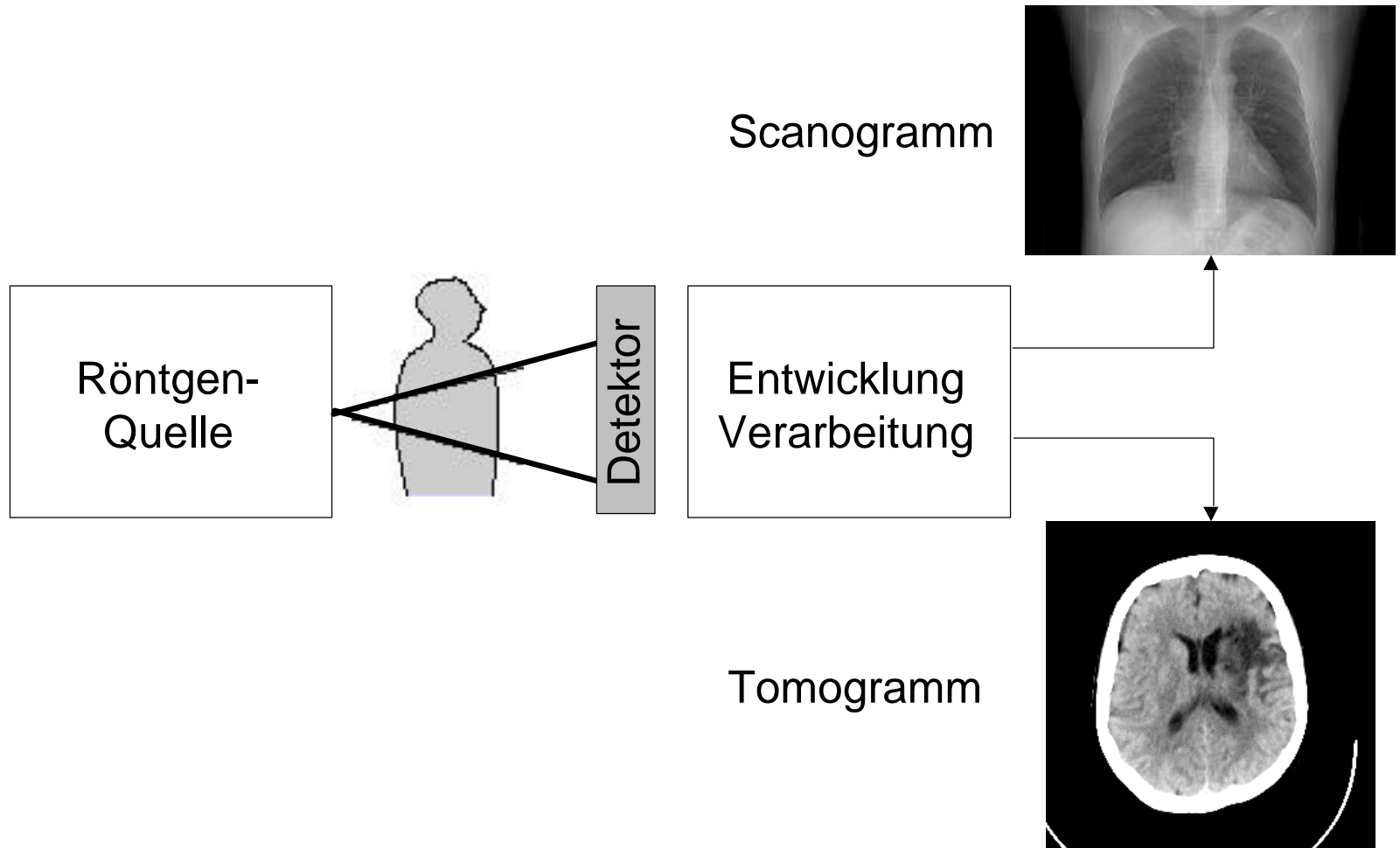


# **Erzeugung von Röntgenstrahlung**

## Bildgebung mit Röntgenstrahlen



## *Bildgebung mit Röntgenstrahlen*

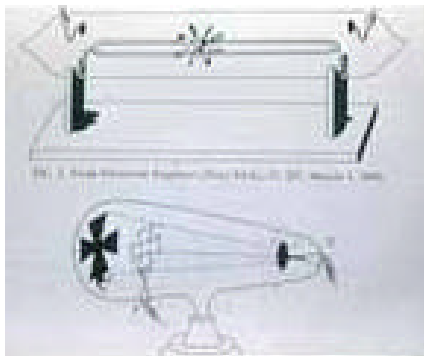
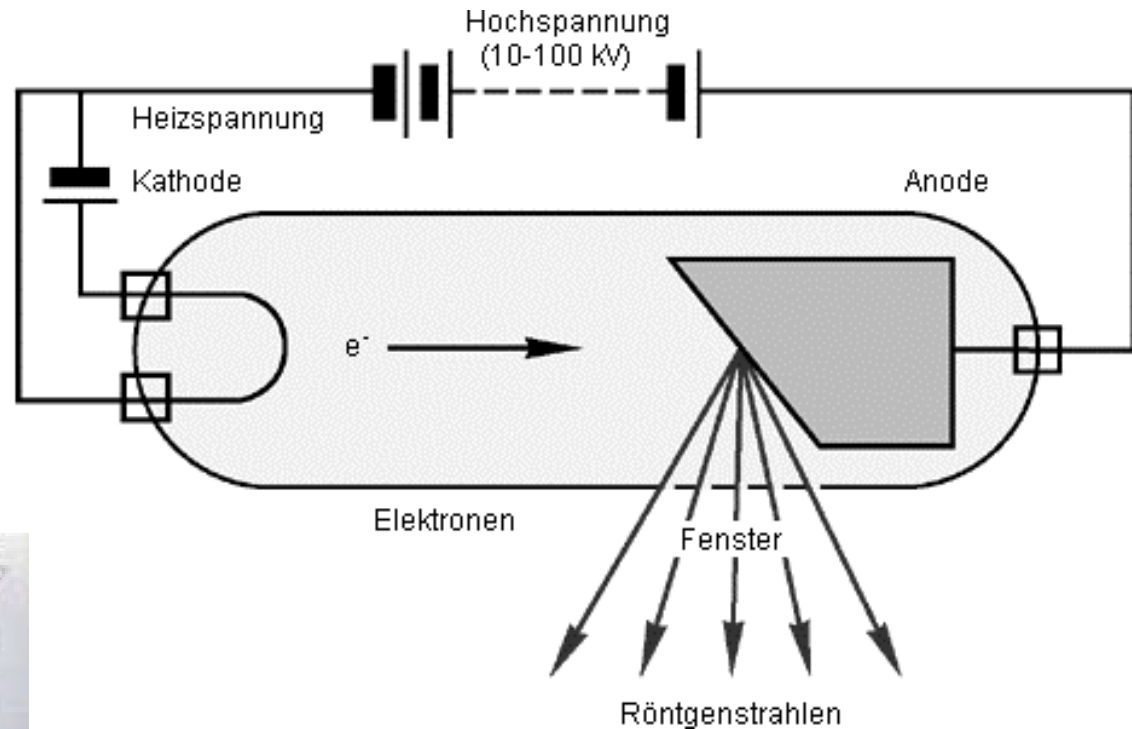
### **Erzeugung von Röntgenstrahlung:**

Grundprinzip: ***Photoelektrischer Effekt***

- Erzeugung freier Elektronen durch Erhitzen einer Schwermetallwendel (Kathode)
- Beschleunigung im elektrischen Feld (100 – 150 kV)
- Abbremsung in Anodenmaterial  
(Umsetzung 99 %  $E_{\text{kin}}$  in Wärme, 1 % in Röntgenstrahlung)
- Bremsstrahlung, charakteristische Strahlung
- Vakuum ( $< 10^{-5}$  mbar); Vermeidung WW mit Luftmolekülen

## Bildgebung mit Röntgenstrahlen

### Erzeugung von Röntgenstrahlung:



W. Crookes 1904

## Bildgebung mit Röntgenstrahlen

### Frequenz der Röntgenstrahlung:

Elektronenenergie nach Durchlaufen der Beschleunigungsspannung:

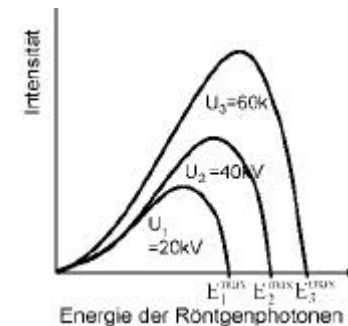
$$E_{kin} = e \cdot U_A$$

$$\text{mit } E_{Photo} = h \cdot n$$

$$\Rightarrow n = \frac{e}{h} \cdot U_A$$

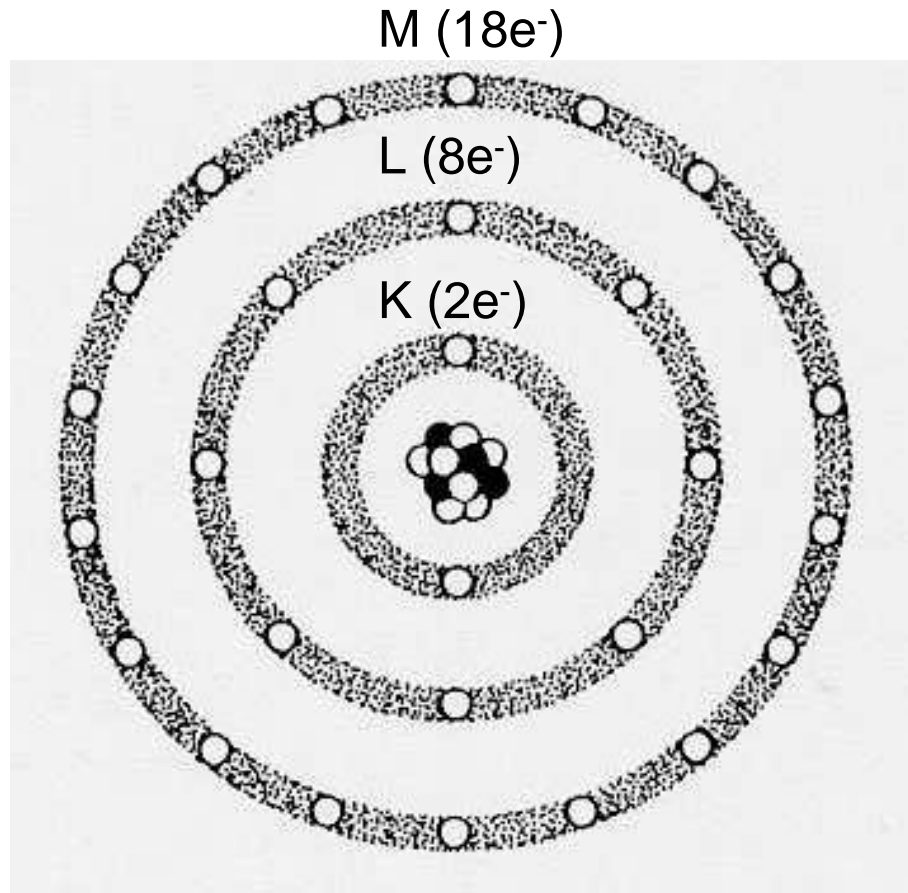
Frequenz der Röntgenstrahlung linear abh. von Röhrensprungung

$U_A$	$\lambda=1/\nu$	Strahlungsart
1 kV	1.242 nm	weich
10 kV	0.124 nm	mittel
100 kV	0.012 nm	hart



## *Bildgebung mit Röntgenstrahlen*

### **Bohrsches Atommodell**



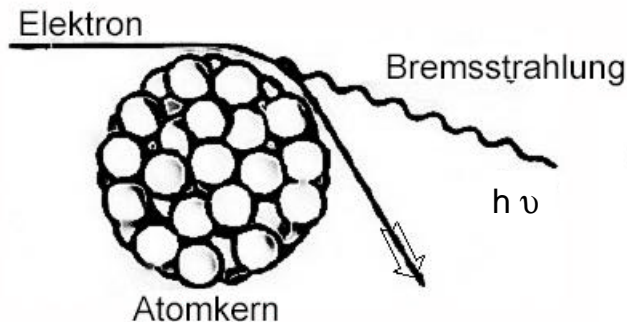
## Bildgebung mit Röntgenstrahlen

### Energie der Röntgenstrahlung:

#### 1. **Bremsstrahlung:**

Beschleunigte Elektronen geraten in Nähe eines Atomkerns  
(zwischen Kern und K-Schale)

- Ablenkung durch Coulomb-Potential des Kerns und der Hüllenelektronen
- Abbremsung (Umwandlung von  $E_{\text{kin}}$  in e.m. Energie)
- Abstrahlung der Energie als „Bremsstrahlung“



Energie der Bremsstrahlung  
hängt von Flugbahn ab

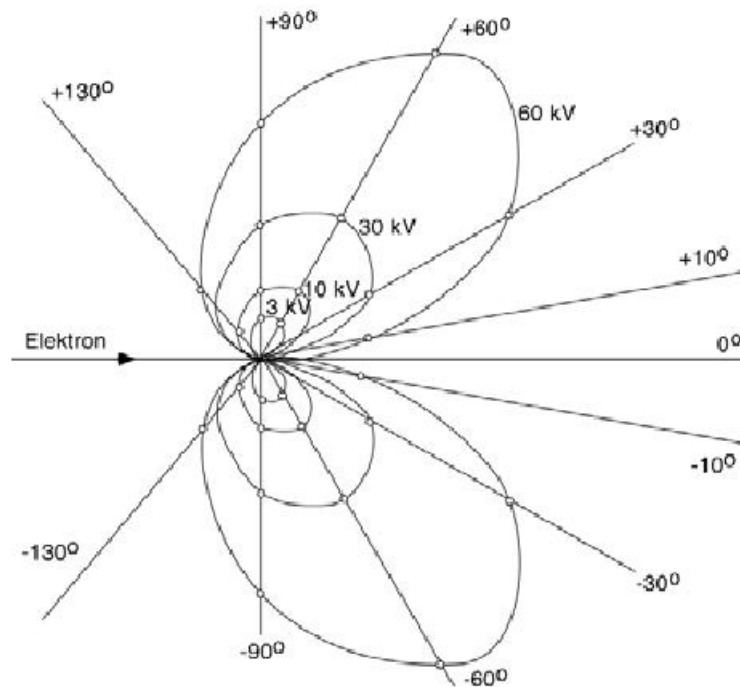
⇒ breites Energiespektrum !

