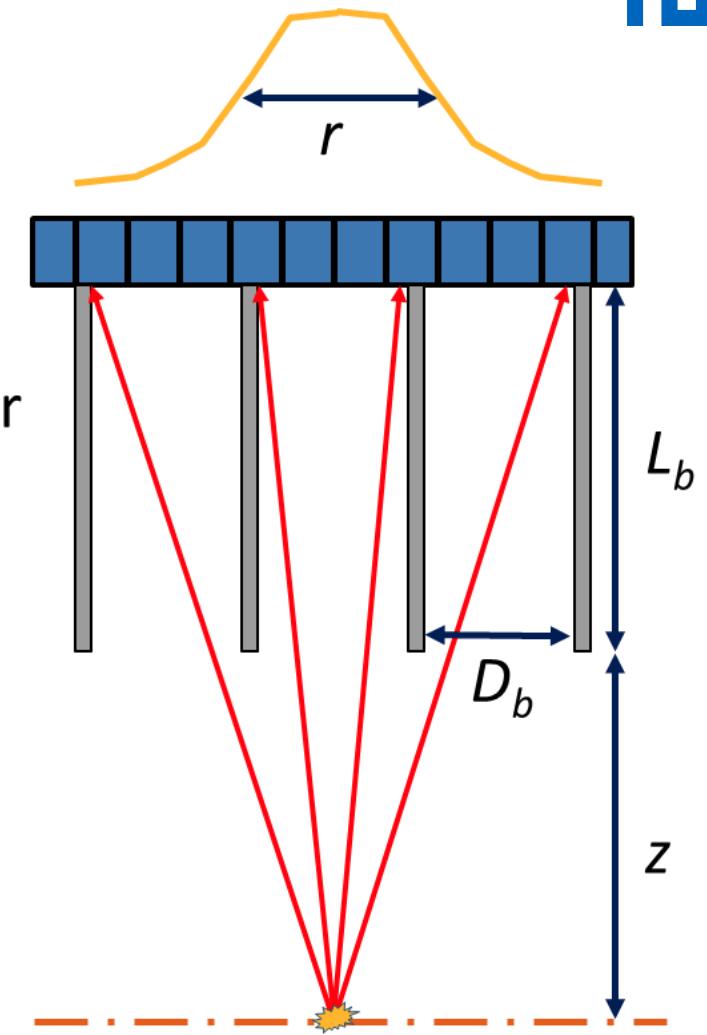
# Gamma-Detektoren für SPECT



Maier, Fig. 10.6

PTM = photomultiplier tubes

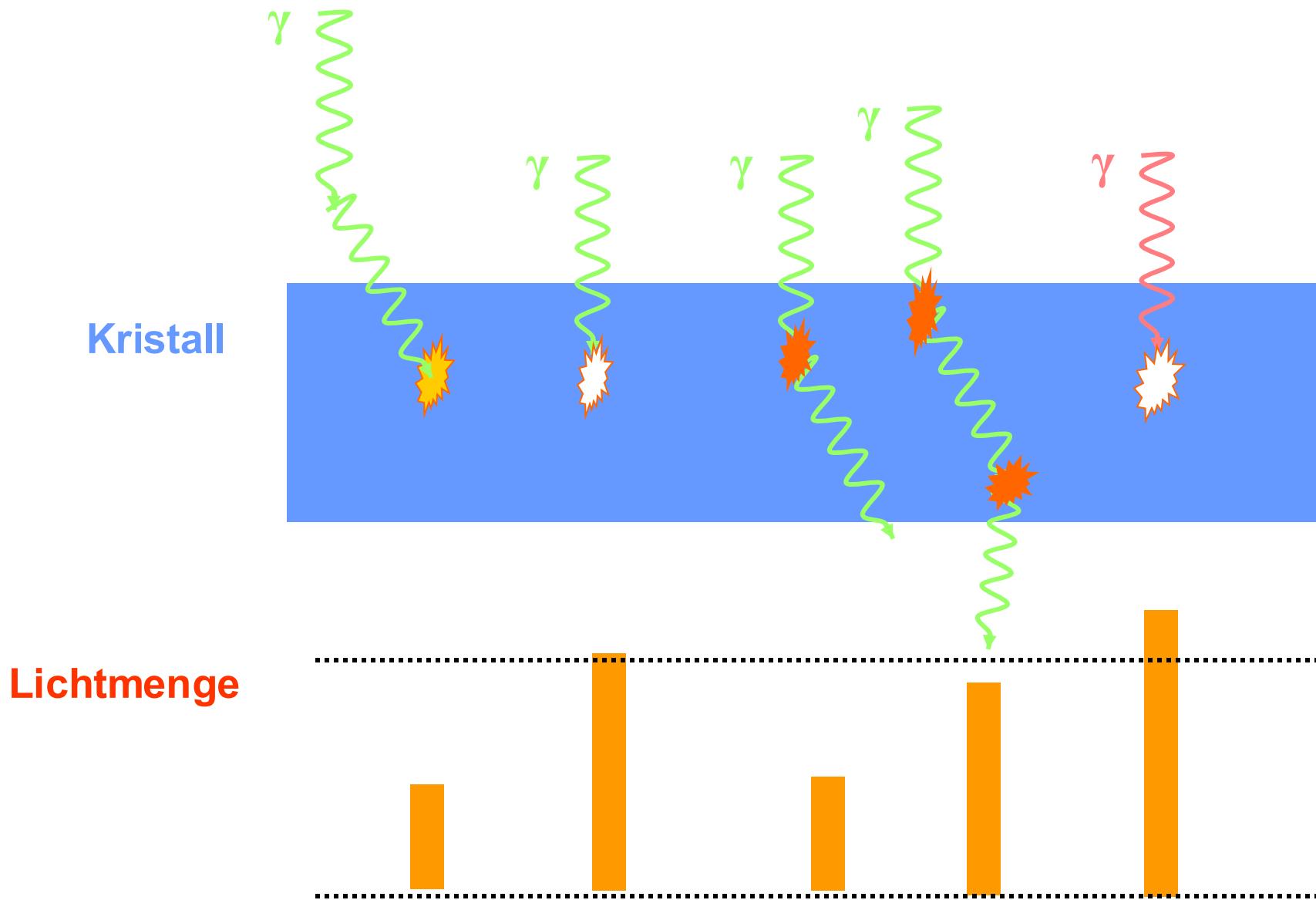
Response



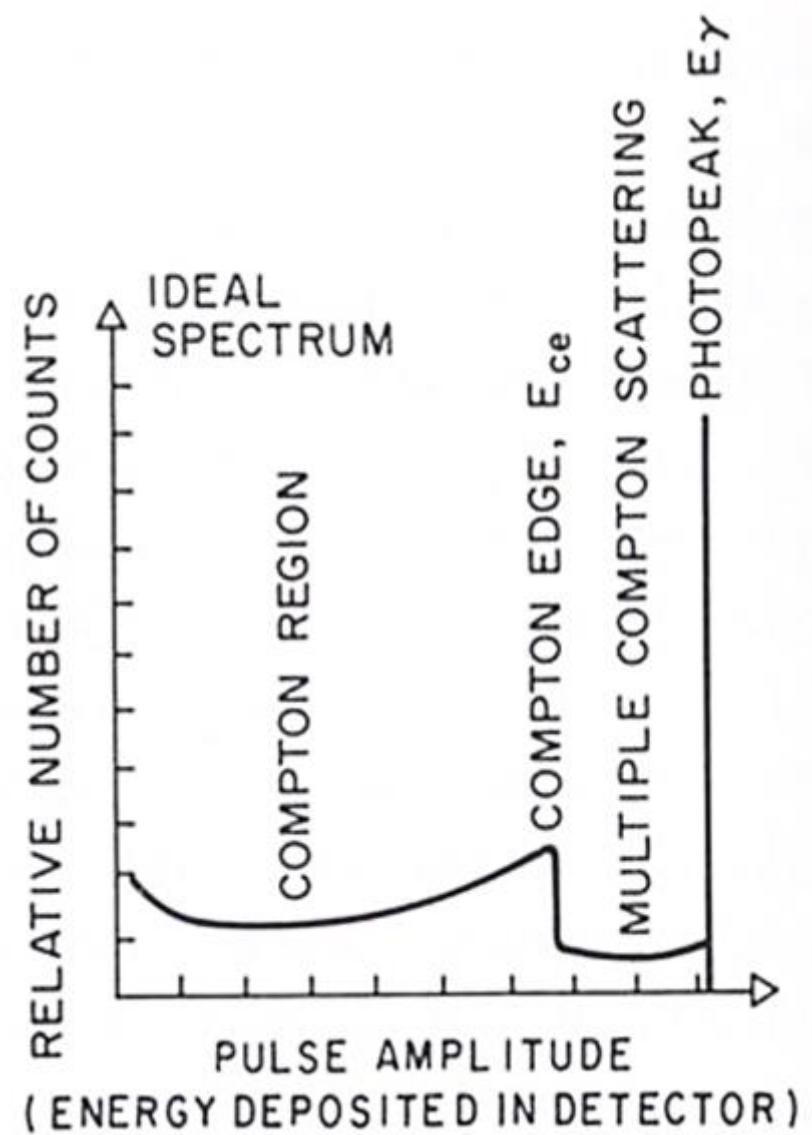
Source  
Plane

Maier, Fig. 10.7

# Mögliche Detektionsprozesse



# Szintillationsdetektor: Energiespektrum



# Planare Szintigrafie



Detektor-Grösse:  $\sim 50 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$

