

31. Lektion

Röntgenstrahlen



Lernziel:

Röntgenstrahlen entstehen durch Beschleunigung von Elektronen oder durch die Ionisation von inneren Elektronenschalen

Begriffe:

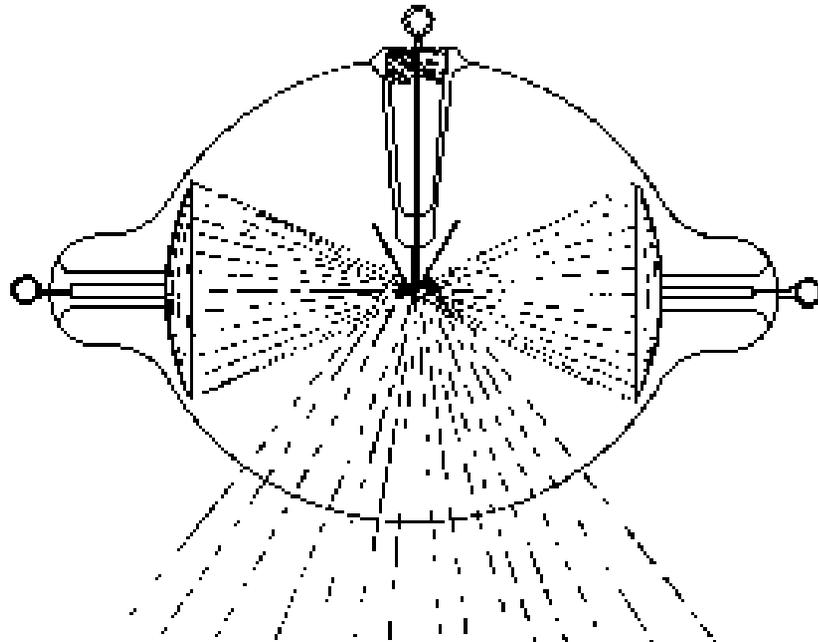
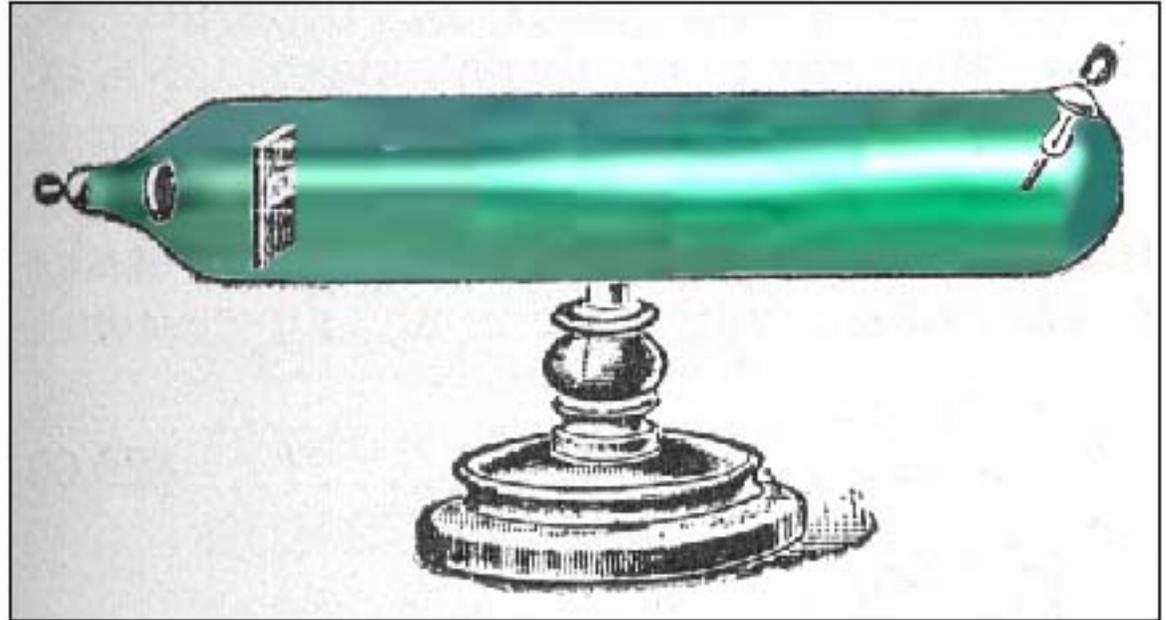
- Anregung von Röntgenstrahlen
- Maximale Röntgenenergie und –
Wellenlänge
- Röntgenfluoreszenz
- Anwendungen von Röntgenstrahlen

Entdeckung der Röntgen- strahlen

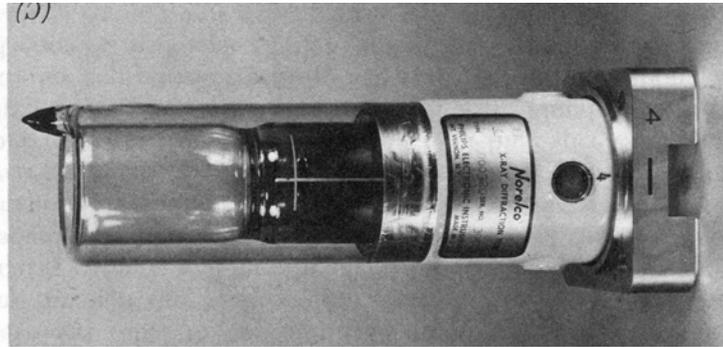


Conrad W. Röntgen
1845-1923

Historische Röntgenröhren



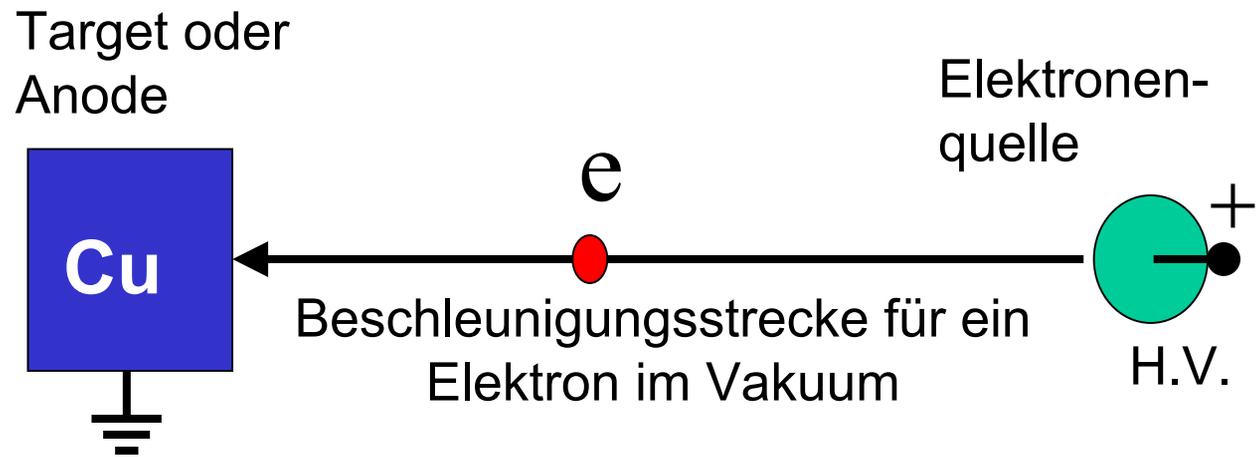
Moderne evakuierte Röntgenröhre



Drehanoden- röhre



Erzeugung von Röntgen- strahlung

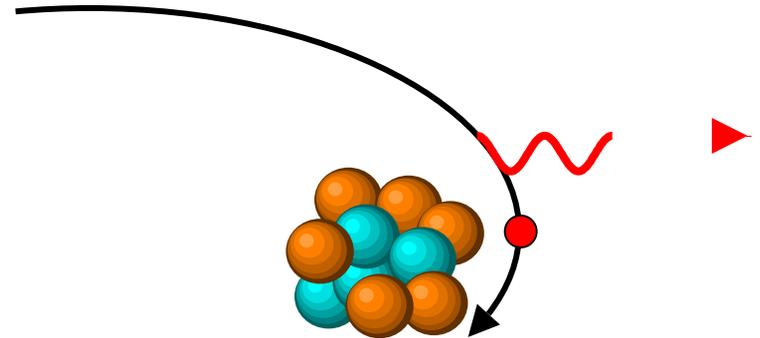


Wenn beschleunigte Elektronen auf ein Target treffen, werden sie abgebremst. Dabei entstehen zwei Arten von Röntgenstrahlen:

1. **Bremsstrahlung:** die Elektronen werden im Coulombfeld der Kerne abgelenkt und verlieren **kontinuierlich** Strahlungsenergie;
2. **Charakteristische Strahlung:** Elektronen regen durch Stoßionisation K-Elektronen auf inneren Schalen der Targetatome an. Dabei entsteht ein für das Target (Cu) charakteristisches Emissionsspektrum.

1. Kontinuierliches (Röntgen-) Brems- spektrum

Elektronen werden im Coulombpotential des Kerns abgelenkt und verlieren dabei Strahlungsenergie durch Emission von Photonen.

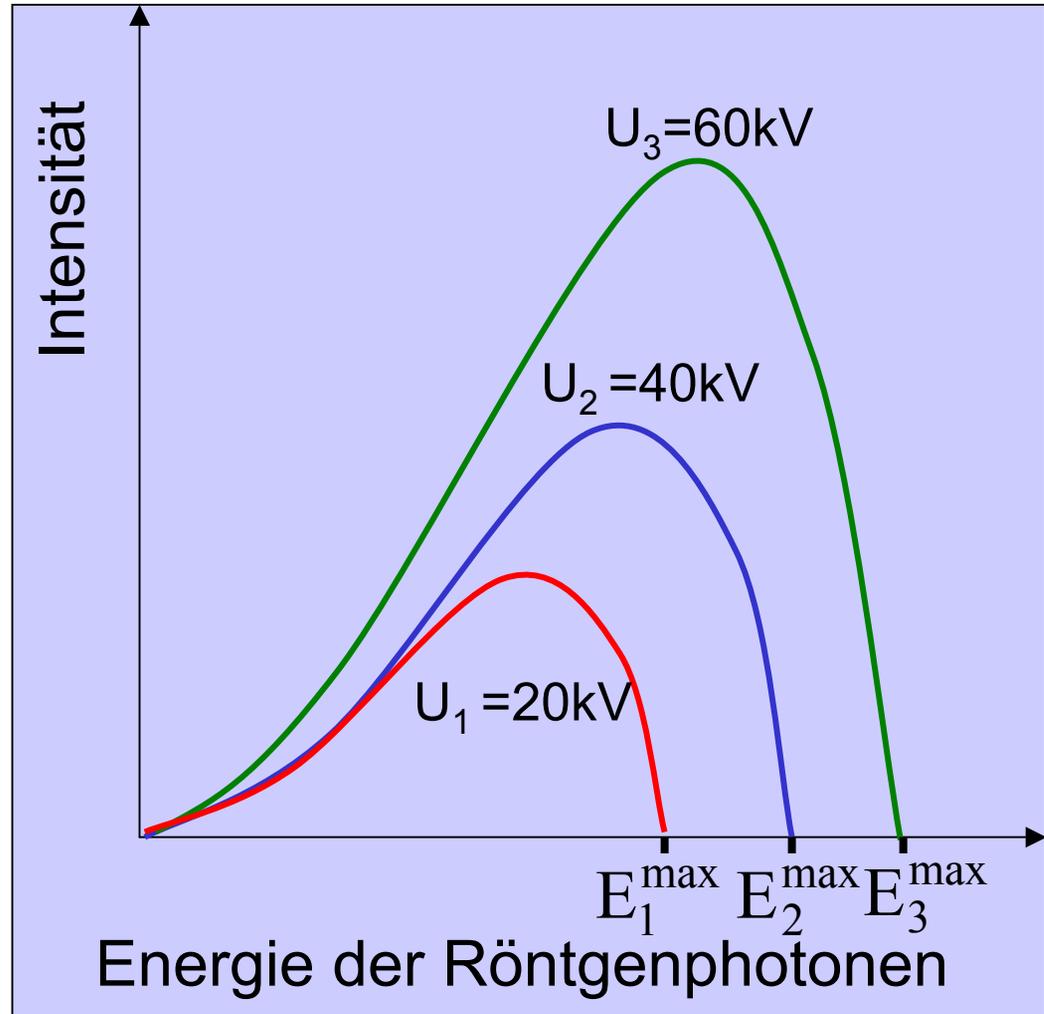


Die maximale Strahlungsenergie, die ein Elektron durch Emission von nur einem Photon abgeben kann, entspricht der Anregungsspannung:

$$E_{\max} = h\nu_{\max} = eU$$

Dies bedeutet, dass ein Elektron voll-ständig in Strahlungsenergie (EM-Welle) umgewandelt wird

Brems- spektrum für verschiedene Anregungs- spannungen



Mit Hilfe der Anregungsspannung wird die Intensität und die Härte der Röntgenstrahlung kontrolliert.

Quiz:



Eine Röntgenröhre werde mit einer Anregungsspannung von 40kV betrieben.

Wie groß ist die maximale Energie der Röntgen-Photonen, die bei der Abbremsung der Elektronen erzeugt werden:

- A 10 keV
- B 20 keV
- C 40 keV
- D 80 keV

Antwort C ist richtig!

Grenzwellenlänge oder minimale Wellenlänge des Bremspektrums

Die Maximal- oder Grenzenergie hängt von der Anregungsspannung ab:

$$E_i^{\max} = eU_i$$

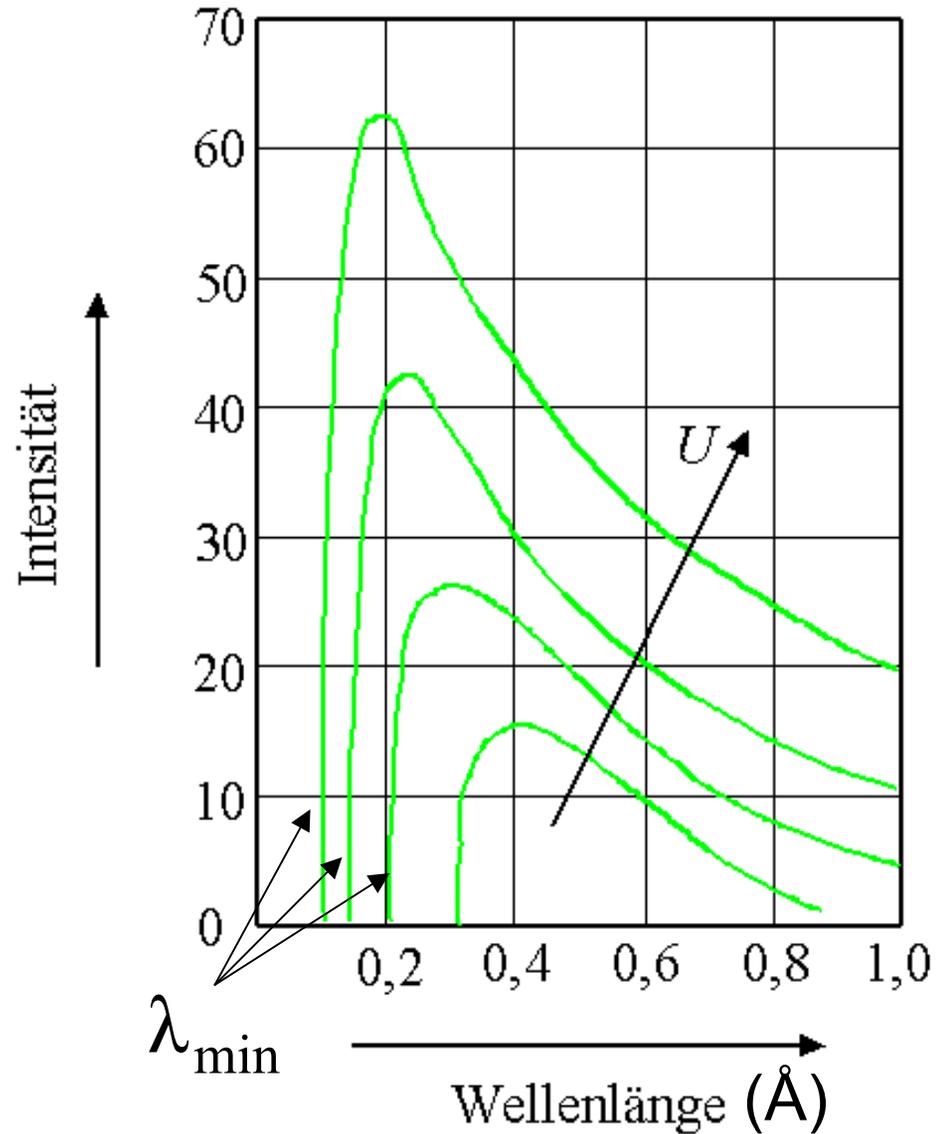
Der Anregungsspannung kann eine minimale Wellenlänge zugeordnet werden:

$$\lambda_{\min} (\text{nm}) = \frac{1240 \text{ eV}}{E_{\max}}$$

Beispiel:

Mit einer Anregungsspannung von 50 keV wird eine minimale Wellenlänge von 0.062 nm erzeugt.

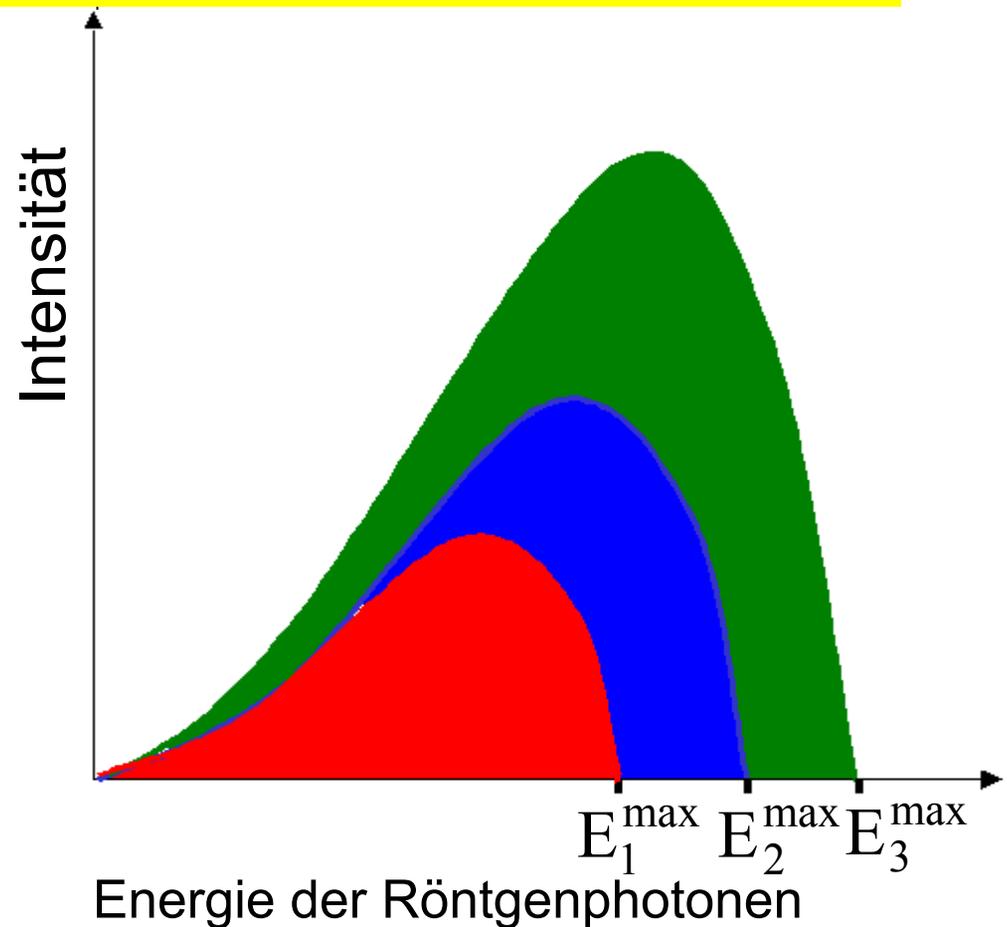
Grenzwellenlängen bei verschiedenen Anregungsspannungen



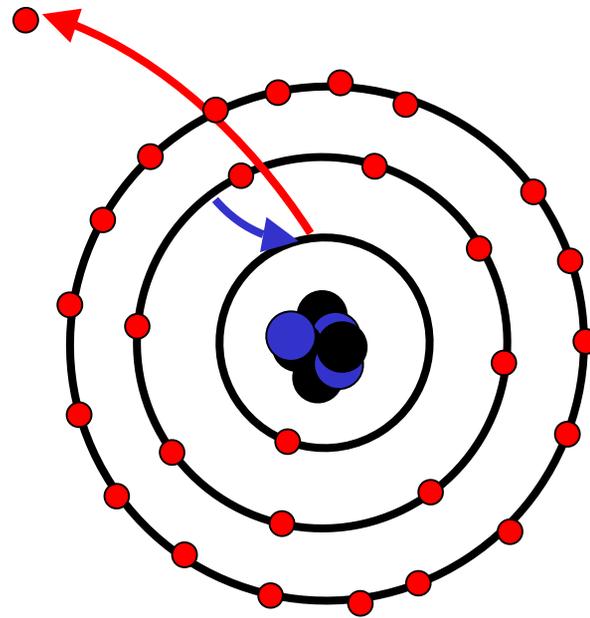
Gesamtintensität der emittierten Bremsstrahlung

Gesamtintensität der emittierten Bremsstrahlung ist proportional zum Anodenstrom und zum Quadrat der Anregungsspannung:

$$\text{Intensität} \propto I_{\text{Anode}} \times U_{\text{Anregung}}^2$$



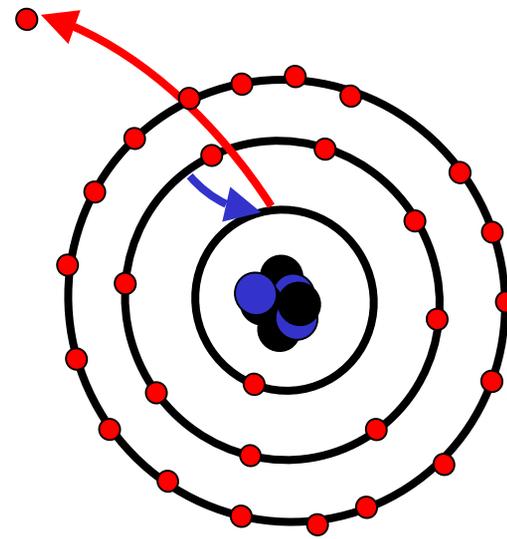
Entstehung von charakteristischer Röntgenstrahlung



Entfernen eines Elektrons aus der innersten Schale erzeugt ein Loch, welches sofort durch ein Elektron aus einer höheren Schale aufgefüllt wird.

