



Strahlenerzeugung mit Röntgengeräten

Dr. R. Mini

Wahlfachpraktikum Medizinphysik 2004/2005

Das Praktikum dauert 3 Wochen, in der Regel in den Frühlingsferien, der genaue Zeitpunkt wird mit dem Betreuer abgesprochen. Sobald Thema und Zeitpunkt bekannt sind, ist dies schriftlich dem Vorlesungsverantwortlichen mitzuteilen (Name, Thema, Zeitpunkt). Jede Arbeit wird mit einem kleinen Bericht (1 bis 2 Seiten) abgeschlossen. Dieser Bericht ist ebenfalls dem Vorlesungsverantwortlichen abzugeben. Ohne diesen Bericht kann kein Testat erteilt werden. Typischerweise kann jeder Betreuer 1 bis 2 Gruppen übernehmen.



Wahlfachpraktikum Medizinphysik 2004/2005

1. Strahlentherapie, Praktikum im Spital
Dr. Uwe Schneider, Klinik für Radio-Onkologie und Nuklearmedizin, Stadtspital Triemli, 8063 Zürich, Tel. 01/466 13 69, e-mail: uwe.schneider@psi.ch
2. Strahlentherapie, Praktikum im Spital
Dr. Beat Leemann, Radio-Onkologie, Kantonsspital Luzern, 6000 Luzern 16, Tel. 041/205 58 11, e-mail: beat.leemann@ksl.ch
3. Stereotaktische Strahlentherapie, Praktikum im Spital
Dr. Stefan Scheib, Klinik im Park, Seestr. 220, 8027 Zürich, Tel. 01/209 22 16, e-mail: stefan.scheib@hirslanden.ch
4. Magnetresonanztomographie, Praktikum am IBT
Prof. Peter Bösigler, ETHZ, Gloriastr. 35, 8092 Zürich, Tel. 01/632 45 81, e-mail: boesiger@biomed.ee.ethz.ch
Prof. Klaas Prüssmann, ETHZ, Gloriastr. 35, 8092 Zürich, Tel. 01/632 66 96, e-mail: pruessmann@biomed.ee.ethz.ch
Dr. Roger Luechinger, ETHZ, Gloriastr. 35, 8092 Zürich, Tel. 01/255 30 64, e-mail: luechinger@biomed.ee.ethz.ch
5. Biomechanik, Verkehrsunfallmechanik, Praktikum am IBT
Prof. Peter Niederer, ETHZ, Gloriastr. 35, 8092 Zürich, Tel. 01/632 45 68, e-mail: peter.niederer@biomed.ee.ethz.ch
6. Laser, Praktikum am IBT und USZ (Augenklinik)
Dr. Michael Mrochen, USZ, Dept. Of Ophthalmology, Frauenklinikstr. 24, 8091 Zürich, Tel. 01/255 49 93, e-mail: michael.mrochen@aug.usz.ch
7. Mikrotomographie, Praktikum am IBT
Prof. Ralph Müller, ETHZ, Moussonstr. 18, 8044 Zürich, Tel. 01/632 45 92, e-mail: ralph.mueller@biomed.ee.ethz.ch
Dr. Marco Stampanoni, Swiss Light Source, WSLA/215, PSI, 5232 Villigen-PSI, Tel. 056/310 47 24, e-mail: marco.stampanoni@psi.ch
8. Protonentherapie, Praktikum am PSI
Dr. Tony Lomax, Abt. Strahlenmedizin, PSI, 5232 Villigen-PSI, Tel. 056/310 35 23, e-mail: tony.lomax@psi.ch
9. Strahlentherapie, Praktikum am Spital
Dr. Wolf Seelentag, Klinik für Radio-Onkologie, Kantonsspital, 9007 St. Gallen, Tel. 071/494 22 33, e-mail: wolf.seelentag@kssg.ch
10. Strahlentherapie, Praktikum am Inselspital Bern
Dr. Peter Manser, Abt. für Strahlenphysik, Inselspital, 3010 Bern, Tel. 031/632 37 71, e-mail: peter.manser@insel.ch

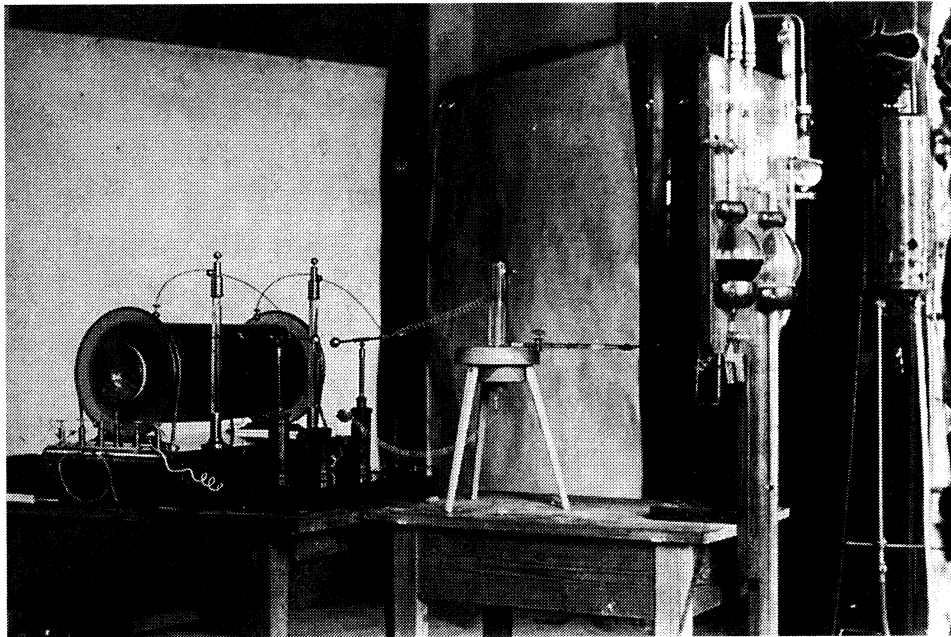




*W. C. Röntgen im Jahr 1895,
Nobelpreis in Physik 1901,
Ernennung zum Ehrenmitglied der
Schweizerischen Radiologen-Gesellschaft
9. März 1913*



Von W. C. Röntgen benutzte Einrichtung anlässlich der Entdeckung der Röntgenstrahlen am 8. November 1895



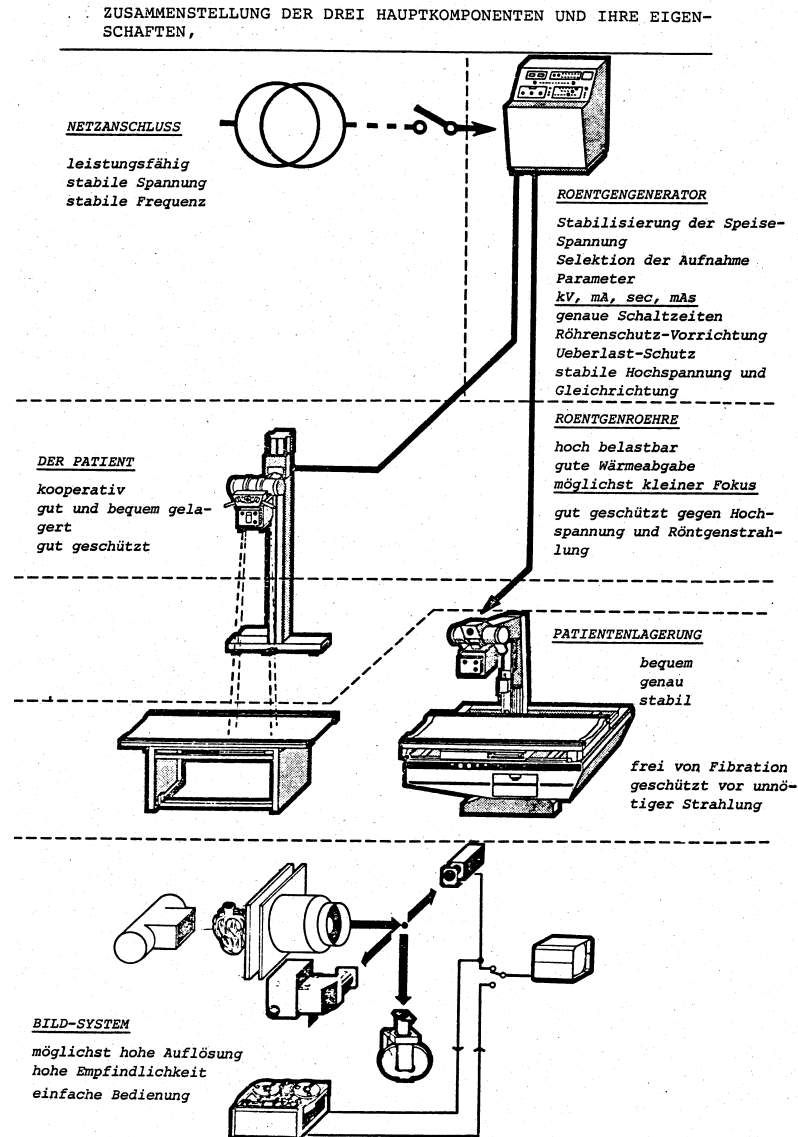
*Hand von Frau Berta Röntgen,
22. Dezember 1895*