## Bildgebung mit Röntgenstrahlen

### Energie der Röntgenstrahlung:

#### 1. **Bremsstrahlung:**

räumliche Intensitätsverteilung der Bremsstrahlung  
(„Strahlungskeulen“)





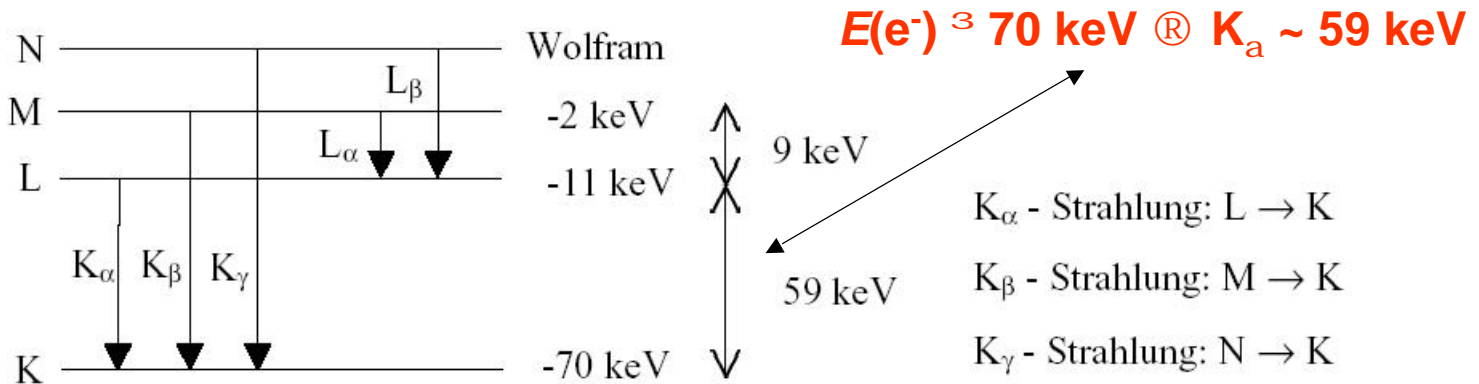
## Bildgebung mit Röntgenstrahlen

### Energie der Röntgenstrahlung:

#### 2. Charakteristische Strahlung:

Beschleunigte Elektronen schlagen gebundene Elektronen aus K- (oder L-) Schale  $\Rightarrow$  Ionisation

Auffüllen der freien Stelle durch freies Elektron oder aus äußerer Schale  
Freisetzen der Energiedifferenz ( $h\nu = E_m - E_n$ ) als Quant mit charakteristischer Frequenz  $\nu$



Energie der charakteristischen Strahlung nur materialabhängig !

## *Bildgebung mit Röntgenstrahlen*

### **Energie der Röntgenstrahlung:**

#### **2. Charakteristische Strahlung:**

Berechnung der Energie der  $K\alpha$ -Strahlung

Mosleysches Gesetz:

$$E_{Ka} = \frac{3}{4} \cdot R_{\infty} (Z - 1)^2$$

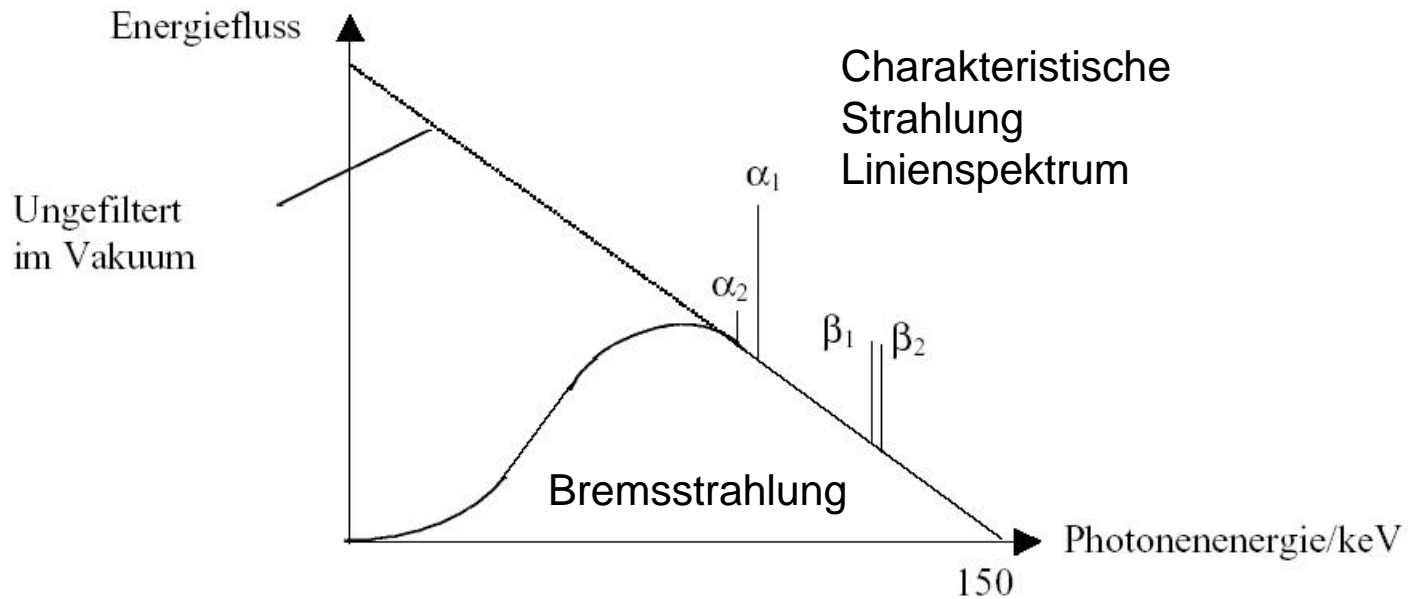
mit  $R_{\infty}$  = Rydbergkonstante ( $3.29 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ )

$Z$  = Ordnungszahl

## Bildgebung mit Röntgenstrahlen

### Energie der Röntgenstrahlung:

#### 3. *Gesamtes Energiespektrum:*



## *Bildgebung mit Röntgenstrahlen*

### **Erzeugung von Röntgenstrahlung:**

- Frequenz abh. von Röhrenspannung
- Energie abh. von Materialeigenschaften

⇒ Anforderungen an Anodenmaterial:

- Hohe Ordnungszahl  $Z$  (Ausbeute an Rö.-Strahlen steigt prop. mit  $Z$ )
- Hoher Schmelzpunkt  $T_{\max}$
- Hohe Wärmeleitfähigkeit  $\kappa$
- Qualitätsmaß =  $Z \cdot T_{\max} \cdot \kappa$

Am meisten verwendet:      Wolfram oder Wolfram-Rhenium

## *Bildgebung mit Röntgenstrahlen*

### **Erzeugung von Röntgenstrahlung:**

Qualitätskriterien für Röntgenquellen in der medizinischen Bildgebung

- hohe Leistung  $\Rightarrow$  kurze Belichtungszeit
- kleiner Fokus  $\Rightarrow$  Schärfe
- einstellbare Quantenenergie  $\Rightarrow$  Kontrast
- kostengünstige Herstellung
- wenig Wartung, lange Lebensdauer