60 Photomultiplier pro Detektor

Energieauflösung: < 10% @140 keV

Ortsauflösung: < 3 mm

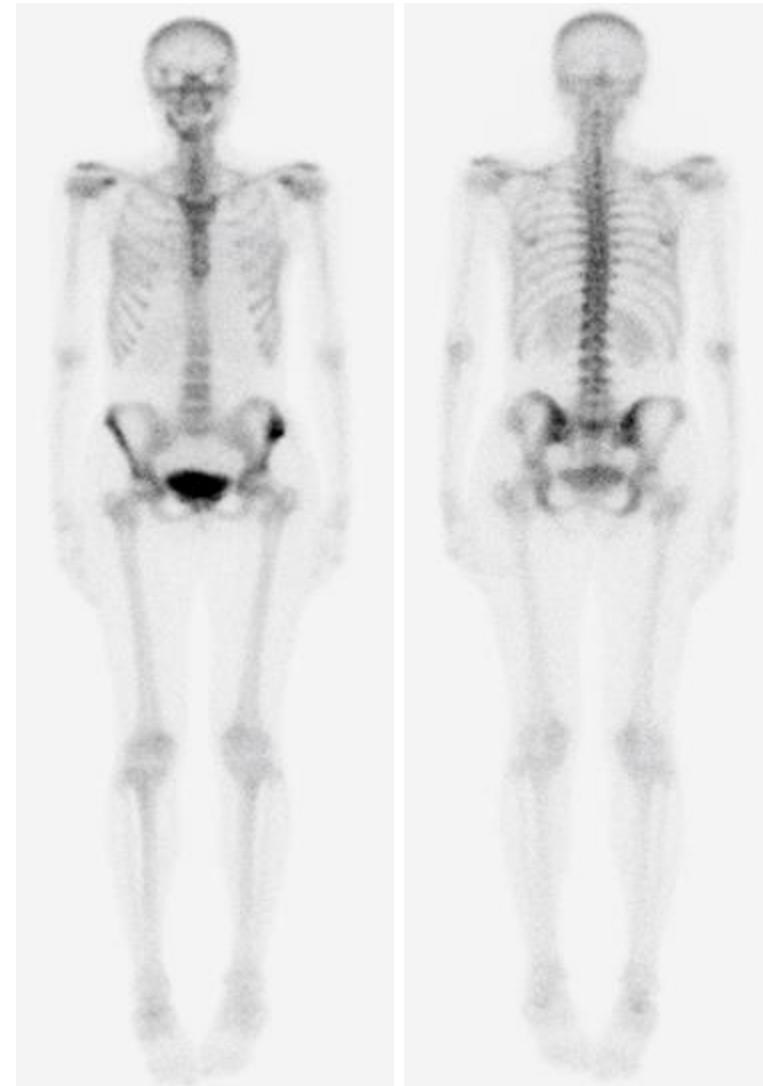
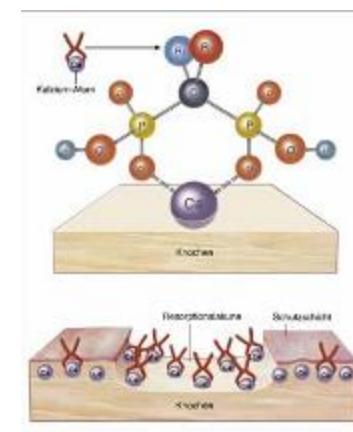
## Knochenszintigrafie:

Erhöhter Metabolismus im Knochen:

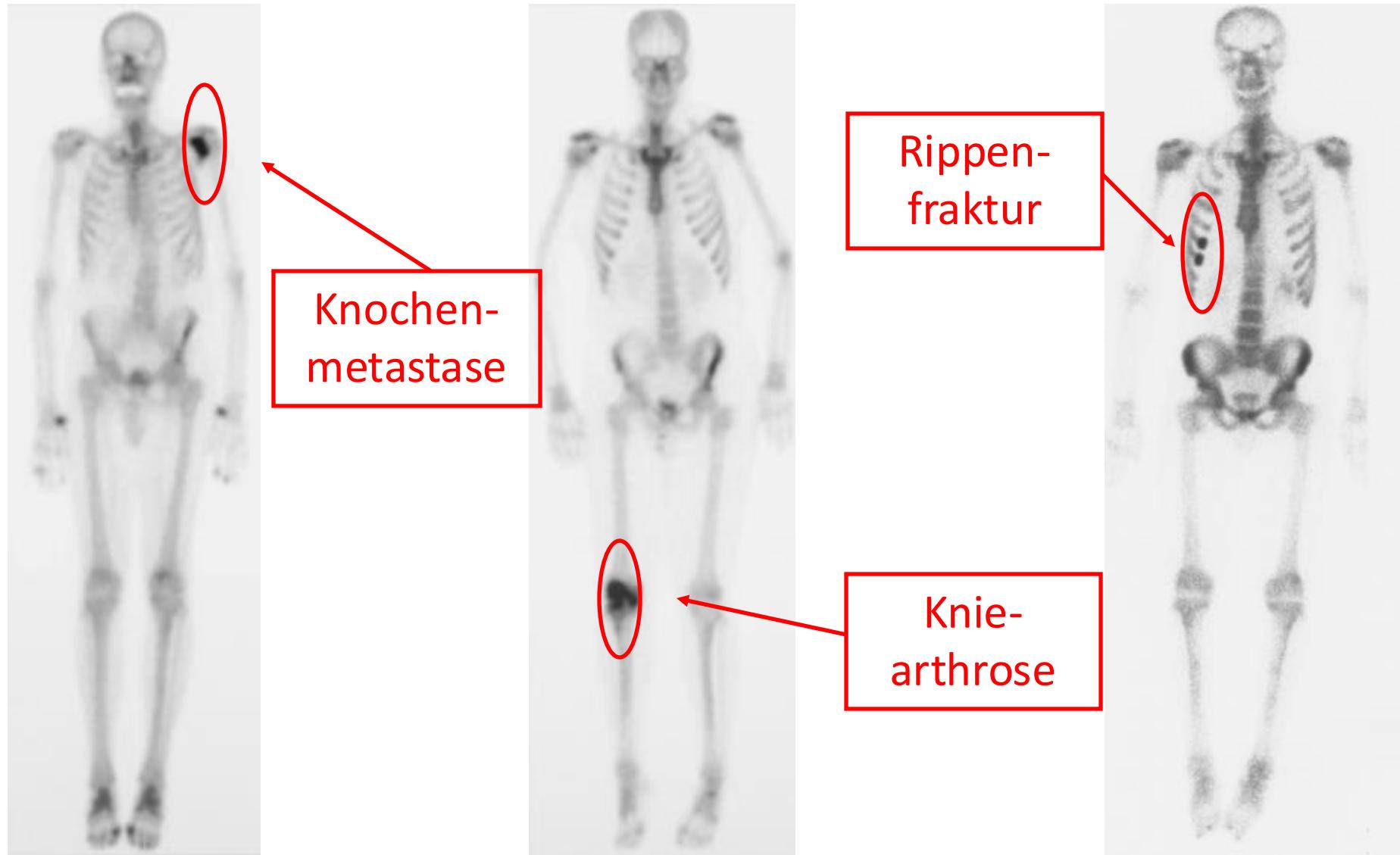
- Knochenbrüchen
- Entzündungen
- Verschleißerscheinungen
- Knochenmetastasen