Aufbau eines Röntgenanlage

- Hochspannungsgenerator
- Röntgenröhre
- Bildgebendes System



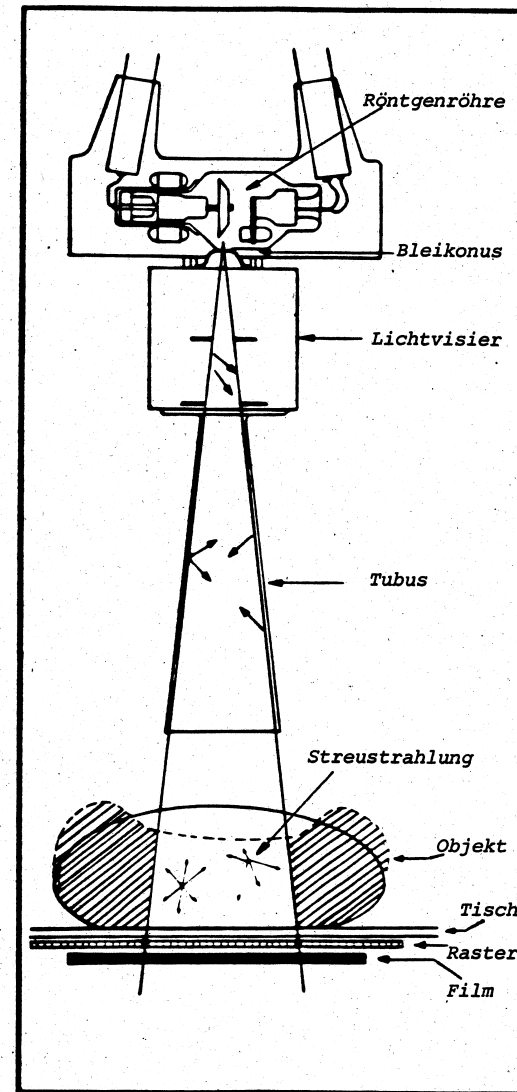
Aufbau einer Röntgenanlage



Aufbau eines Röntgenanlage



Bilderzeugung



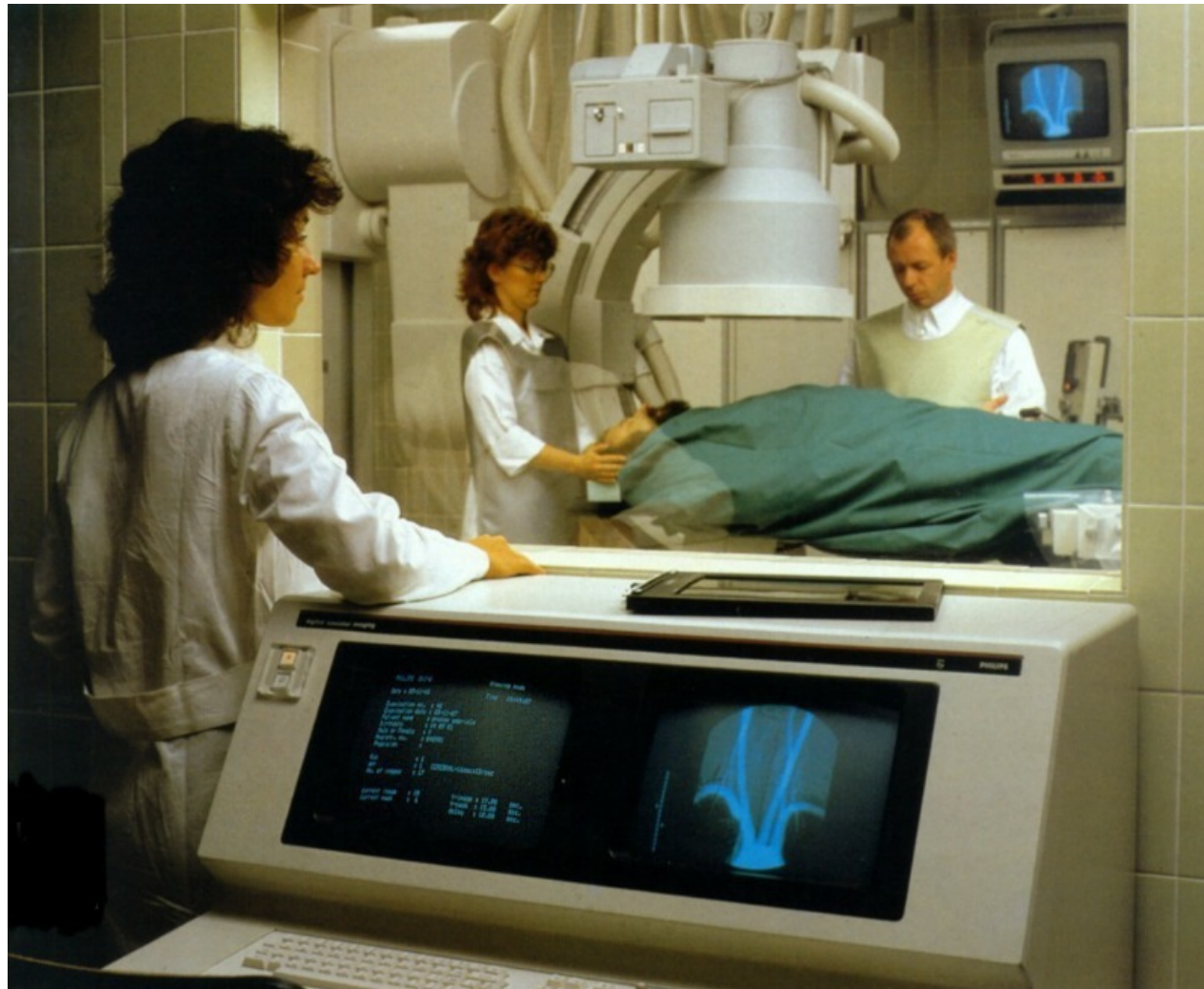
Bilderzeugung



Bilderzeugung



Aufbau eines Röntgenanlage



Bilderzeugung

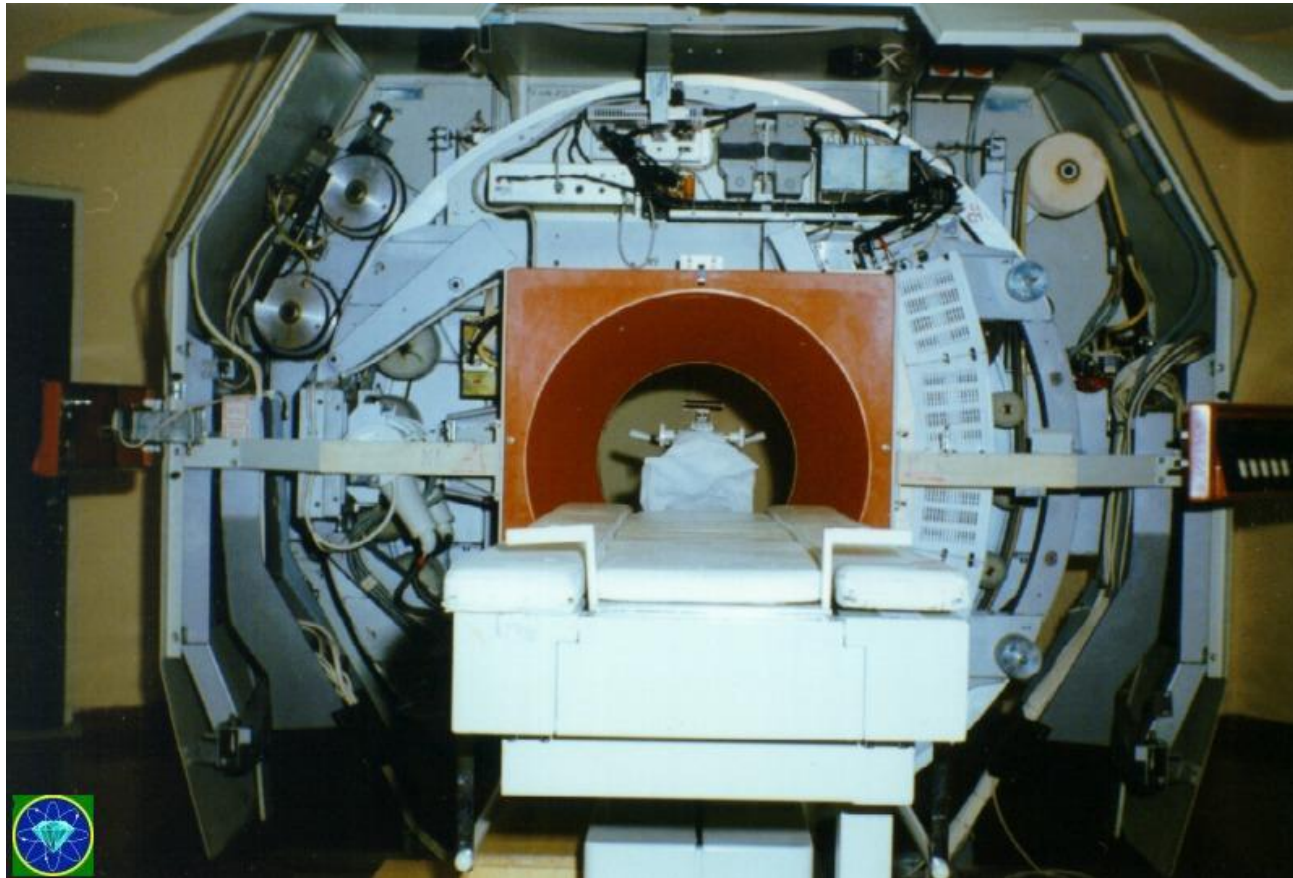


AMS

Bilderzeugung



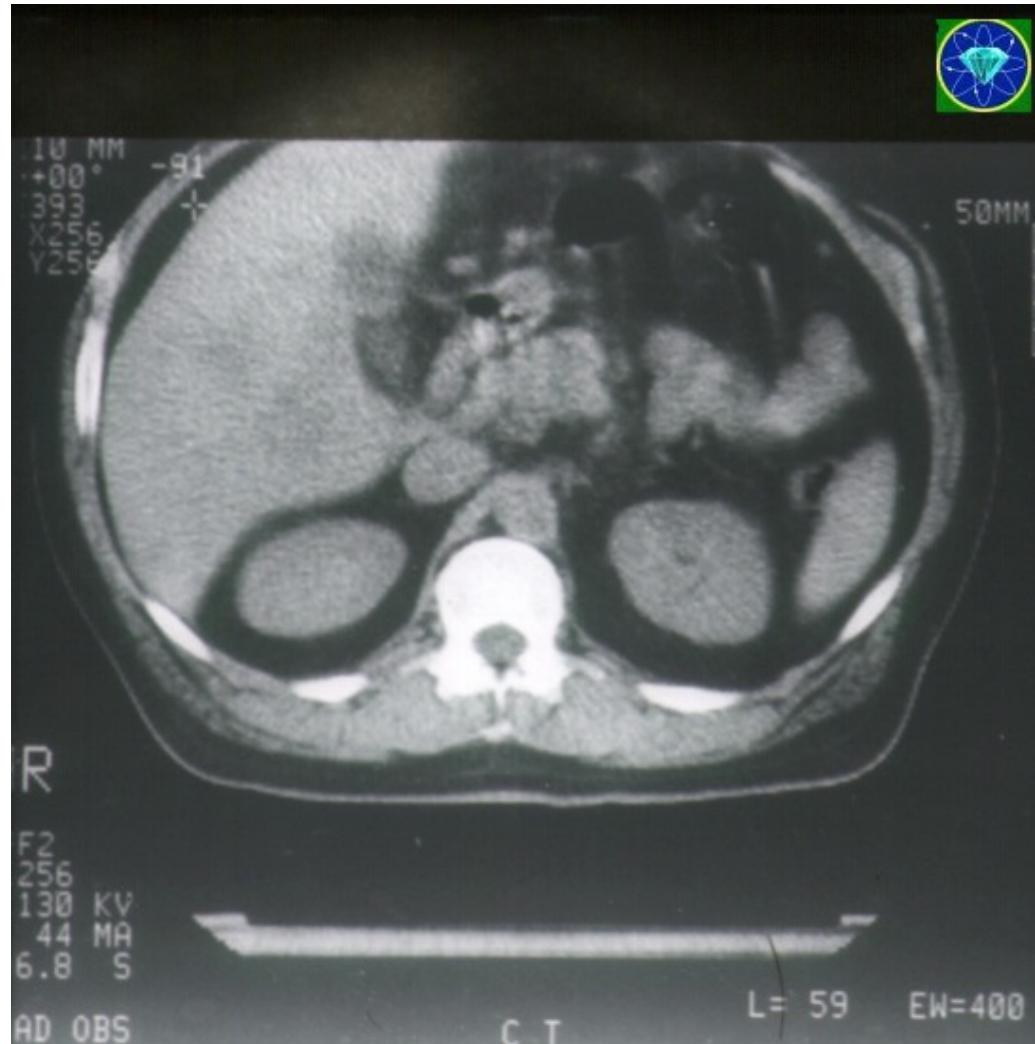
Bilderzeugung



Bilderzeugung



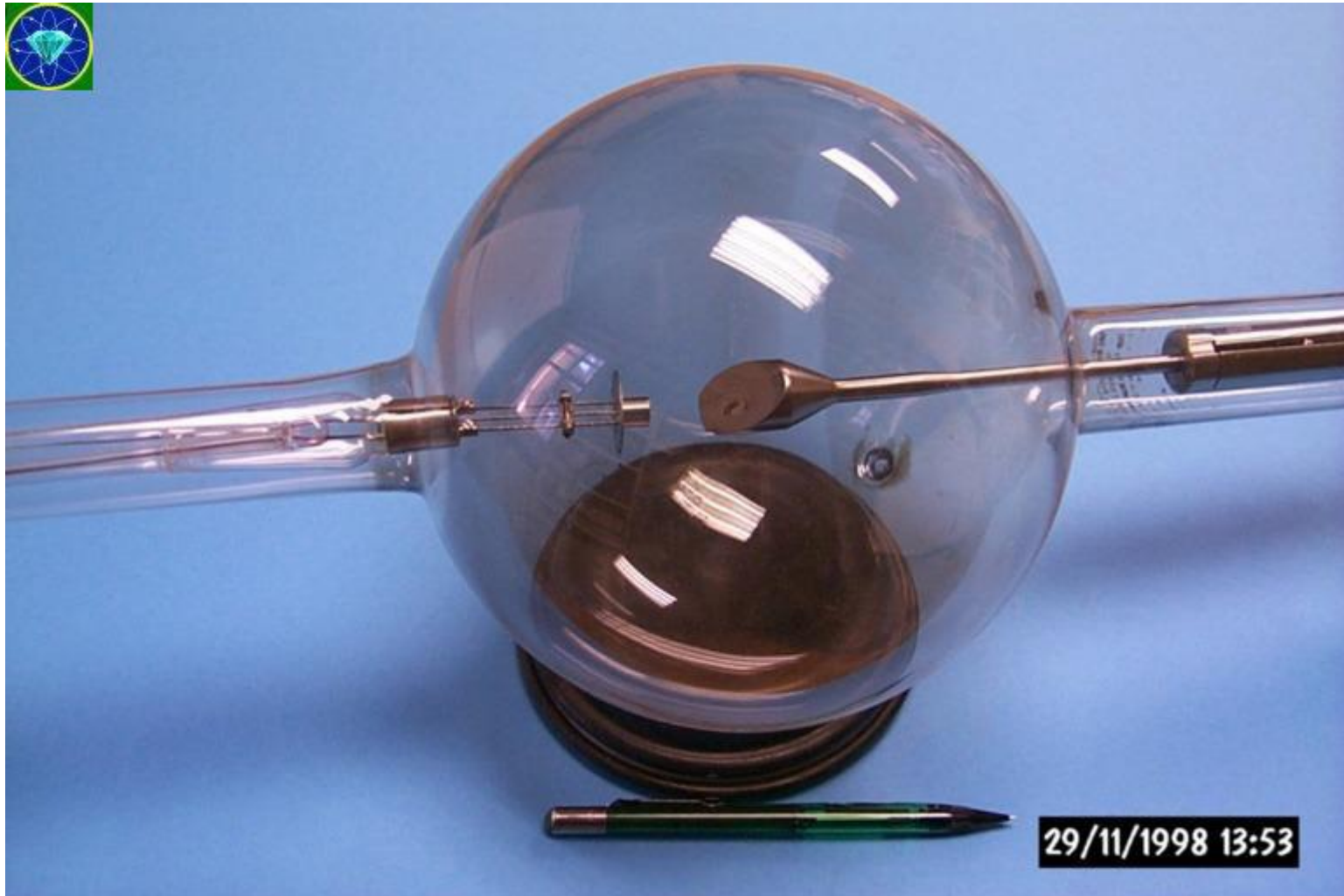
Bilderzeugung



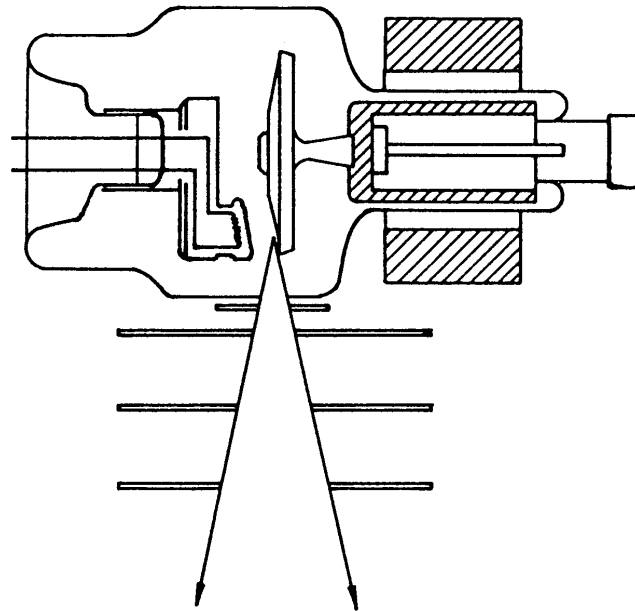
Funktionen einer Röntgenröhre



Funktionen einer Röntgenröhre



Aufbau einer Röntgenröhre



Kathode
Anode
Primärfilter

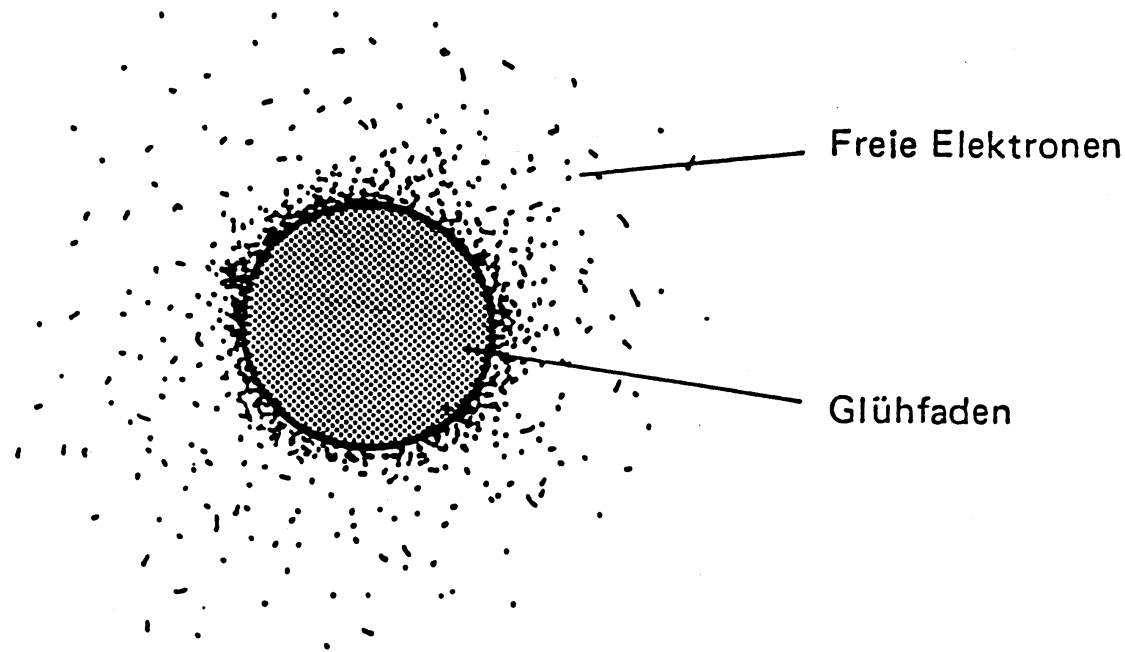
Kühlsystem
Blendensystem
Glasumhüllung

Funktionen einer Röntgenröhre

- **Erzeugung der Elektronen**