## *Bildgebung mit Röntgenstrahlen*

### **Erzeugung von Röntgenstrahlung:**

Qualitätskriterien für Röntgenquellen in der medizinischen Bildgebung

Eine hohe Leistung und ein kleiner Fokus

kann durch Verwendung einer

***schräg gestellten Anode***

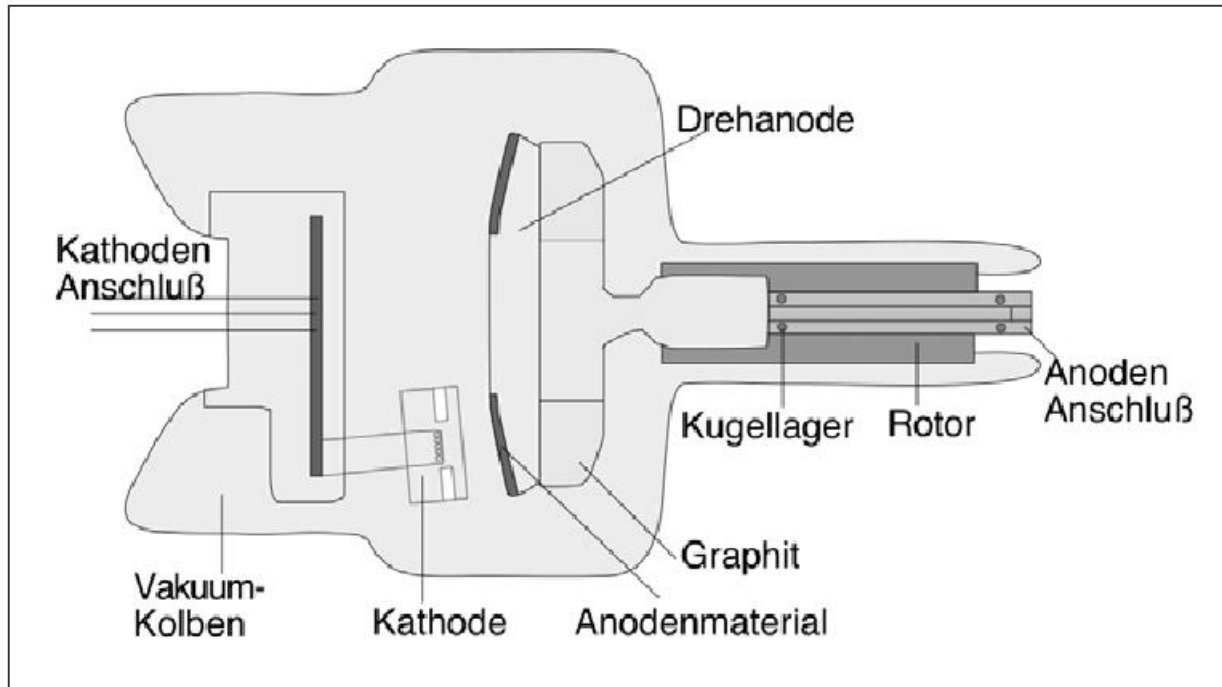
und durch eine

***rotierende Anode (Drehanode)***

erreicht werden

## *Bildgebung mit Röntgenstrahlen*

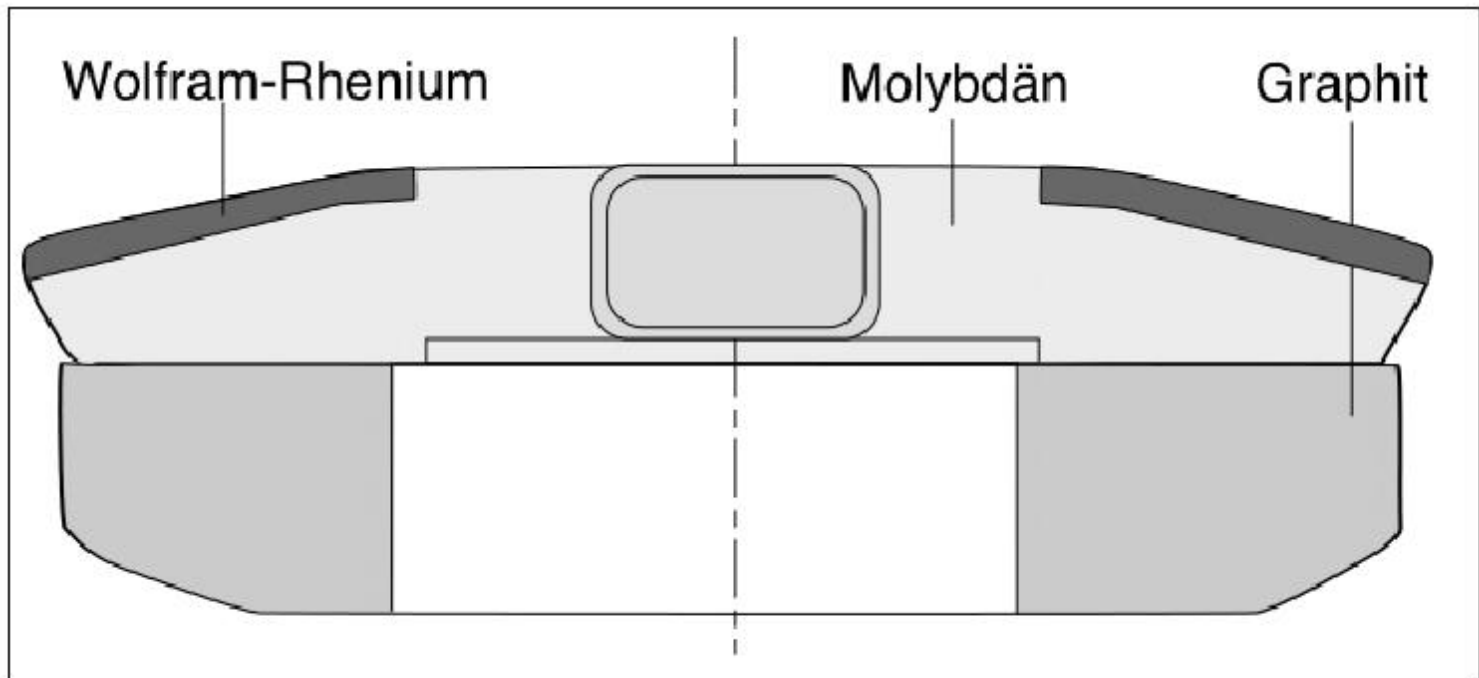
### **Generierung von Röntgenstrahlung (Drehanode):**