Bei der Entfernung des K-Elektrons entsteht eine charakteristische Röntgenstrahlung die der Energiedifferenz der Elektronen in der K und der L – Schale entspricht.

Bohr'sches Modell zur Beschreibung der charakteristischen Röntgen- strahlung

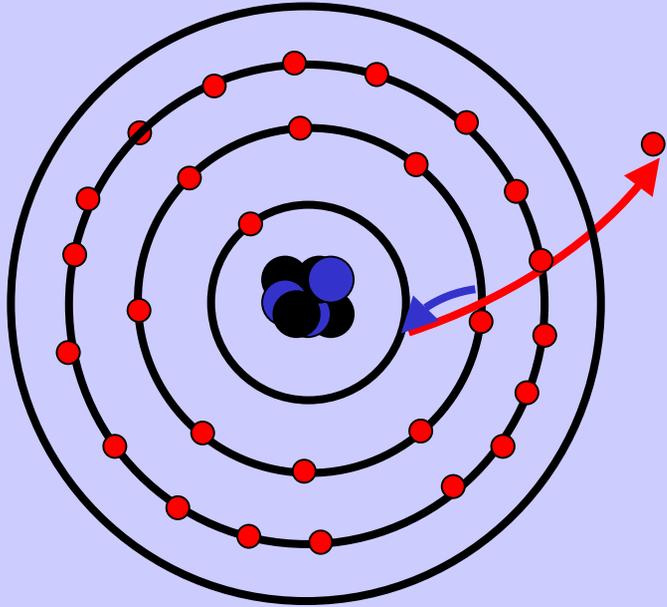


Die Energie der Emissionslinie kann analog zum Wasserstoffatom berechnet werden. Man muss allerdings berücksichtigen, dass nach Stossanregung dem Atom ein Elektron fehlt und die verbleibende Zahl der Elektronen nicht Z sondern $Z-1$ ist:

$$\nu = R_H (Z - 1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = R_H (Z - 1)^2 \frac{3}{4}$$

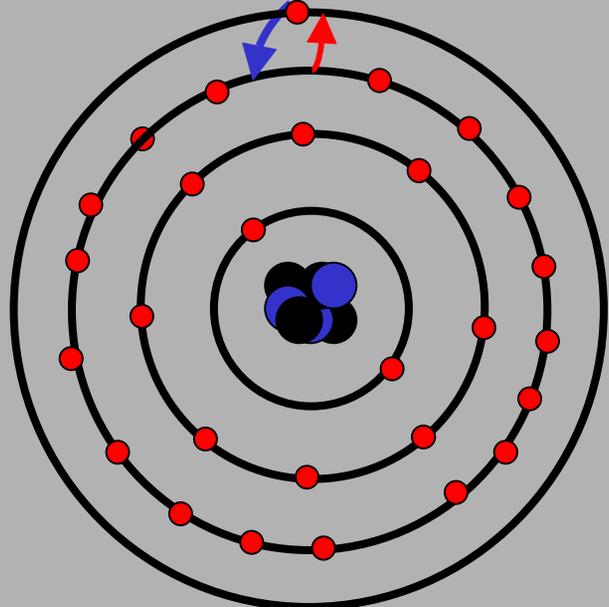
Vergleich: Röntgen- und optische Strahlungsprozesse

Röntgenprozess:
Anregung von Elektronen auf
inneren Schalen



$$E_{\text{röntgen}} = \sim 1-20 \text{ keV}$$

Optische Prozesse:
Anregung von Elektronen
auf äußeren Schalen



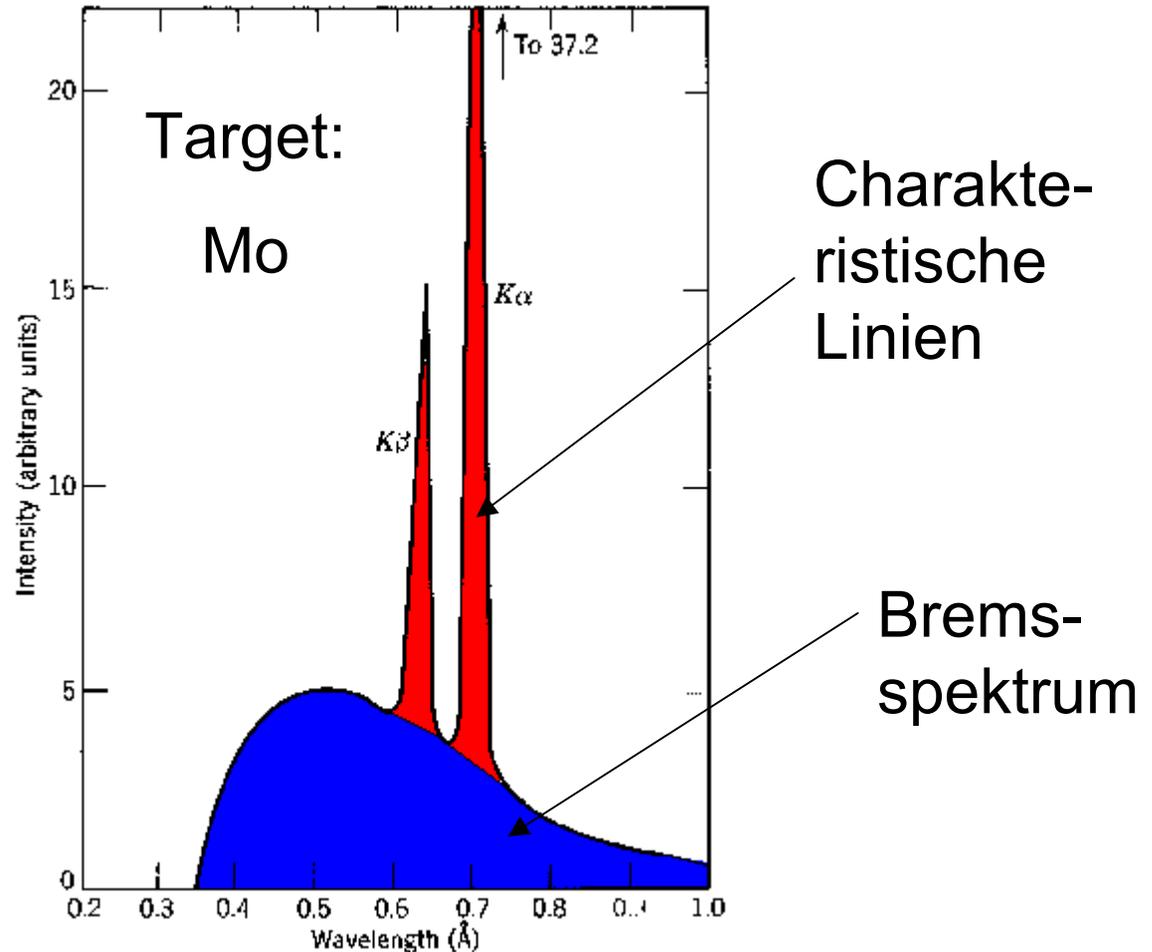
$$E_{\text{optische}} = \sim 1-20 \text{ eV}$$



