

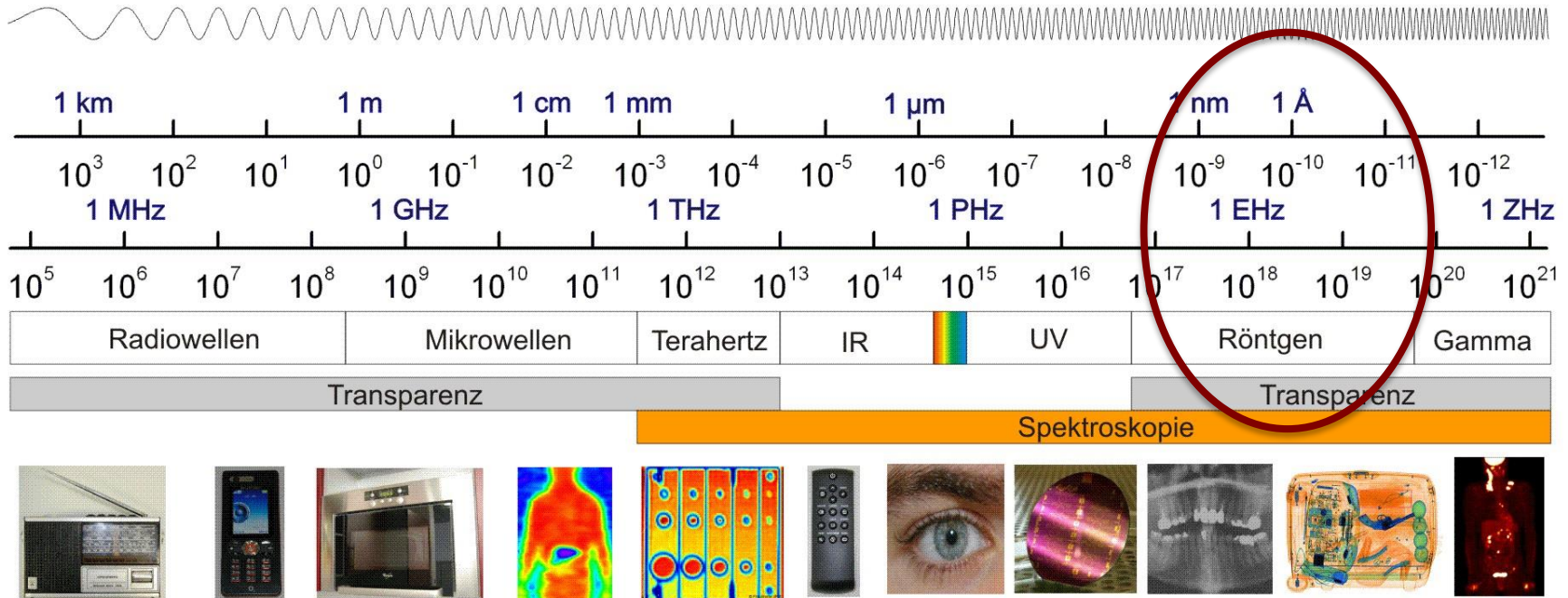


TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

# Röntgenstrahlung & Computertomographie



# elektromagnetisches Spektrum



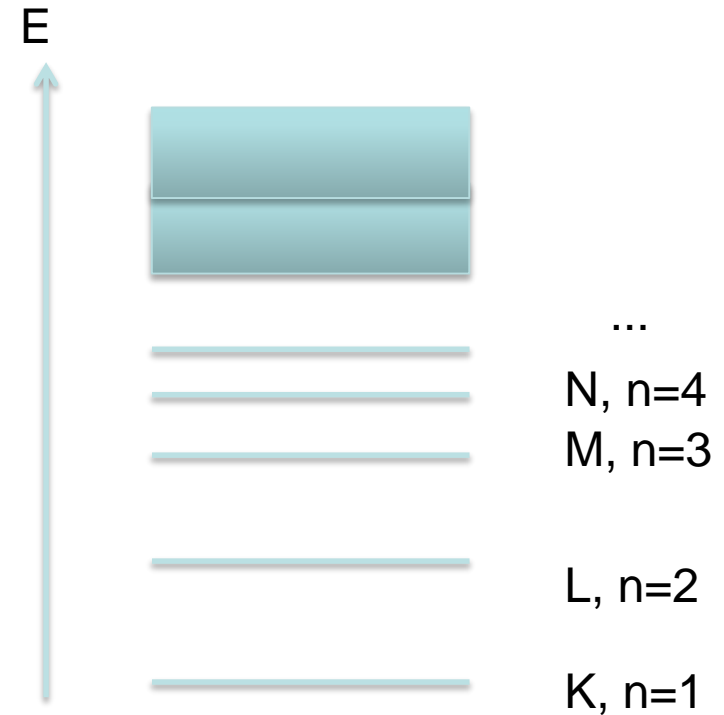
Quellen: Fraunhofer IPM (9), Smiths Detection (1), Forschungszentrum Rossendorf (1)