- **Beschleunigung der Elektronen in einem elektrischen Feld**
- **Abbremsung der Elektronen in einem geeigneten Material.**



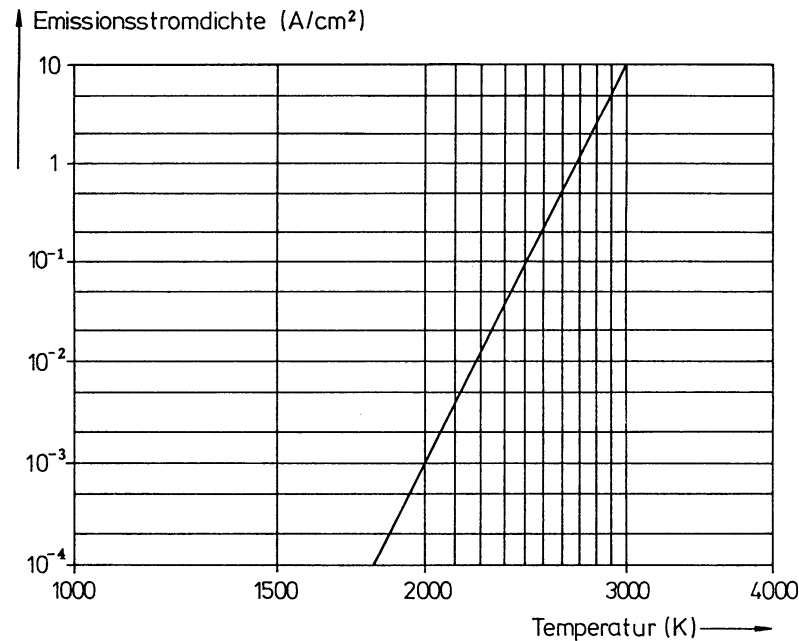
„Erzeugung“ der Elektronen



*Wolke der Elektronen um einen elektrisch geheizten
Glühfaden (Kathode)*

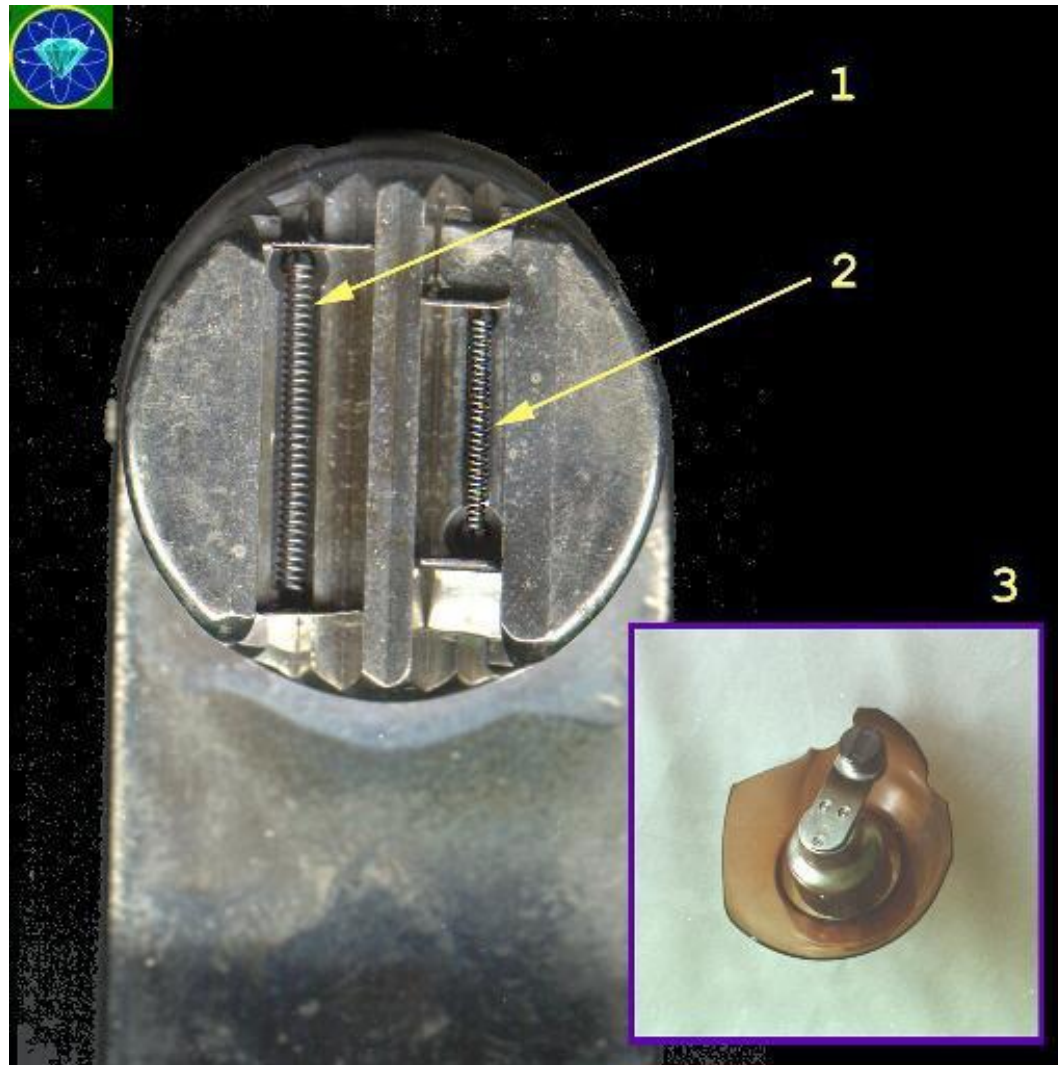
Thermische Emission von Elektronen

$$j = V^w \cdot L_j \cdot \epsilon \frac{k \cdot L}{-M}$$

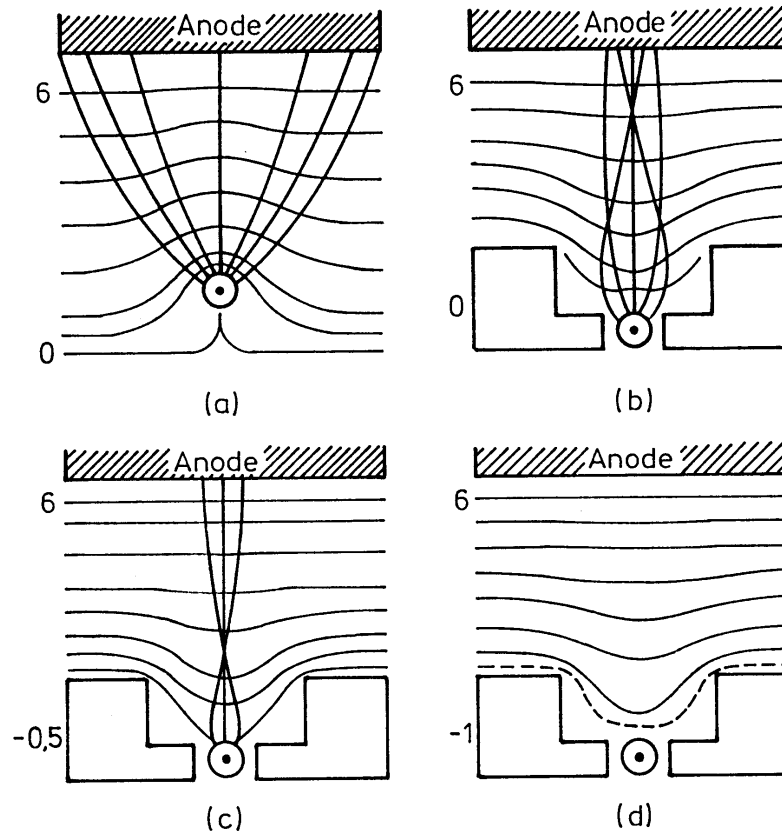


Abhängigkeit der Emissionsstromdichte j an einer Wolframkathode als Funktion der Heiztemperatur T (nach Daten aus [Krestel2]).

Kathode

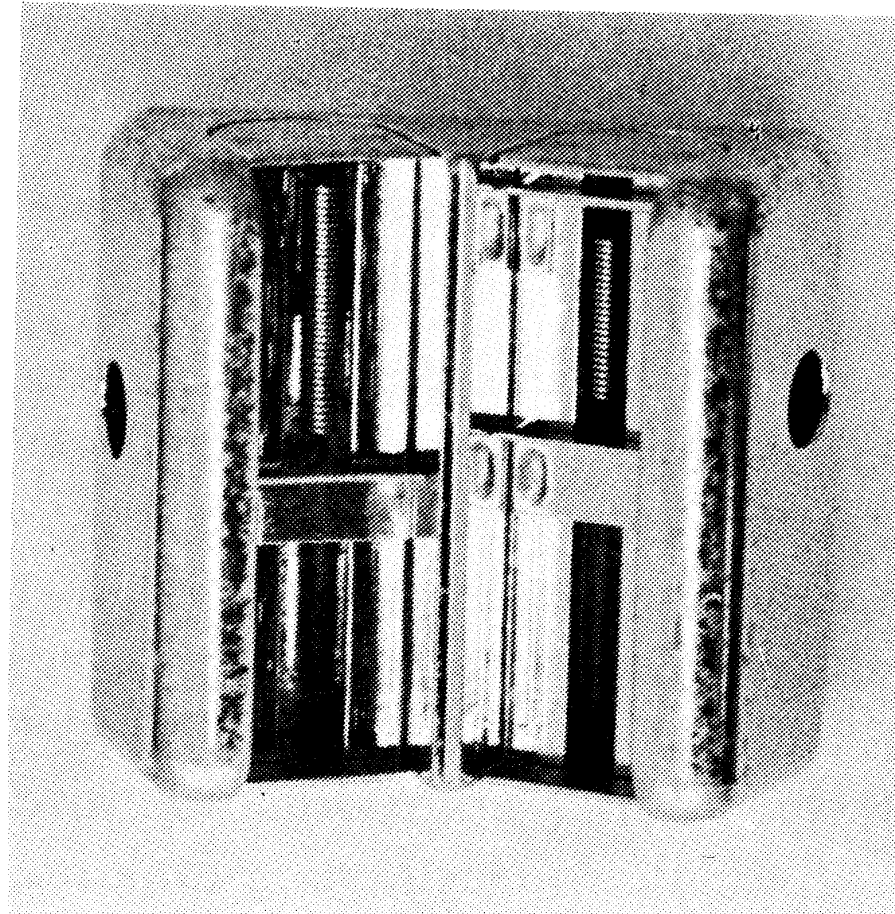


Fokussierung des Elektronenstrahles

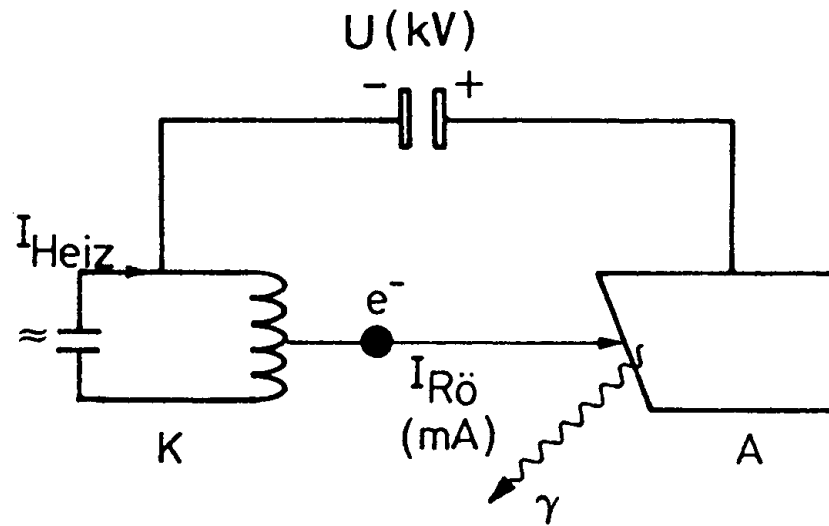


- a) Zyl. Heizwendel
- b+c) fokussierender Wehneltzyl. mit kl. neg. Vorspannung
- d) Negative Sperrspannung

