

VL 20

VL 18

18.1. Mehrelektronensysteme

VL 19

19.1. Periodensystem

VL 20

20.1. Röntgenstrahlung

Vorlesung 20:

Roter Faden:

Röntgenstrahlung

Folien auf dem Web:

<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/>

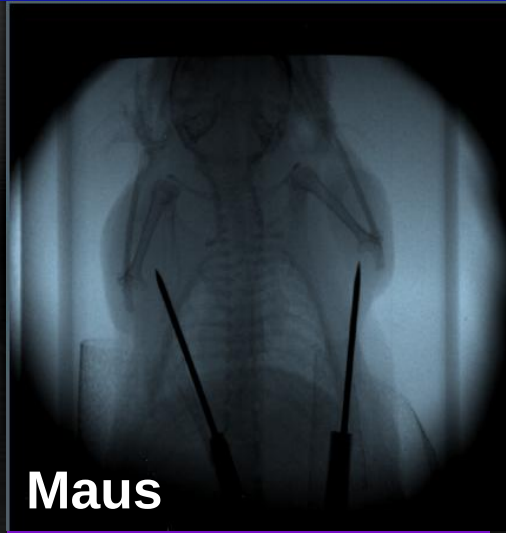
Siehe auch:

<http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/index.html>

<http://www.uni-stuttgart.de/ipf/lehre/online-skript/>

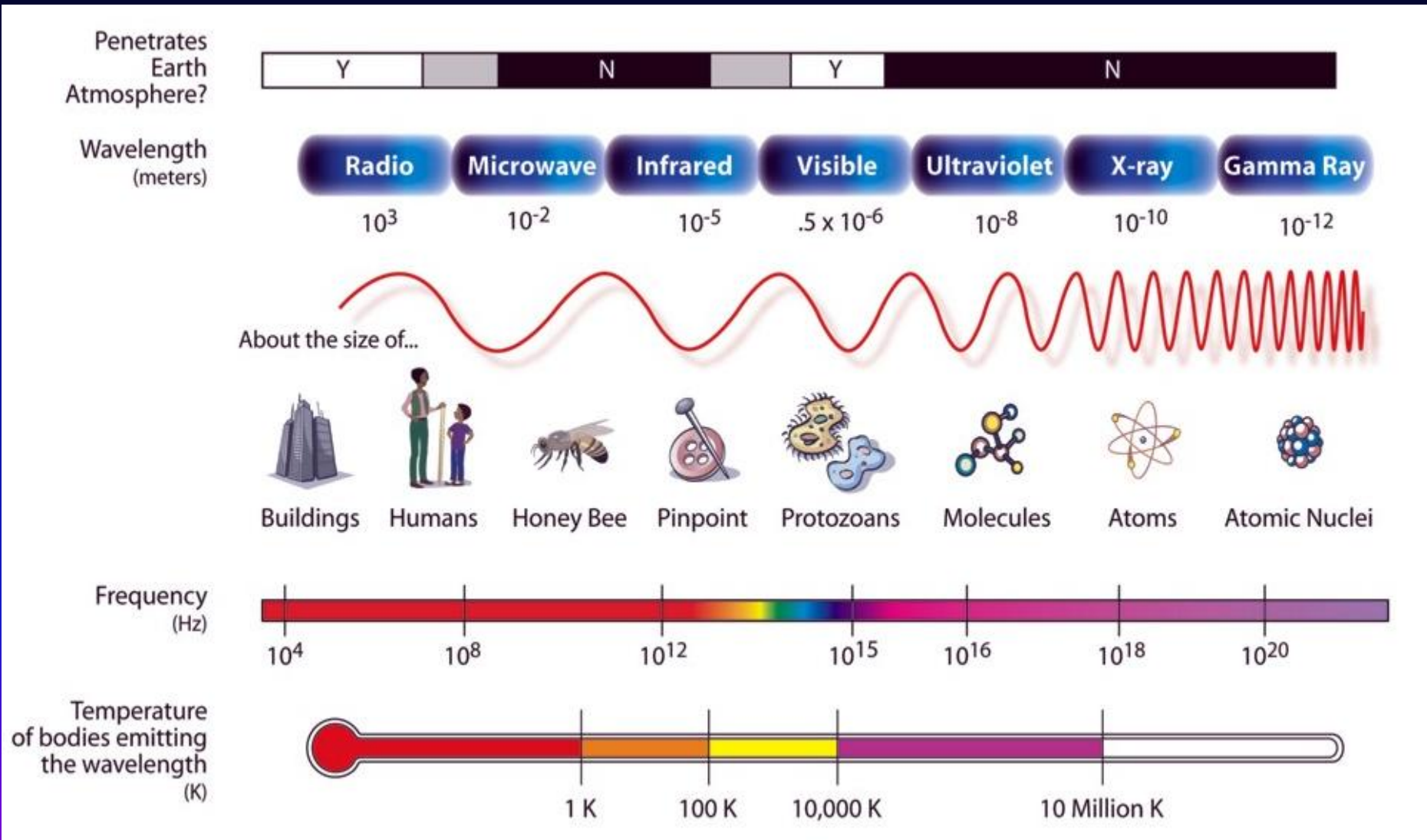
Röntgenstrahlung (X-rays)