Vergleichen Sie die Energie sichtbaren Lichtes und der Röntgenstrahlung miteinander!



## Atomhüllen im Festkörper:

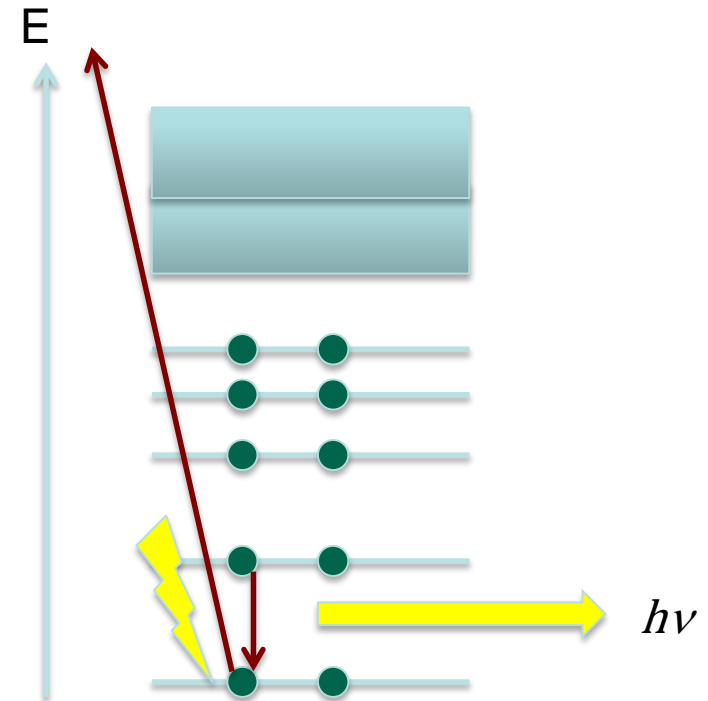
- Leitungsband: elektr. Leitung durch frei bewegliche Elektronen
- Valenzband: gemeinsame besetzte Energiezustände aller Atome im Festkörper, Bindungsenergie  $\sim$  eV
- tiefe Schalen: nicht beeinflusst von Nachbaratomen, diskret, Elektronen stark gebunden ( $\sim$ keV)