Kathode



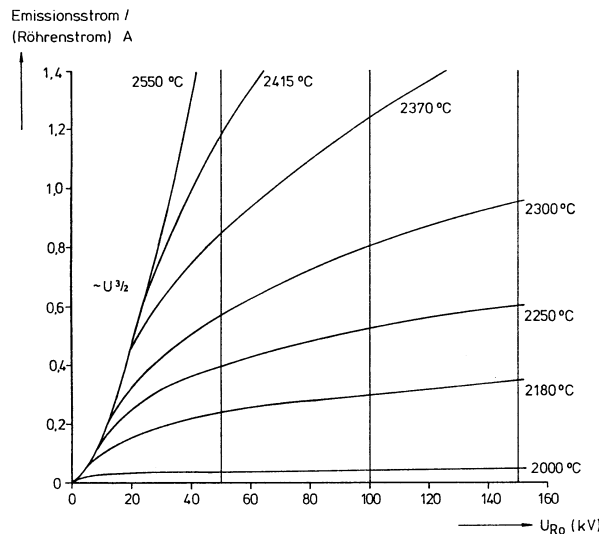
Beschleunigung der Elektronen in einem elektrischen Feld



Raumladungsgesetz von Schottky-Langmuir

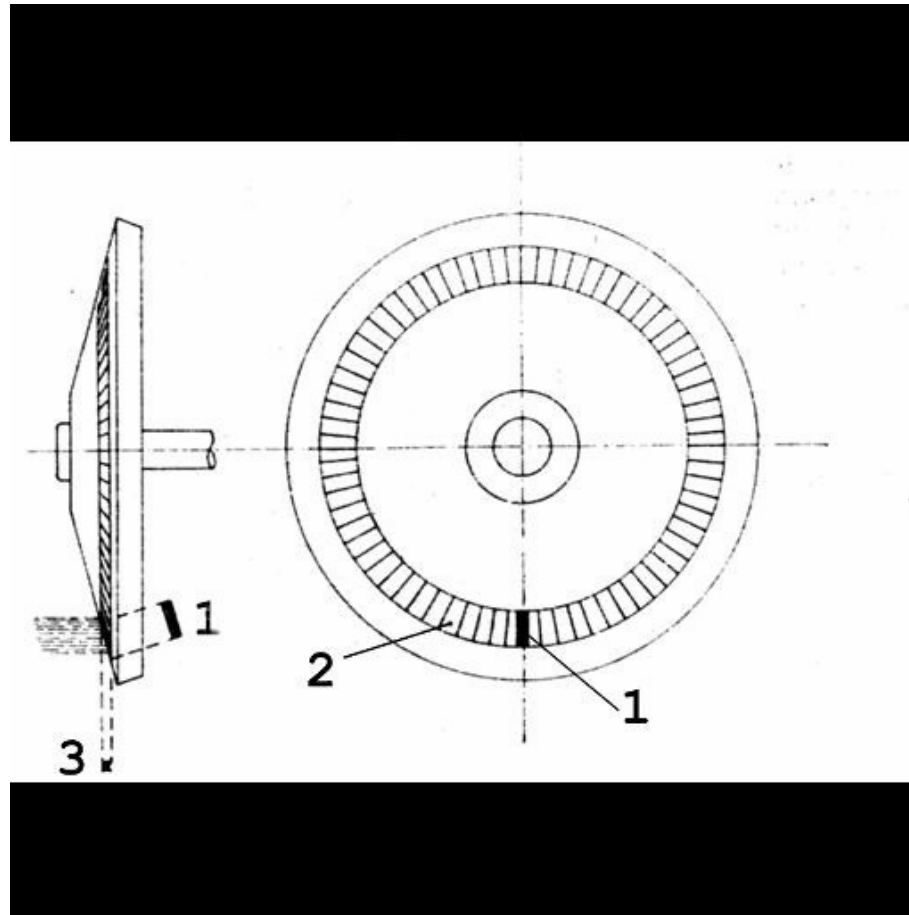
$$I_A = \frac{4}{9} \cdot \epsilon_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m}} \cdot \frac{U_A^{3/2}}{d^2}$$

Röhrenstrom als Funktion von Kathodentemperatur und Anodenspannung

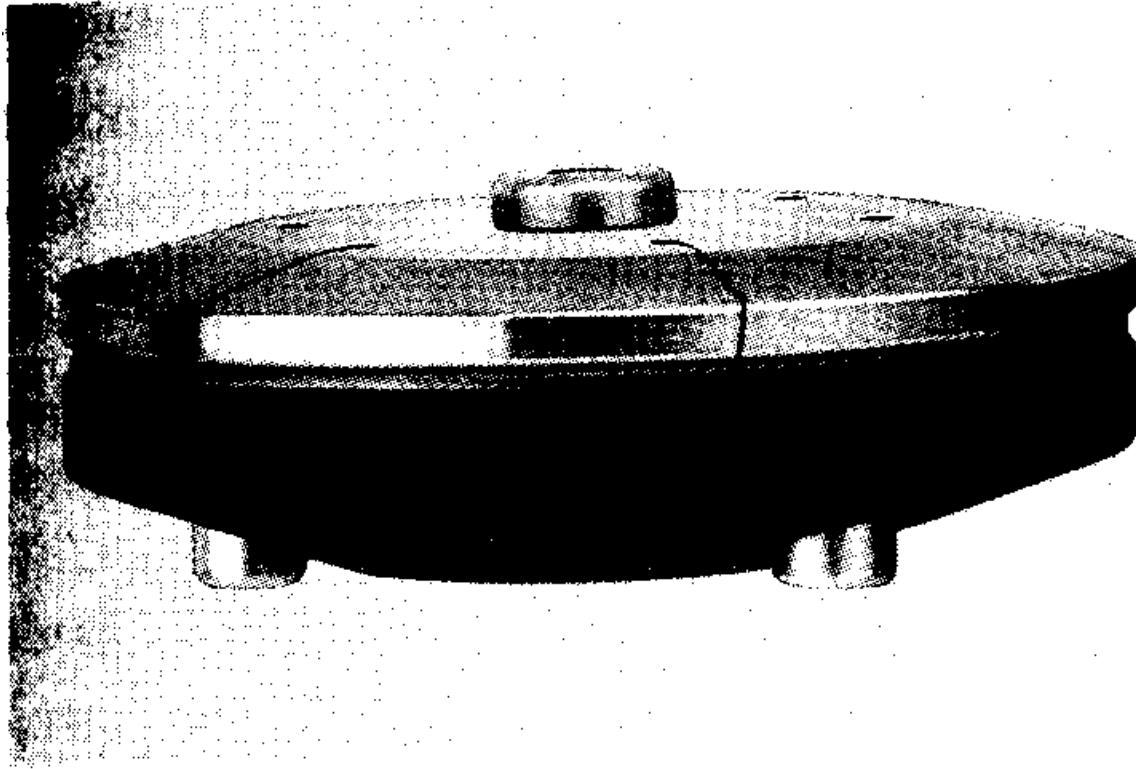


Röhrenstrom I_A als Funktion der Anodenspannung U_A für verschieden Kathodenheizströme bzw. Kathodentemperaturen. Bei kleinen Spannungen zeigt sich die typische $U^{3/2}$ -Abhängigkeit nach (Gl. 1.2.11), bei höheren Spannungen zeigt der zunehmend waagrechte Kurvenverlauf die beginnende Sättigung bei vollständigem Durchgriff (nach [Krestel2]).

Abbremsung der Elektronen in der Anode



Abbremsung der Elektronen in der Anode



Elektronenwechselwirkungen

- **Elastische Atomstöße**
- **Unelastische Stöße mit Atomhüllen (Anregung)**
- **Unelastische Stöße mit Hüllenelektronen (Ionisation)**
- **Elastische Streuung an Atomkernen (Coulombstreuung)**
- **Unelastische Streuung an Atomkernen (Bremsstrahlungserzeugung)**
- **Kernreaktionen**
- **Cerenkov-Effekt**



Elektronenwechselwirkungen

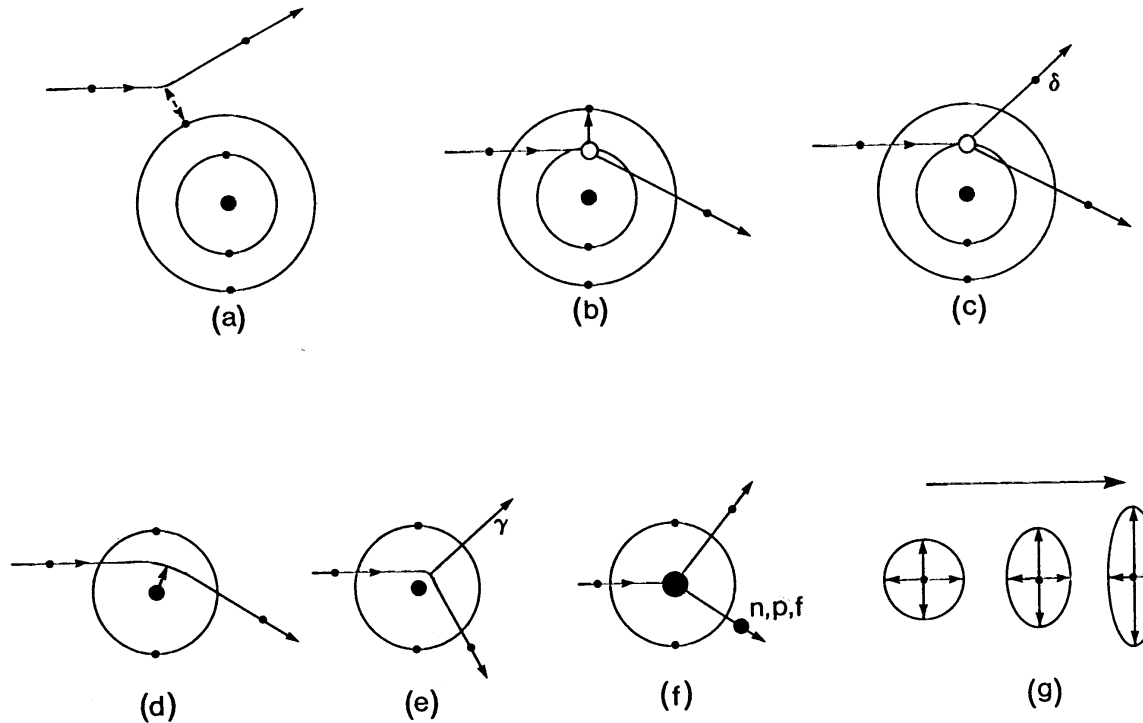


Fig. 5.1: Wechselwirkungen von Elektronen mit Materie. Oben: Hüllenwechselwirkungen (a: elastische Streuung, b: Anregung von Hüllenelektronen, c: Ionisation mit δ -Elektron). Unten: Wechselwirkungen mit dem Atomkern (d: elastische Coulombstreuung, e: inelastische Kernstreuung, Strahlungsbremmung, f: elektroneninduzierte Kernreaktionen). g: Verformung des elektrischen Feldes und Erhöhung des Wechselwirkungsradius mit zunehmender Geschwindigkeit des Elektrons (Lorentzkontraktion).