Röntgenstrahlung bezeichnet **elektromagnetische Wellen** einer **Photonenenergie** zwischen 100 eV und 1 MeV und von Wellenlängen zwischen 10^{-8} und 10^{-12} m. Röntgenstrahlen liegen im **elektromagnetischen Spektrum** zwischen dem **ultravioletten** Licht und der **Gammastrahlung**, mit der sie sich teilweise überschneiden. Die Röntgenstrahlung wurde von **Wilhelm Conrad Röntgen** entdeckt und trägt ihren Namen im deutschsprachigen Raum zu seinen Ehren. In anderen Sprachräumen wird sie häufig mit dem von Röntgen ursprünglich selbst verwendeten Begriff *X-Strahlen* (englisch *X-rays*) bezeichnet.



**30-facher
Beckenfraktur
mit Metall-
stäben
stabilisiert**

Elektromagnetisches Spektrum



Entstehung der Röntgenstrahlung

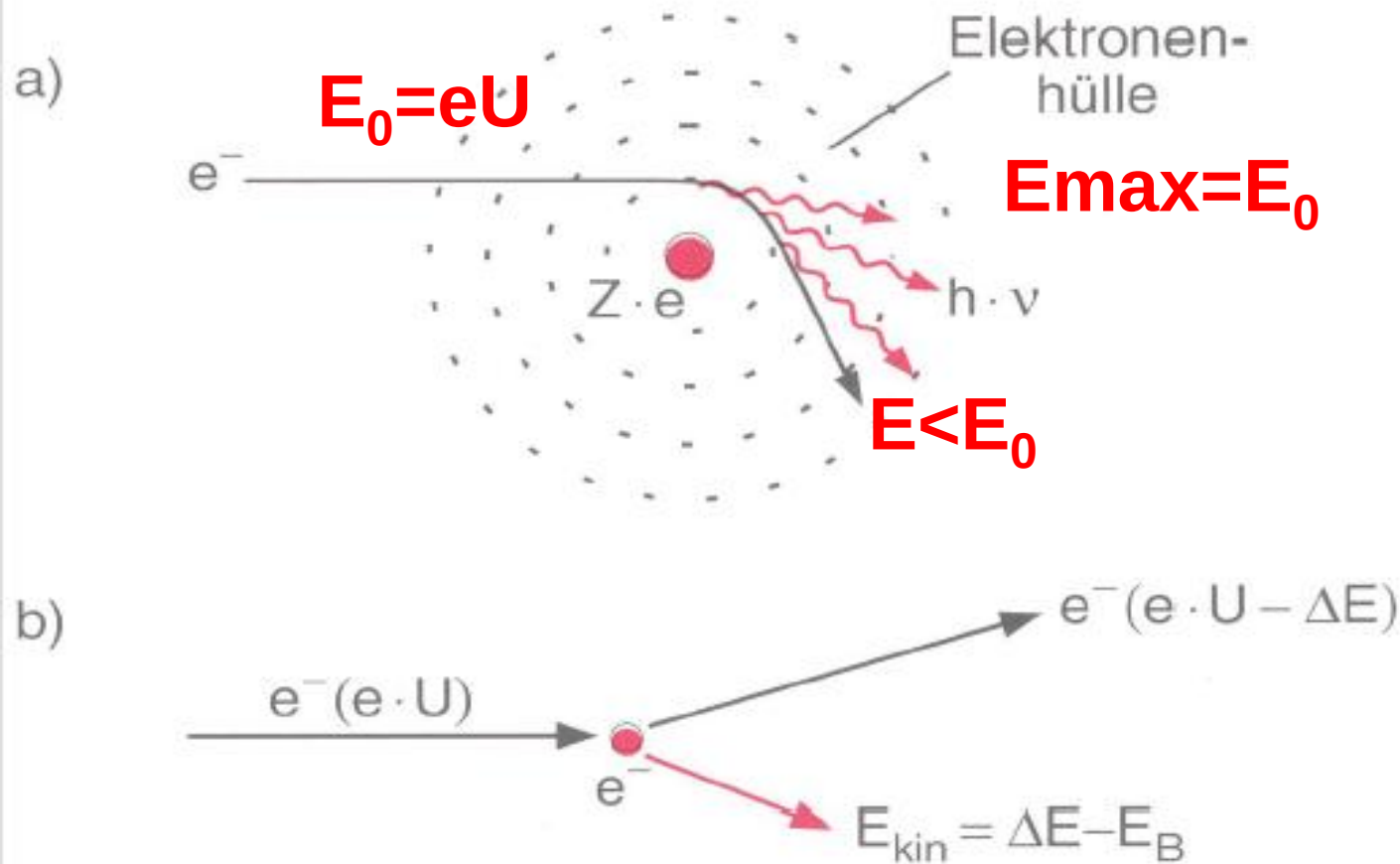


Abb. 7.25. (a) Zur Entstehung der Bremsstrahlung. (b) Inelastischer Stoß des ankommenden Elektrons mit einem Hüllenelektron der Anodenatome

Röntgenspektren

Bremsstrahlung:

Elektronen wandel ihre Energie $e \cdot U$ beim Auftreffen auf ein Target in **Bremsstrahlung** um.

Ein Teil wird in kontinuierliche Röntgenstrahlung umgesetzt, ein Teil in Wärme.

Ist **elektromagnetische Strahlung** - zeigt Polarisierung, Beugung, Interferenz.

Intensitätsverteilung - siehe Abb.

kurzwellige Grenze: $h\nu \leq h\nu_G = e \cdot U \Rightarrow \lambda \geq \lambda_G = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$

Bei ausreichend großen Spannungen - charakteristische Linien - entsprechen atomaren Übergängen.