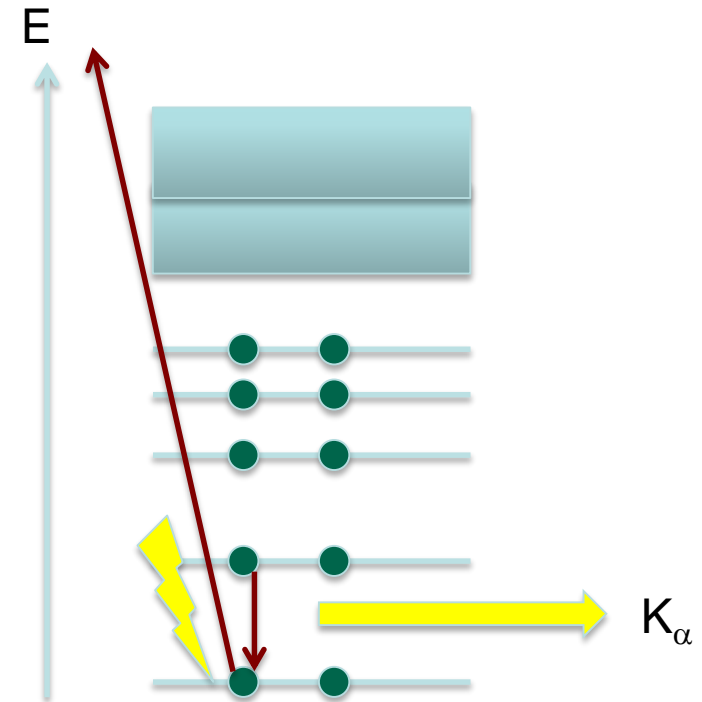


# Röntgenstrahlung - Entstehung

- tiefe, diskrete Energieniveaus sind im Grundzustand alle vollständig mit Elektronen besetzt.
- Anregung von außen ist möglich – einem Elektron muss dann soviel Energie zugeführt werden, dass es sein Ausgangsatom verlassen kann
  - Ionisation durch Elektronenstoß, Strahlung
  - ein unbesetzter Zustand bleibt zurück
  - Auffüllen aus darüberliegenden Energieniveaus
  - freiwerdende Energie wird als Röntgenquant abgegeben, Energie hängt vom Element und den beteiligten Niveaus ab
    - **charakteristische Strahlung**

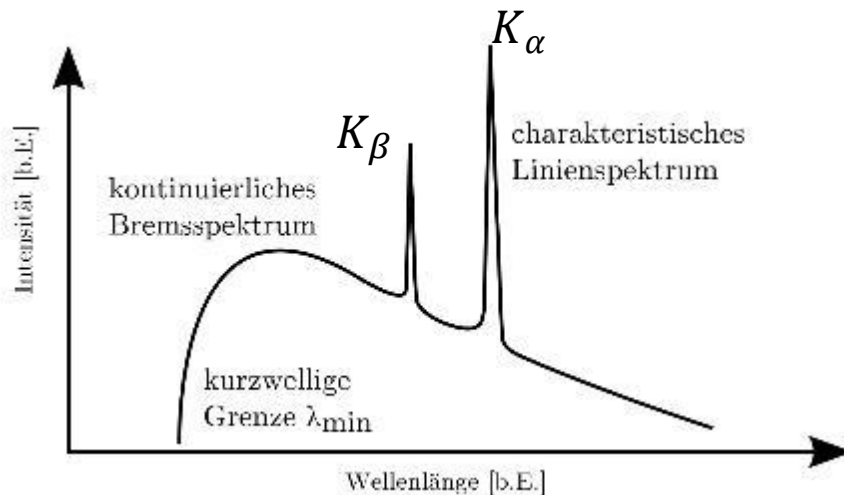


- **charakteristische Strahlung**
    - diskrete, feste Energie & Wellenlänge
    - Kennzeichnung:
      - nach der Schale, in der der freie Zustand erzeugt wird: K, L, M,...
      - nach der Schale, aus der der freie Zustand wieder besetzt wird:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,...
- $$E(K_b) > E(K_a)$$
- $$I(K_b) < I(K_a)$$
- tatsächlich sind die Niveaus ab  $n=2$  aufgespalten in mehrere Unterniveaus





# Röntgenstrahlung - Entstehung



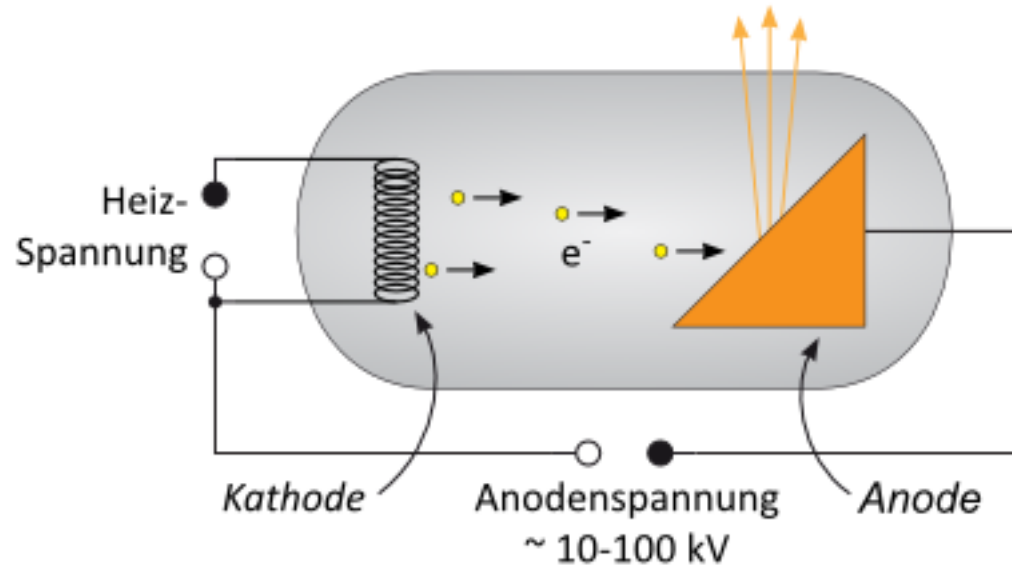
Röntgenstrahlung wird in Röntgenröhren erzeugt