## Tracer:

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



# Anwendungsbeispiel: Knochenszintigrafie



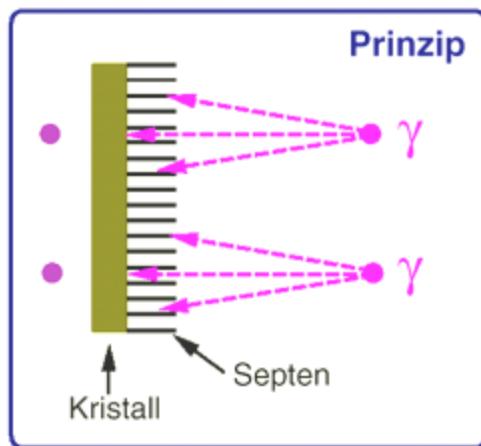
# SPECT-Doppelkopfkamera



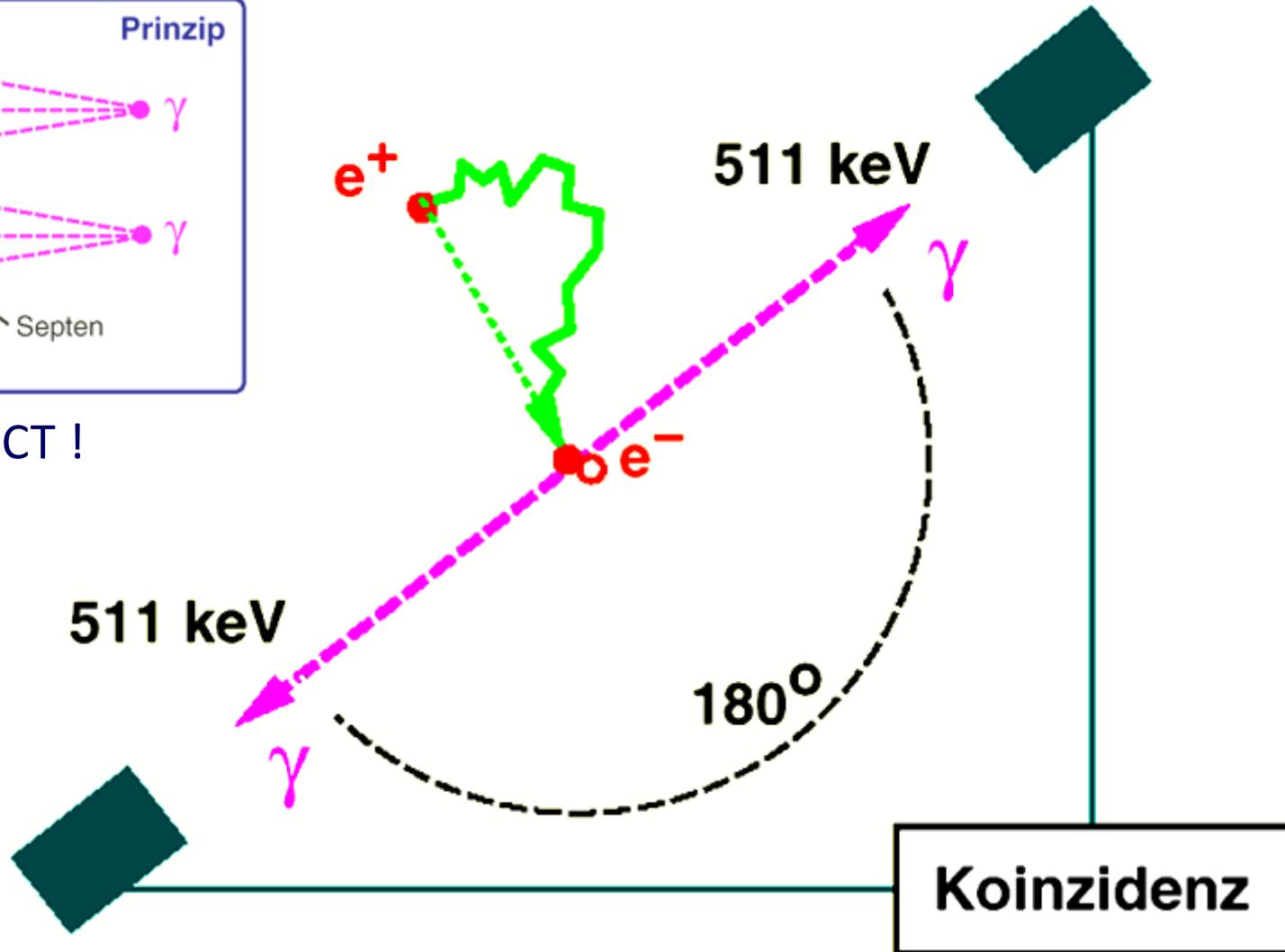
# SPECT-Dreikopfkamera



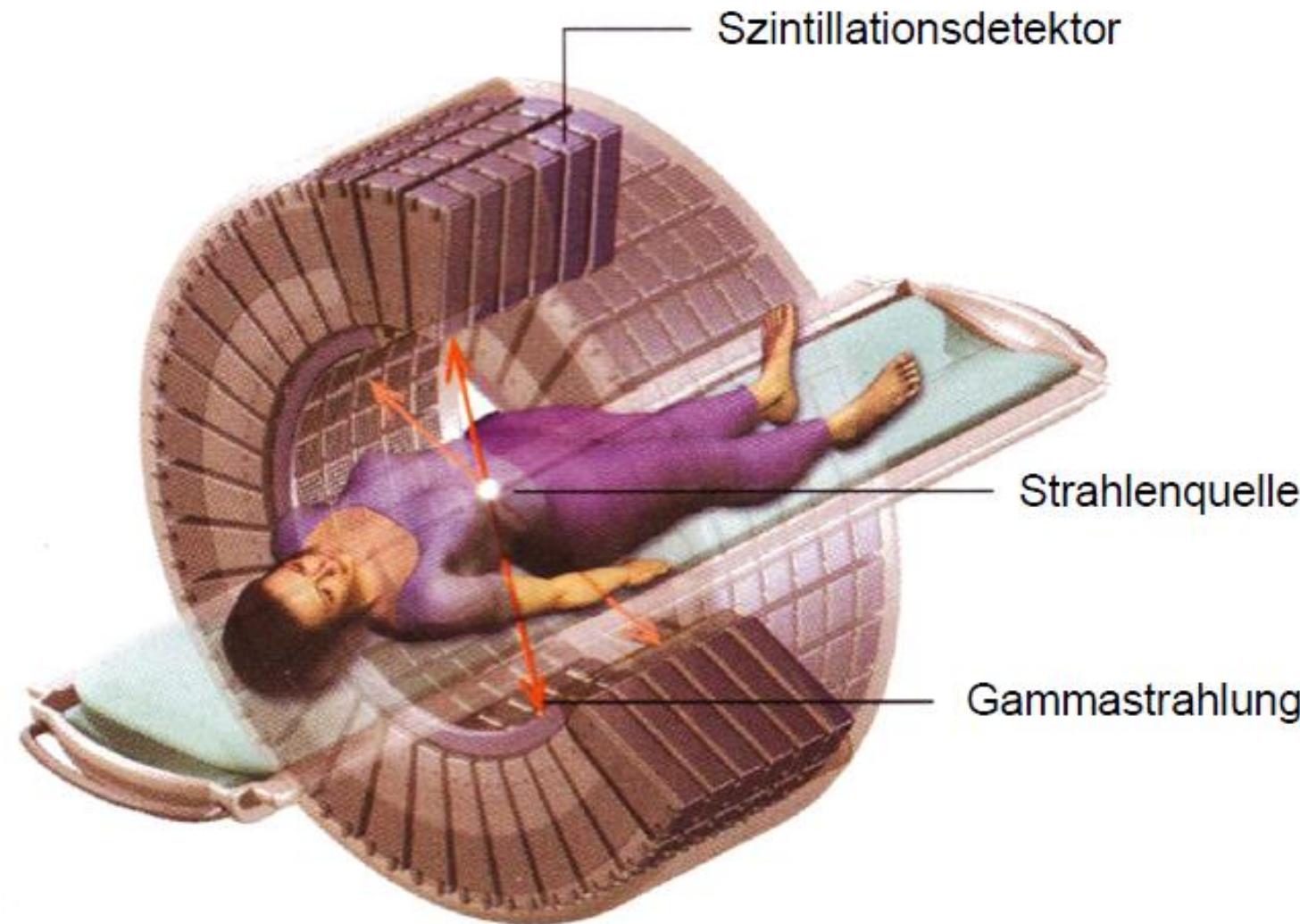
# PET - Elektronische Kollimierung



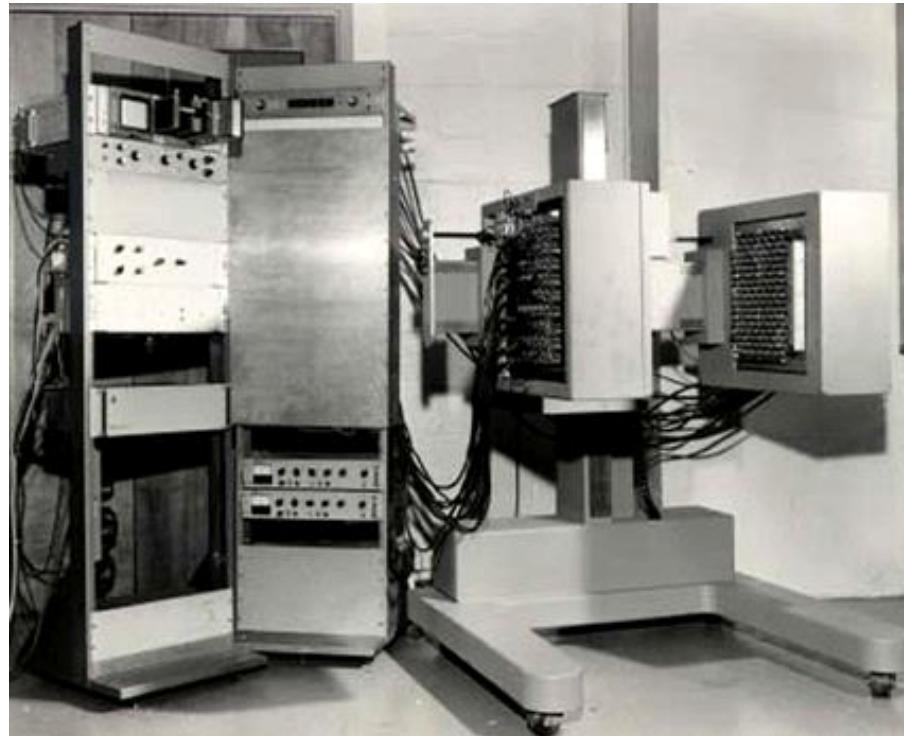
vgl. SPECT !



# PET - Aufbau



# PET - Aufbau

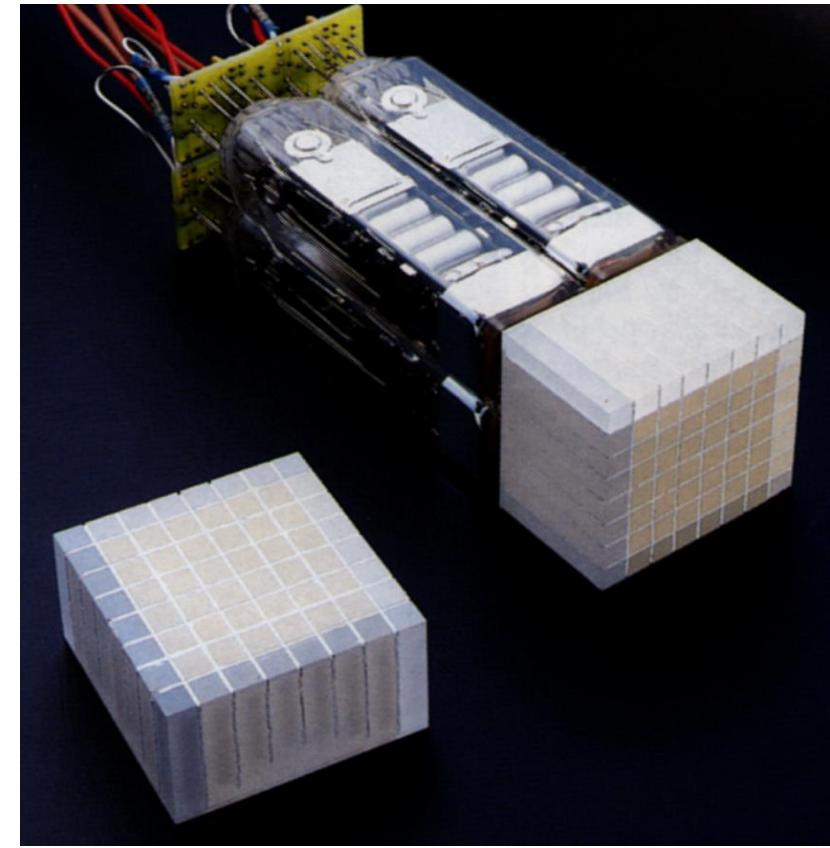
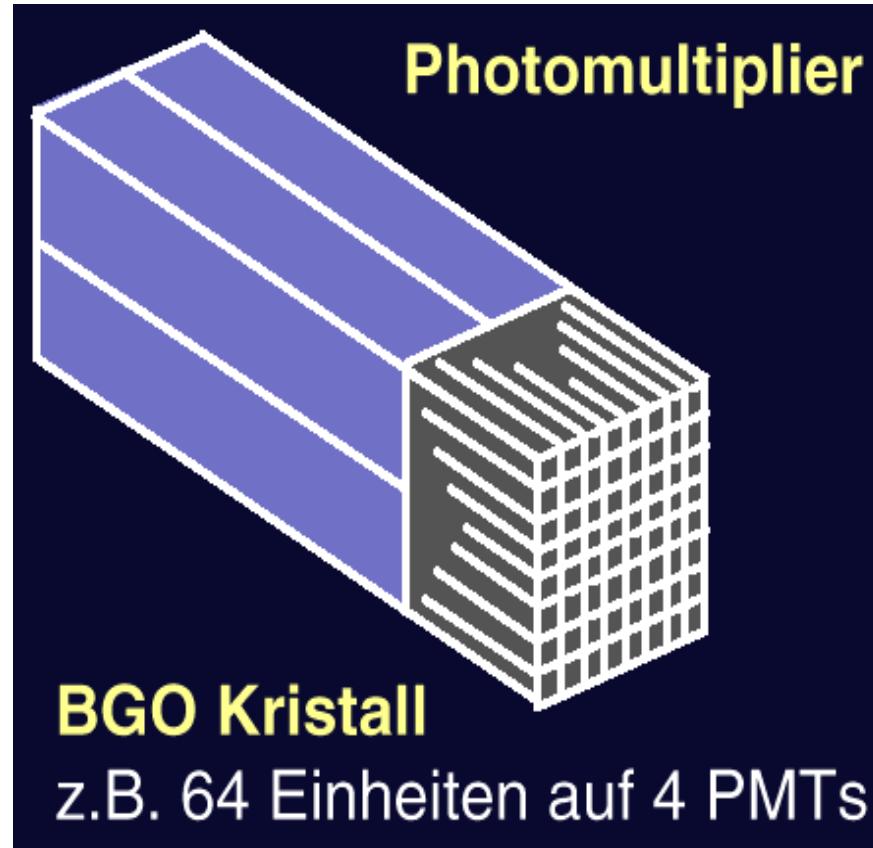