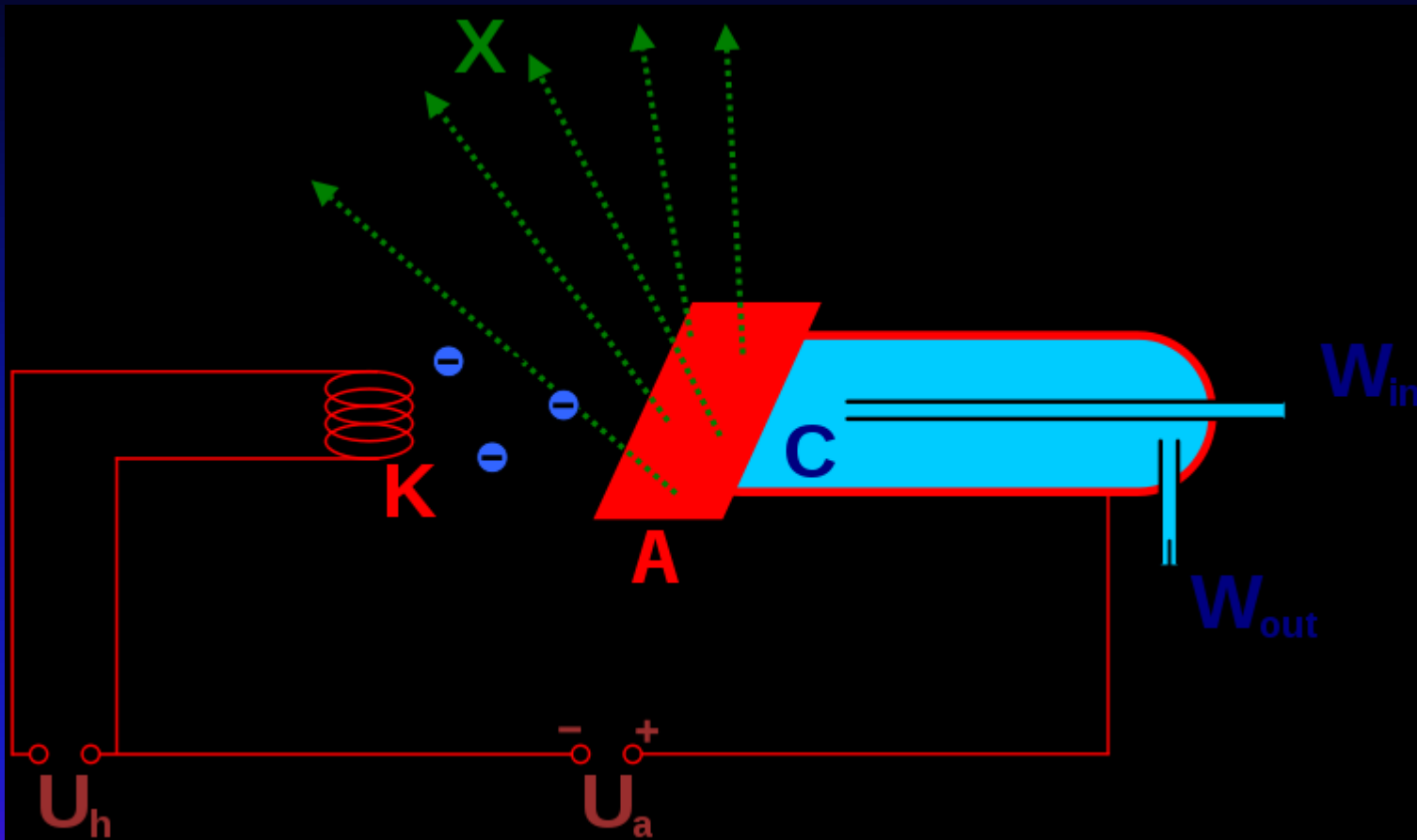
Charakteristische Röntgenstrahlung:

Energie der Elektronen muß "genügend" groß sein um Elektronen der Anodenatome aus inneren Schale in freie höhere Energiezustände anzuregen.

$$e^- + E_{kin} + A(E_k) \Rightarrow A^*(E_i) + e^- + E'_{kin}$$

$$\text{mit } E_{kin} - E'_{kin} = E_i - E_k \text{ und } A^*(E_i) \Rightarrow A(E_k) + h\nu_{ik}$$