- beschleunigte Elektronen ( $U_B$ ) werden auf ein Metalltarget geschossen
- Stoß mit Hüllenelektronen, charakteristische Strahlung
- zudem ist Ablenkung und Abbremsung im elektr. Feld der Atomkerne auch ohne Stoß möglich
  - Energieverlust in Form von **Röntgenbremsstrahlung**
  - kontinuierliche Strahlung
- Wie groß ist die maximale Energie / minimale Wellenlänge der Röntgenbremsstrahlung?



# Röntgenröhre

Röntgenstrahlen

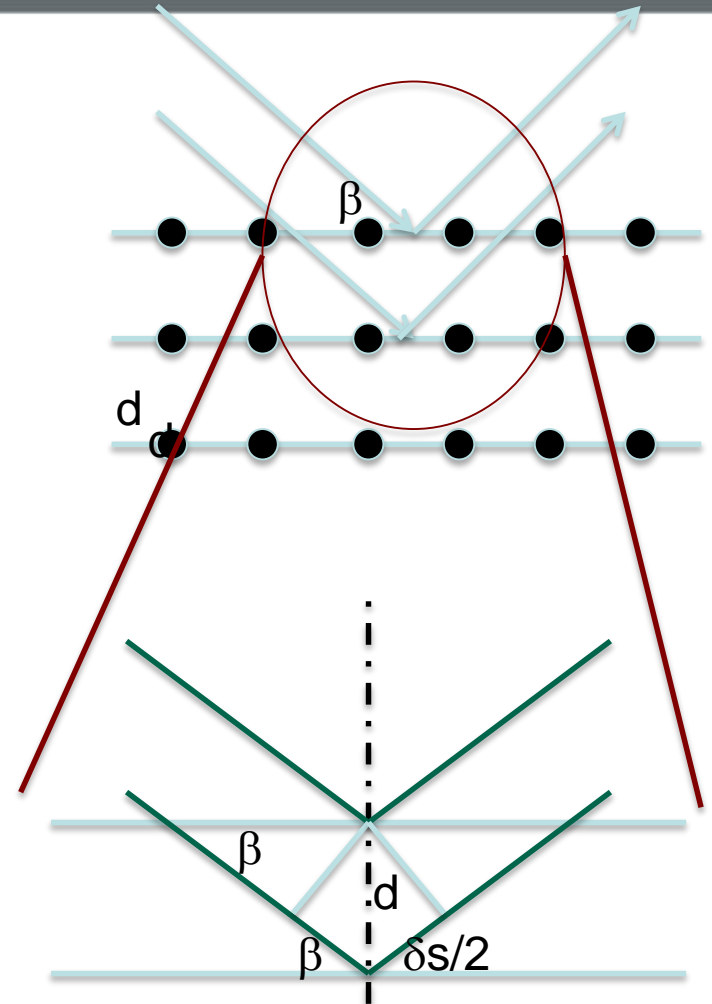


<http://lp.uni-goettingen.de>, Physik IV  
<http://www.ld-didactic.de>



# Beugung von Röntgenstrahlen

- Wellenlänge der Röntgenstrahlung ist im Bereich der Atomabstände im Festkörper  
→ Beugung an der Gitterstruktur
- Bragg-Gleichung:  
$$2d \sin \beta = n\lambda$$
- Anwendungen:
  - Analyse der Gitterstruktur mit Röntgenstrahlung bekannter Wellenlänge
  - Untersuchung des Röntgenspektrums mit Spektrometerkristall mit bekannter Gitterkonstante