Stossbremsvermögen S_{col}

$$S_{\text{col}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{col}}$$

$$E_e < 500 \text{ keV}$$

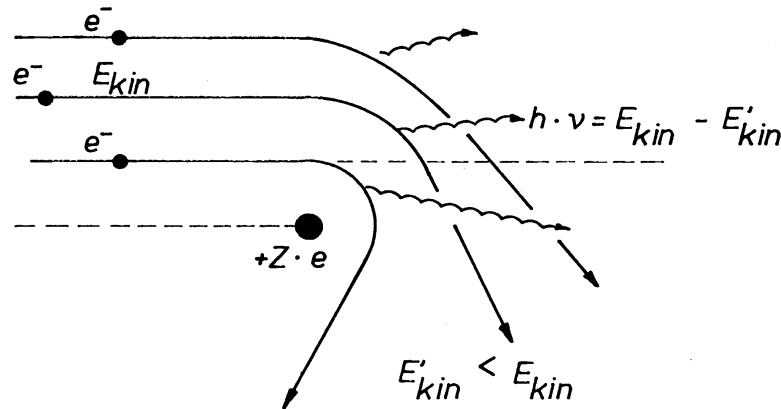
$$S_{\text{col}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{col}} \propto \rho \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{v^2} \propto \rho \cdot \frac{m_e}{E}$$

$$E_e > 500 \text{ keV}$$

$$S_{\text{col}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{col}} \propto \rho \cdot \frac{Z}{A} \cdot R$$

Strahlungsbremsvermögen S_{rad}

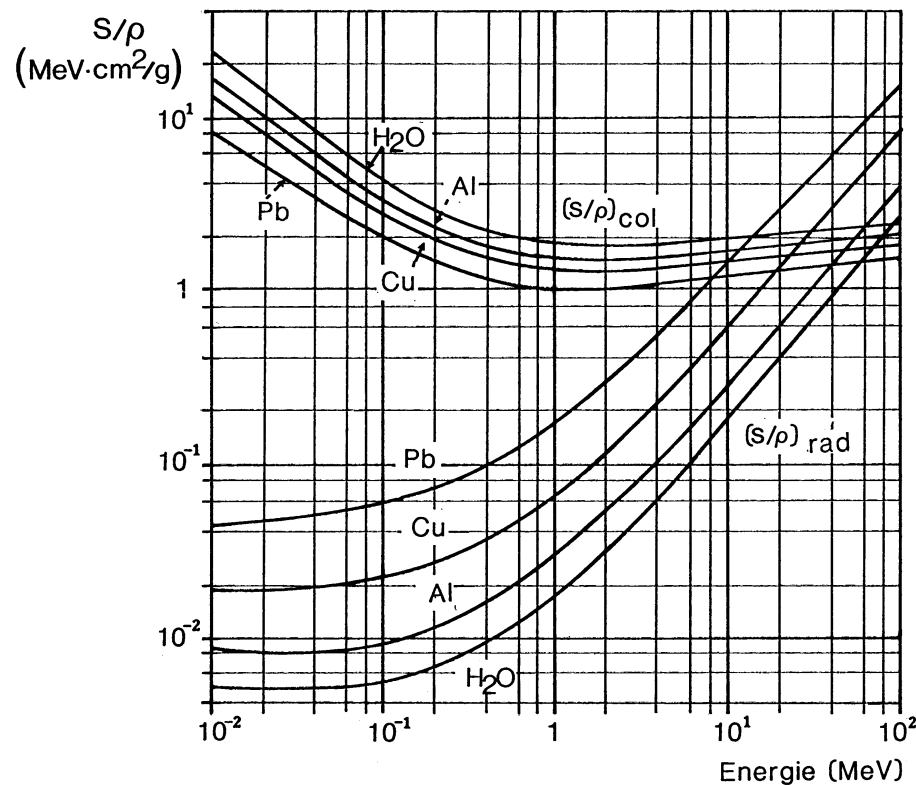
$$S_{\text{rad}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} \propto \rho \cdot \left(\frac{e}{m} \right)^2 \cdot Z^2 \cdot E$$



: Entstehung elektromagnetischer Strahlung bei der Strahlungsbremsung von Elektronen im elektrischen Feld eines Atomkernes der Ladung $Z \cdot e$. Die Differenz der kinetischen Elektronenenergien vor und nach der Ablenkung wird in Form sogenannter Bremsstrahlung ($h \cdot \nu$) emittiert. Der Energieverlust der Elektronen hängt vom Stoßparameter der einlaufenden Elektronen ab. Die wichtigste Anwendung dieser Art von Strahlungsbremsung ist die Erzeugung von Bremsstrahlung in der Röntgenröhre.

Totales Massenbremsvermögen

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{tot}} = \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{col}} + \left(\frac{S}{\rho}\right)_{\text{rad}}$$



Totales Bremsvermögen für Elektronen

$$S_{\text{tot}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{tot}} = S_{\text{col}} + S_{\text{rad}}$$

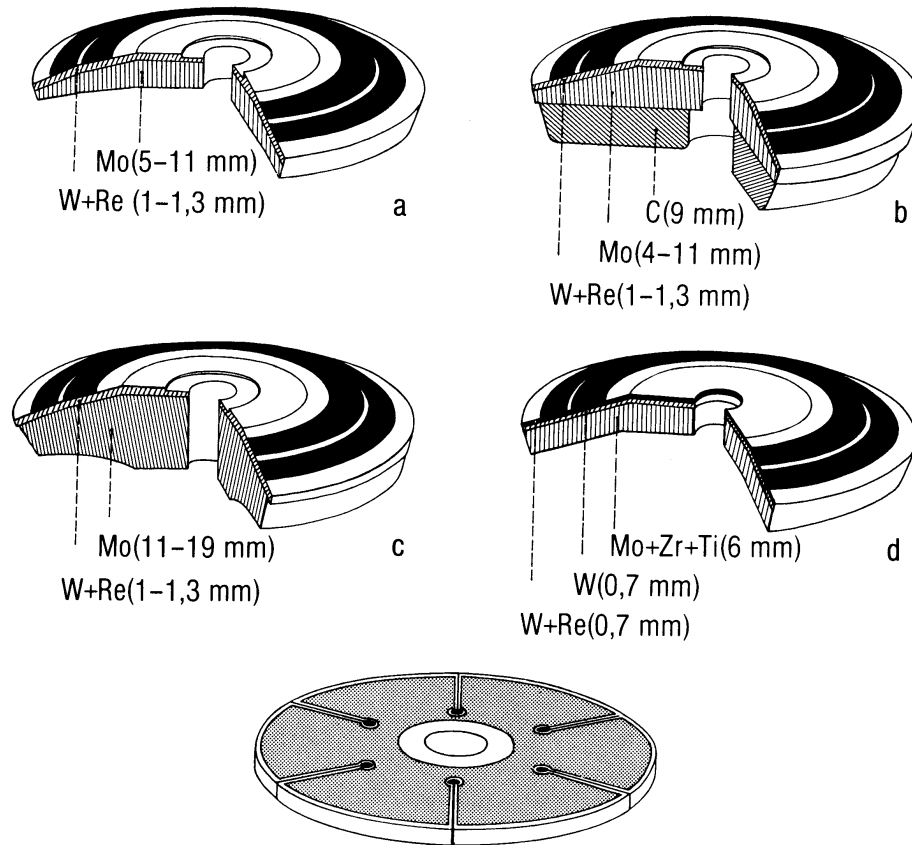
wobei

$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{col}}} \approx \frac{Z \cdot E}{1400} \quad (\text{für } E < 150 \text{ keV})$$

Die Energie E ist dabei in MeV anzugeben



Anodenbauformen



Kühlung der Anode

Strahlungskühlung

Wärmeleitung

Wärmespeicherung

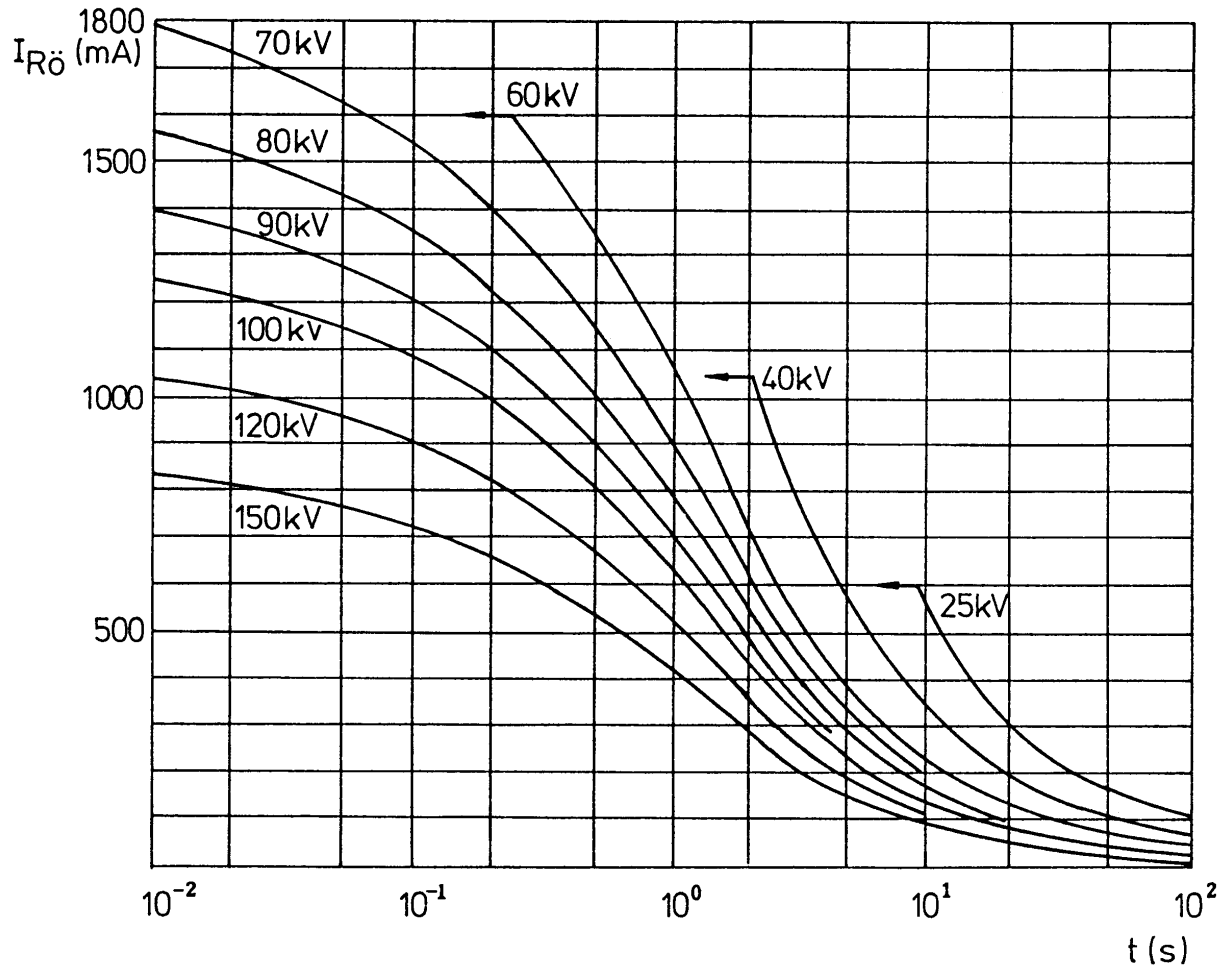


Wärmeleitung, Wärmespeicherung

Element	Ordnungs- zahl Z	Schmelz- punkt (K)	spez. Wärmeka- pazität (J/g·K)	Wärmeleitfähig- keit (W/cm·K)	Eignung
Graphit	6	3650	0.710	≈ 0.9	nur als Wärmespeicher an Drehanoden
Kupfer	29	1083	0.386	3.98	besten Wärmeleiter und Wärmespeicher, niedri- ger Schmelzpunkt
Molybdän	42	2620	0.247	1.38	mechanisch sehr stabil
Tantal	73	2996	0.141	0.55	schlechtester Wärme- leiter
Wolfram	74	3390	0.135	1.3	hohe Ausbeute, sehr hoher Schmelzpunkt
Rhenium	75	3180	0.137	0.71	6% Beimischung zu W verhindert Versprödung der Anodenoberfläche
Platin	78	1769	0.132	0.71	höchste Ausbeute

Tab. Materialeigenschaften einiger Substanzen zur Herstellung von Röntgenröhren-Anoden (Daten nach [Kohlrausch]). Die durch den Dampfdruck der Anode begrenzte zulässige Betriebstemperatur von Anoden beträgt etwa 70% der Schmelztemperatur.