Röntgenröhre

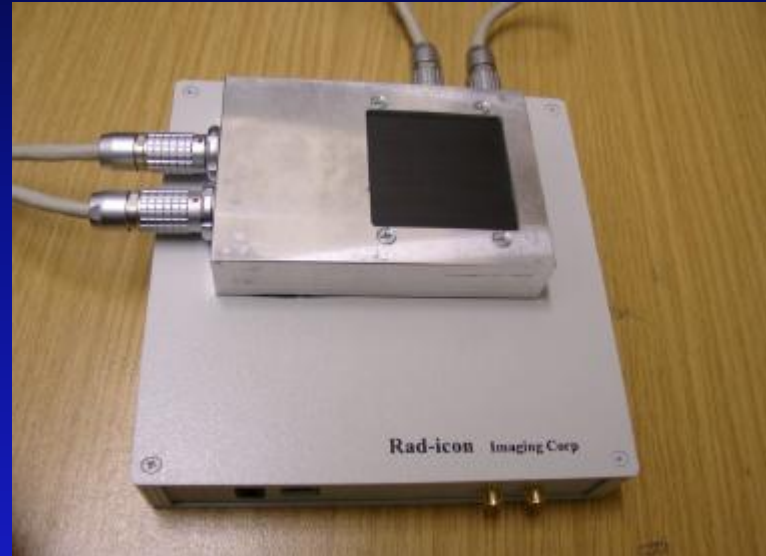


Schematische Zeichnung einer Röntgenröhre (K: Kathode (Elektronenquelle), A: Anode (Elektronenziel), X: X-Strahlung, Röntgenstrahlung)