1968 PC-I: Erster PET Scanner  
Burnham and Brownell (MGH)



2009 Siemens Biograph  
PET/ CT System

## Prinzip: Szintillator + Photomultiplier



**Idee:**

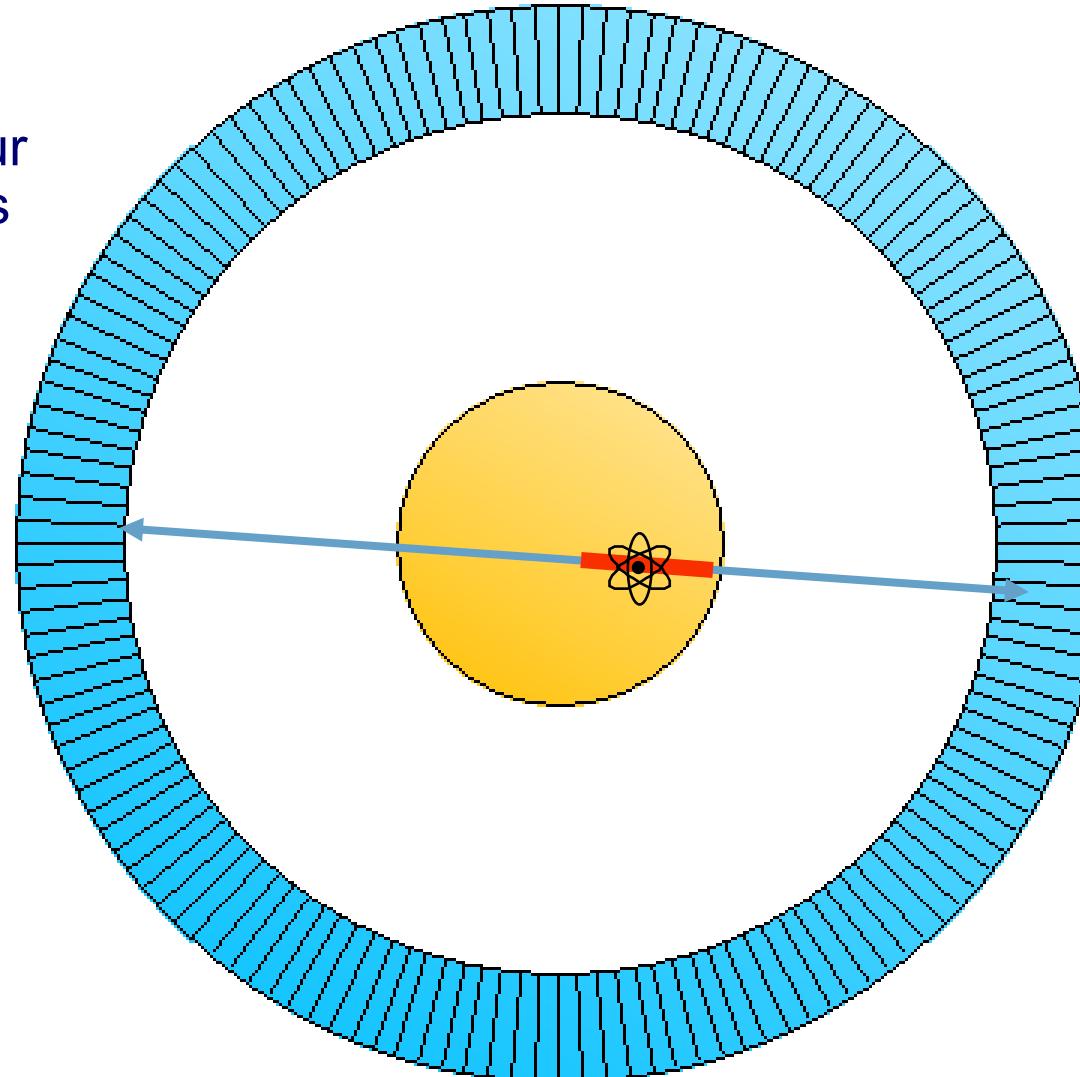
Benutze Flugzeitdifferenz zur Lokalisation des Ereignisses