Belastungskurven für Röntgenröhren



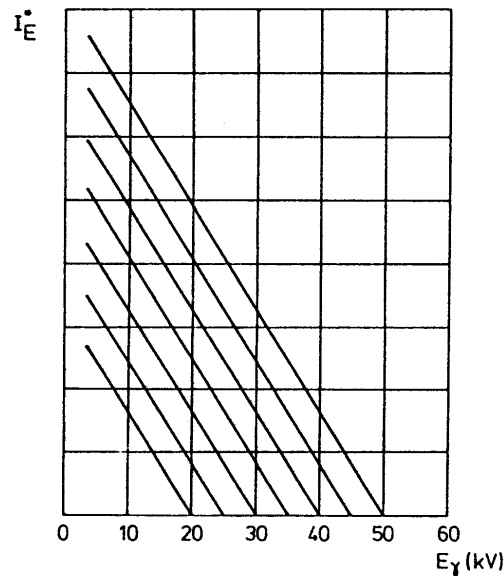
Röntgenstrahlung

- **die kontinuierliche Röntgenbremsstrahlung**
- **und die diskrete charakteristische Röntgenstrahlung.**

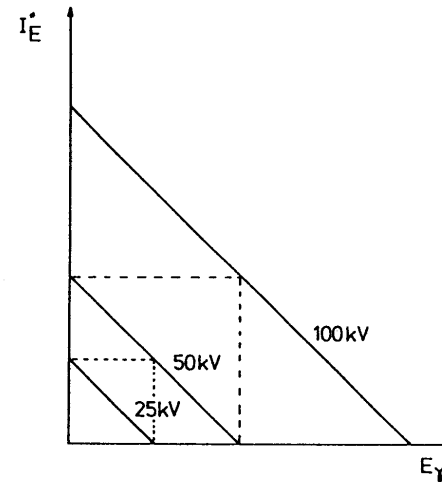


Intensitätsspektrum der Röntgenbremsstrahlung

$$I^*(E_\gamma) = b \cdot (E_g - E_\gamma) \text{ mit der Randbedingung } E_g \geq E_\gamma$$



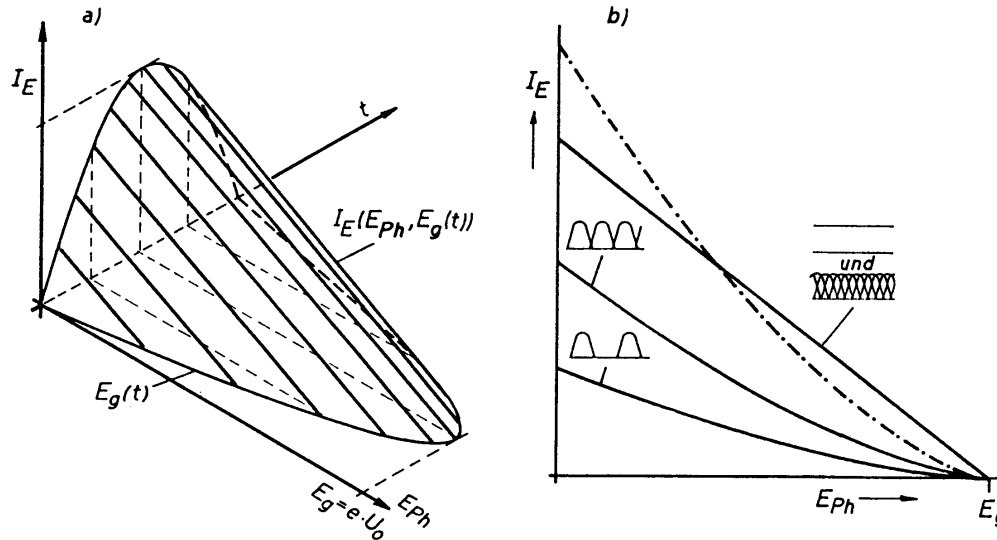
(a)



(b)

(a): Schematische Darstellung der Veränderung der Bremsstrahlungs-Intensitätsspektren mit der Beschleunigungsspannung an Röntgenröhren (alle Spektren ohne Filterung), (b): Ver- vierfachung bzw. Viertelung der Gesamtintensität im Röntgenspektrum bei verdoppelter bzw. halbierter Röhrenspannung.

Abhängigkeit des Bremsstrahlungsspektrums vom zeitlichen Spannungsverlauf



Intensitätsverteilungen der Röntgenbremsstrahlung bei zeitlich variabler Beschleunigungsspannung der Elektronen. (a): Zeitliche Folge der Intensitätsverteilungen beim Ein-Puls-Generator (Halbwellenbetrieb ohne Kondensatorglättung). (b): Intensitätsverteilung beim Ein-Puls- und Zwei-Puls-Generator (ohne Kondensatorglättung) sowie bei konstanter Beschleunigungsspannung der Elektronen für jeweils gleichen Röhrenstrom. Zum Vergleich (strichpunktiert): Intensitätsverteilung beim Ein-Puls- und Zwei-Puls-Generator mit gleicher Gesamtintensität der Bremsstrahlungserzeugung wie beim Gleichspannungsbetrieb.

Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Röntgenbremsstrahlungen

Anodenspannung $< 0.5 \text{ MeV}$; $k = 1.1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1}$

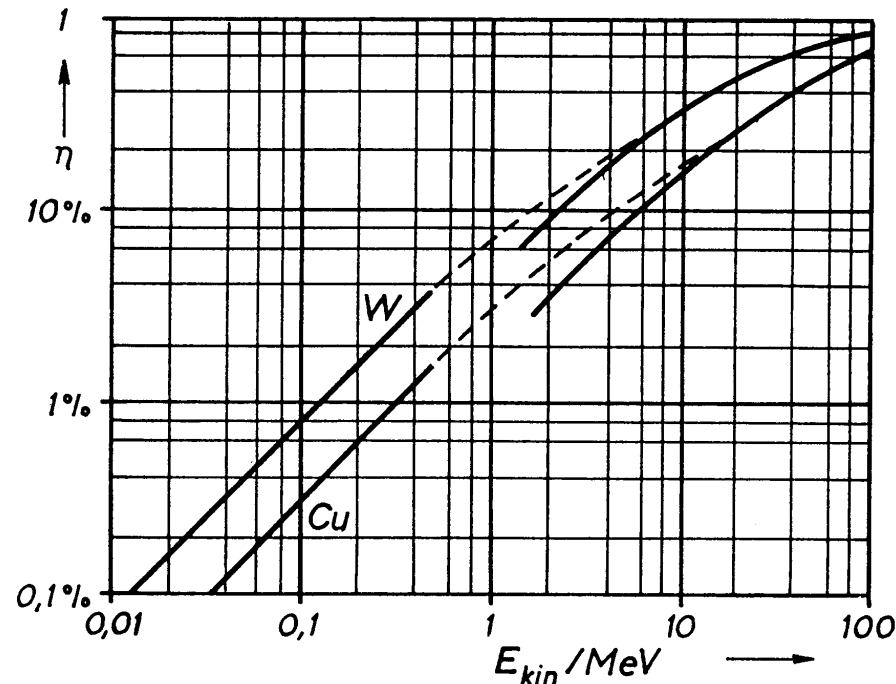
$$\eta = \frac{P_{\text{strl}}}{P_{\text{el}}} = \frac{k \cdot Z \cdot I \cdot U^2}{I \cdot U} = k \cdot Z \cdot U$$

Anodenspannung $> 0.5 \text{ MeV}$; $k = 0.6 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1}$

$$\eta = \frac{k^* \cdot Z \cdot U}{1 + k^* \cdot Z \cdot U}$$

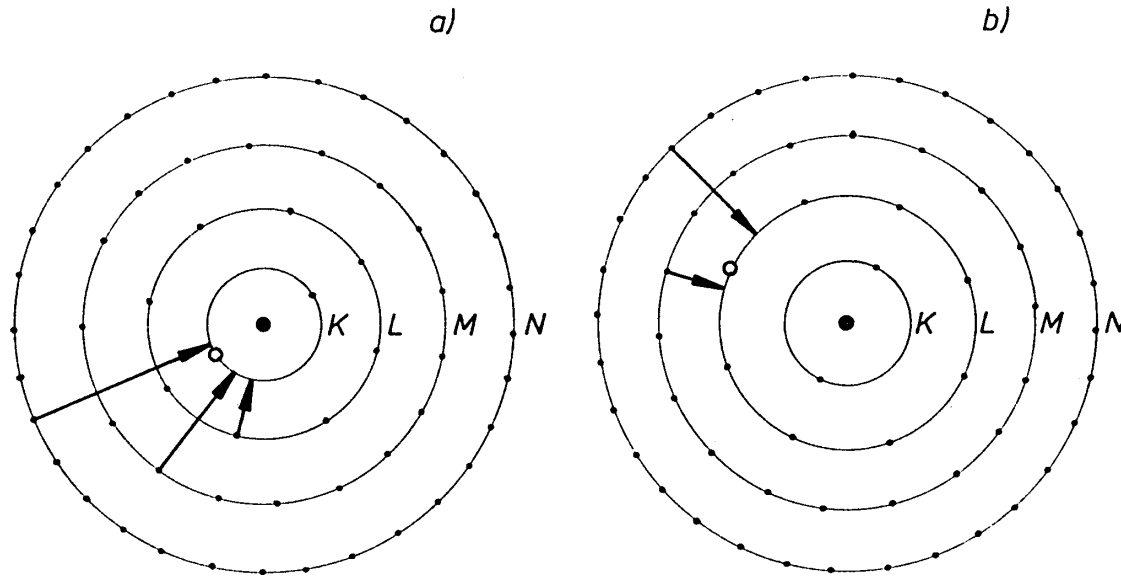


Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Röntgenbremsstrahlungen



Wirkungsgrad η für die Erzeugung von Röntgenbremsstrahlung in dicken Kupfer- und Wolframanoden durch Elektronen der kinetischen Energie $E_{kin} < 0,5$ MeV nach Gl. (1.2.7). Für höhere Elektronenenergien gilt Gl. (1.2.6) nicht mehr, der zugehörige Wirkungsgrad ist statt dessen aus den rechten Kurven zu entnehmen.

Charakteristische Röntgenstrahlung



Zur Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung. (a): Ionisierung eines Atoms in der K-Schale mit anschließender K-Strahlungsemission, (b): in der L-Schale durch Elektronenstoß. Die Darstellung der Schalenradien ist nicht maßstabgerecht, nach der Bohrschen Theorie nehmen die Radien tatsächlich quadratisch mit der Schalennummer n zu ($r \propto n^2$).

Charakteristische Röntgenstrahlung

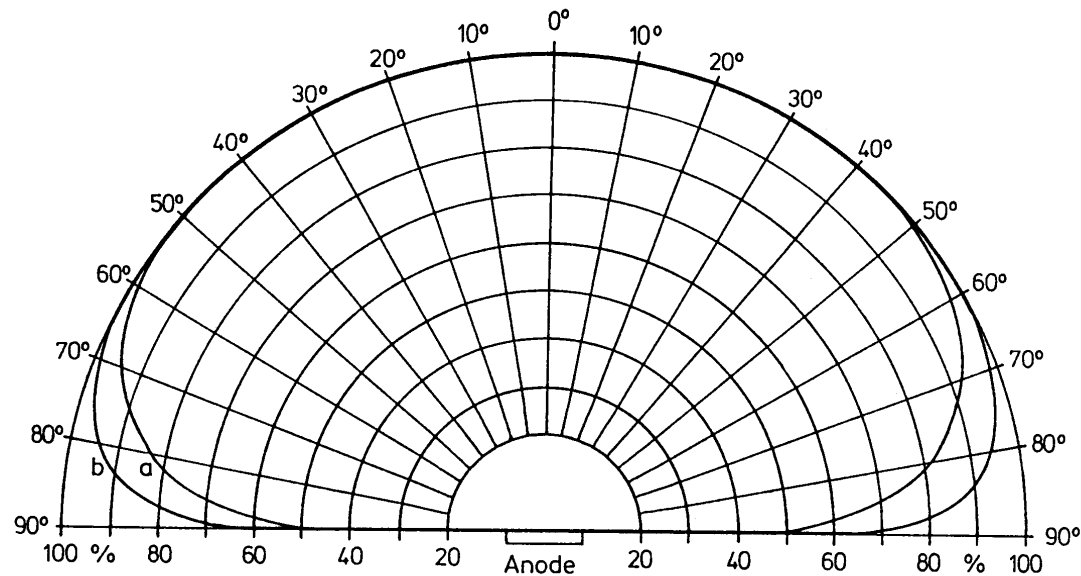
$$I \propto (E_{\text{kin,e}} - E_B)^n$$

$$n = \text{ca. } 2$$

Serie	Linie	Übergang	Energie (keV)	Rel. Intensität (%)
K-Serie	K-Bindungsenergie:	E_K: 69.523 keV		
Linien:	$K\beta_2^1$	$N_{III} \rightarrow K$	69.100	8
	$K\beta_2^2$	$N_{II} \rightarrow K$	69.005	
	$K\beta_1$	$M_{III} \rightarrow K$	67.245	22
	$K\beta_3$	$N_{III} \rightarrow K$	66.951	11
	$K\alpha_1$	$L_{III} \rightarrow K$	59.318	100
	$K\alpha_2$	$L_{II} \rightarrow K$	57.981	57
L-Serie	L-Bindungsenergien:	E_{LI}: 12.099 keV, E_{LII}: 11.542 keV, E_{LIII}: 10.205 keV		
Linien:	$L\gamma_1$	$N_{IV} \rightarrow L_{II}$	11.287	9
$L\beta_2$	$L\beta_2$	$N_V \rightarrow L_{III}$	9.962	22
$L\beta_1$	$L\beta_1$	$M_{IV} \rightarrow L_{II}$	9.673	52
$L\alpha_1$	$L\alpha_1$	$M_V \rightarrow L_{III}$	8.398	100
$L\alpha_2$	$L\alpha_2$	$M_{IV} \rightarrow L_{III}$	8.336	11
M-Serie	M-Bindungsenergien:	E_{MI}: 2.817 keV, E_{MII}: 2.572 keV, E_{MIII}: 2.278 keV, E_{MIV}: 1.869 keV, E_{MV}: 1.807 keV		
Linien:	$M\gamma$	$N_V \rightarrow M_{III}$	2.035	
	$M\beta$	$N_{VI} \rightarrow M_{IV}$	1.835	
	$M\alpha_1$	$N_{VII} \rightarrow M_V$	1.775	
	$M\alpha_2$	$N_{VI} \rightarrow M_V$	1.773	

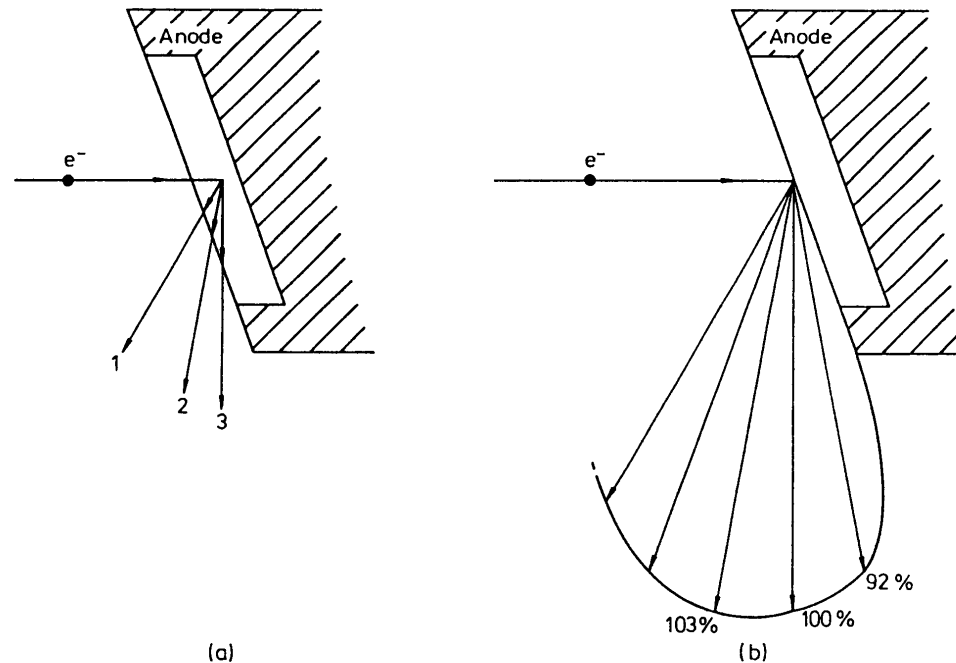
Energien der wichtigsten Elektronenübergänge im Wolframatom ($Z = 74$). Neben der historischen Bezeichnung (nach Siegbahn) ist der Elektronenübergang und die Bindungsenergie­differenz der beteiligten Niveaus angegeben. Die relativen Intensitäten beziehen sich auf den jeweils stärksten Übergang der Serie. Nicht aufgeführte Übergänge sind verboten oder stark behindert.