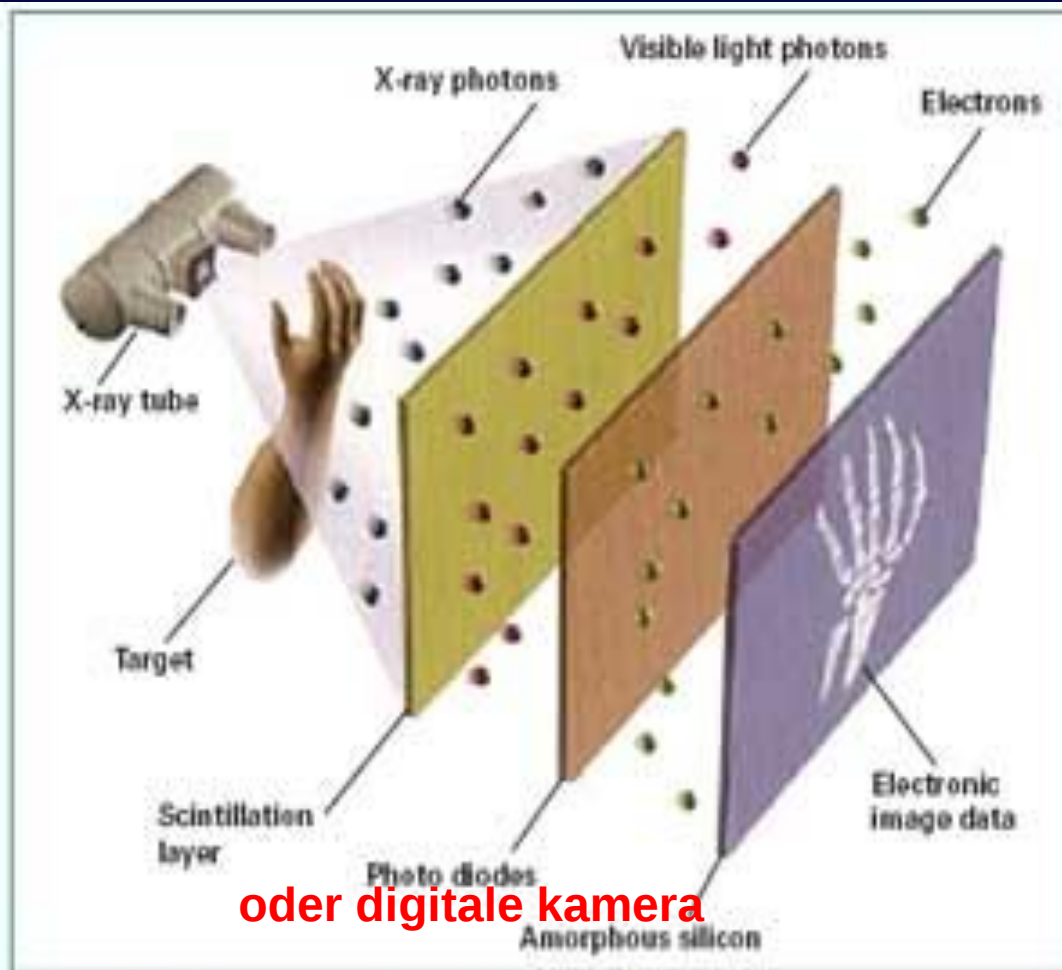
Röntgenröhre



Röntgenkamera



Röntgendetektor



oder digitale kamera

Figure 4: Flat panel detector signal chain

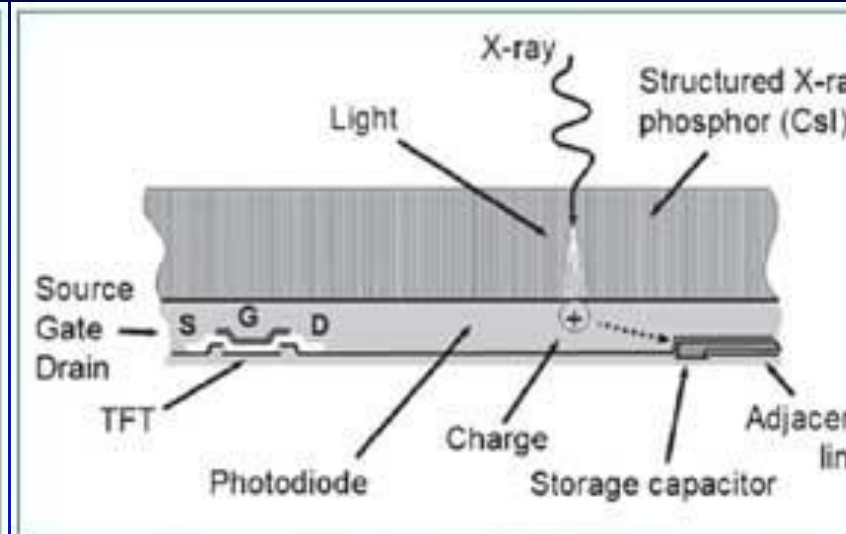
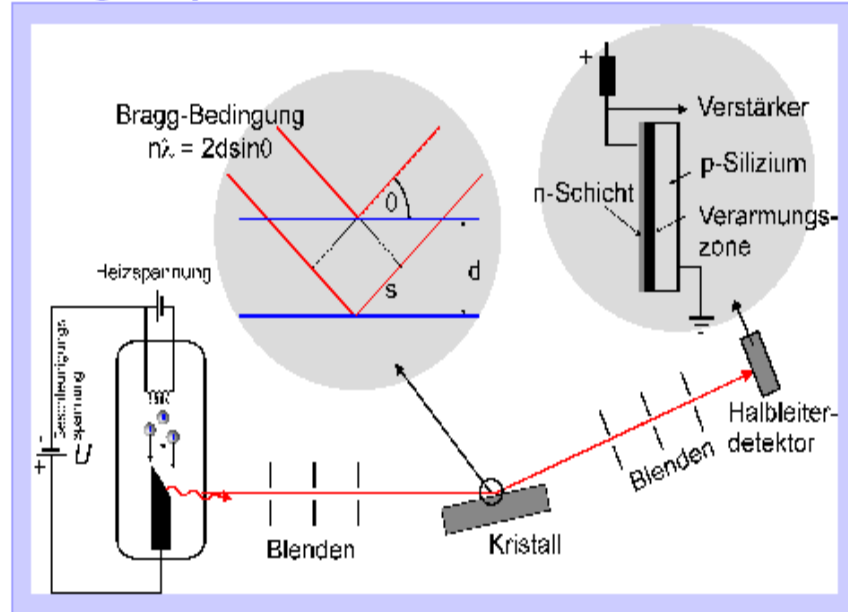


Figure 5: Cross-section of an indirect TFT detector using a CsI scintillator shows the conversion of x-rays first into light, traveling through the structured phosphor to a photodiode etched on the TFT arrays, and the creation of a proportional charge stored in the local capacitor.

