

# Bildgebende Verfahren in der Medizin

Röntgen-Systeme und Abbildungen mit ionisierender Strahlung

**Olaf Dössel**

INSTITUTE OF BIOMEDICAL ENGINEERING



© 2008 Google - Imagery © 2008 Digital Globe, GeoContent, AeroVista, Stadt Karlsruhe VLV, ChesSpot, Image, GeoEye

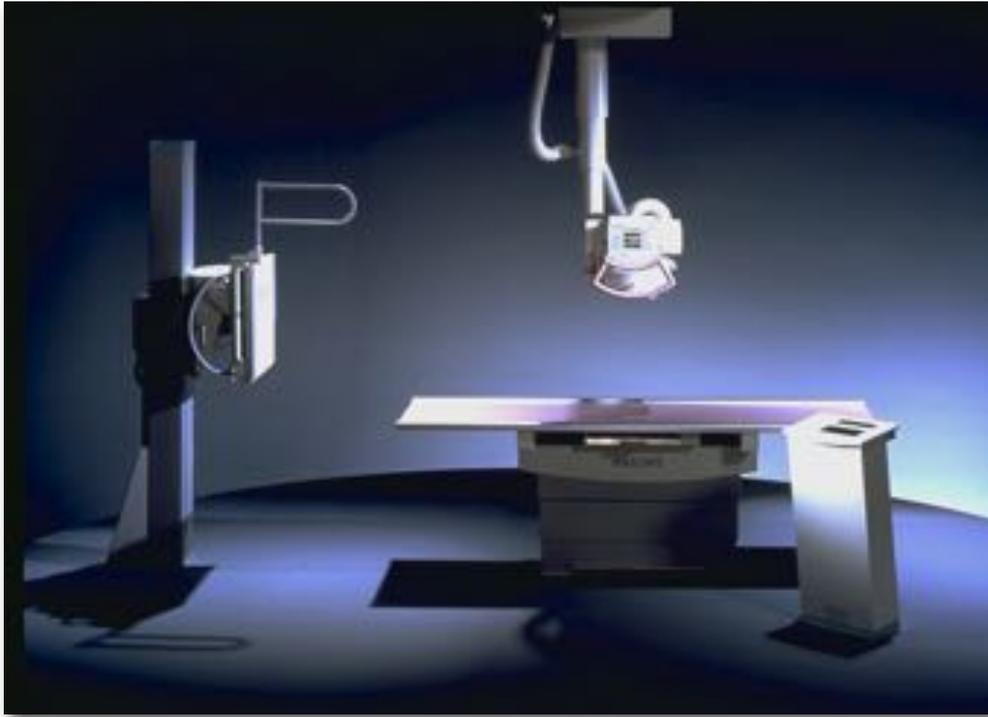
KIT – University of the State of Baden-Württemberg and  
National Research Center of the Helmholtz Association

[www.ibt.kit.edu](http://www.ibt.kit.edu)

## Röntgentechnik - Projektions-Röntgen -

- Grundlagen zur Erzeugung von Röntgenstrahlen
- Grundlagen zur Schwächung von Röntgenstrahlen
- Technik zur Erzeugung von Röntgenstrahlen
- Techniken zur Bildaufnahme
- Röntgenbildverstärker
- Einführung in die Modulationsübertragungsfunktion MTF
- Rauschen und Detective Quantum Efficiency DQE
- Anwendungen der Projektions-Röntgentechnik

# Röntgen



1848 Rühmkorff und andere  
„Induktor“

1869 Hittorf, Lenard, Crook u.a.  
Vakuum-Entladungsröhre  
Kathodenstrahlen



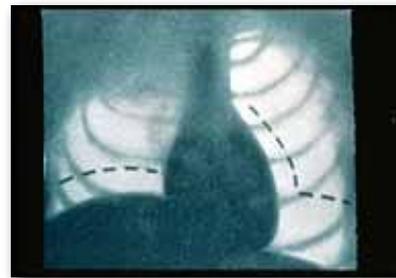
8. November 1895  
Wilhelm Conrad Röntgen  
Entdeckung der Röntgenstrahlen

28. Dezember 1895  
Wilhelm Conrad Röntgen  
„Über eine neue Art von Strahlen“  
vorläufige Mitteilung

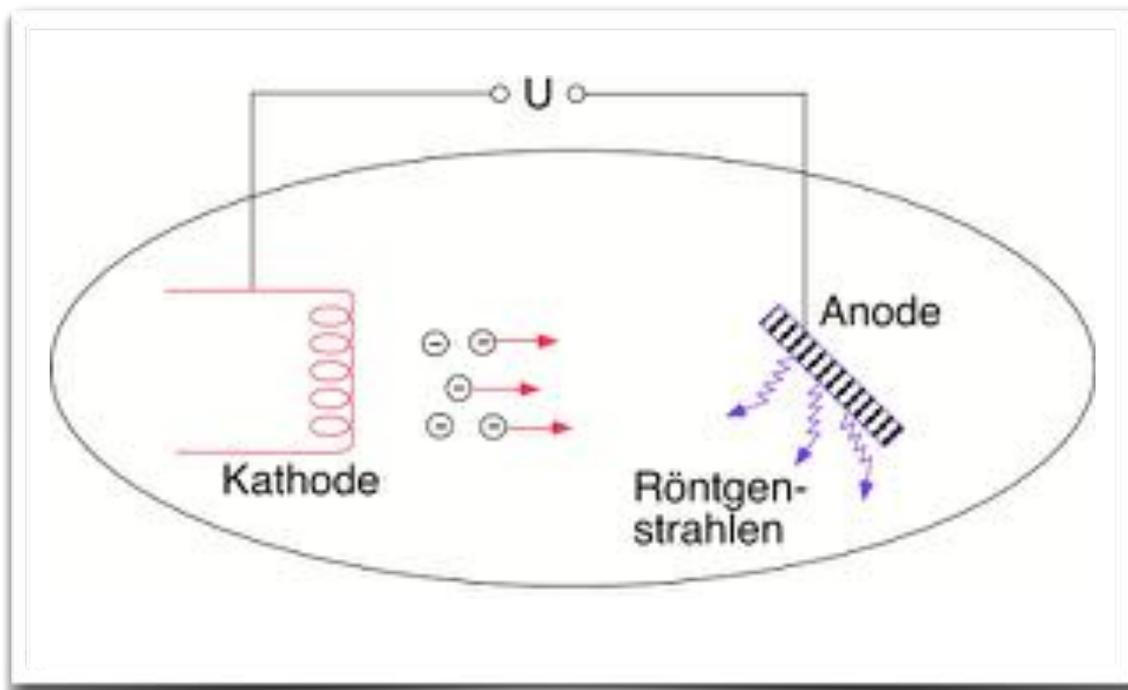


Januar 1896  
Aufnahmen von  
Händen, Unterarm, Fremdkörper, etc

Februar 1896  
M.I. Pupin  
Fluoreszenzschirm aus  
Kalzium-Wolframat



## Erzeugung von Röntgenstrahlen (schematisch)



$$E_{\text{Photo}} = h \cdot f \quad E_{\text{Kin}} = e \cdot U_A \quad c = \lambda \cdot f$$

$$\Rightarrow f_{\text{max}} = \frac{e \cdot U_A}{h} \quad \Rightarrow \lambda_{\text{min}} = \frac{c \cdot h}{e \cdot U_A}$$

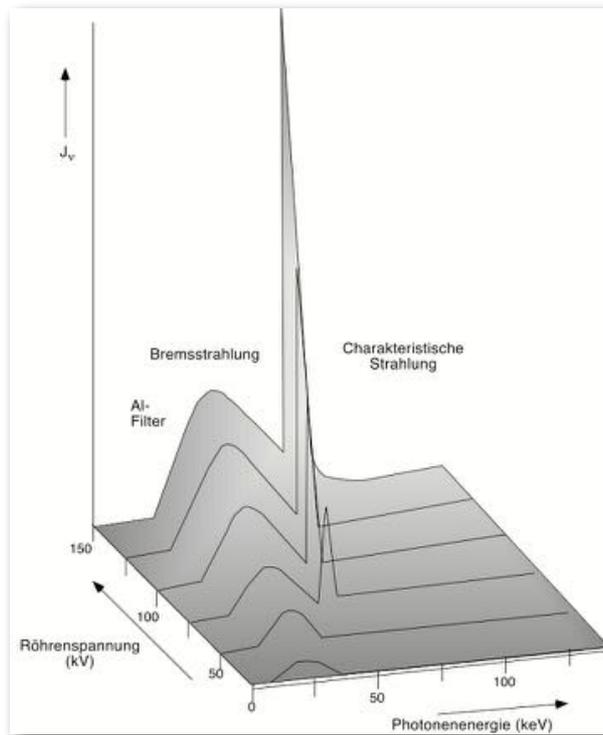
$h$  = Plancksches Wirkungsquantum,  
 $e$  = Elektronenladung,  
 $U_A$  = Anodenspannung,  
 $f$  = Frequenz der elektromagnetischen Welle,  
 $\lambda$  = Wellenlänge der elektromagnetischen Welle

... die maximale Frequenz steigt mit der Anodenspannung. Dabei wird die kleinste vorkommende Wellenlänge immer kleiner.

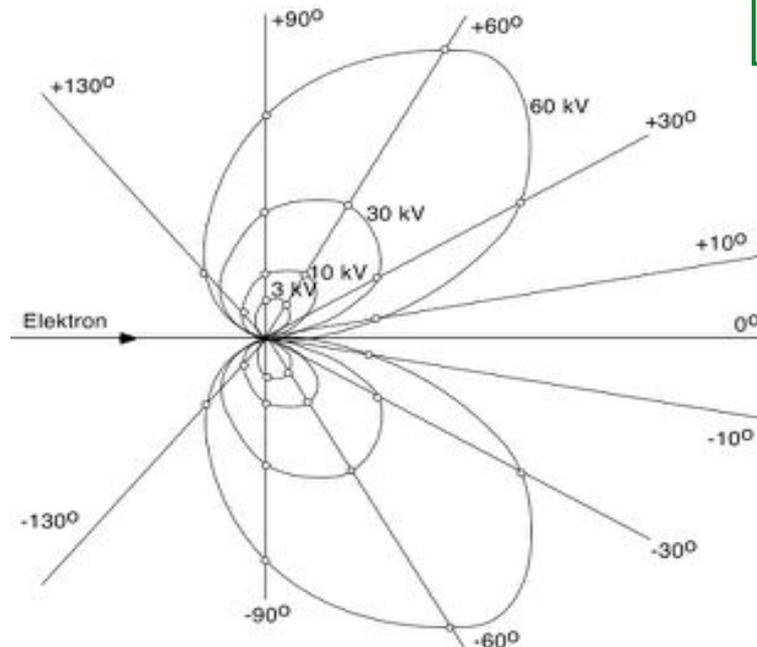
## Typische Werte für die Anodenspannung und die zugehörige kleinste Wellenlänge

| $U_A$ [kV] | $\lambda_{\text{min}}$ [nm] | Einsatzbereich                 |
|------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1          | 1,242                       | „weich“, Röntgendiffraktometer |
| 10         | 0,124                       | „mittel“                       |
| 100        | 0,012                       | „hart“, Röntgendiagnostik      |