Winkelverteilung der Röntgenstrahlung



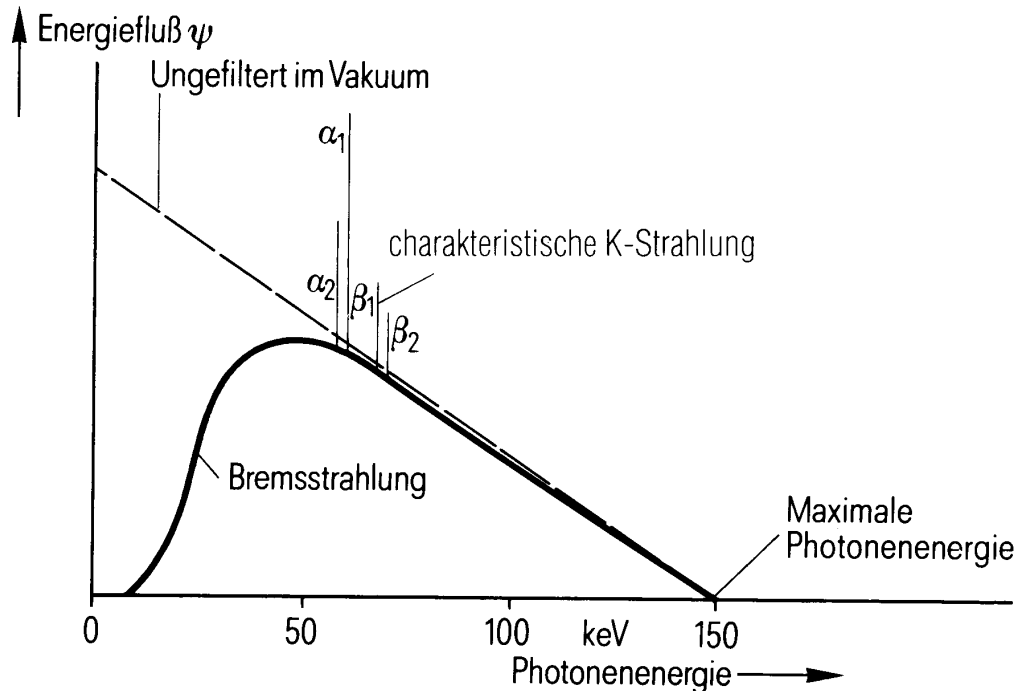
Polardiagramme der Intensitätsverteilung von 70-kV-Röntgenbremsstrahlung (a) ungefilterte Strahlung, (b) mit 10 mm Aluminium gefilterte Strahlung (nach Daten von [Morneburg]).

Der Heel-Effekt



Darstellung des Heel-Effekts für die Energieflußdichte von Röntgenstrahlung für eine Wolframanode mit schrägem Anodenwinkel. (a): Zustandekommen der richtungsabhängigen Schwächung der Röntgenquanten im Anodenmaterial, (b): Experimentelles Polardiagramm der Energieflußdichte als Funktion der Emissionsrichtung einschließlich Gehäuse und Isolieröl-Schwächung (Erläuterung s. Text).

Ungefiltertes und gefiltertes Röntgenspektrum



Energieverteilung der
gefilterten Strahlung
einer Wolframanode
(schematisch);
Bremspektrum und die
charakteristische
K-Strahlung

Expositionsparameter

Filterung [mm Al oder mm Cu]

Röhrenstrom [mAs-Produkt]

Röhrenspannung [kV]

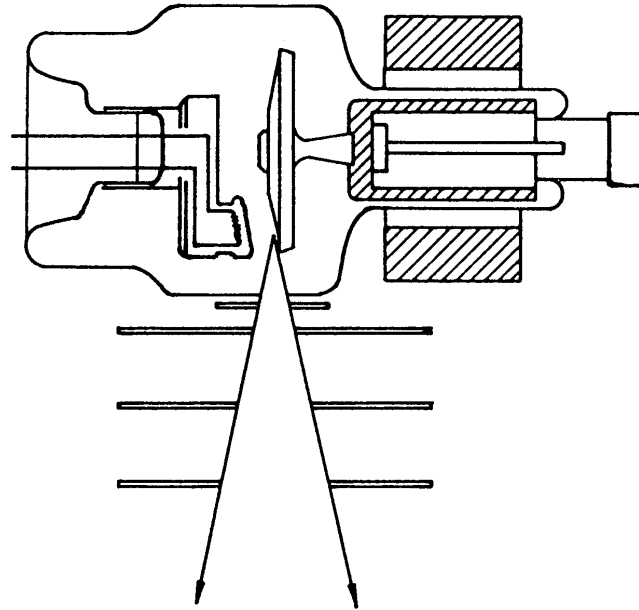
Fokus-Haut-Distanz [FHD]



Expositionsparameter



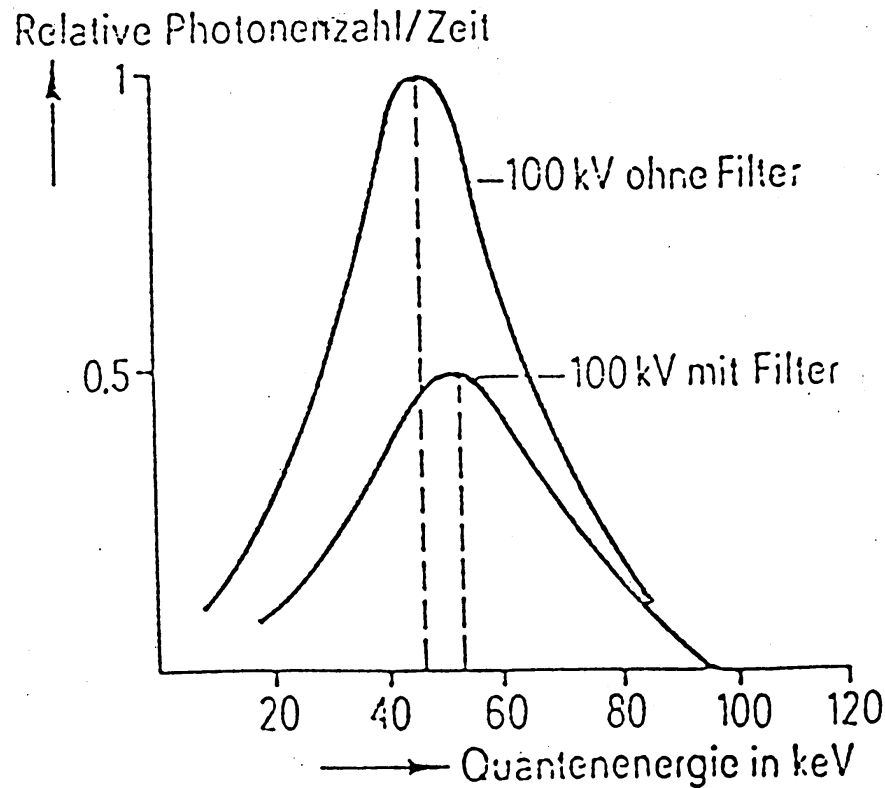
Filterung



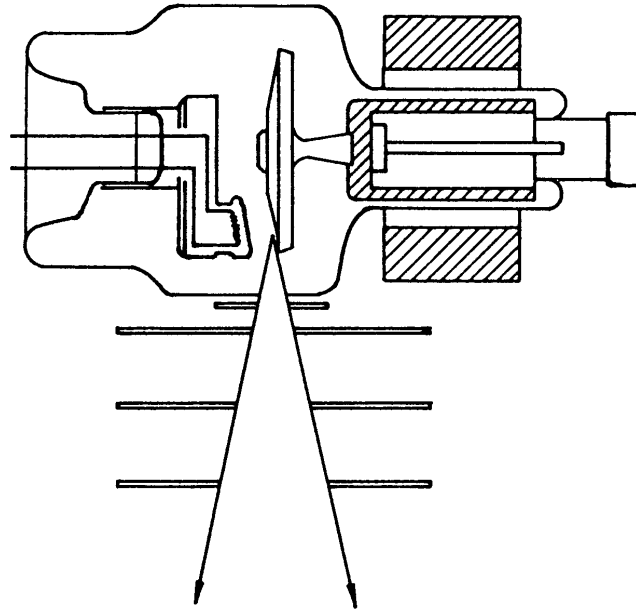
Kathode
Anode
Primärfilter

Kühlsystem
Blendensystem
Glasumhüllung

Filterung [mm Al oder mm Cu]



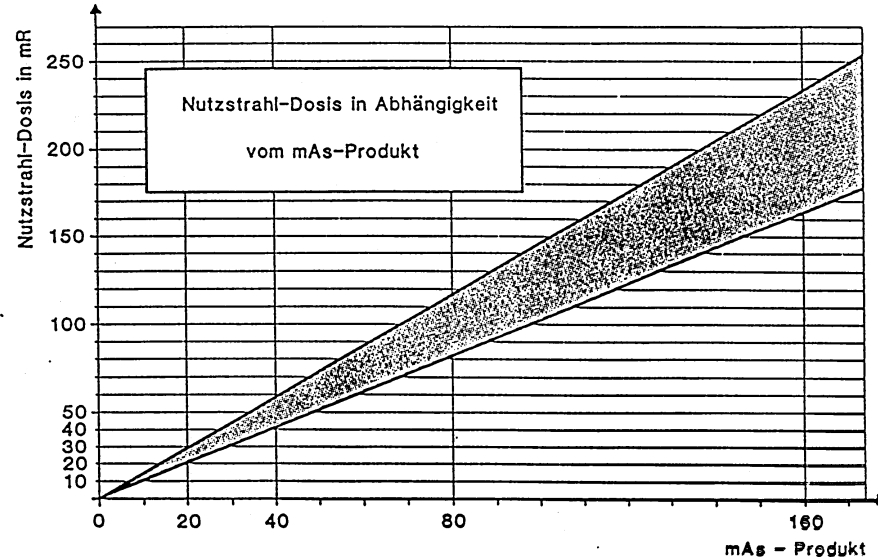
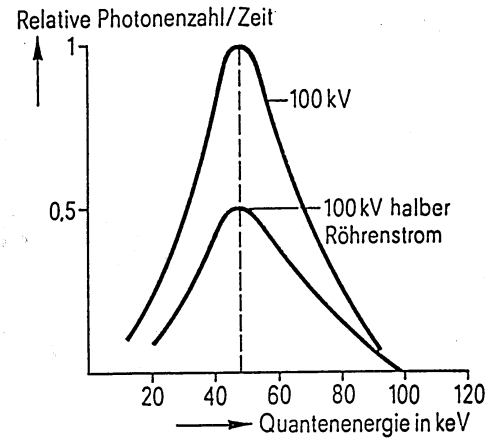
Röntgenröhrenstrom



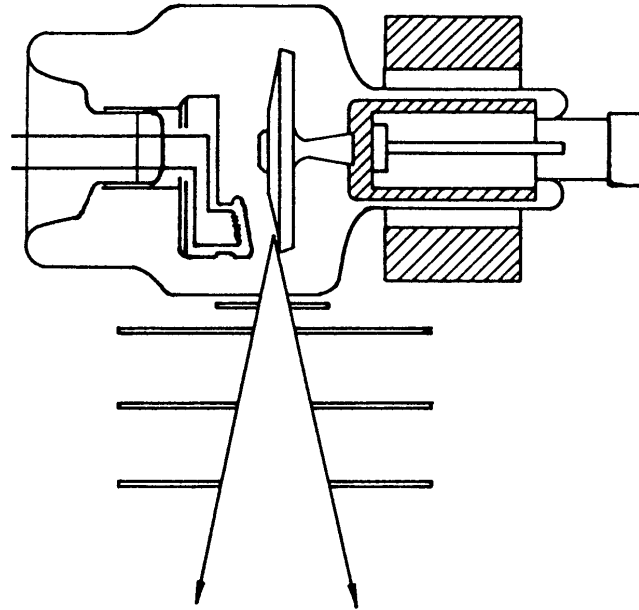
Kathode
Anode
Primärfilter

Kühlsystem
Blendensystem
Glasumhüllung

Röhrenstrom [mAs-Produkt]