<http://www.emasiamag.com>

Röntgenstrahlung

Röntgen-Spektrometer



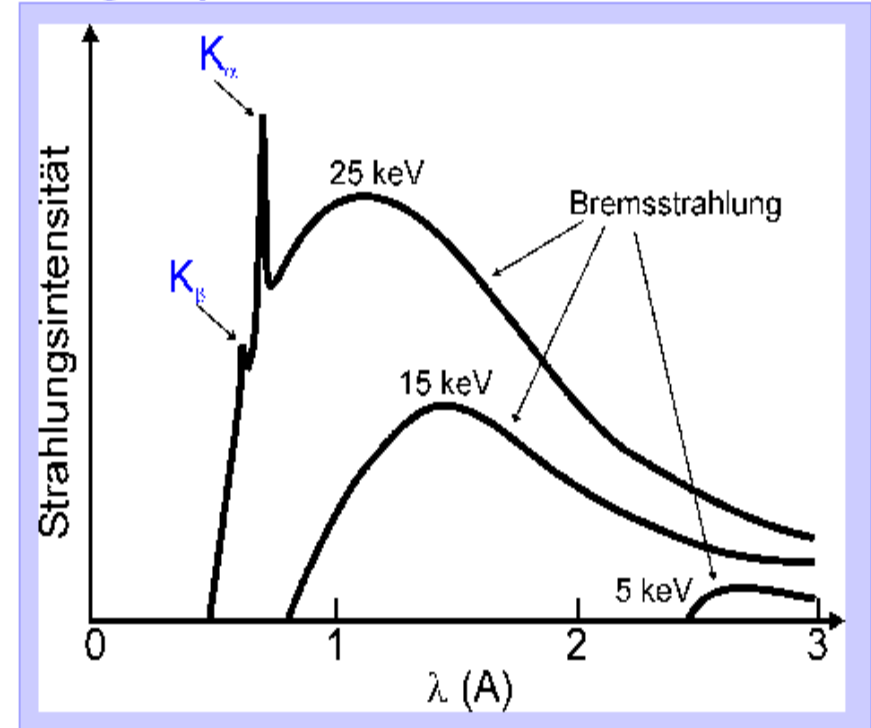
Spektroskopie der inneren Schalen.

- ▶ $E = 1-100 \text{ keV}$
- ▶ $\lambda = 0,1-10 \text{ \AA}$

Röntgen-Bremsspektrum

- ▶ Kontinuierlich
- ▶ Grenzfrequenz $\nu_{\max} = eU/h$
- ▶ $I(\nu) \sim Z(\nu_{\max} - \nu)$