# Spektrum einer Diagnostik-Röntgenröhre in Abhängigkeit von der Röhrenspannung

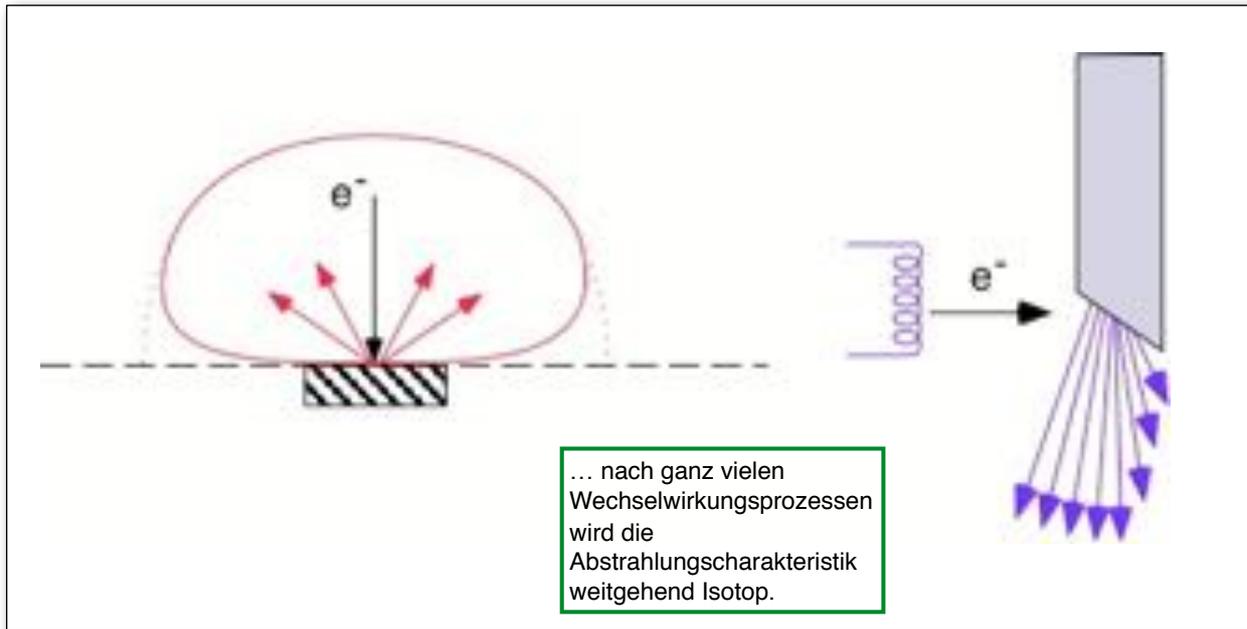


# Die räumliche Intensitätsverteilung der Bremsstrahlung eines abgebremsten Elektrons



... wie ein Hertzscher Dipol mit relativistischen Effekten

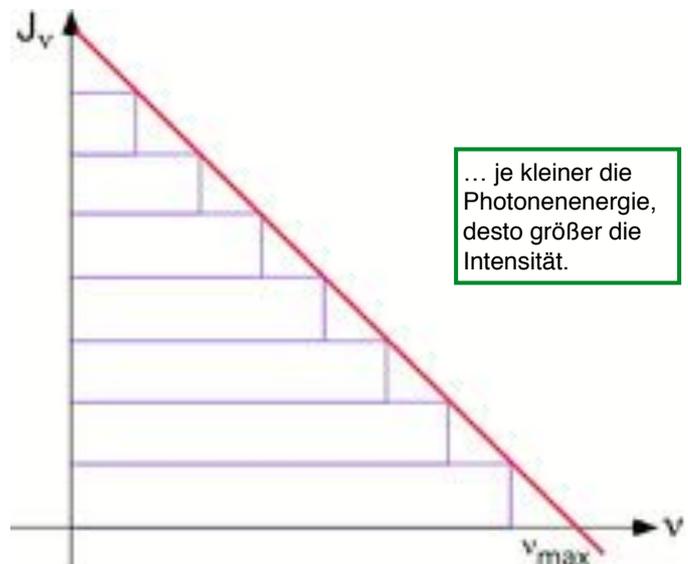
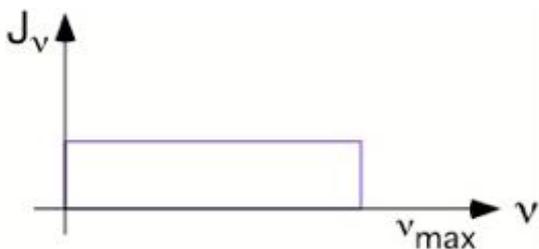
# Winkelverteilung der Röntgenstrahlung



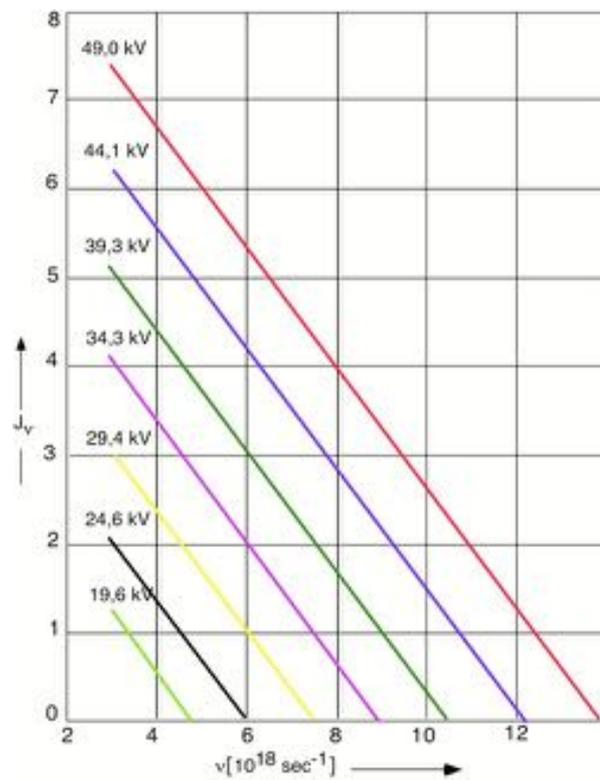
# Bremsstrahlungsspektrum

ein Wechselwirkungsprozess  
statistisch verteilt

viele Wechselwirkungsprozesse  
in Folge



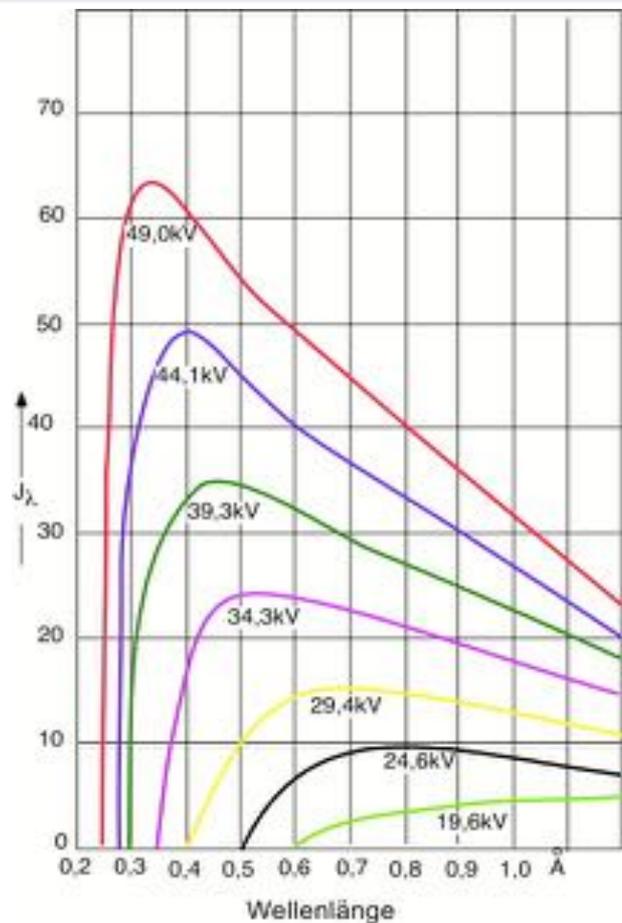
# Die spektrale Intensitätsverteilung der Bremsstrahlung $J_\nu$



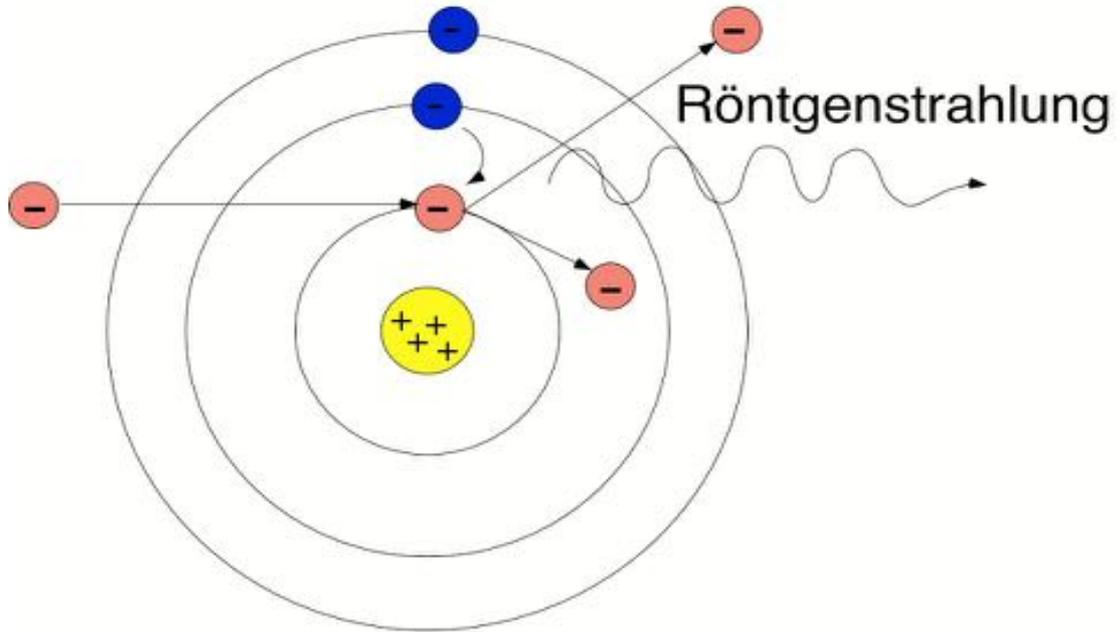
# Die spektrale Intensitätsverteilung der Bremsstrahlung $J_\lambda$

$$f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow df = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$$