Wärmeabführung  
durch Rotation

## *Bildgebung mit Röntgenstrahlen*

### **Aufbau einer Drehanode:**





## Bildgebung mit Röntgenstrahlen

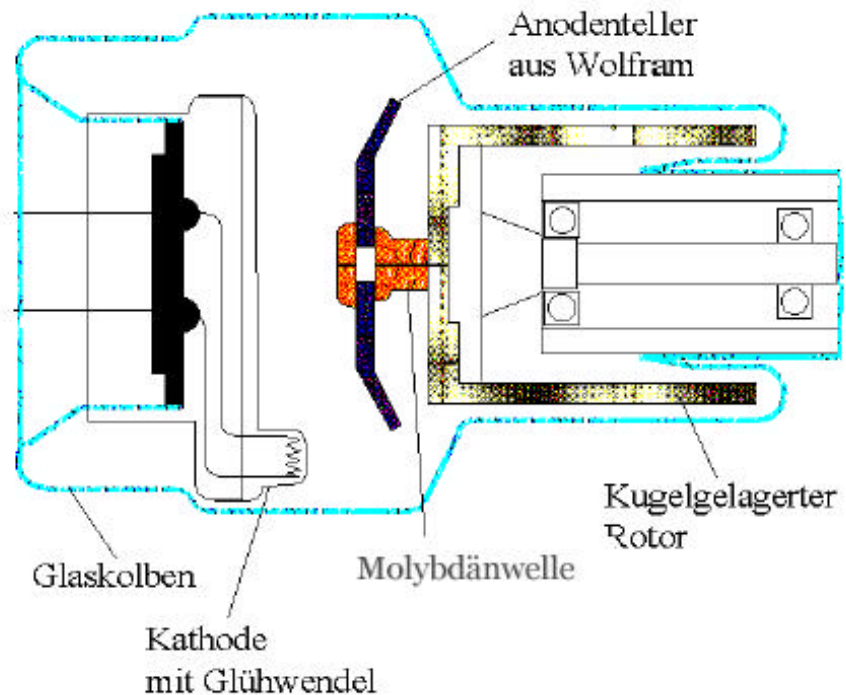
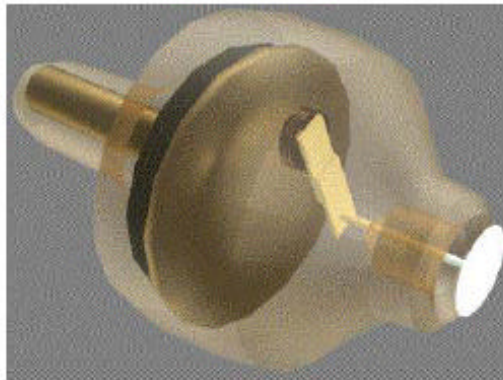
### Anodenmaterial:

Element	Ordnungszahl Z	Zulässige Temperatur $T_{\max}$ bei $1,33 \cdot 10^{-2}$ Pa [°C]	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda$ $\left[ \frac{\text{W}}{\text{cm K}} \right]$	Festanoden		Drehanoden		
				$ZT_{\max}\lambda$	Reihen- folge	$\sqrt{\lambda \rho c}$	$ZT_{\max}\sqrt{\lambda \rho c}$	Reihen- 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

## Bildgebung mit Röntgenstrahlen

### Generierung von Röntgenstrahlung (Drehanode):

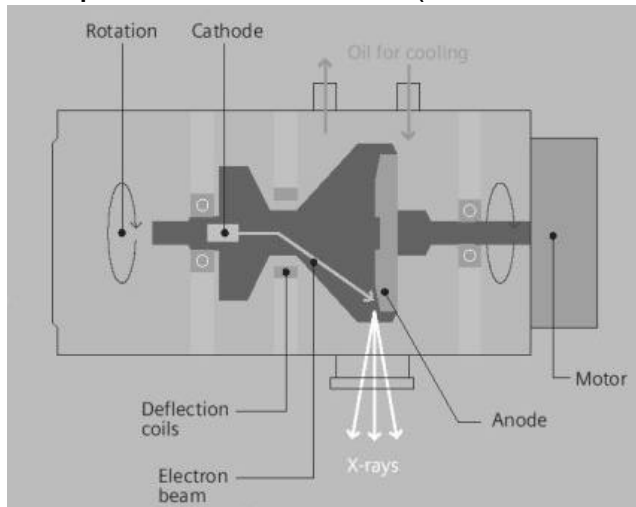
Aufbau einer drehenden Röntgenanode zur Erzeugung harter Bremsstrahlung für medizinische Anwendungen:



## *Bildgebung mit Röntgenstrahlen*

### **Erzeugung von Röntgenstrahlung:**

Beispiel: Straton-Röhre (Siemens, 2003)



direkte Anodenkühlung

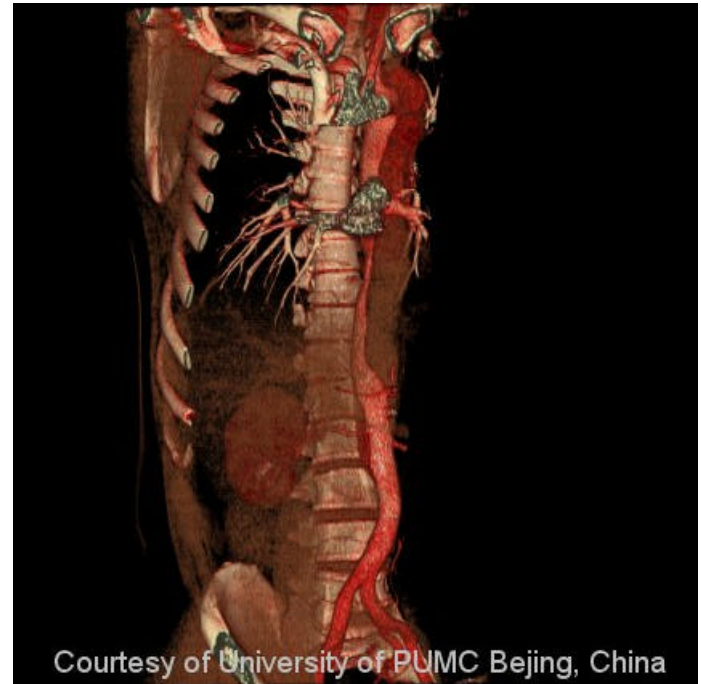
Mechanik außerhalb Vakuum

Rotationszeit: 0.37 sec

Sub-mm Volumen-Scans bei 500 mAs für 20 sec  
(64 mm/sec)