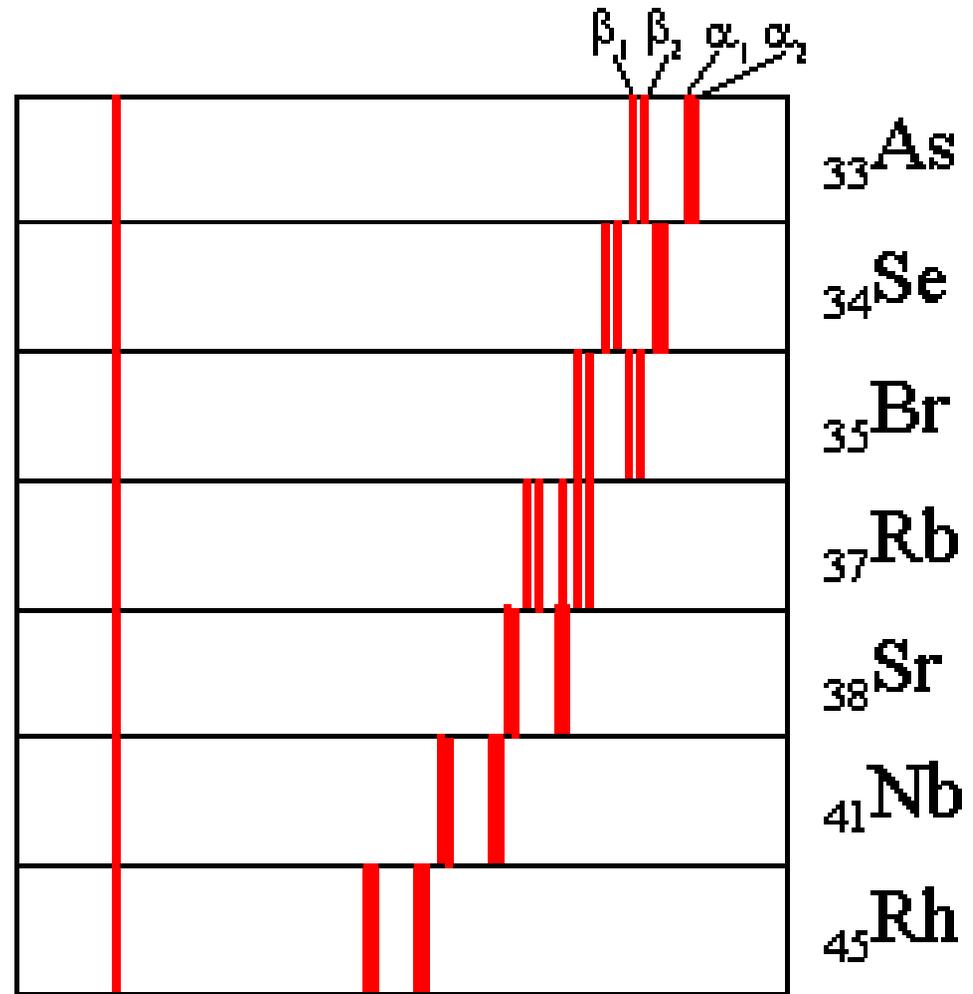
Röntgenstrahlen von schweren Atomen
haben eine wesentlich höhere Energie

Kontinuierliche und charakteristische Spektren

Dem kontinuierlichen Bremspektrum überlagert sich ein Linienspektrum, welches charakteristisch für das verwendete Targetmaterial ist:

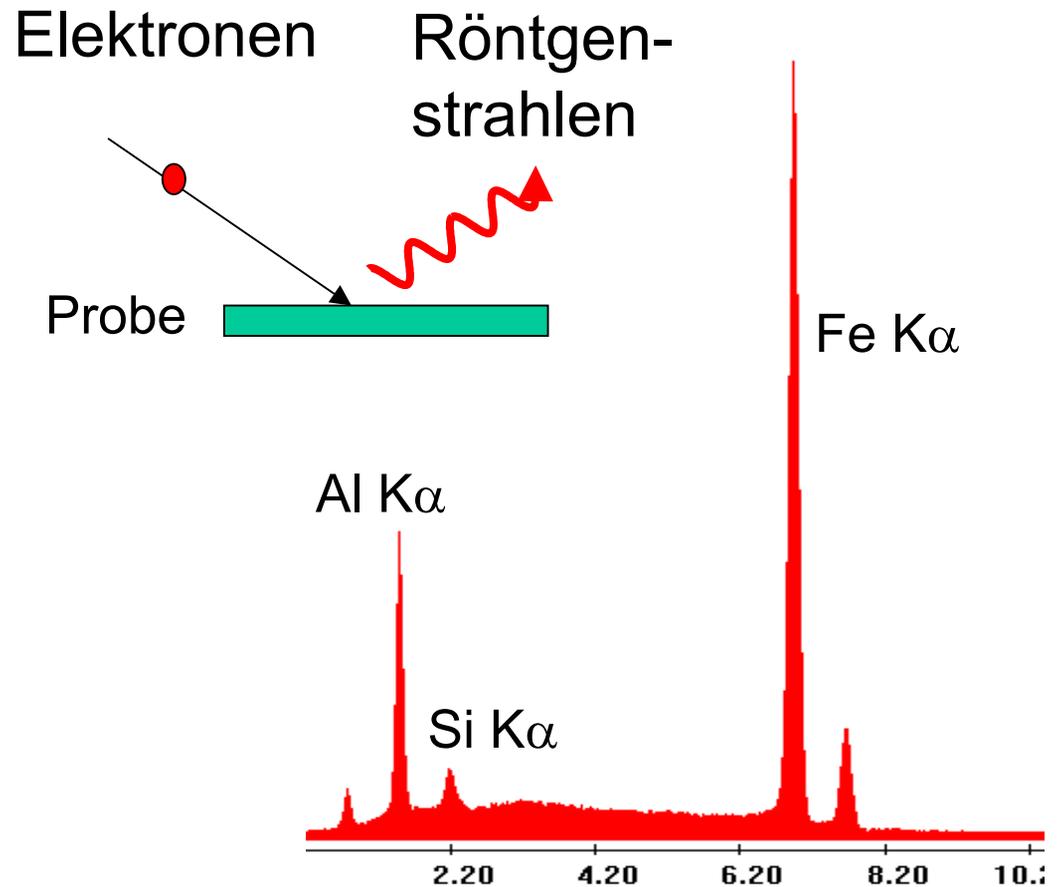


Diskrete
Röntgen-
spektren durch
Anregung
verschiedener
Atome



Wellenlänge \longrightarrow
Frequenz \longleftarrow

Röntgen- fluoreszenz- analyse



Charakteristisches Röntgen-Spektrum stellt einen *Fingerabdruck* des untersuchten Materials dar. Damit ist eine schnelle, trockene, chemische Analyse von Proben möglich. Diese Methode wird die in der forensischen Medizin häufig eingesetzt wird.

Quiz:



Die charakteristische K-alpha Strahlung eines Targetmaterials kann angeregt werden, wenn

- A die Targetspannung auf 10 keV eingestellt wird
- B die Targetspannung größer ist als die Ionisationsenergie der Leuchtelektronen
- C die Targetspannung größer ist als die Ionisationsenergie der K-Elektronen
- D der Anodenstrom möglichst groß gewählt wird.

Antwort C ist richtig!