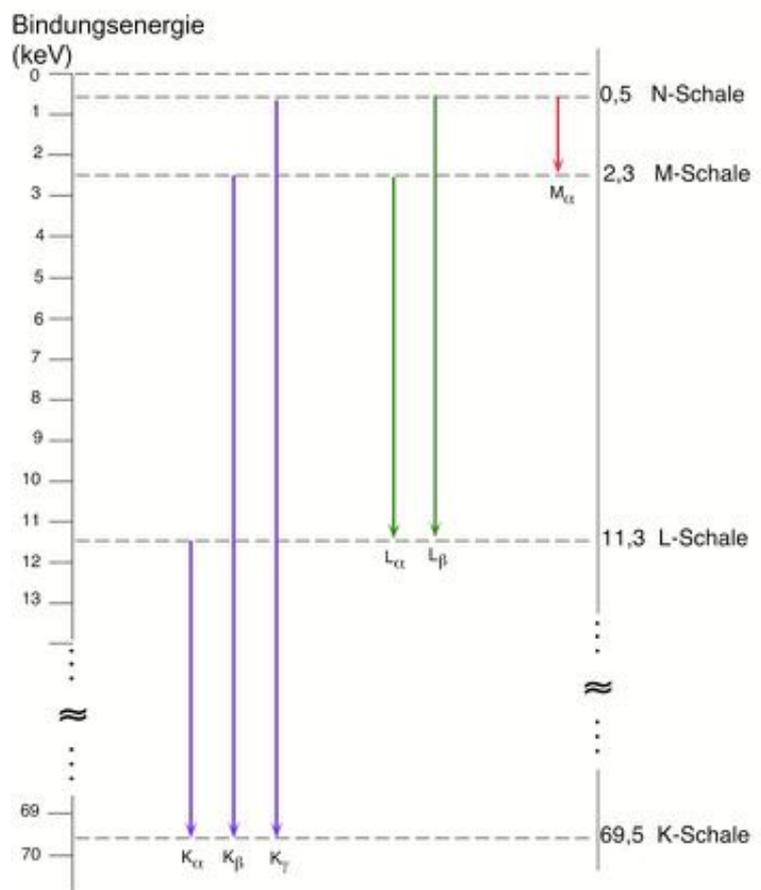
... bei der Übersetzung von Frequenz in Wellenlänge wird das Spektrum „umgedreht“ und „verbogen“.



# Charakteristische Strahlung



# Energie-niveauschema des Elements Wolfram



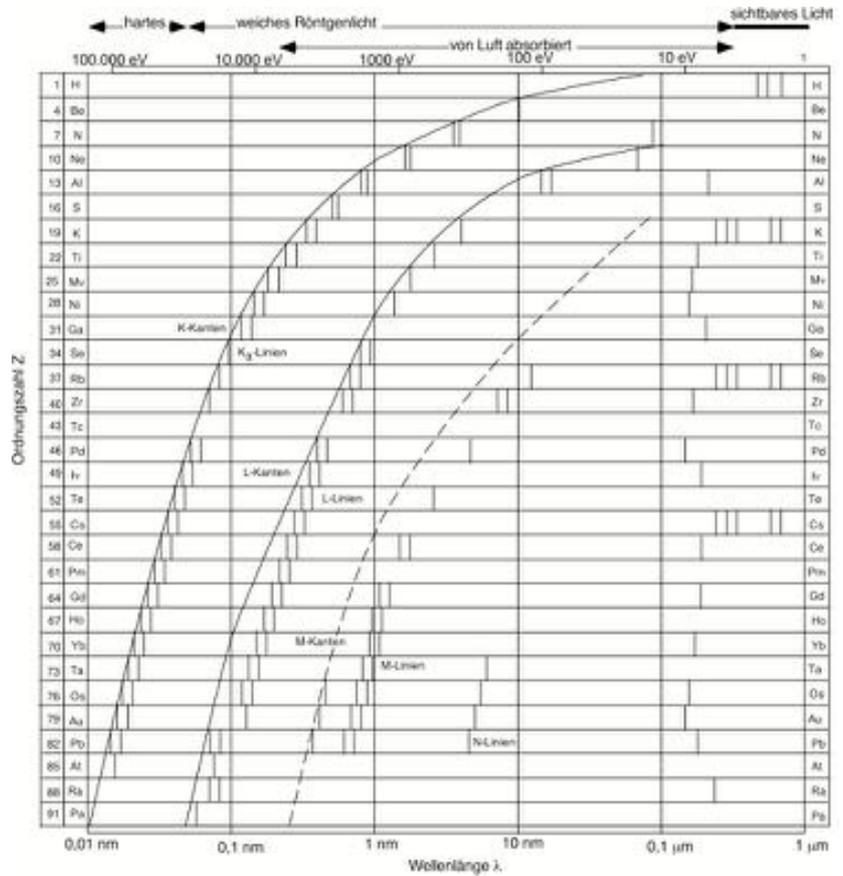
... beachte: die drei K-Linien liegen sehr dicht beieinander.

# Übersicht über die Lage der K-, L-, und M-Linien und Absorptionskanten

$$f_{K\alpha} = \frac{3}{4} \cdot R_{\infty} (Z-1)^2$$

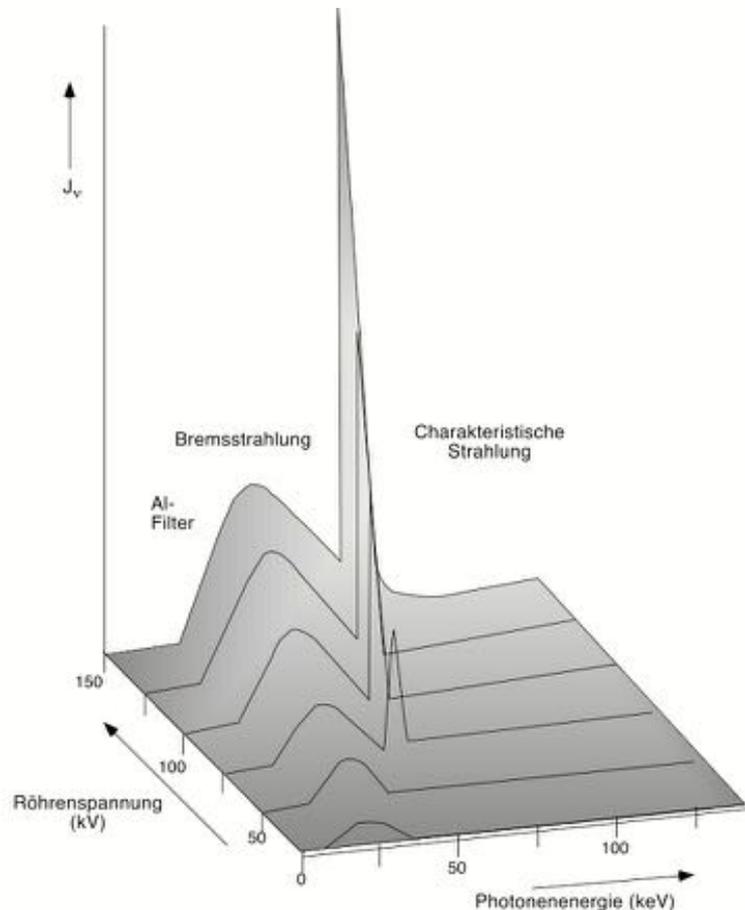
$R_{\infty}$  = Rydbergkonstante  
( $1,097 \cdot 10^7 \text{m}^{-1}$ ),  
 $Z$  = Ordnungszahl.

... die Frequenz der K-Linien steigt quadratisch mit der Ordnungszahl



# Spektrum einer Diagnostik-Röntgenröhre in Abhängigkeit von der Röhrenspannung

... diagnostische Röntgenröhren haben alle einen Filter, der die niedrigen Photonenenergien ausblendet.



## Der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{J_{\text{ges}}}{I_A \cdot U_A}$$

$J_{\text{ges}}$  = gesamte abgestrahlte Röntgenleistung

$I_A$  = Anodenstrom

$U_A$  = Anodenspannung

## Wirkungsgrad als Funktion von Ordnungszahl und Anodenspannung

$$\eta = k \cdot U_A \cdot Z$$

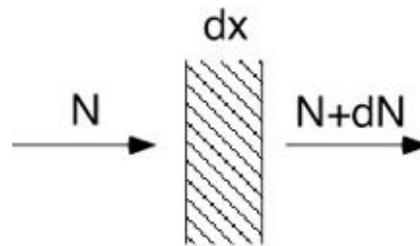
→  $k \approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1}$

→ für Wolfram ( $Z = 74$ ) folgt für  $U_A = 100 \text{ kV}$   
 $\eta = 0,7\%$

→ für die abgestrahlte Röntgenleistung folgt allgemein  
 $J_{\text{ges}} = \eta \cdot I_A \cdot U_A = k \cdot I_A \cdot U_A^2 \cdot Z$

... der Wirkungsgrad ist sehr sehr klein. Die meiste eingesteckte Energie wird zu Wärme.

# Allgemeines Schwächungsgesetz



$$dN = \mu \cdot N \cdot dx$$

- $N$  = Zahl der auftreffenden Quanten  
 $dN$  = Zahl der wechselwirkenden Quanten pro Sekunde  
 $\mu$  = Schwächungskoeffizient (Einheit:  $m^{-1}$ )

für Materialien mit homogenem Schwächungskoeffizienten gilt:

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

... die Zahl der herauskommenden Photonen fällt exponentiell mit der Dicke der Probe.

$N_0$  = Zahl der auftreffenden Quanten pro Sekunde,  
 $d$  = Dicke des Materials.

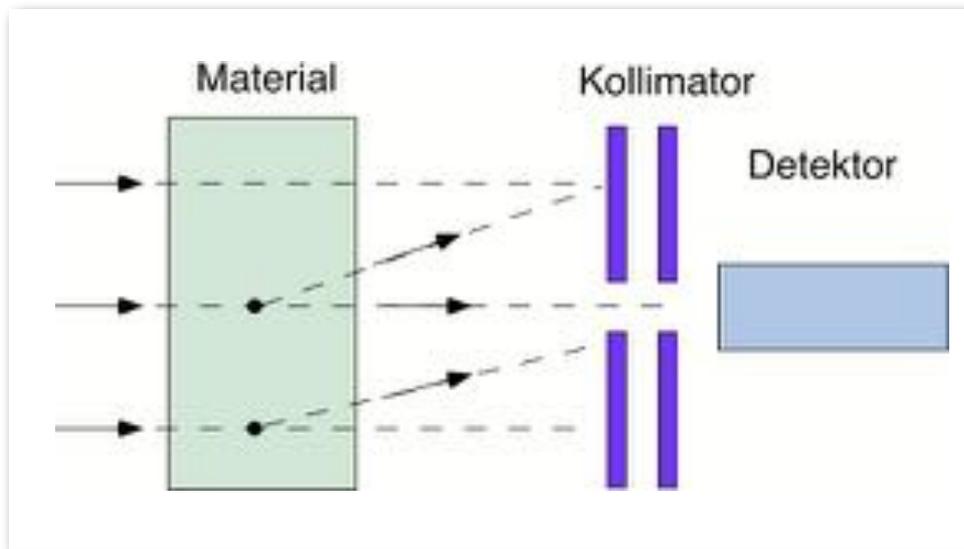
Halbwertsdicke:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu \cdot d_{1/2}} \Rightarrow d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$$\text{Massenschwächungskoeffizient} = \frac{\mu}{\rho}$$

$\rho$  = Dichte des Materials.