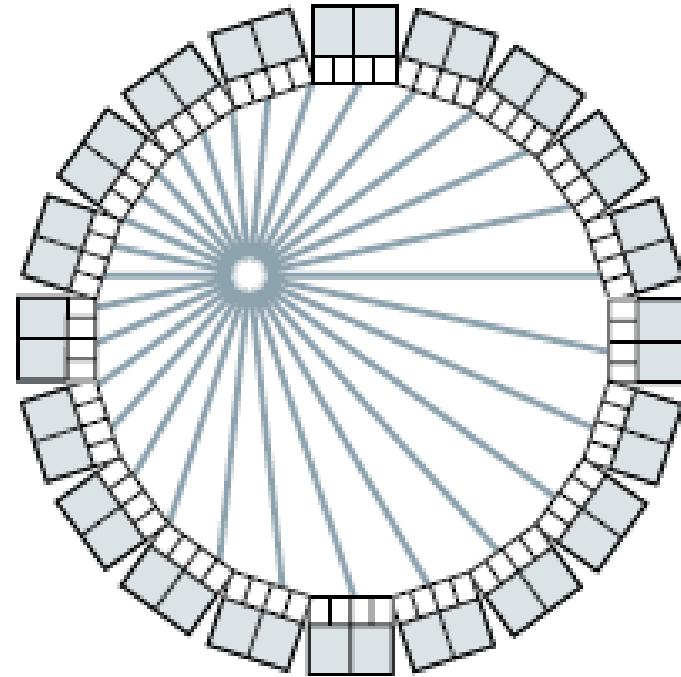
**Problem:**

1 ns Zeitauflösung

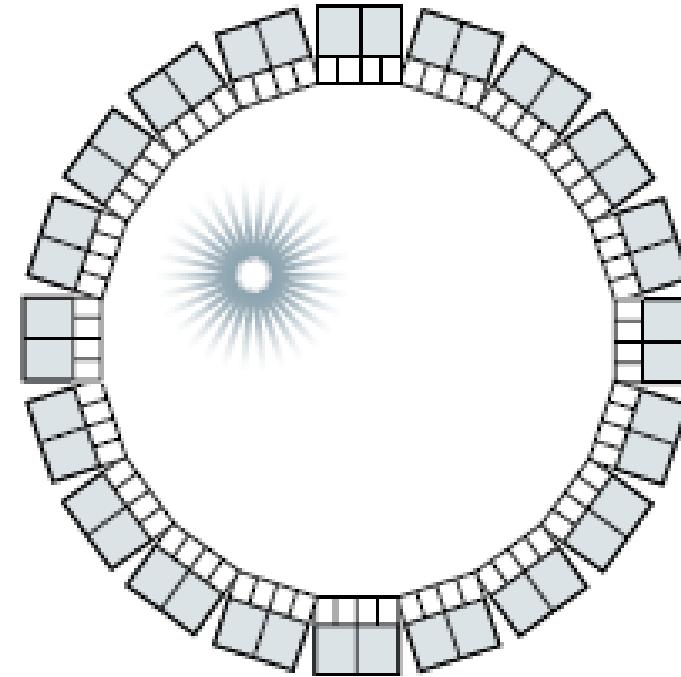
=

30 cm Ortsauflösung



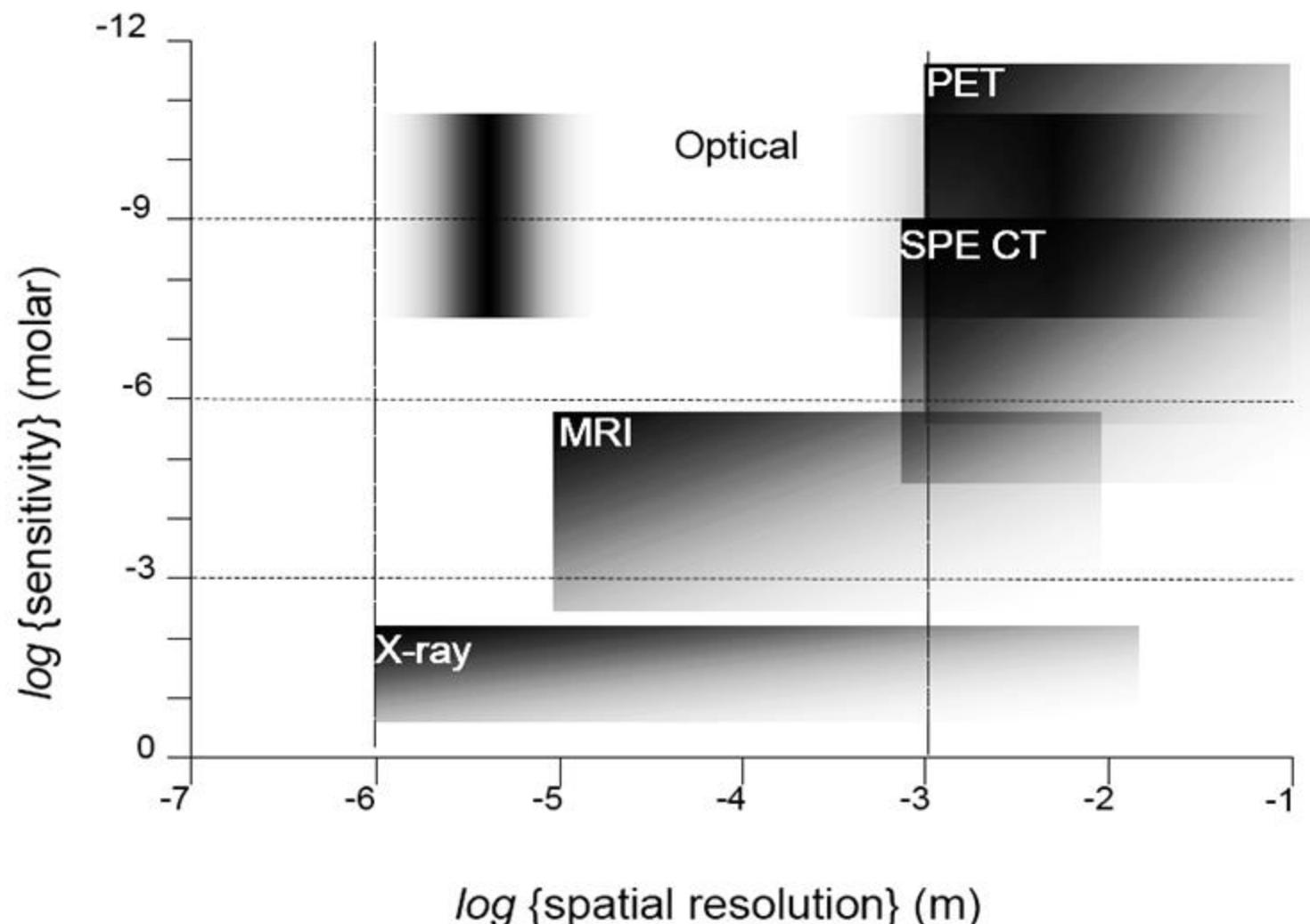


Koinzidenzlinien  
konventionelles PET

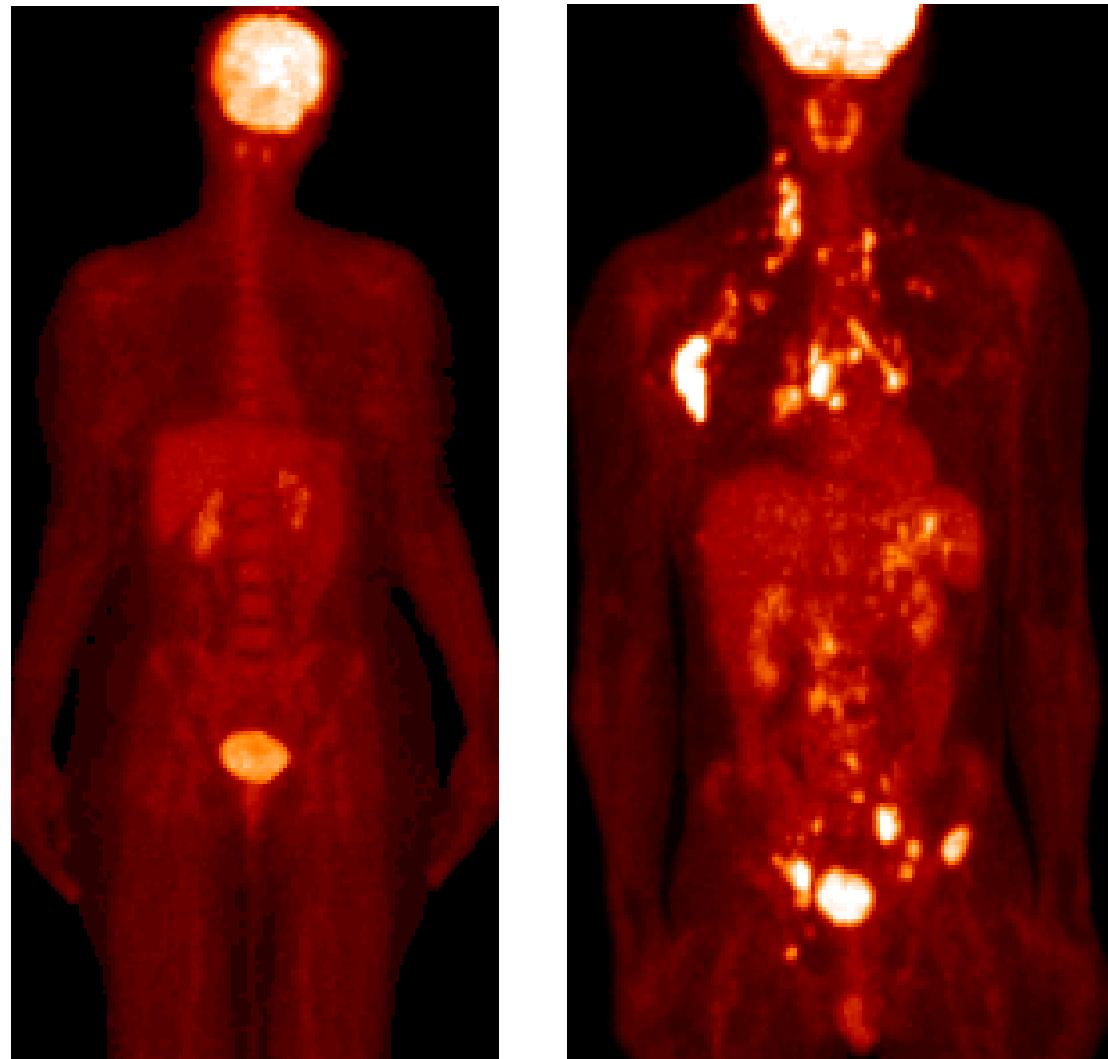


Einschränkung des  
Bereichs im TOF-PET

# PET - Örtliche Auflösung und Sensitivität



## Anwendungsbeispiele PET



F-18 & Fluorodeoxyglucose (FDG) zur Tumor-Detektion

## **Vorteile:**

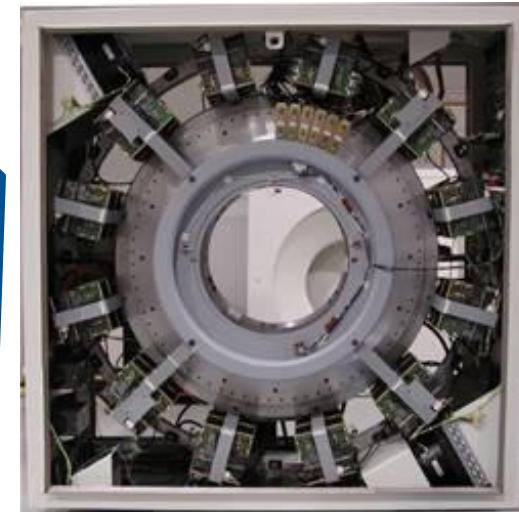
- Kombination von funktioneller (PET) und anatomischer (CT) Information
- Hohe Genauigkeit der Koregistrierung
- CT-basierte Schwächungskorrektur
- Quantitative Daten