Dosisreduktion

unabh. von Patientengröße u. Anatomie



## Bildgebung mit Röntgenstrahlen

### Wirkungsgrad $h$ und Strahlungsleistung $D$ :

$$h \equiv \frac{\text{Strahlungsleistung}}{\text{elektrische Leistung}} = k \cdot Z \cdot U_A \quad [\%]$$

wobei

$$k = 1.1 \cdot 10^{-9} \text{ [V}^{-1}\text{]}$$

$Z$  = Ordnungszahl des Anodenmaterials

$U_A$  = Röhrenspannung

Beispiel: Wolfram-Anode,  $Z=74$ ,  $U_A=125 \text{ kV}$   $\Rightarrow \eta = 1.02 \%$   
(in der Praxis  $< 1\%$  wg. Filterung und Ausblendung; Rest: Wärme)

$$D \equiv Z \cdot I \cdot U_A^2$$

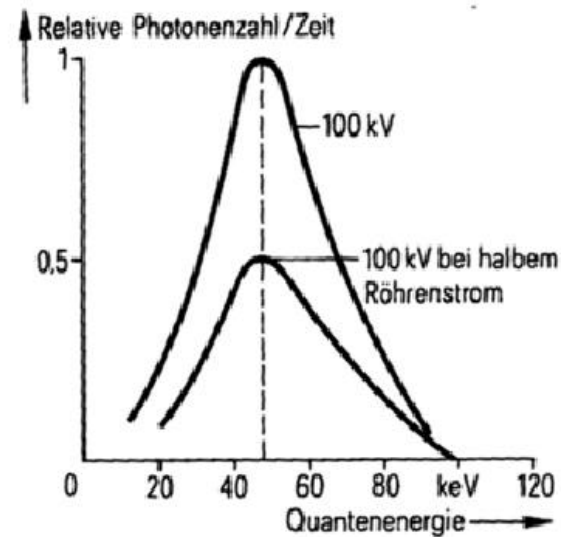
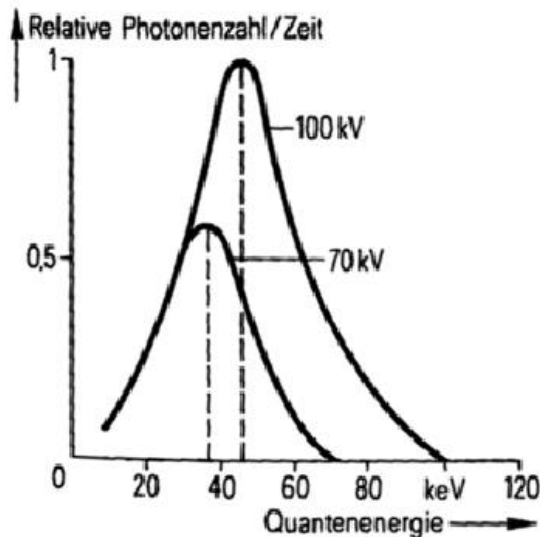
wobei

$I$  = Röhrenstrom (weitestgehend fest vorgeschrieben!)

## Bildgebung mit Röntgenstrahlen

### Einfluss von Röhrenspannung und -strom:

- Flussdichte der Röntgenstrahlung:  $\psi \sim Z \cdot I \cdot U_a^n$
- Röhrenspannung bestimmt „Härte“ der Strahlung  
Potentieller Einfluss (ungefiltert:  $n=2$ ; mit Filter bis  $n=5$ )
- Röhrenstrom bestimmt Photonenanzahl/sec  
Linearer Einfluss



## *Bildgebung mit Röntgenstrahlen*

### **Röntgenstrahlung:**

#### **Klassifizierung**

Strahlungsart	$\lambda_{\min} - \lambda_{\max}$ [nm]	$f_{\min} - f_{\max}$ [GHz]	E [keV]
überweich	0.25 - 0.06	$1.2 \cdot 10^9 - 3.3 \cdot 10^9$	5.0 - 13.6
weich	0.06 - 0.02	$3.3 \cdot 10^9 - 1.5 \cdot 10^{10}$	13.6 - 62
mittelhart	0.02 - 0.01	$1.5 \cdot 10^{10} - 3.0 \cdot 10^{10}$	62 - 124
hart	0.01 - 0.005	$3.0 \cdot 10^{10} - 6.0 \cdot 10^{10}$	124 - 248
überhart	< 0.005	$> 6.0 \cdot 10^{10}$	> 248

Typische CT-Röntgenröhre:

Beschleunigungsspannung 120 kV

Wolfram-Anode: ~ 20 - 120keV

Ionisierung von lebendem Gewebe bereits bei 15 eV !!