# Untersuchung des Röntgenspektrums

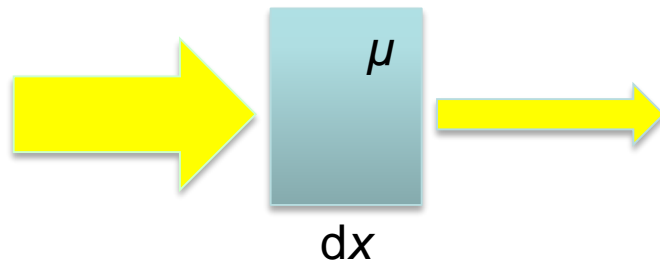


- Schulröntgengerät mit Molybdän-Röntgenröhre
- Beschleunigungsspannung:  
 $U_B = 35 \text{ kV}$
- NaCl-Kristall als Spektrometerkristall zur Untersuchung der emittierten Röntgenstrahlung  
→ Netzebenenabstand  $282 \text{ pm}$



# Absorption von Röntgenstrahlung

- Röntgenstrahlung wird im Material geschwächt



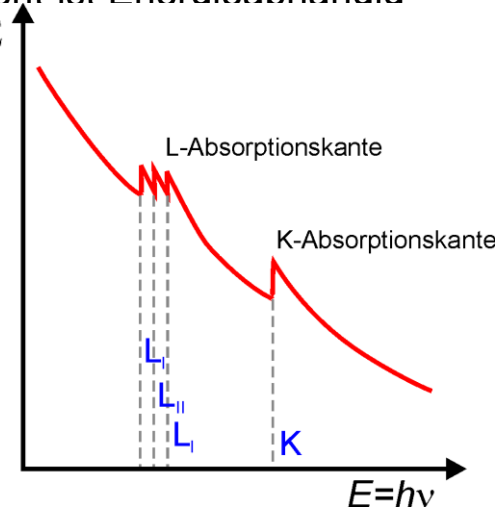
$$dI = -\mu I dx$$

→ Integration liefert das bekannte Schwächungsgesetz

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

- Schwächungskoeffizient charakterisiert das Material

- einfallende Röntgenstrahlung kann Elektronen aus der Atomhülle (tiefe Zustände) herauslösen
  - Ionisation
  - Bindungsenergie der K-, L-,... Elektronen muss aufgebracht werden
  - genügt die Energie der Röntgenstrahlung dazu,
    - wird die Absorption besonders effizient
  - Schwächungskoeffizient ist Energieabhängig (sog. Absorptionskanten)
- abseits der Kanten ändert sich  $\mu$  nur langsam mit der Energie / Wellenlänge





- in Durchstrahlung wird die Gesamtschwächung entlang einer Geraden gemessen

$$(md)_{\text{ges}} = \int m(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = -\ln \frac{I}{I_0}$$

- geringe Schwächung → helle Bereiche im Bild
  - große Schwächung → dunkle Bereiche im Bild
  - Schwächung kann
    - gleichmäßig durch mäßig absorbierendes Material
    - oder
    - auf kurzer Strecke durch stark absorbierendes Material geschehen
- kein Rückschluss möglich



- Wünschenswert ist es, die einzelnen übereinander liegenden Schichten trennen zu können  
→ Dickeninformation wird benötigt.
- ist Dickeninformation vorhanden, lassen sich die Schwächungskoeffizienten der einzelnen Materialien bestimmen.
- Dickeninformation kann einem Bild senkrecht zur eigentl. Durchstrahlungsrichtung entnommen werden

Bsp: Materialpaarungen gleicher Dicke  $d$

$$(md)_{12} = m_1 d + m_2 d$$

$$(md)_{13} = m_1 d + m_3 d$$

$$(md)_{23} = m_2 d + m_3 d$$

→ Gleichungssystem ist zu lösen

in realen Objekten liegen die absorbierenden Strukturen nicht so geordnet übereinander  
→ mathematisch kompliziert  
→ 360° -Abtastung erforderlich



## Kleingerät:

- Strahlengang fest, Objekt wird bewegt
- je Orientierung Strahl/Objekt wird ein Durchleuchtungsbild des gesamten Objektes gewonnen

anschließend:

Verarbeitung der gewonnenen Daten mittels PC

→ aus Intensitäten müssen  $\mu(x, y, z)$  berechnet werden

→ Darstellung in normierter Skala (Hounsfield-Skala, CT-Zahl, Bezogen auf Absorption der Strahlung in Wasser)

$$CT = \frac{m - m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Wasser}}} \times 1000 \text{HU}$$