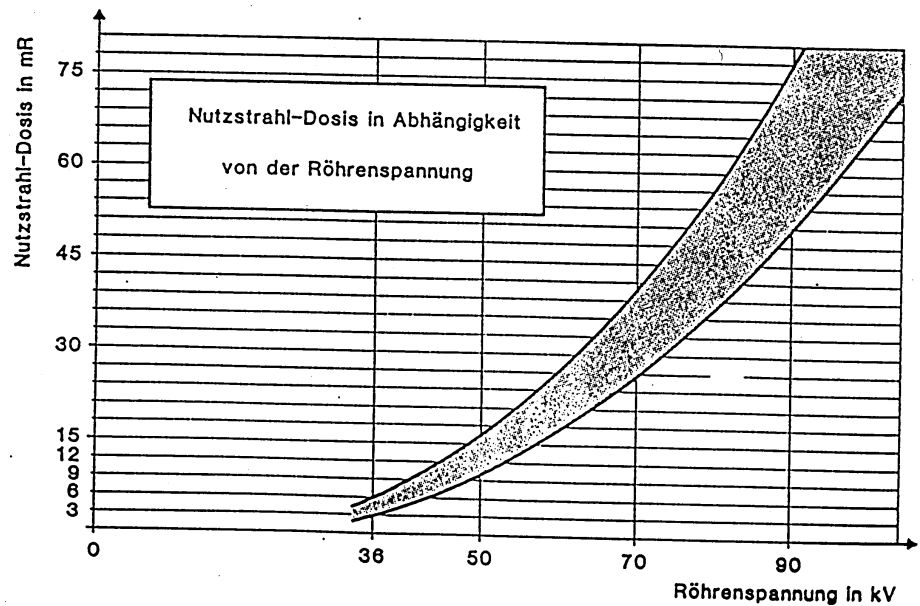
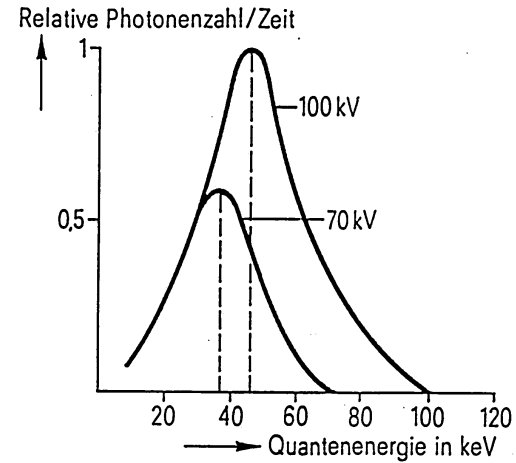
Röntgenröhrenspannung



Kathode
Anode
Primärfilter

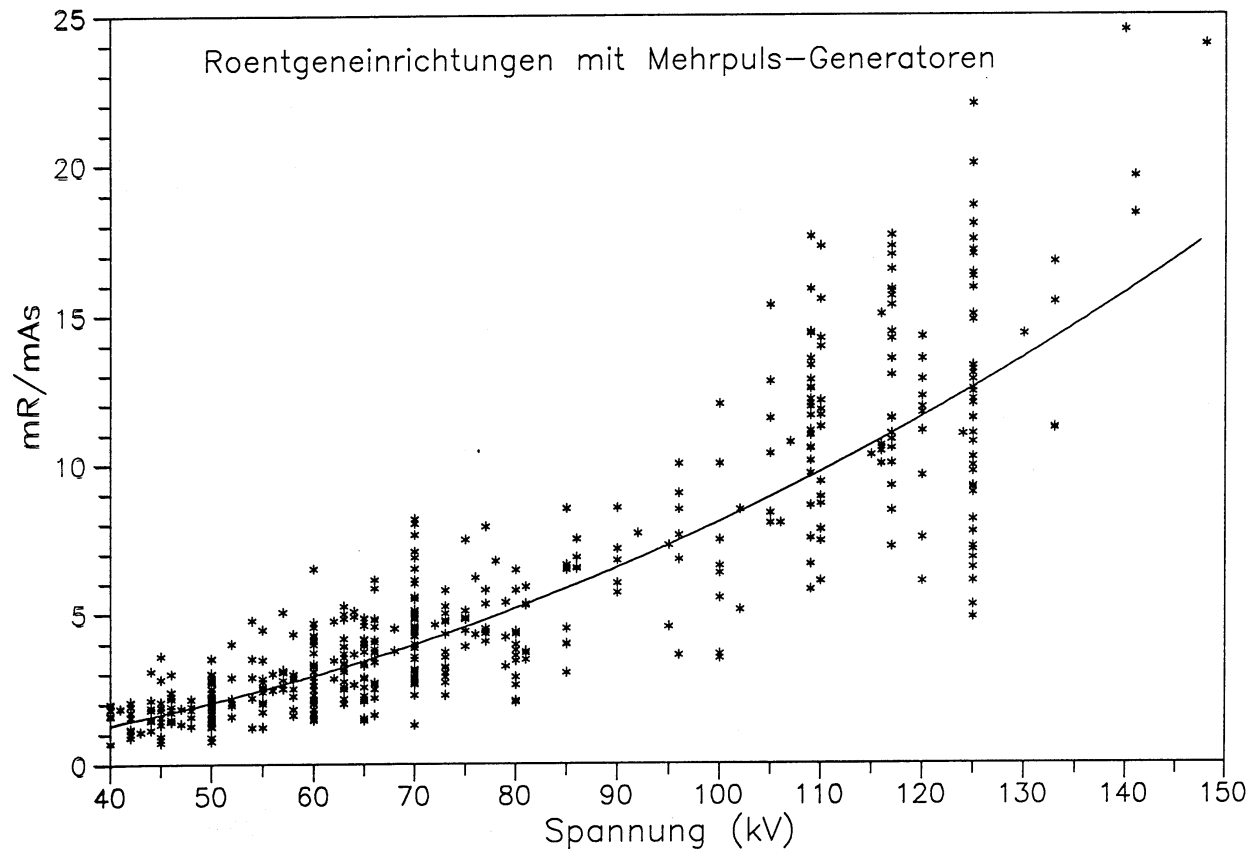
Kühlsystem
Blendensystem
Glasumhüllung

Röhrenspannung [kV]



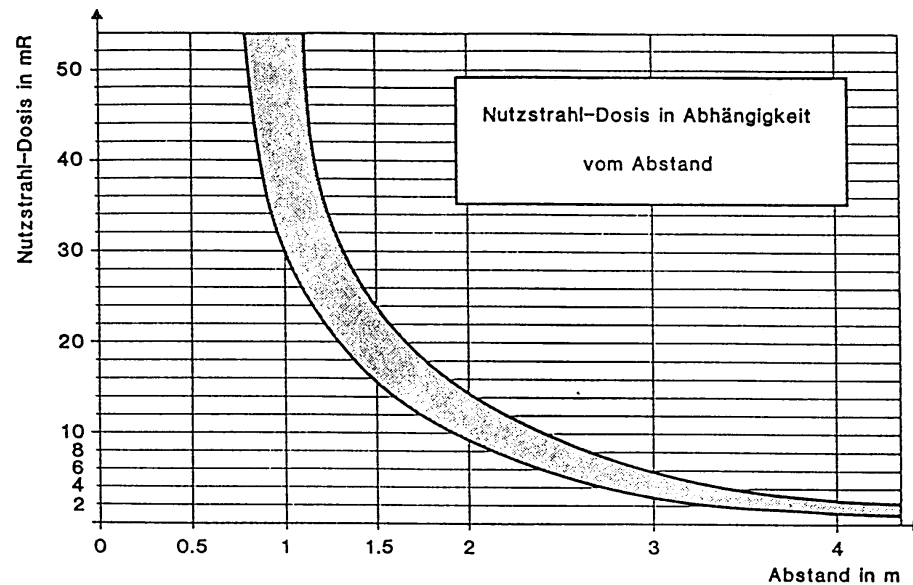
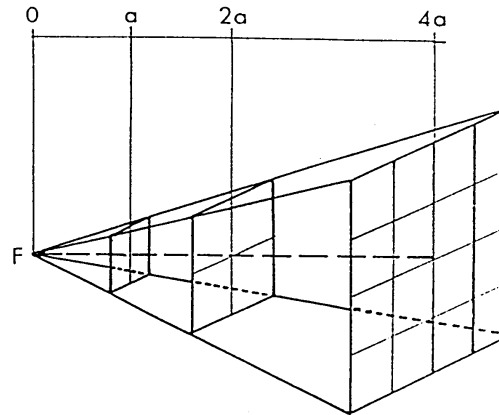
Röhrenspannung [kV]

Verteilung der gemessenen Dosisleistungen (mR/mAs)



Die Messergebnisse wurden auf den Fokus-Kammer-Abstand FKA = 1m umgerechnet.

Fokus-Haut-Distanz [FHD]



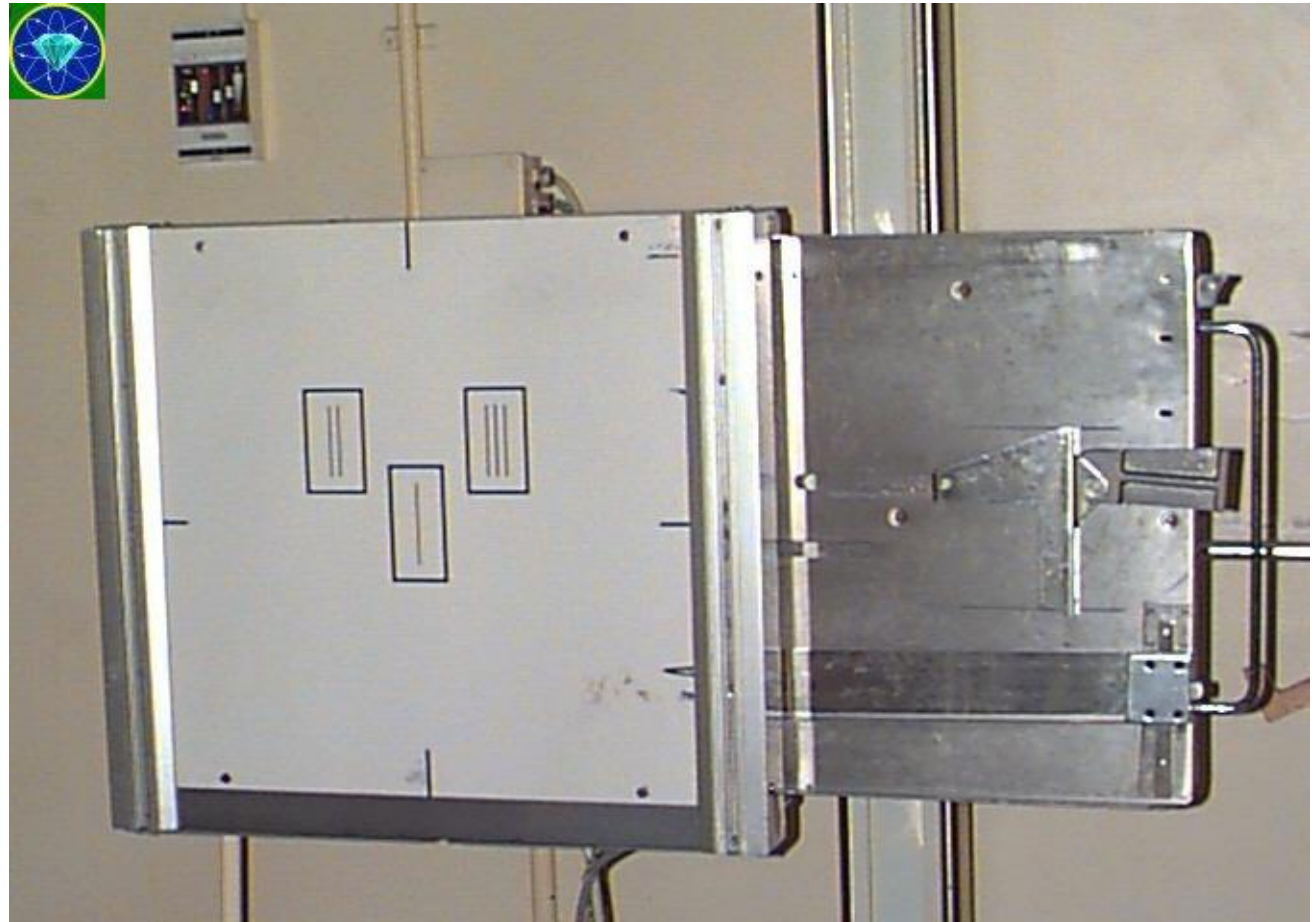
Schätzformel zur Berechnung der Expositionsdosis J

$$J = G \cdot \frac{U^2}{FHA^2} \cdot t \cdot I$$

J	:	Nutzstrahlendosis	(mR)
G	:	Gerätekonstante	-
U	:	Röhrenspannung	(kV)
FHA	:	Fokus-Haut-Abstand	(m)
t.I	:	mAs-Produkt	(mAs)



Expositionsparameter



Expositionsparameter





Strahlenerzeugung mit Röntgengeräten

Dr. R. Mini