# Multimodale Bildgebung: PET/CT



CT

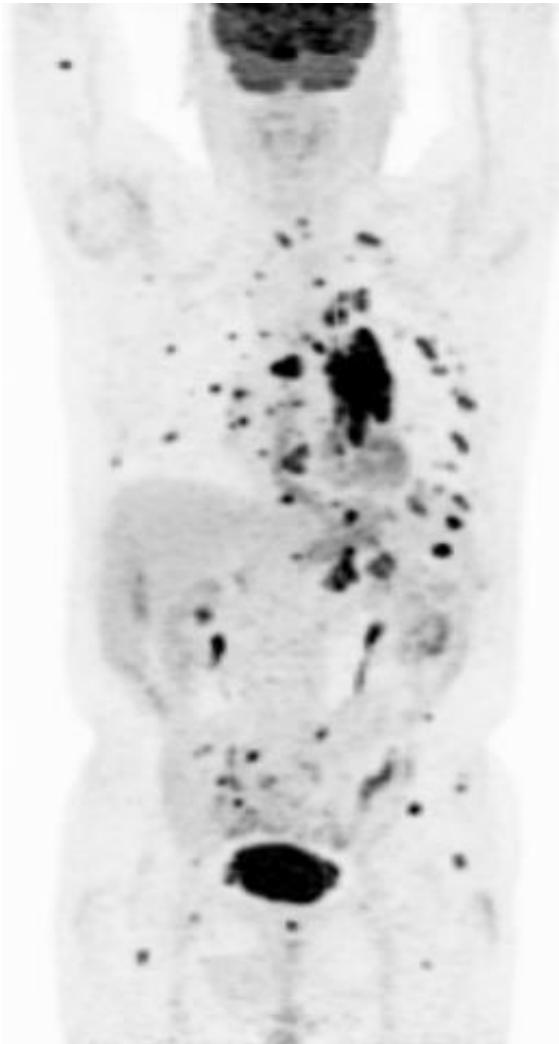
PET



# State-of-the-art PET/ CT



5-minute PET



CT



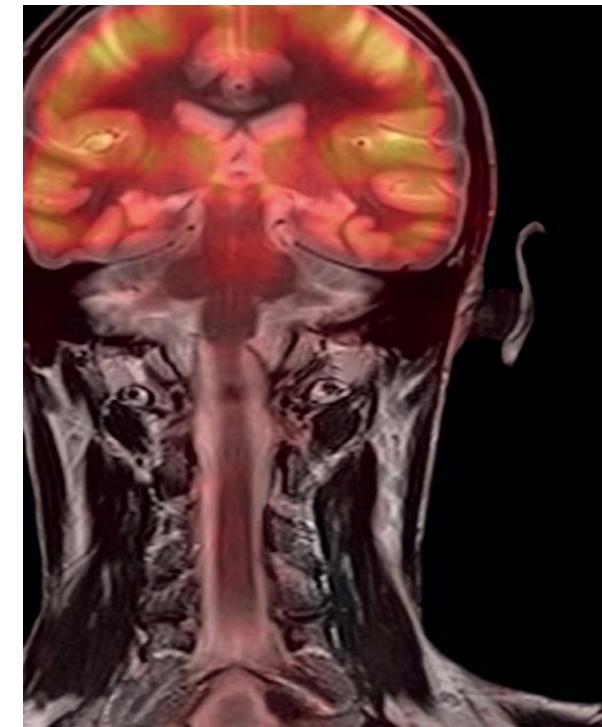
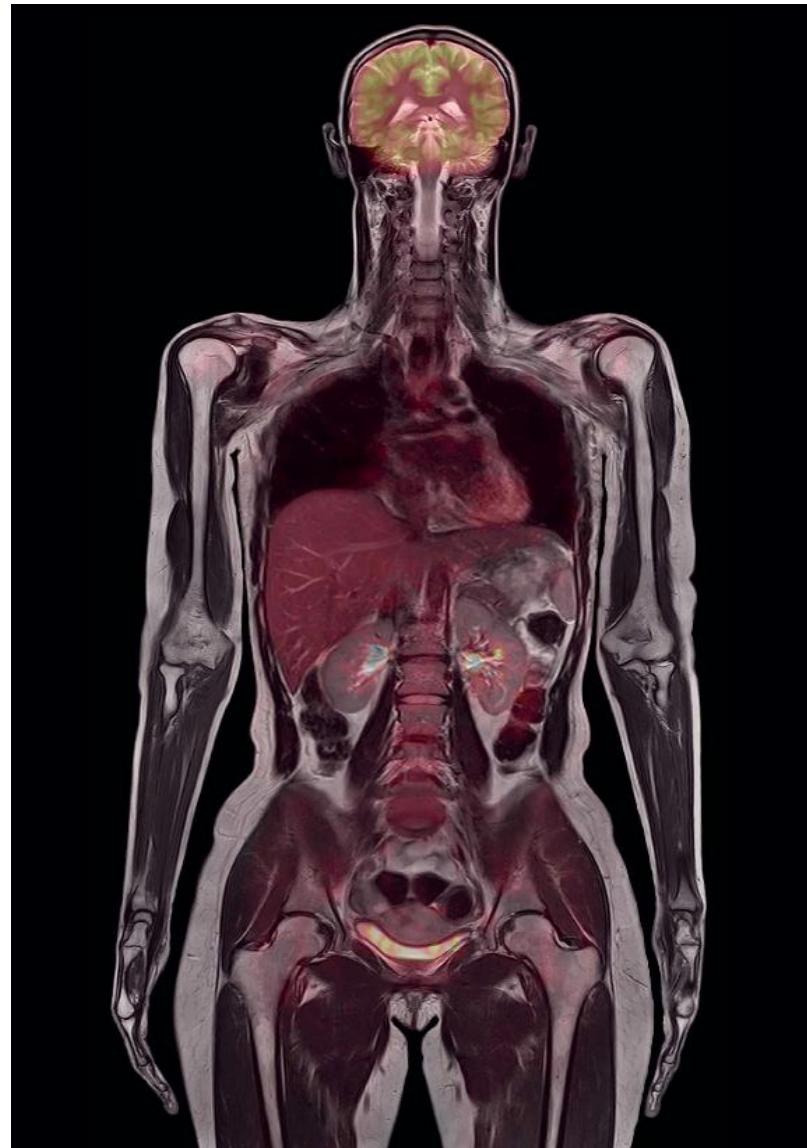
# State-of-the-art PET/ CT



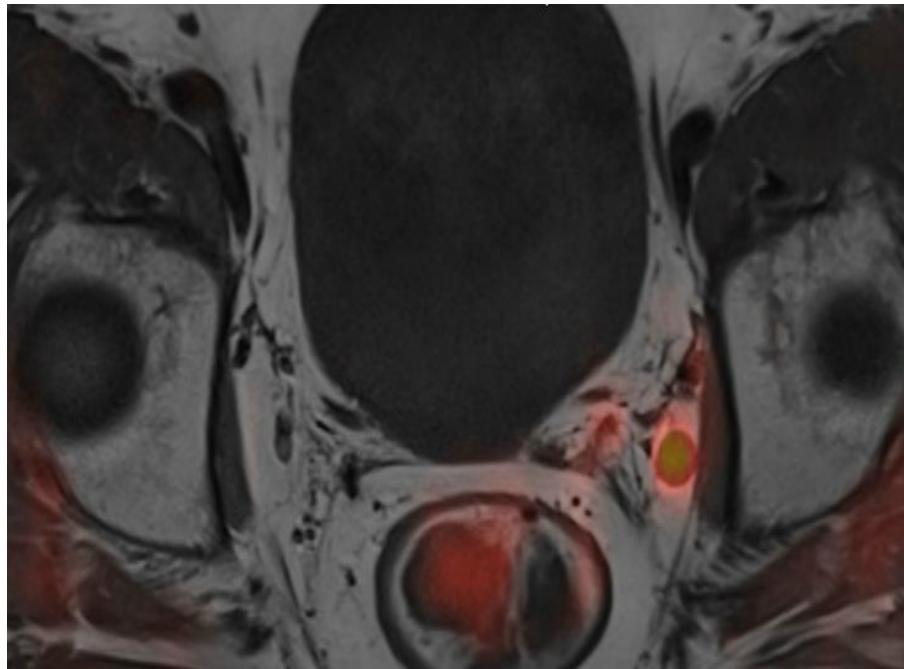
Plattenepithelkarzinom im  
linken Lungenflügel

## **Vorteile:**

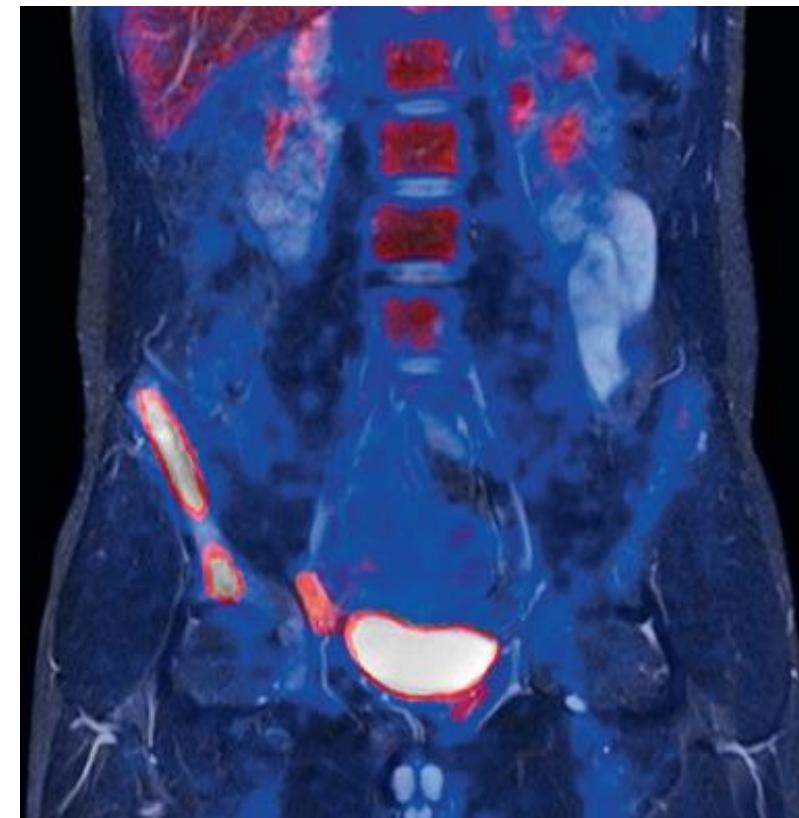
- Kombination von funktioneller (PET) und anatomischer (MRT) Information mit gutem Weichteilkontrast
- Hohe Genauigkeit der Koregistrierung, gleichzeitige Messung



Kombination aus  
Weichteilkontrast (MR)  
& Funktionaler Bildgebung (PET)



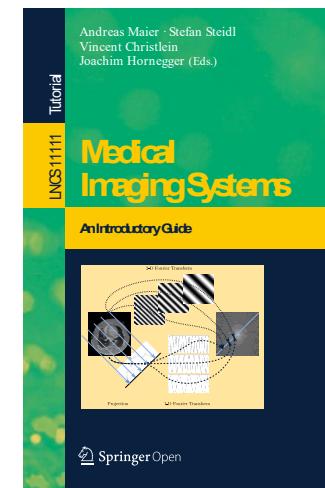
Tumordiagnostik und Verlauf



# Referenzen für weitere Information

## Bücher über SPECT/PET

- Radiotheranostics: a roadmap for future development. Herrman et al. doi: 10.1016/S1470-2045(19)30821-6 and <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7367151/>
- PSMA Theranostics: Science and Practice. Mokoala et al. <https://doi.org/10.3390/cancers13153904> and <https://www.mdpi.com/2072-6694/13/15/3904>
- From the Magic Bullet to Theragnostics: Certitudes and Hypotheses, Trying to Optimize the Somatostatin Model : Di Stasio et al. <https://doi.org/10.3390/cancers13143474> and <https://www.mdpi.com/2072-6694/13/14/3474>