## medizinisches CT:

- Patient fest, Röhre und Detektor rotieren um Patient
- Ursprünglich: Punktdetektor  
heute: Zeilendetektor ermöglicht schnelleren Scan und geringere Strahlenbelastung
- Patient muss axial an Röhre vorbeibewegt werden (üblich: Spiral-CT)



## typische CT-Zahlen:

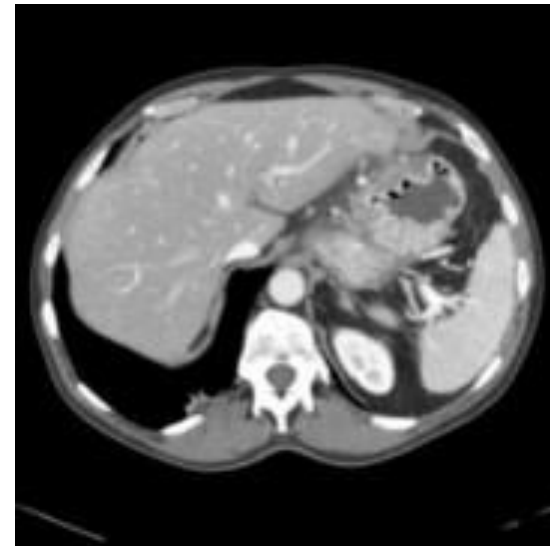
- Luft: -1000 HU
- Wasser: 0 HU
- Weichteile: ~50 HU
- Fettgewebe: ~- 65 HU
- Knochen: >130 HU
- Blut: ~ um 55 HU

$$CT = \frac{m - m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Wasser}}} \times 1000 \text{HU}$$

da  $\mu = \mu(x, y, z)$  vorliegt, können Schnitte entlang verschiedener Ebenen berechnet und dargestellt werden  
→ ausgefeilte Diagnostik möglich

**Kontrastmittel:** hervorheben schwach absorbierender Bereiche, Untersuchung des Stoffwechsels

CT-Zahlen werden zur Darstellung in Grauskala umgerechnet, Farbwerte analog zum Röntgenbild





### Röntgentomographie & OrthoPhantomogramm (OPG)

- Film- bzw. Digitalaufnahme, Filmkassette und Röhre bewegen sich in gleichem Abstand zu interessierender Ebene um das Objekt
- Aufnahme einer gekrümmten Fläche → Zahnmedizin

### digitale Volumentomographie (DVT)

- Computertomographie mit spezieller Röhren-/Detektorführung und 2D-Detektion
- Hauptanwendung derzeit in HNO & Zahnmedizin

### MRT, PET & Co.

- Kontrasterzeugung mit unterschiedlichen Methoden je nach (medizinischer) Fragestellung
- analoge Berechnungsvorgänge bleiben erforderlich



## Röntgentomographie & OrthoPhantomogramm (OPG)

- Film- bzw. Digitalaufnahme, Filmkassette und Röhre bewegen sich in gleichem Abstand zu interessierender Ebene um das Objekt

- Aufnahme

digitale Volu

- Computert

- Hauptanw

MRT, PET &

- Kontraster

- analoge Berechnungsvorgänge bleiben erforderlich



on

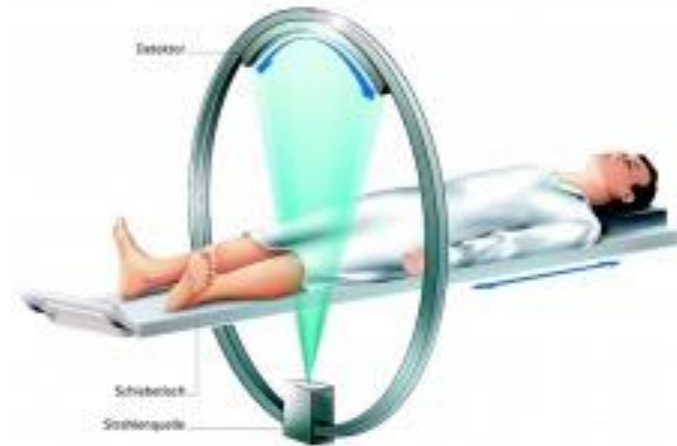
fragestellung





TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

# Computertomographie



LD Didactic GmbH Siemens Medical AG Sirona Dental GmbH