Quiz:

Durch welche Prozesse werden Röntgenstrahlen nicht erzeugt:

- A Anregung der äußeren Elektronen in einem Atom
- B Anregung der K-Elektronen in einem Atom
- C Abbremsung von Elektronen im Kernpotential des Targetmaterials
- D Beschleunigung von Elektronen auf einer Kreisbahn
- E Beschießen eines Targets mit Protonen

1. B+C

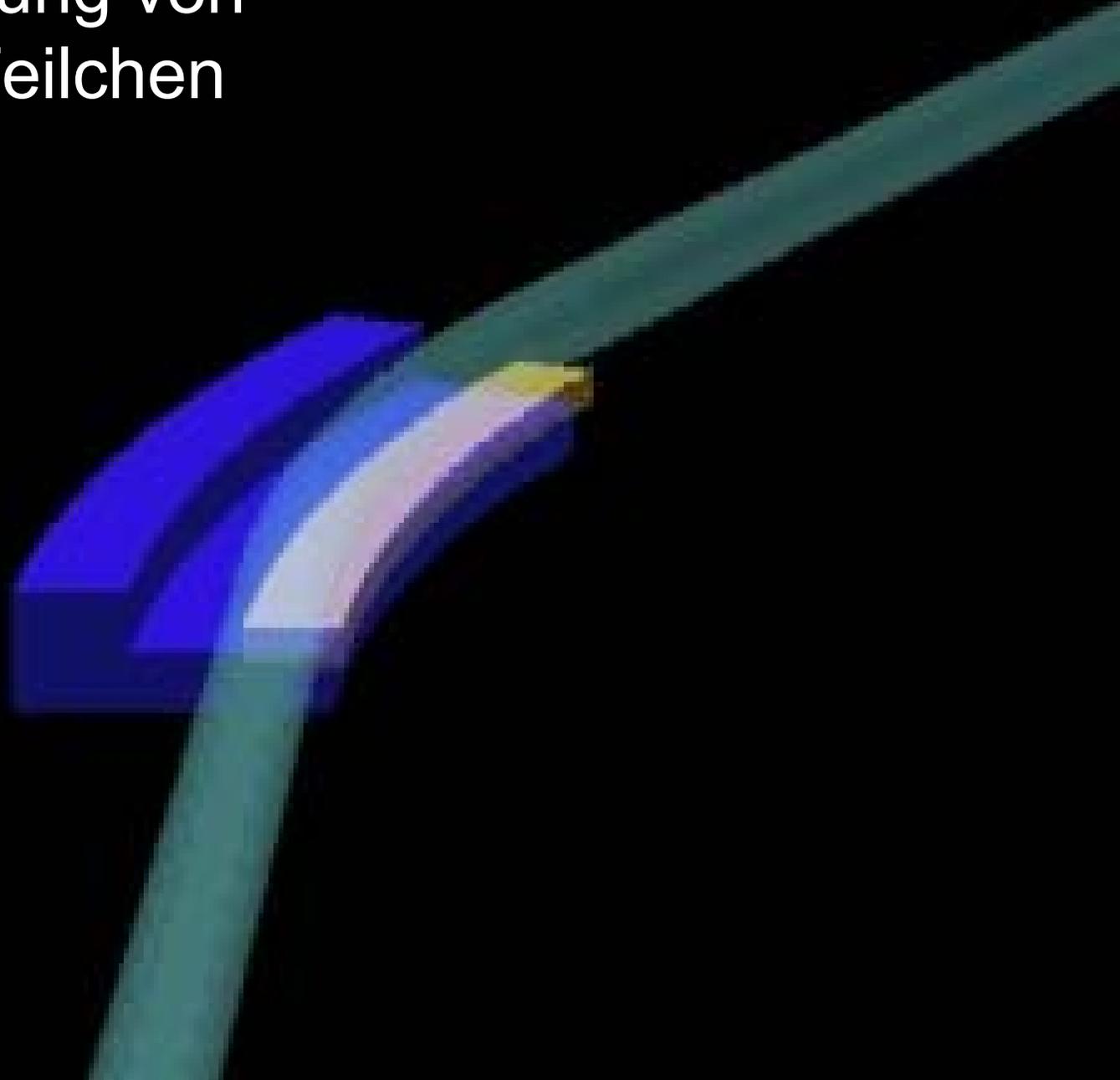
2. D + E

3. A

4. E

Antwort 3 ist richtig!