## Messanordnung für die Messung des Schwächungskoeffizienten



...gestreute Röntgenquanten sollen hier nicht den Detektor erreichen.

## Wechselwirkung von Röntgenstrahlen mit Materie

$$dN = \mu \cdot N \cdot dx$$

$$dN = dN_{\tau} + dN_{\sigma R} + dN_{\sigma C} + dN_{\chi} + dN_K$$

$$\mu = \mu_{\tau} + \mu_{\sigma R} + \mu_{\sigma C} + \mu_{\chi} + \mu_K$$

$\mu_{\tau}$  = Schwächungskoeffizient für Photoabsorption,

$\mu_{\sigma R}$  = Schwächungskoeffizient für klassische Streuung (Rayleigh-Streuung)

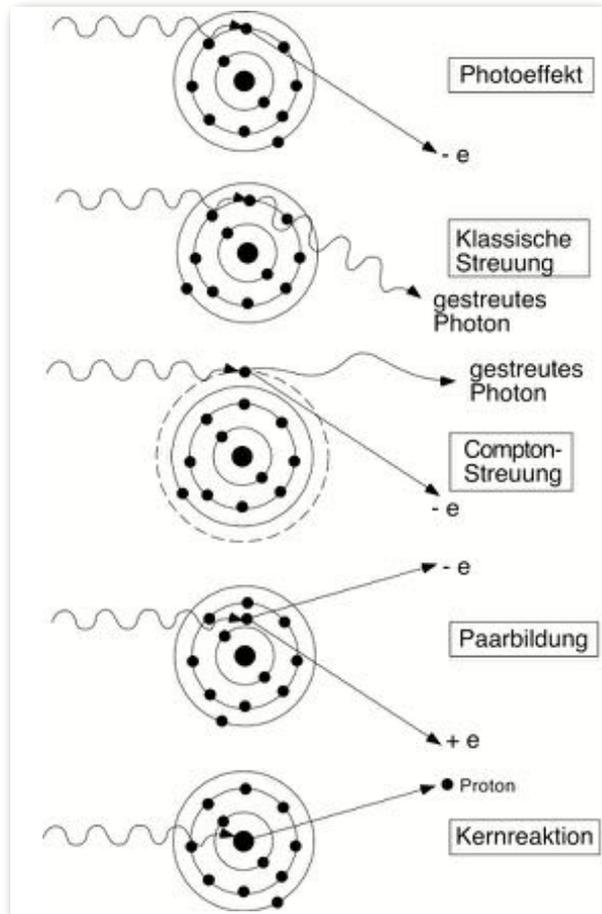
$\mu_{\sigma C}$  = Schwächungskoeffizient für Compton Streuung

$\mu_{\chi}$  = Schwächungskoeffizient für Paarbildung

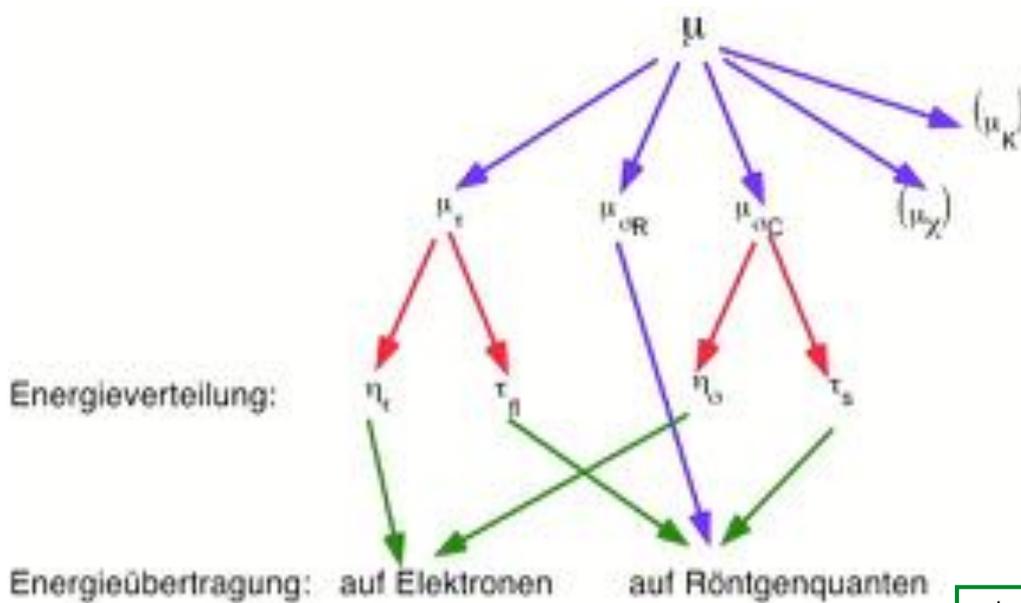
$\mu_K$  = Schwächungskoeffizient für Kernreaktion

... der gesamte Schwächungskoeffizient ist die Summe der Schwächungskoeffizienten aller möglicher WW Prozesse

# Wechselwirkung zwischen ionisierender Strahlung und Materie



# Betrachtung von Energieübertragungskoeffizienten

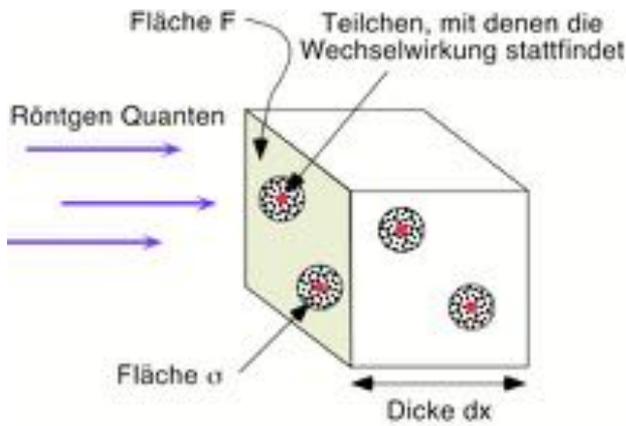


... bei vielen WW Prozessen entstehen am Ende wieder Röntgen Quanten

# Wirkungsquerschnitt

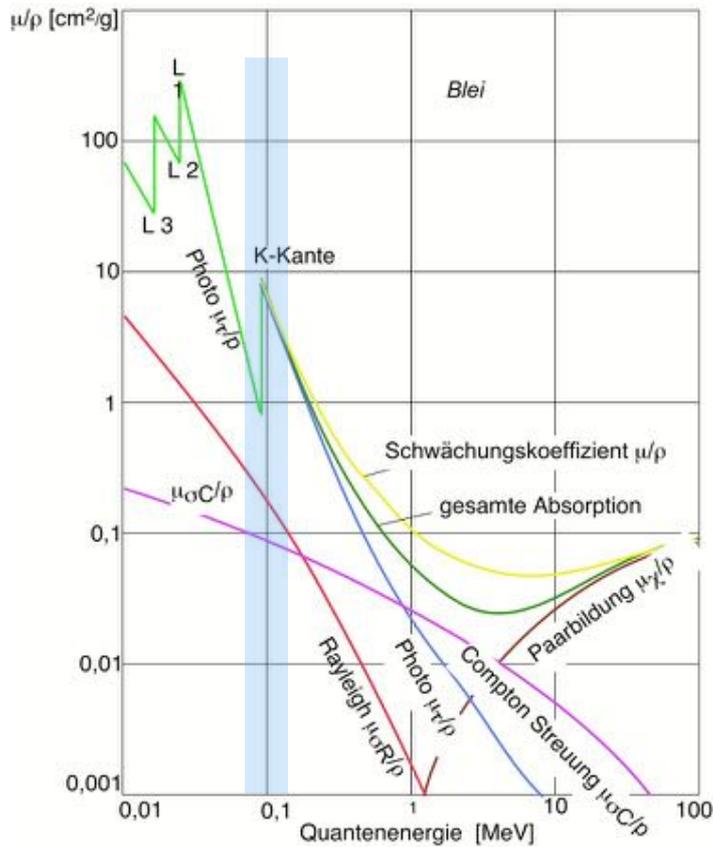
$$\sigma_{WW} = \frac{\mu_{WW}}{n_{WW}}$$

$\sigma_{WW}$  = Wirkungsquerschnitt für eine WW,  
 $\mu_{WW}$  = Schwächungskoeffizient für eine WW,  
 $n_{WW}$  = Teilchendichte der Teilchen,  
 mit denen die WW stattfindet.

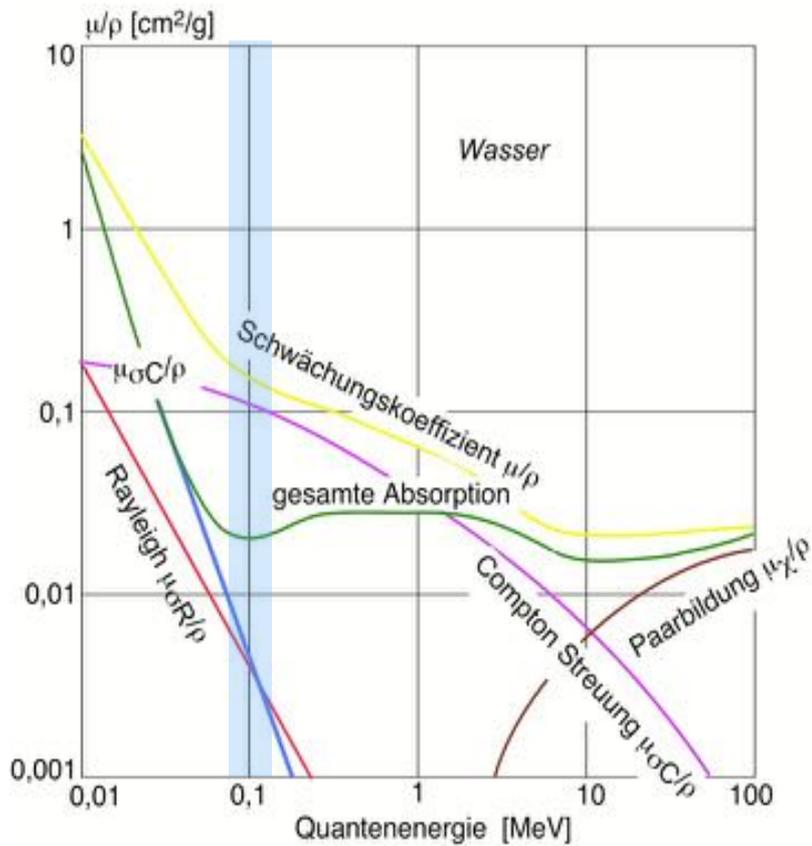


$$\begin{aligned}
 \frac{dN}{N} &= -\mu dx = -\sigma n_{WW} dx \\
 &= -\sigma \cdot \frac{Z_{WW}}{F \cdot dx} dx \\
 &= -\sigma \cdot \frac{Z_{WW}}{F} \\
 &= -\frac{\text{WW - Fläche}}{\text{Gesamtfläche}}
 \end{aligned}$$