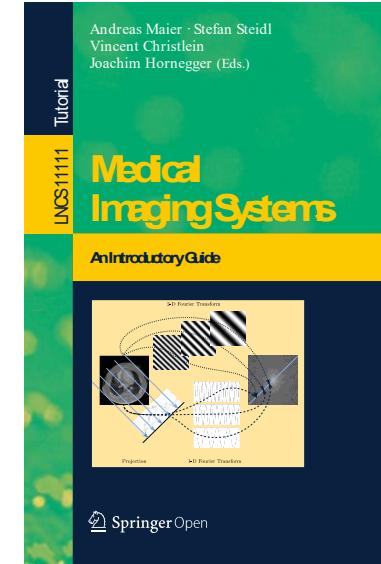
<https://link.springer-com.eaccess.tum.edu/book/10.1007/978-3-319-96520-8>

Chapter 10

# Inhalt

## Teil I: Überblick über klinische Bildgebung

- MRT
- SPECT/PET
- Ultraschall
- Röntgenbildgebung



<https://link.springer.com.eaccess.tum.edu/book/10.1007/978-3-319-96520-8>

## Chapter 11

## Teil II: Spektrale Röntgenbildgebung

- Röntgendetektoren
- Konzepte spektraler Bildgebung
- Anwendungen

# Ultraschall: Grundlagen

Fragen, die Sie am Ende jeder behandelten Methode beantworten können sollten:

- Was erzeugt den Kontrast?
- Wie erhält man die Ortsauflösung?

ausführlichere Behandlung in folgenden Vorlesungen im Master:

- Biomedical Physics II (Prof. Pfeiffer/Prof. Wilkens)



**Quelle:** Maier, "Medical Imaging Systems"

**Figure 11.1:** Clinical Ultrasound System in action. Image courtesy of Siemens Healthineers AG.

	$f$	Examples
<b>Infrasound</b>	0 ... 16 Hz	Seismic waves
<b>Audible sound</b>	16 Hz ... 20 kHz	Music Human Speech
<b>Ultrasound</b>	> 20 kHz	Bat, Dolphin, and Whale Sounds Acoustic Microscopy Ultrasound Imaging

**Table 11.1:** Acoustic spectrum.

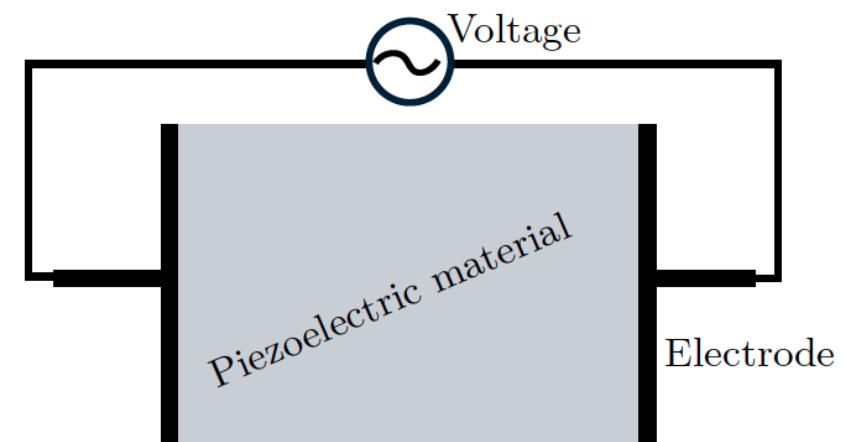
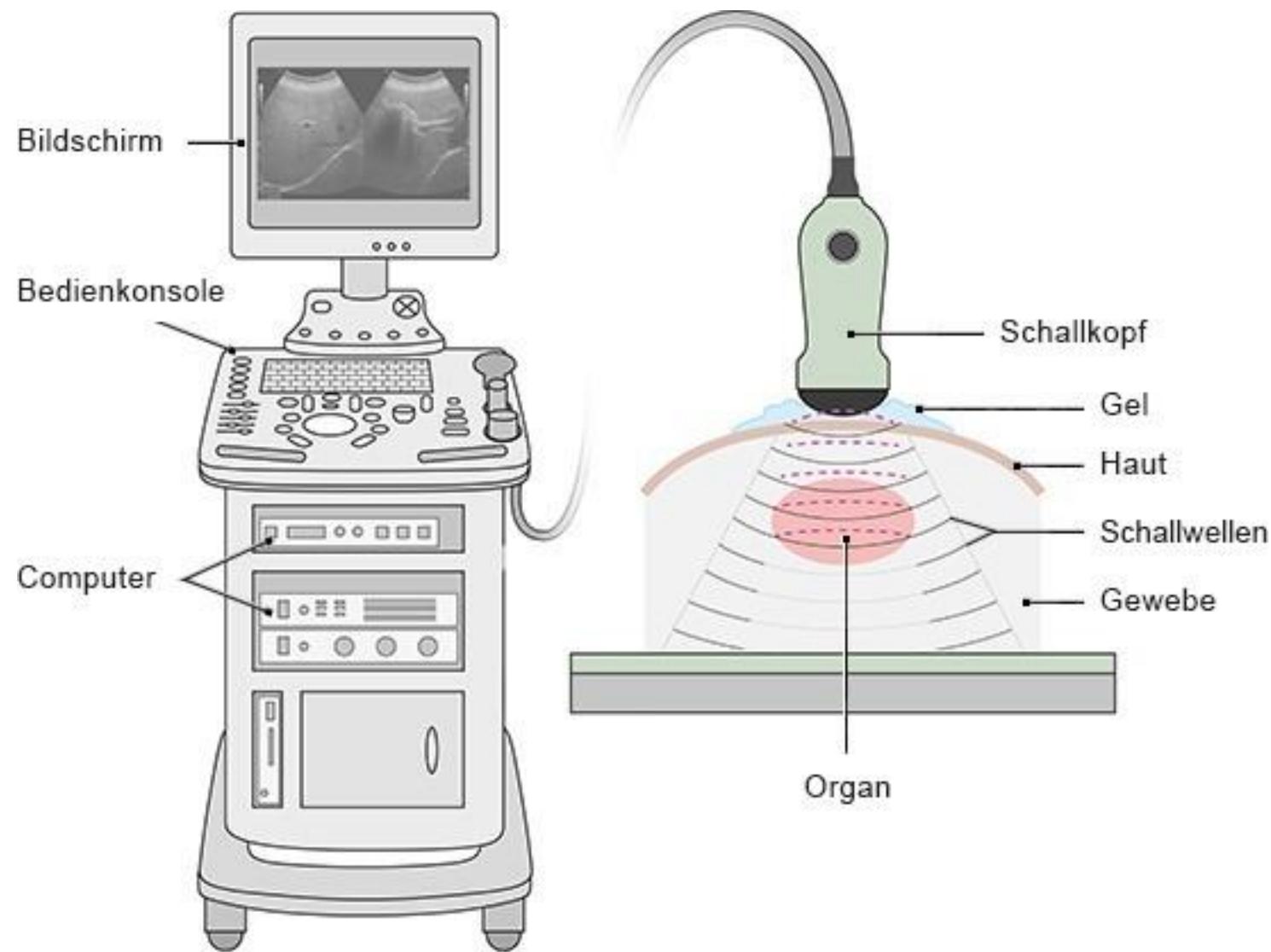
Medium	$v$ [m s $^{-1}$ ]	$Z$ [g cm $^{-2}$ s $^{-1}$ ]
Air	331	$4.3 \cdot 10^1$
Fat	1470	$1.42 \cdot 10^5$
Water	1492	$1.48 \cdot 10^5$
Brain tissue	1530	$1.56 \cdot 10^5$
Muscles	1568	$1.63 \cdot 10^5$
Bones	3600	$6.12 \cdot 10^5$

**Table 11.2:** Sound velocity  $v$  and impedance  $Z$  of various media occurring in the human body.

Material 1	Material 2	Reflected
Brain	Skull bone	43.5%
Fat	Muscle	1%
Fat	Kidney	0.6%
Muscle	Blood	0.1%
Soft tissue	Water	0.25%
Soft tissue	Air	99.9%