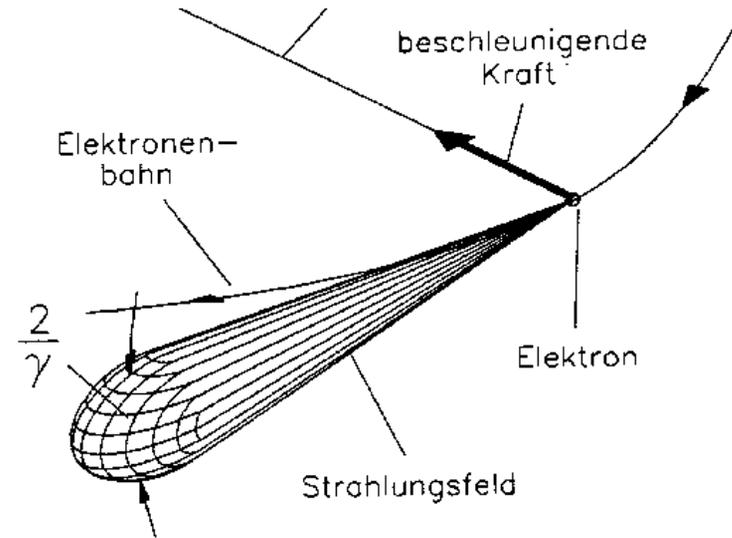
Beschleunigung von geladenen Teilchen



European
Synchrotron
Radiation
Facility
(ESRF),
Grenoble,
Frankreich

Start of
operation in
1994

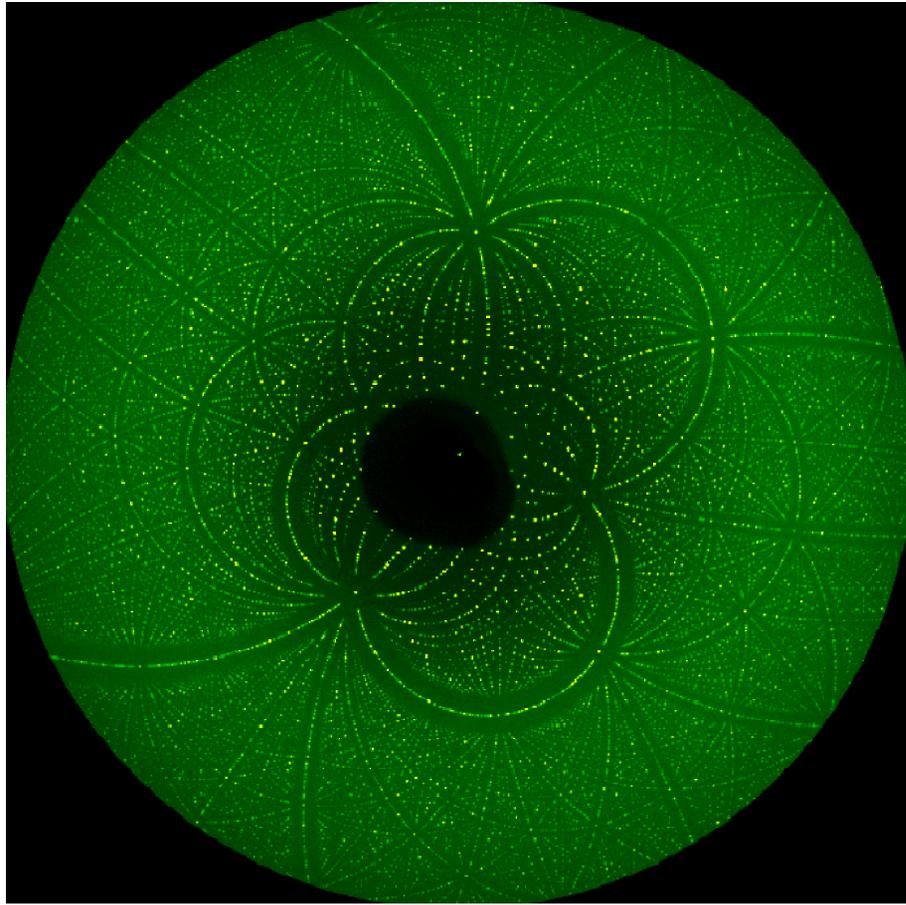
Elektronensynchrotron



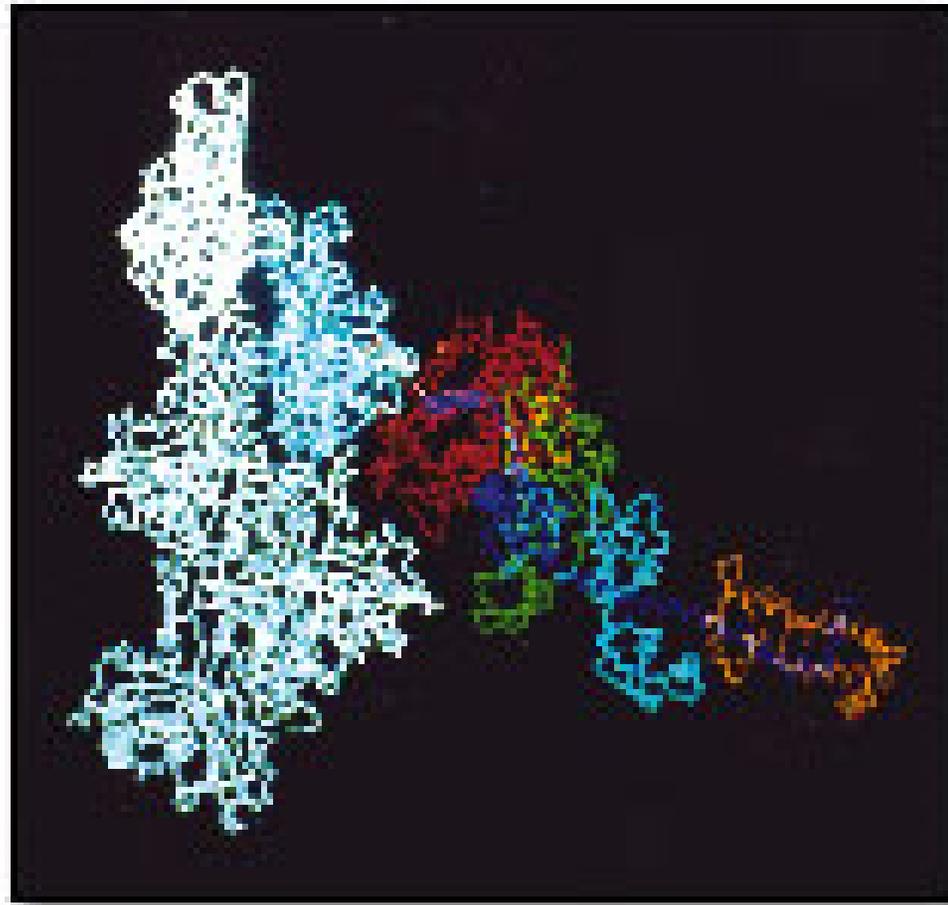
Verwendung von Röntgenstrahlen

a. Strukturanalyse

Interferenzbild



Realstruktur: Myoglobin



Structural model of myoglobin at 0.85 Å resolution (Popov, Kachalova, Bartunik). The atomic resolution shows features corresponding to the scattering power of a single electron. The XFEL permits 100 fs time resolved studies of rapid conformational transitions at atomic resolution.