# Massenschwächungskoeffizient von Blei

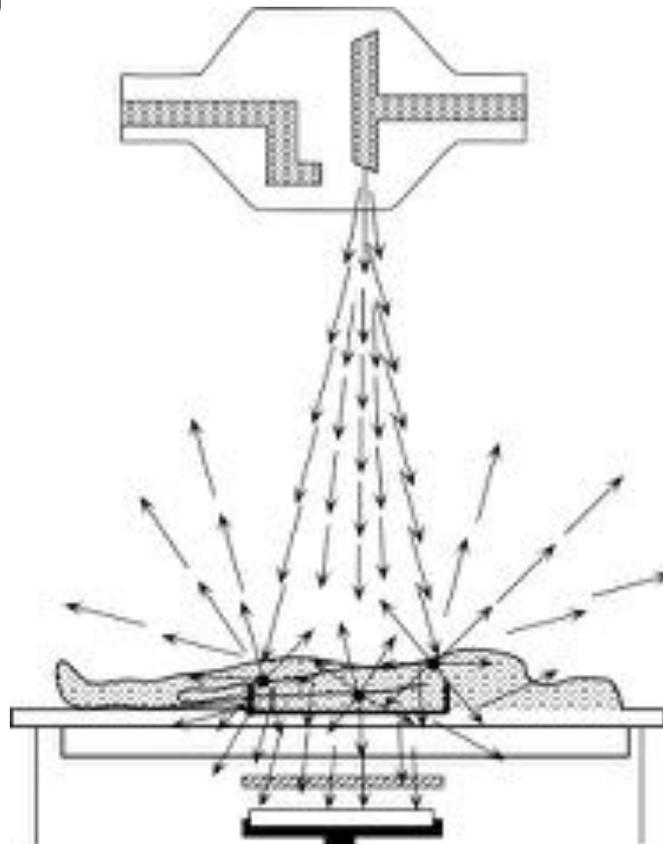


# Massenschwächungskoeffizient von Wasser



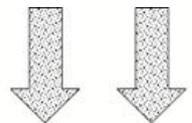
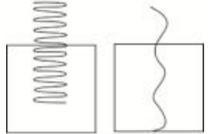
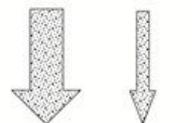
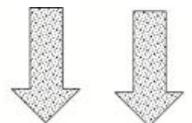
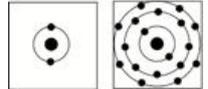
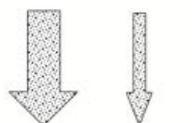
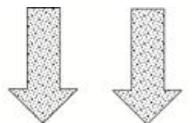
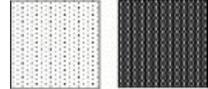
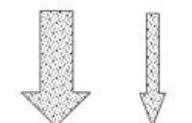
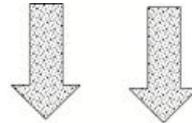
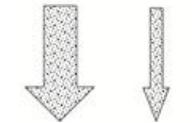
... bei Wasser dominiert im Bereich 100keV die Compton Streuung.

# Streustrahlung



... bei einer Röntgenaufnahme wird der Patient zum Röntgenstrahler!

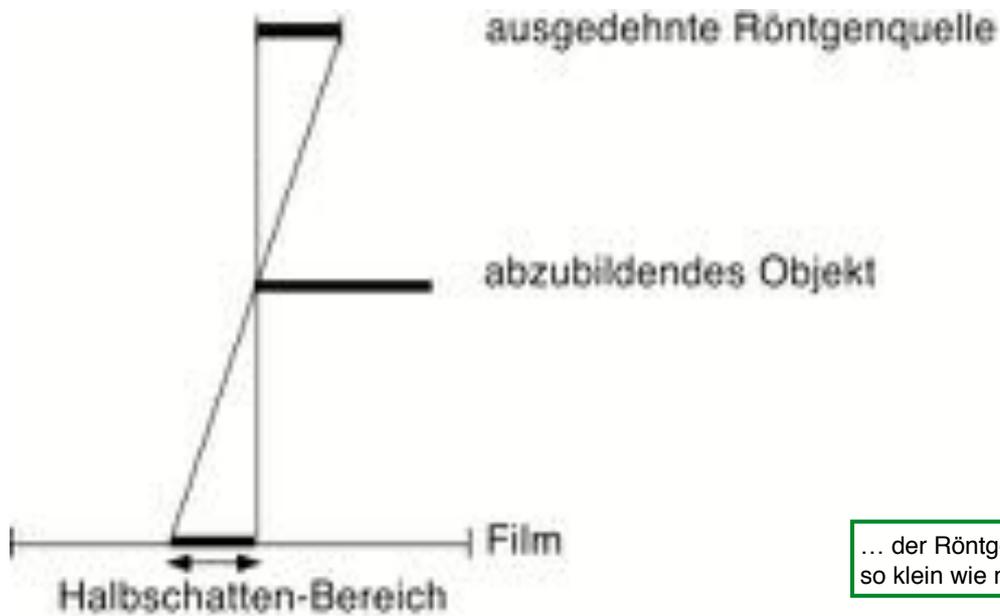
## Zusammenfassendes schematisches Modell der Schwächungsfaktoren

| Wellenlänge   | Ordnungszahl  | Dichte (spez. Gew.)  | Dicke   |
|---|---|--|---|
| <br><br> | <br><br> | <br><br> | <br><br> |
| Schwächung steigt proportional mit der 3. Potenz der Wellenlänge  | Schwächung steigt mit der 3. Potenz der Ordnungszahl  | Schwächung steigt mit der Dichte   | Schwächung steigt mit der Dicke   |

## Qualitätskriterien für Röntgenquellen in der Medizintechnik

- ➡ hohe Leistung → kurze Belichtungszeit
- ➡ kleiner Fokus → Schärfe
- ➡ einstellbare Quantenenergie → Kontrast
- ➡ kostengünstige Herstellung
- ➡ wenig Wartung und lange Lebensdauer

## Halbschatten bei der Röntgenabbildung



... der Röntgenfokus sollte so klein wie möglich sein.

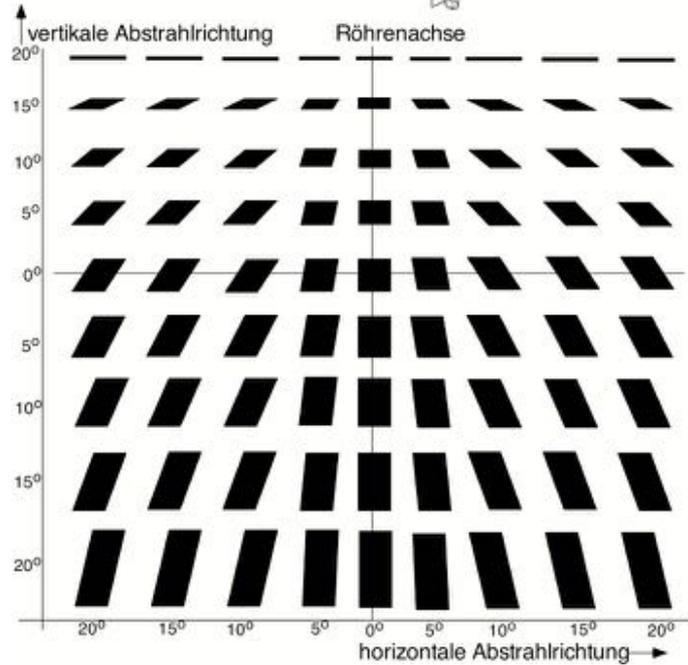
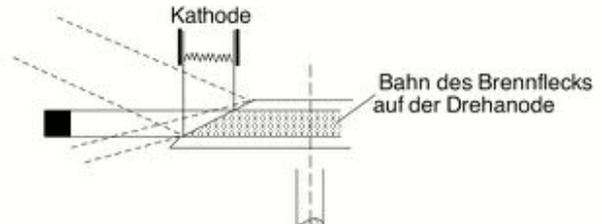
## Mögliche Quellen für Röntgenstrahlung