**Table 11.3:** Reflectivity at boundaries between two materials.

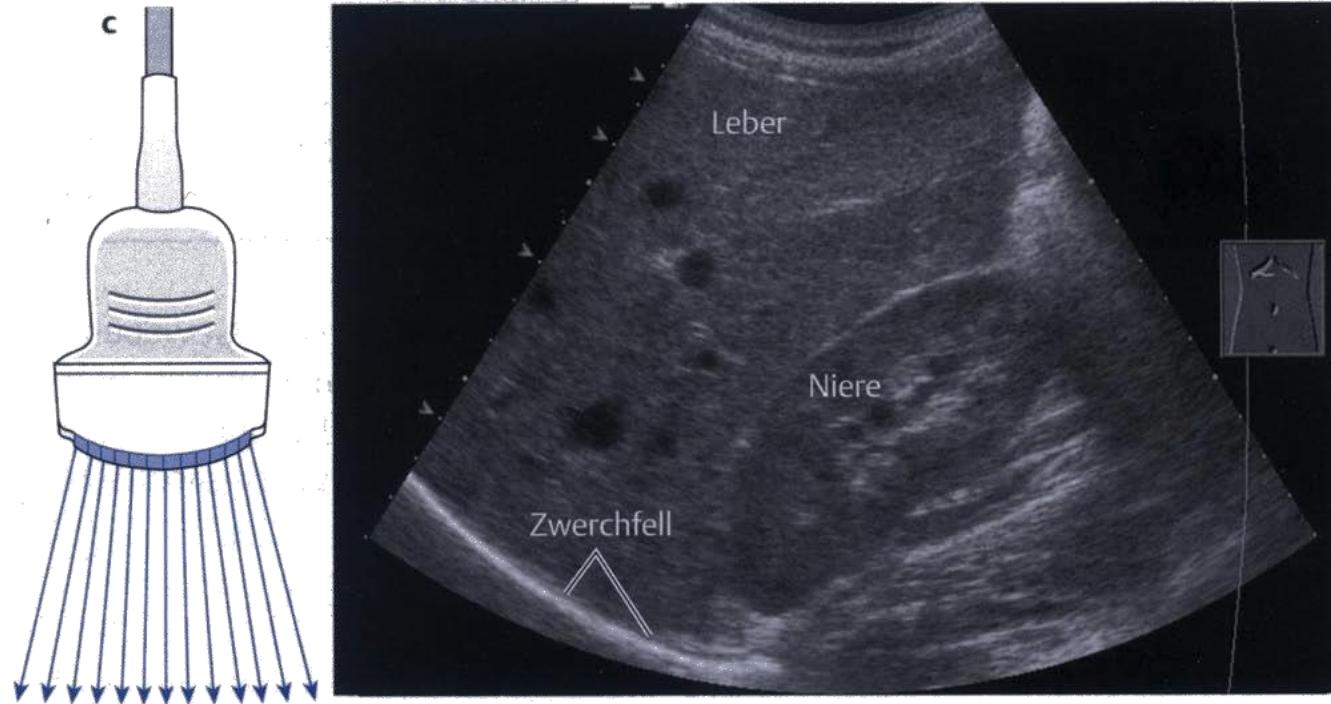
# Transducer = Emitter & Detektor



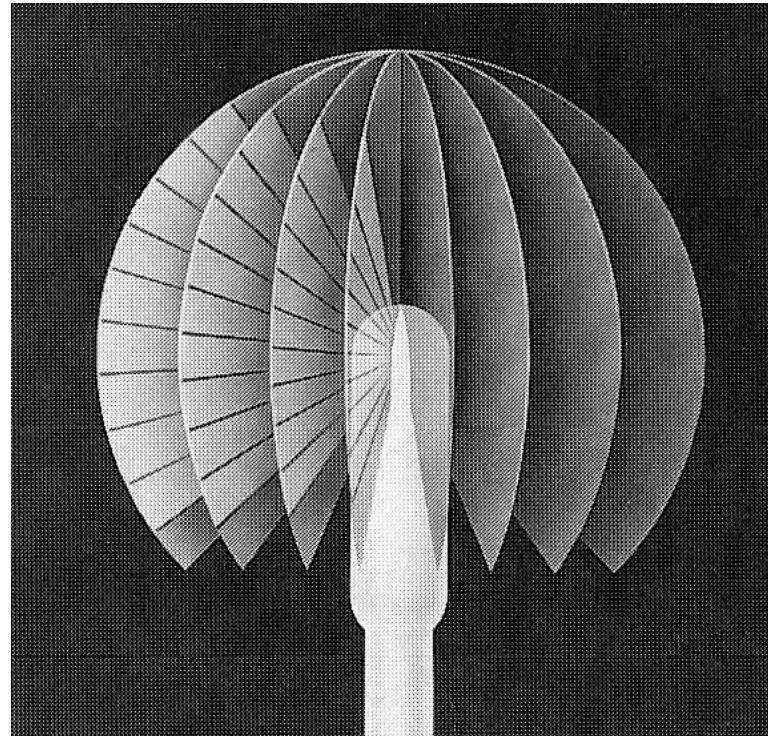
**Figure 11.4:** Piezoelectric effect.

**Quelle:** Maier, "Medical Imaging Systems"

# 2D Ultraschall

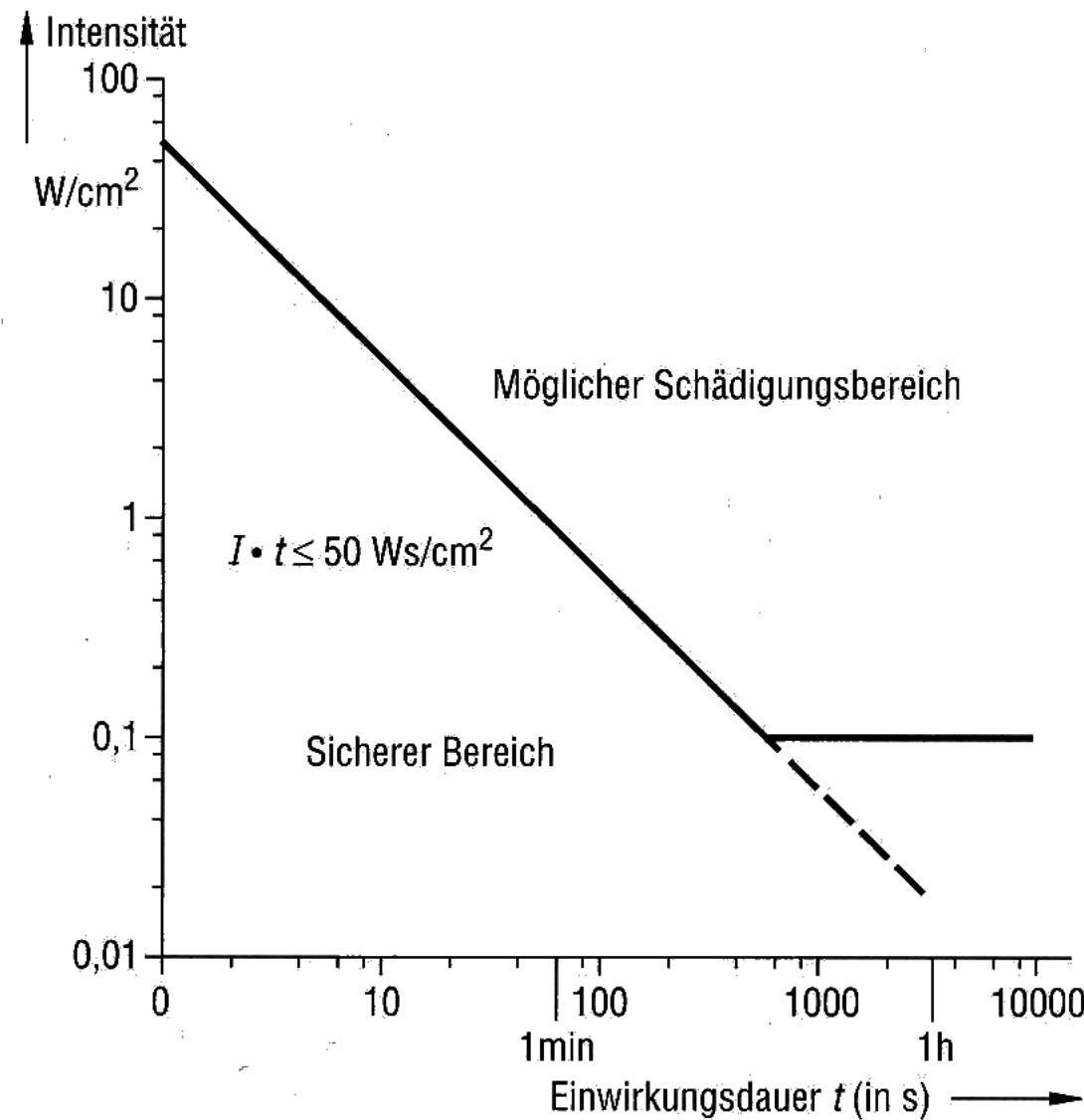


# 3D Ultraschall



seit 2021 3D und 4D Ultraschall für Schwangere ohne medizinische Indikation verboten

# Ultraschall: Sicherheitsaspekte

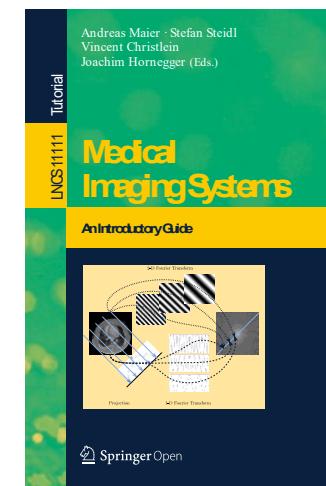


Quelle: Morneburg, 1995

# Referenzen für weitere Information

## Bücher über Ultraschall

- Morneburg H. (Hrsg) (1995) Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik, PublicisMCD Verlag: Erlangen
- Dössel O. (2000) Bildgebende Verfahren in der Medizin, Springer: Berlin Heidelberg
- Schlegel W. und Bille J. (Hrsg) (2002) Medizinische Physik–Band 2, Springer: Berlin Heidelberg
- Qin S et al. (2009) Ultrasound contrast microbubbles in imaging and therapy: physical principles and engineering. *Phys. Med. Biol.* 54, R27–R57



<https://link-springer-com.eaccess.tum.edu/book/10.1007/978-3-319-96520-8>

Chapter 11

# Hausaufgaben

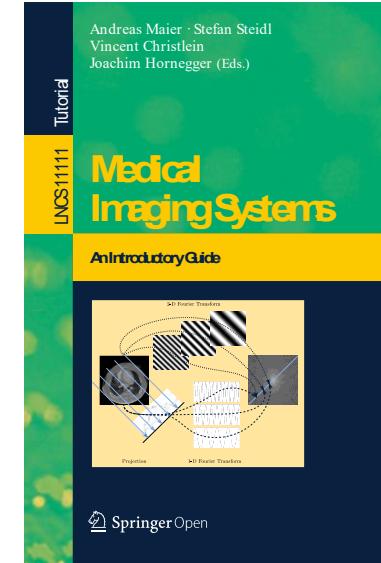
## Eine Aufgabe auf Moodle

- Aufgabe 1: zu klinischen Methoden

# Inhalt

## Teil I: Überblick über klinische Bildgebung

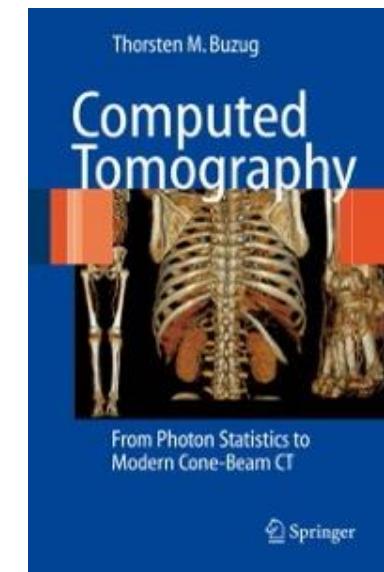
- MRT
- SPECT/PET
- Ultraschall
- Röntgenbildgebung



<https://link.springer-com.eaccess.tum.edu/book/10.1007/978-3-319-96520-8>

## Teil II: Spektrale Röntgenbildgebung

- Röntgendetektoren
- Konzepte spektraler Bildgebung
- Anwendungen



<https://link.springer-com.eaccess.tum.edu/book/10.1007/978-3-540-39408-2>

**Vielen Dank für ihre  
Aufmerksamkeit!**