Verwendung von Röntgenstrahlen

b. Durchstrahlung und Schattenbildung

Historische Aufnahme der Hand von Frau Röntgen

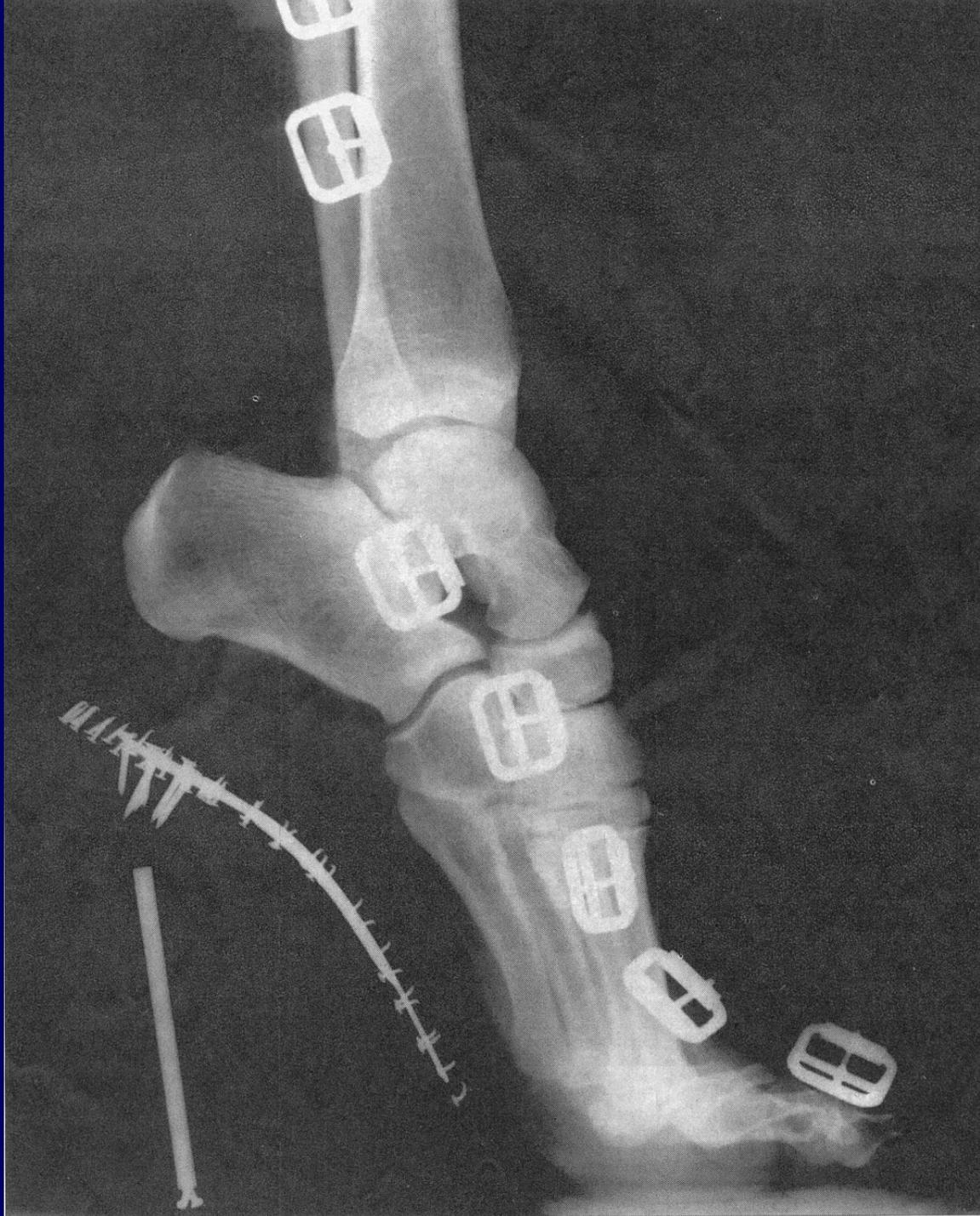


Implantate und Schienen

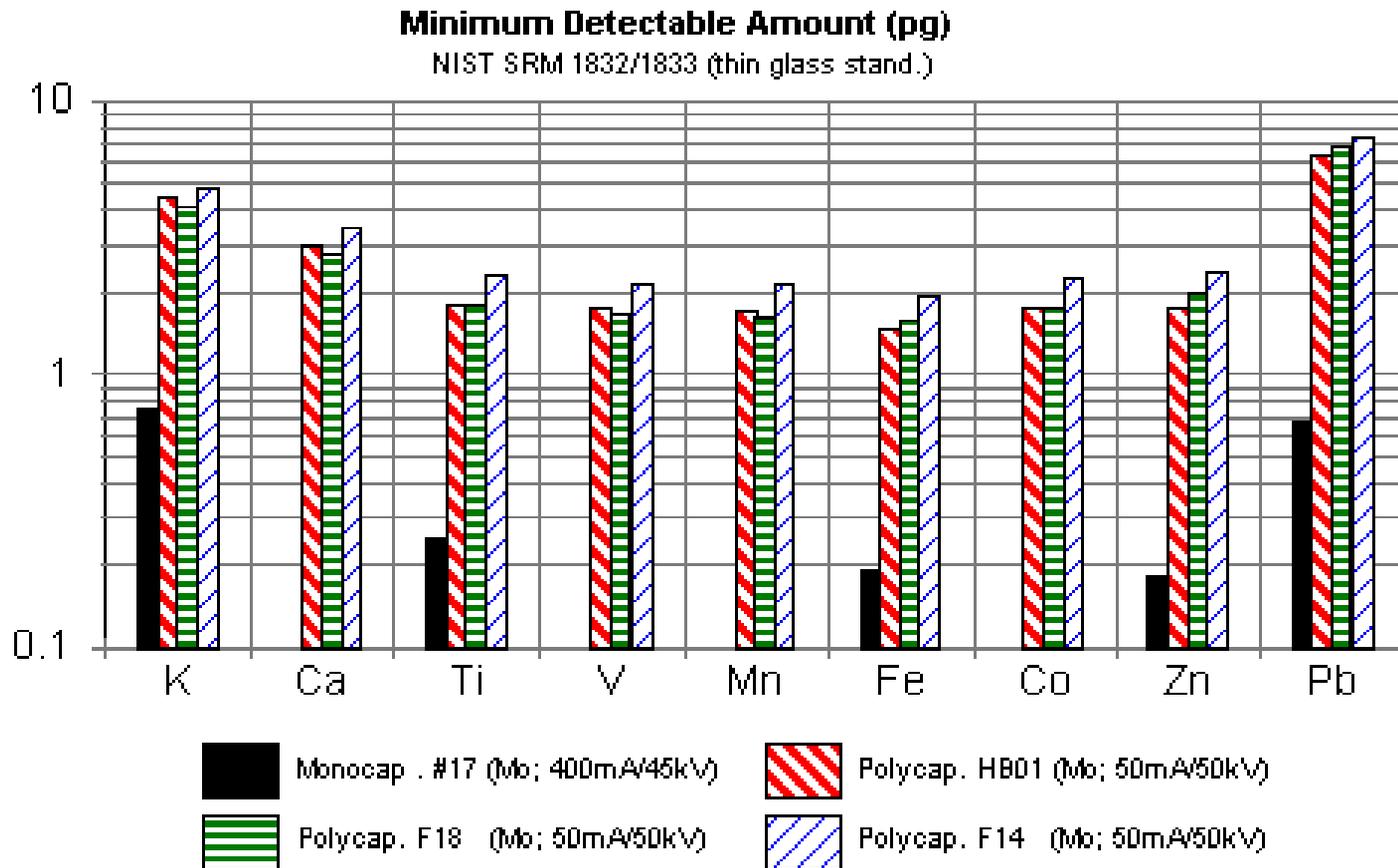
Knochenbruch



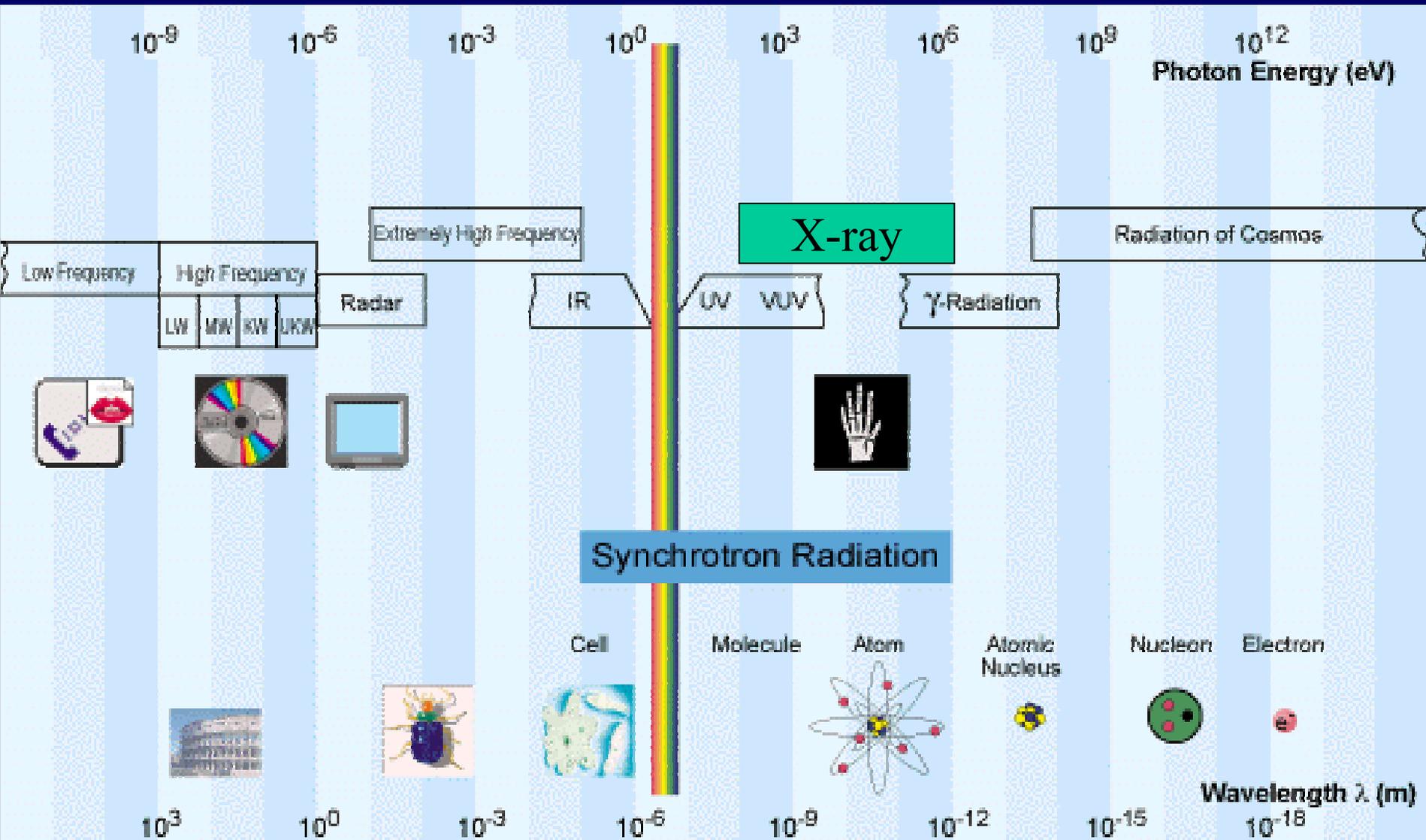
Mit Röntgenstrahlen können nicht nur Knochen sondern auch auch Fremdkörper und insbesondere Metallteile abgebildet werden.



Verwendung von Röntgenstrahlen: c. chemische Analyse



Energie- und Wellenlängenbereich der Röntgenstrahlen



Zusammenfassung:

- Charakteristische Röntgenstrahlen entstehen durch Anregung von Elektronen aus inneren Schalen
- Kontinuierliche Röntgenstrahlen entstehen durch Abbremsen von Elektronen im Coulombpotential von Kernen
- Härte der Röntgenstrahlung wird über die Anodenspannung kontrolliert