- ➡ Radioaktive Isotope
- ➡ Synchrotron-Strahlung
- ➡ Röntgenröhren

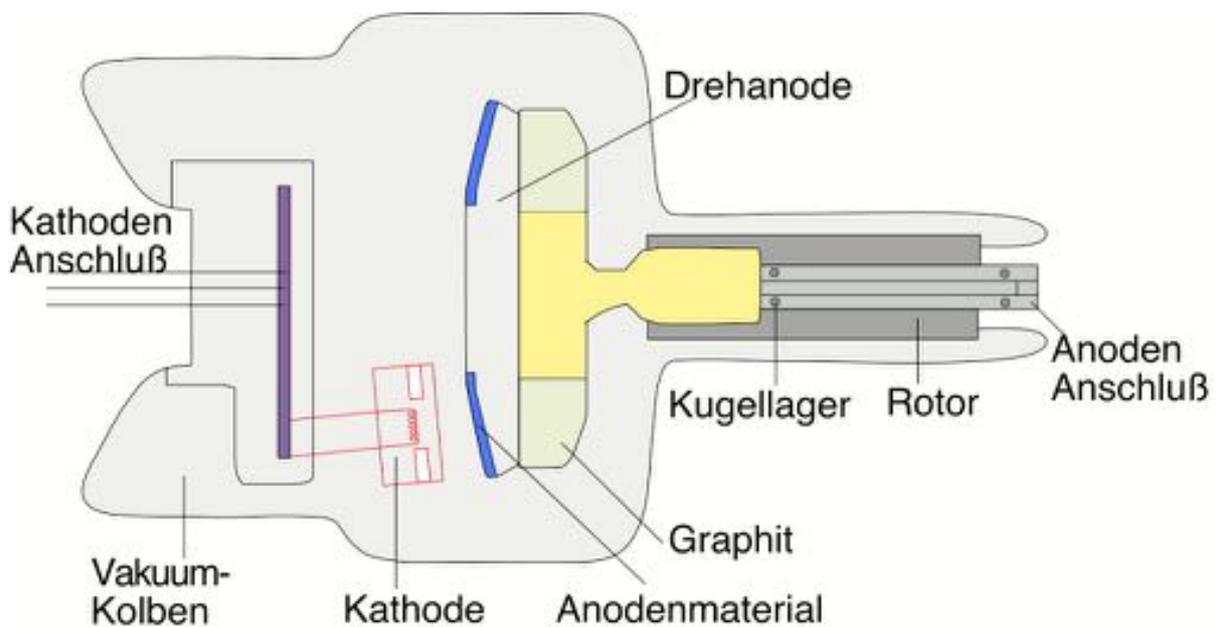
Methoden zur Lösung des „Wärmeproblems“

- ➡ Schräg gestellte Anode
- ➡ Rotierende Anode

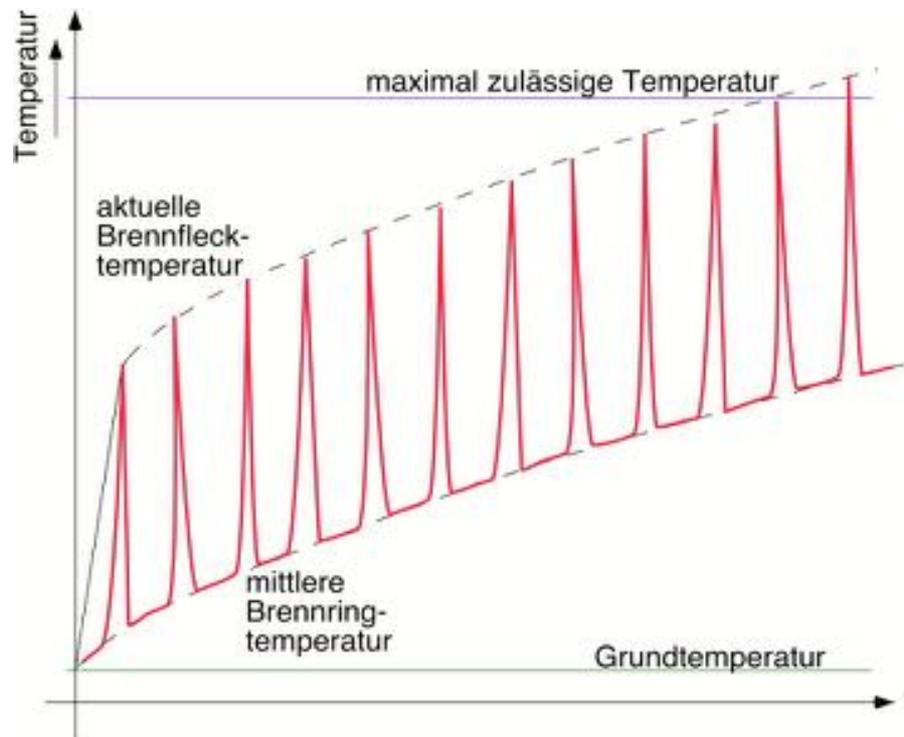
# Brennfleckgeometrie bei der schräg gestellten Anode



# Schnitt durch die Drehanode-Röntgenröhre



# Temperaturaufbau an einer Stelle auf der rotierenden Anode



## Kriterien zur Auswahl eines Anodenmaterials

- ➔ hohe Ordnungszahl  $Z$  ( $\eta = k \cdot U_A \cdot Z$ )
- ➔ hohe Schmelztemperatur  $T_{\max}$
- ➔ hohe Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$
- ➔ hohe spezifische Wärme  $c$

$$\text{Qualitätsmaß für Festanoden} = Z \cdot T_{\max} \cdot \lambda$$

$$\text{Qualitätsmaß für Drehanoden} = Z \cdot T_{\max} \cdot \sqrt{\lambda \rho c}$$

# Verschiedene Anodenwerkstoffe und Bewertungskriterien

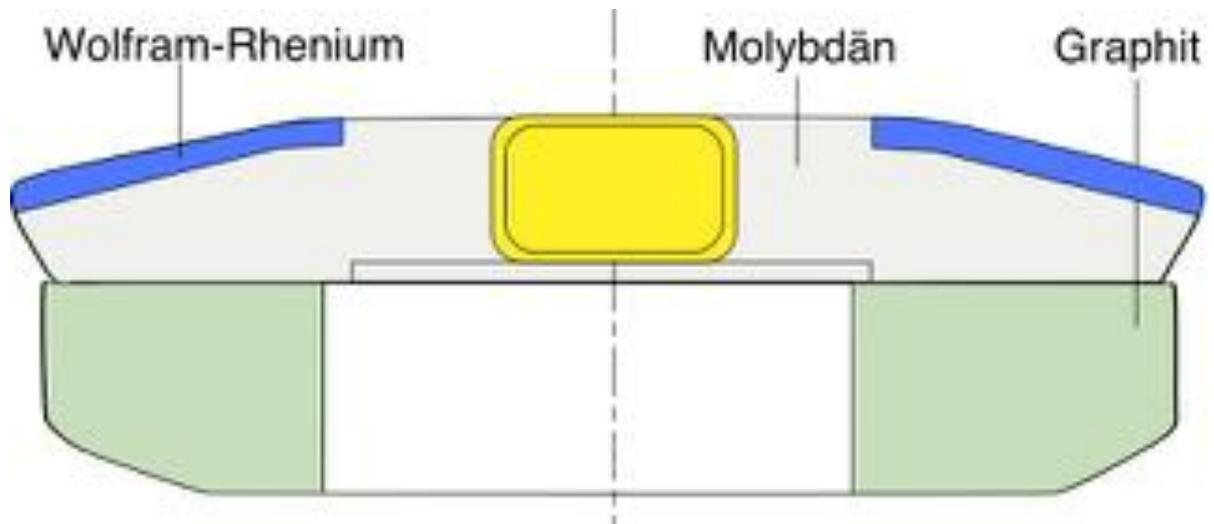
| Element | Ordnungszahl<br>Z | Zulässige<br>Temperatur<br>$T_{\max}$ bei<br>$1,33 \cdot 10^{-2}$ Pa<br>[°C] | Wärmeleit-<br>fähigkeit $\lambda$<br><br>[ $\frac{W}{cm \cdot K}$ ] | Festanoden Drehanoden |                  | $\sqrt{\lambda \rho c}$ | $Z T_{\max} \sqrt{\lambda \rho c}$ | Reihen-<br>folge |
|---------|-------------------|--|---|-----------------------|------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------|
|         |                   |  |   | $Z T_{\max} \lambda$  | Reihen-<br>folge |                         |                                    |                  |
| Cu      | 29                | 1032   | 3,98  | 119113                | 8                | 3,68                    | 110135                             | 10               |
| Mo      | 42                | 2167   | 1,38  | 125599                | 7                | 1,88                    | 171106                             | 8                |
| Ag      | 47                | 832  | 4,18  | 163450                | 4                | 3,18                    | 124350                             | 9                |
| Ta      | 73                | 2587   | 0,55  | 103868                | 9                | 1,13                    | 213402                             | 6                |
| W       | 74                | 2757   | 1,3   | 265223                | 1                | 1,81                    | 369273                             | 1                |
| Re      | 75                | 2557   | 0,71  | 136160                | 6                | 1,38                    | 264650                             | 4                |
| Os      | 76                | 2280   | 0,87  | 150754                | 5                | 1,77                    | 306706                             | 3                |
| Ir      | 77                | 2220   | 1,46  | 249572                | 3                | 2,06                    | 352136                             | 2                |
| Pt      | 78                | 1742   | 0,71  | 96472                 | 10               | 1,41                    | 191585                             | 7                |
| Au      | 79                | (1063)   | 3,14  | 263687                | 2                | 2,81                    | 235975                             | 5                |
| U       | 92                | (1132)   | 0,25  | 26036                 | 11               | 0,75                    | 78108                              | 11               |

... Sieger nach Punkten ist Wolfram.

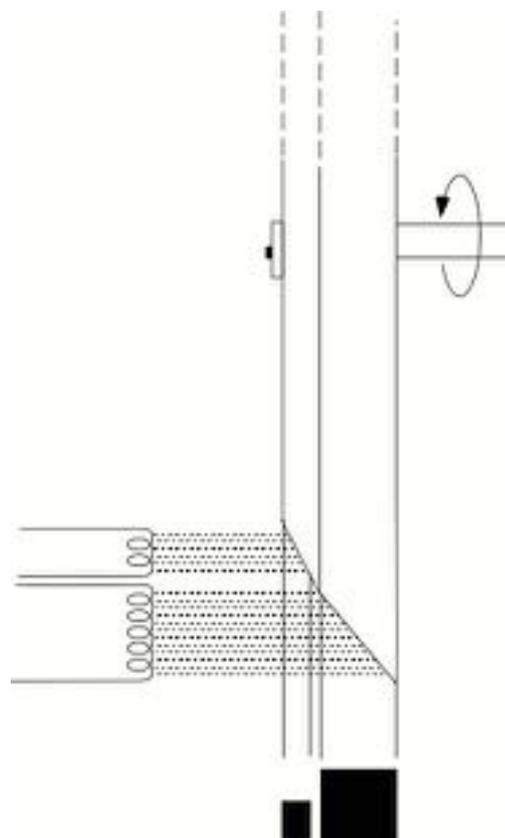
## Technische Aspekte von Röntgenquellen

- ➡ Anodenaufbau
- ➡ Drehlager
- ➡ Gehäuse und Durchführungen
- ➡ Filter
- ➡ Motor
- ➡ Kathode und Stromregelung
- ➡ Generator
- ➡ Belichtungssteuerung

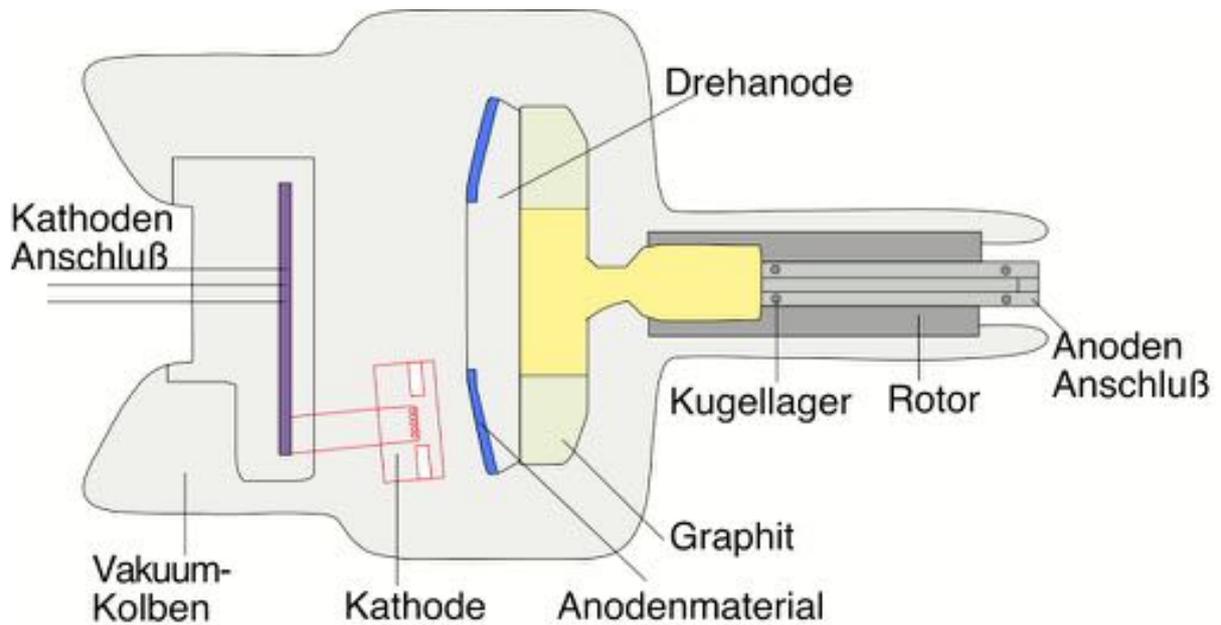
## Aufbau einer Drehanode



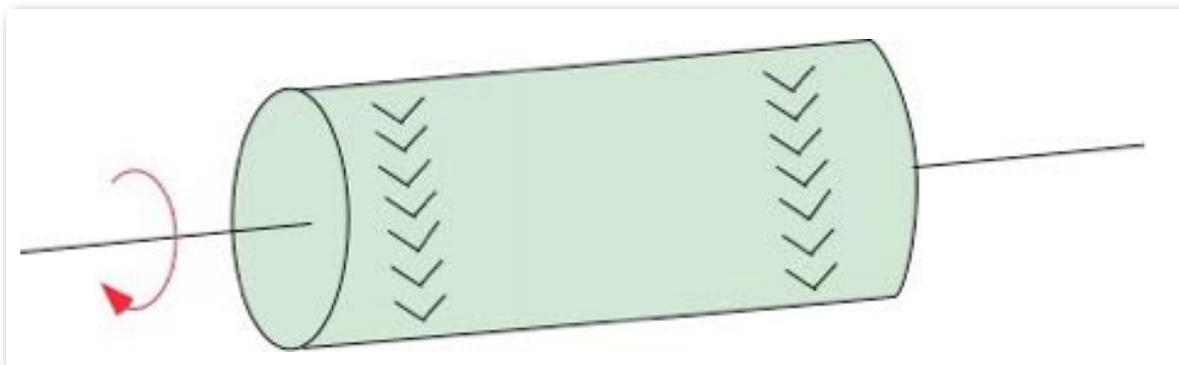
## Doppelwinkel-Anode



## Schnitt durch die Drehanode-Röntgenröhre



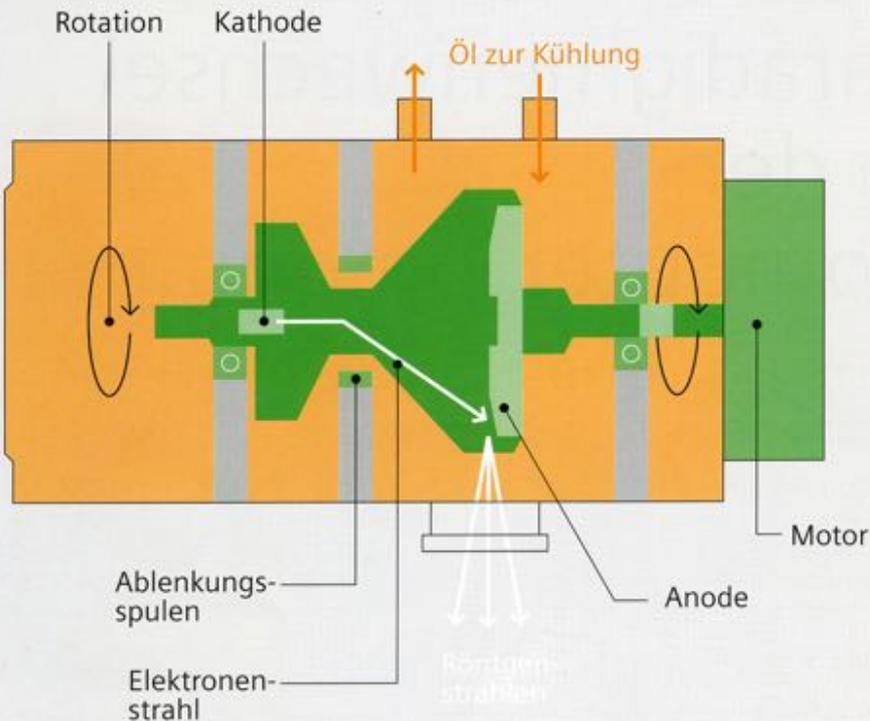
## Gleitrollenlager



3000 bis 17000 Umdrehungen pro Minute

# Drehlager „ausßen“, direkte Kühlung

Straton: Revolutionäre Röhrentechnologie



# Anodenstrom-Regelung

Thermoelektrischer Effekt

$$j_e = A_0 T^2 e^{-W/kT}$$

$j_e$  = Stromdichte

$A_0$  = Materialkonstante

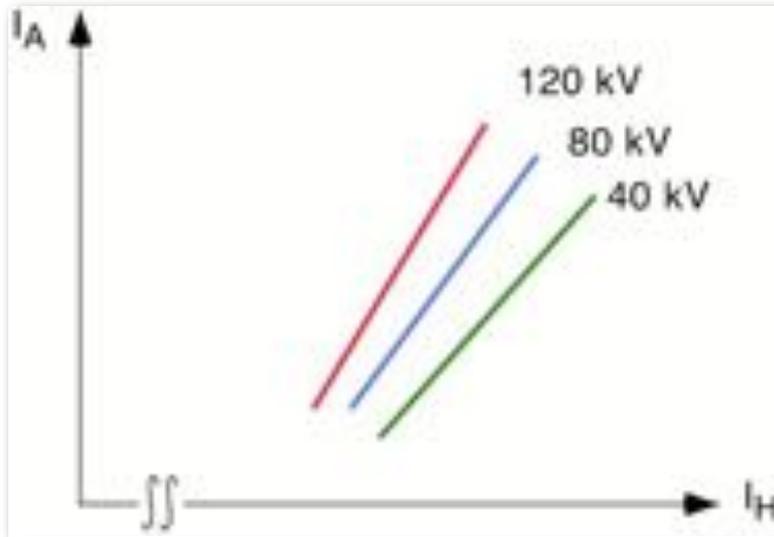
$T$  = absolute Temperatur

$W$  = Austrittsarbeit

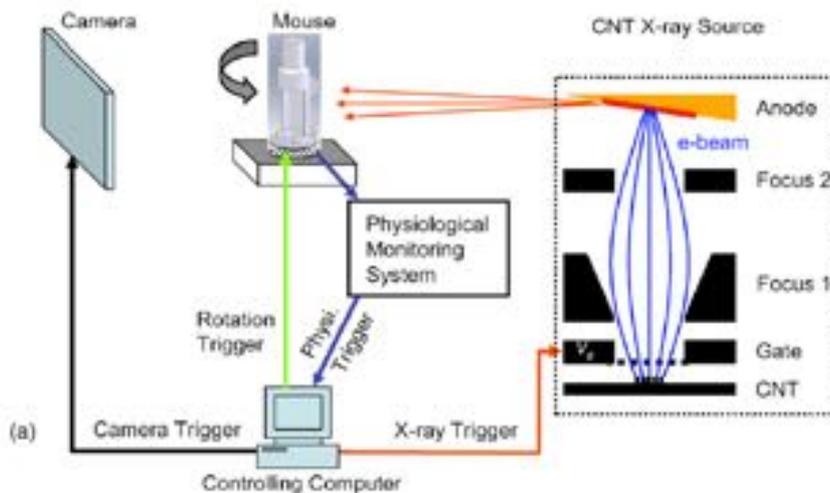
$k$  = Boltzmannkonstante

Glühwendel aus Wolfram

# Kennlinien zum „Durchgriff“ von Röntgenröhren ( $I_A$ = Anodenstrom, $I_H$ = Heizstrom)



# Feld-Emission mit Kohlenstoff Nano-Röhrchen



Phys. Med. Biol. 54 (2009) 2323–2340

G Cao<sup>1</sup>, Y Z Lee<sup>1,2</sup>, R Peng<sup>3</sup>, Z Liu<sup>1,7</sup>, R Rajaram<sup>3</sup>, X Calderon-Colon<sup>3</sup>, L An<sup>1</sup>, P Wang<sup>1</sup>, T Phan<sup>4</sup>, S Sultana<sup>3</sup>, D S Lulush<sup>5</sup>, J P Lu<sup>1,3</sup> and O Zhou<sup>1,3,6</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics and Astronomy, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA

<sup>2</sup> Department of Radiology, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA

<sup>3</sup> Curriculum in Applied Sciences and Engineering, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA

<sup>4</sup> Department of Biomedical Engineering, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA

<sup>5</sup> Department of Biomedical Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695, USA

<sup>6</sup> Lineberger Comprehensive Cancer Center, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA

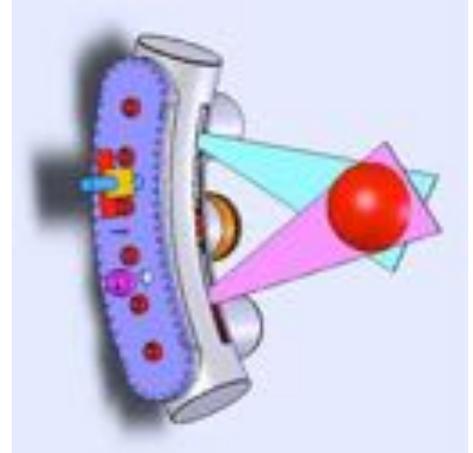
# Feld-Emission mit Kohlenstoff Nano-Röhrchen

## Electron Field Emission

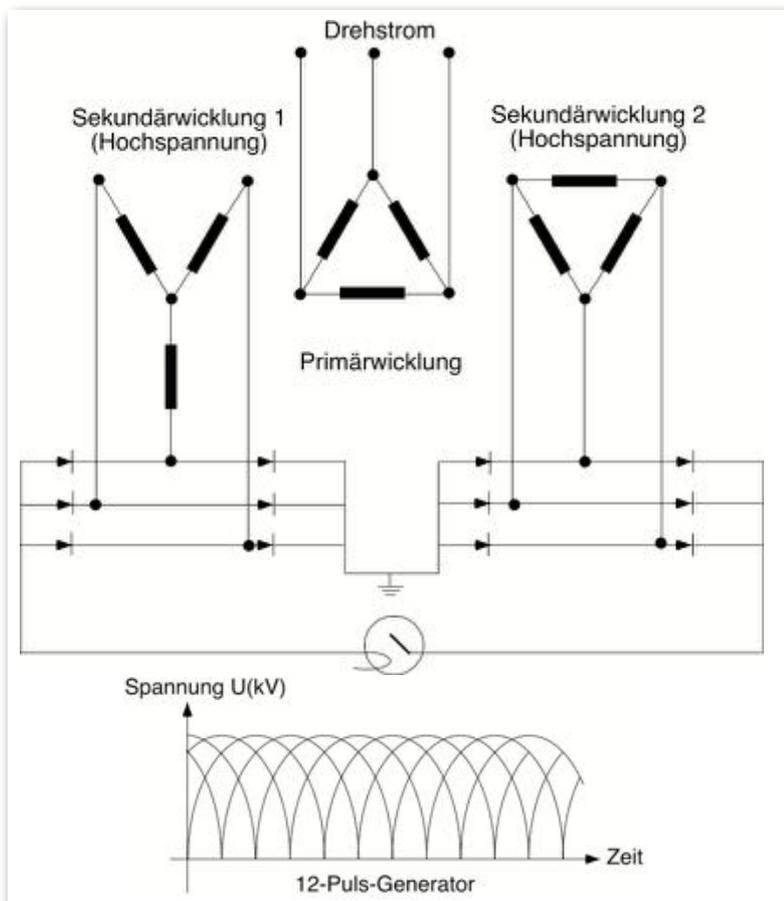
XinRay Systems - Products and Technology

<http://www.xinraysystems.com>

Electron field emission is a quantum tunneling process where an electrical field is used to extract electrons. No heating is required, and the emission current can be controlled and modulated instantaneously by the external field. The "cold" cathode technology also enables the fabrication of matrix addressable distributed electron sources which can be used in a variety of vacuum electronic devices to not only replace the hot filaments but also add new capabilities and functionality. The lack of reliable high performance electron field emitters have in the past prevented the development of this technology. Nanomaterials including carbon nanotubes have shown promising electron field emission properties. The potential of utilizing these novel field emitters for devices such as field emission flat panel display, electron microscope, microwave amplifier, and x-ray tube is being actively investigated in industry and academic labs worldwide. Xintek is a leader in the field of nanotechnology. Its proprietary nanomaterial based field emission electron sources have superior emission properties including high emission current and long term stability. Field emission x-ray tubes have been manufactured using Xintek's cold cathodes which are capable of generating sufficient flux for diagnostic x-ray imaging.

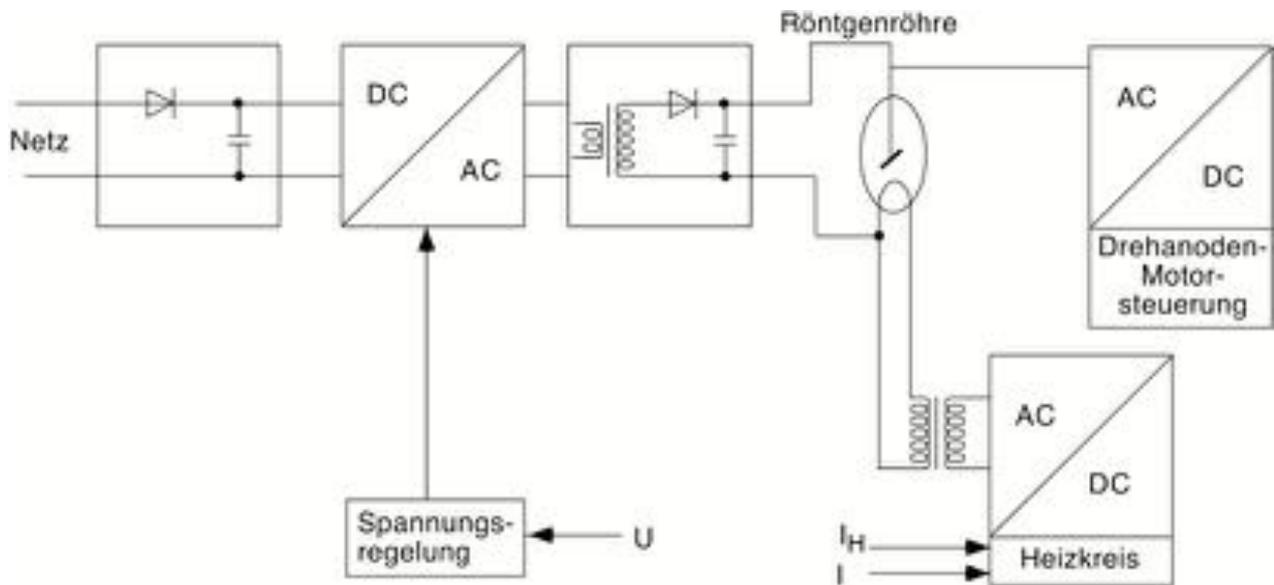


## 12-Puls-Generator



... hat eher historische Bedeutung

# Prinzip des Hochfrequenzgenerators



typisch: 20kHz bis 30kHz

# Belichtungssteuerung

abgegebene Dosis

$$D_{\text{ges}} = k \cdot Z \cdot I_A \cdot U_A^2 \cdot T$$

mit T: Belichtungszeit

bildgebene Dosis

$$D_{\text{Bild}} = k^* \cdot Z \cdot I_A \cdot U_A^n \cdot T$$

mit  $n \approx 3$

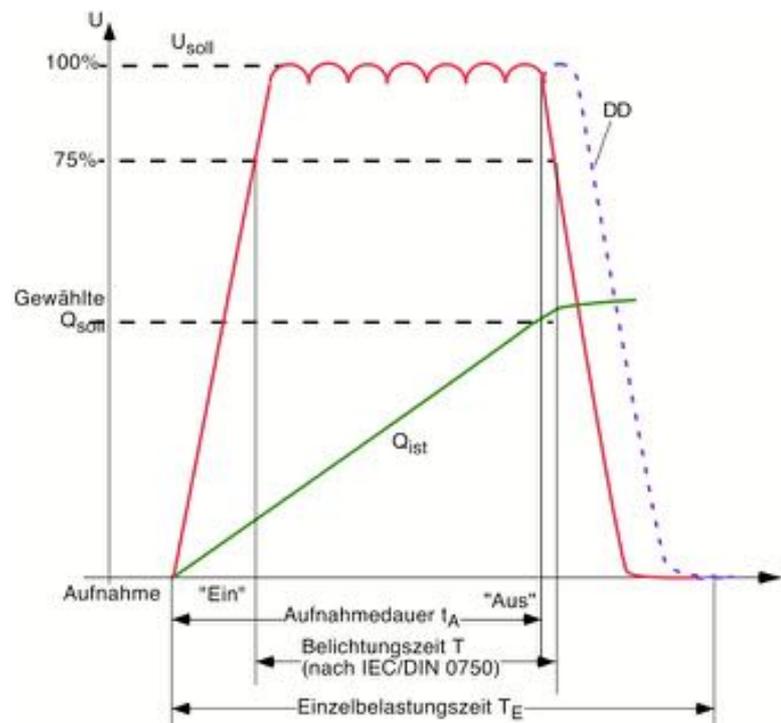
## Belichtungssteuerung

- Dreiknopf-Steuerung kV, mA, s
- Zweiknopf-Steuerung kV, mAs
- Einknopf-Steuerung kV

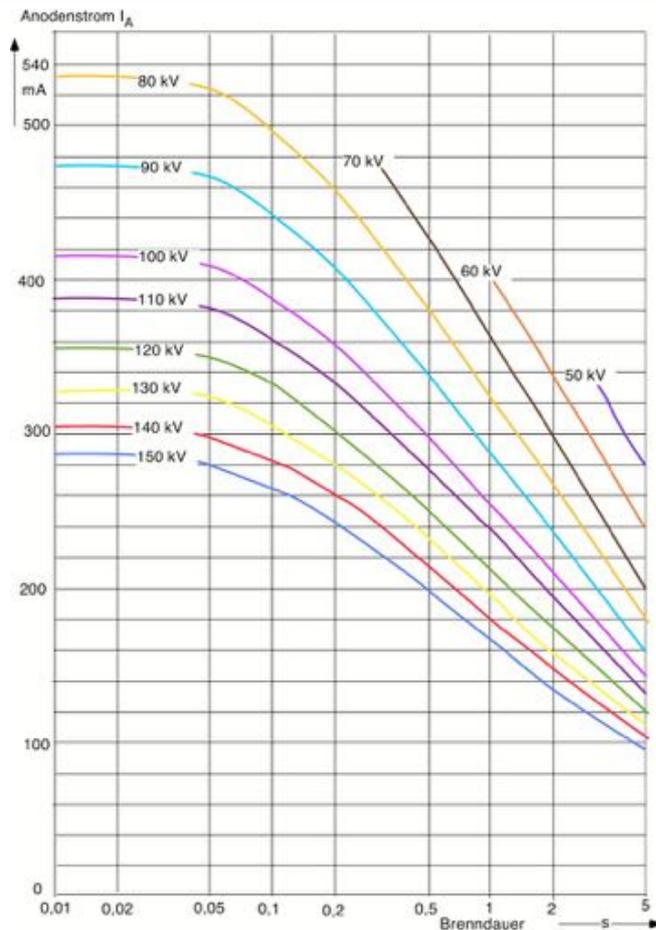
## An- und Ausschalten der Röhre

- über die Hochspannung
- über ein Gitter in der Röhre

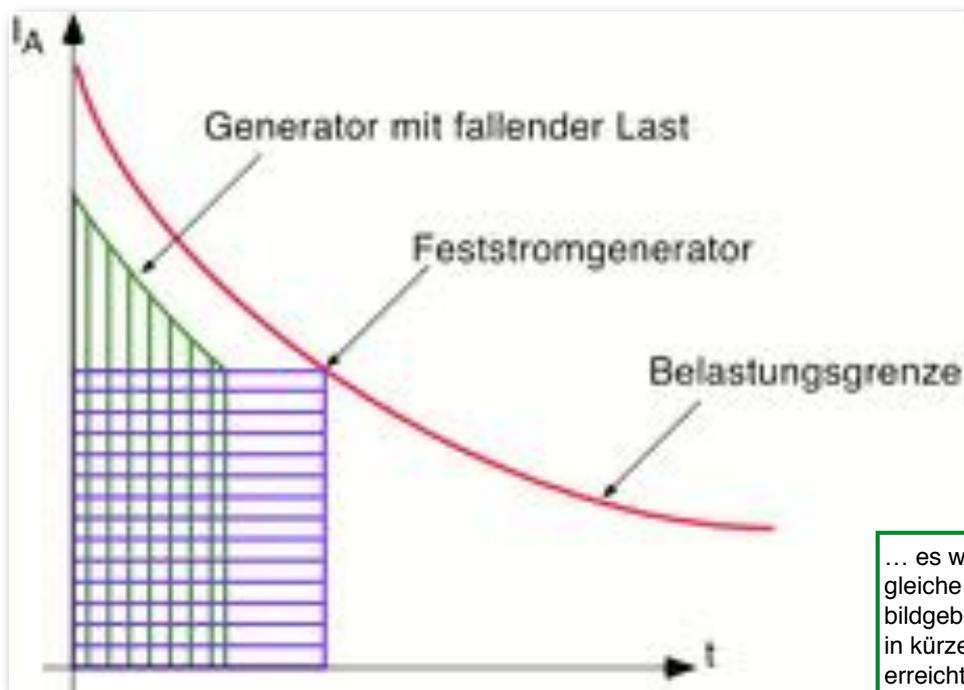
## Belichtungszeit, Aufnahmedauer und Schwankung der applizierten Dosis $\Delta D$



# Typische Belastungskurven



# Generator mit „fallender Last“



... es wie die gleiche bildgebende Dosis in kürzerer Zeit erreicht, ohne dabei die Röhre zu überlasten.

# Temperaturaufbau an einer Stelle auf der rotierenden Anode