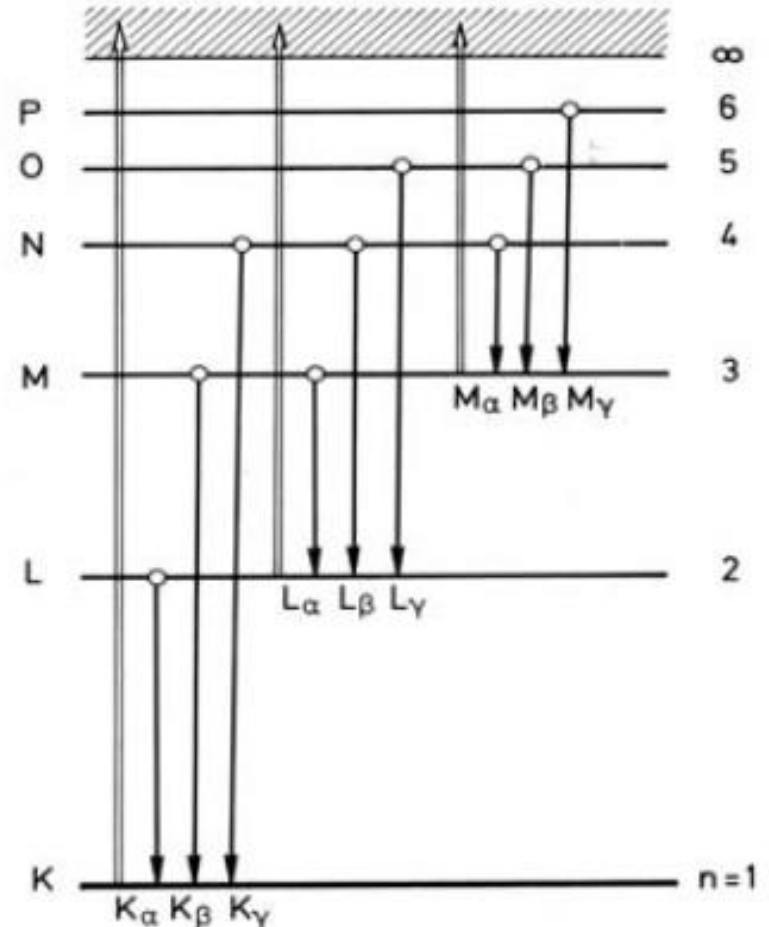
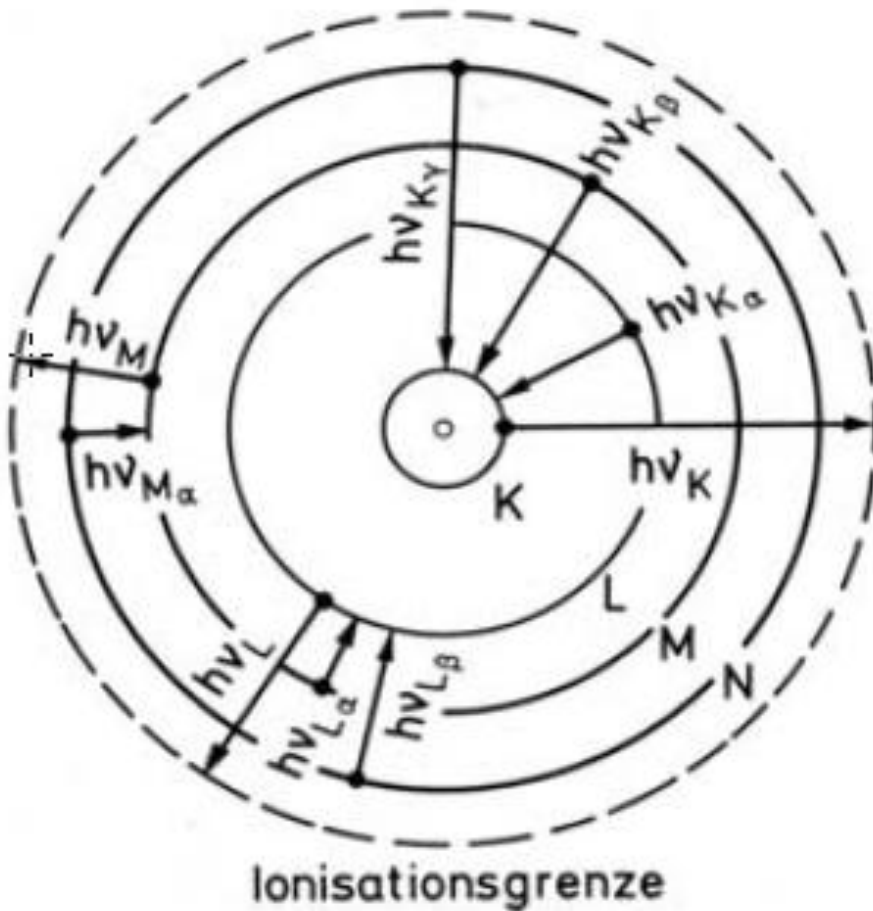
Röntgen-Spektrum



Charakteristisches Spektrum

- ▶ Wenige Linien
- ▶ Zusammengefasst in Serien
- ▶ Kurzwellige Grenzfrequenz (**Serienkante**)
- ▶ Serien verschieben sich mit Z zu höheren Energien

Charakteristische Linien im Bohr Modell



Röntgenlinien

Deutung der Röntgen-Spektren durch Kossel 1916 im Modell unabhängiger Teilchen.

- ▶ Energetisches Elektron stößt Elektron aus inneren Schale
- ▶ Unbesetztes Niveau in sonst voller Schale (genannt **Loch**) hat gleichen Eigenschaften wie ein einzelnes Elektron in der Schale
- ▶ Übergang von Elektronen aus höheren Schalen und Emission eines Photons

Notation

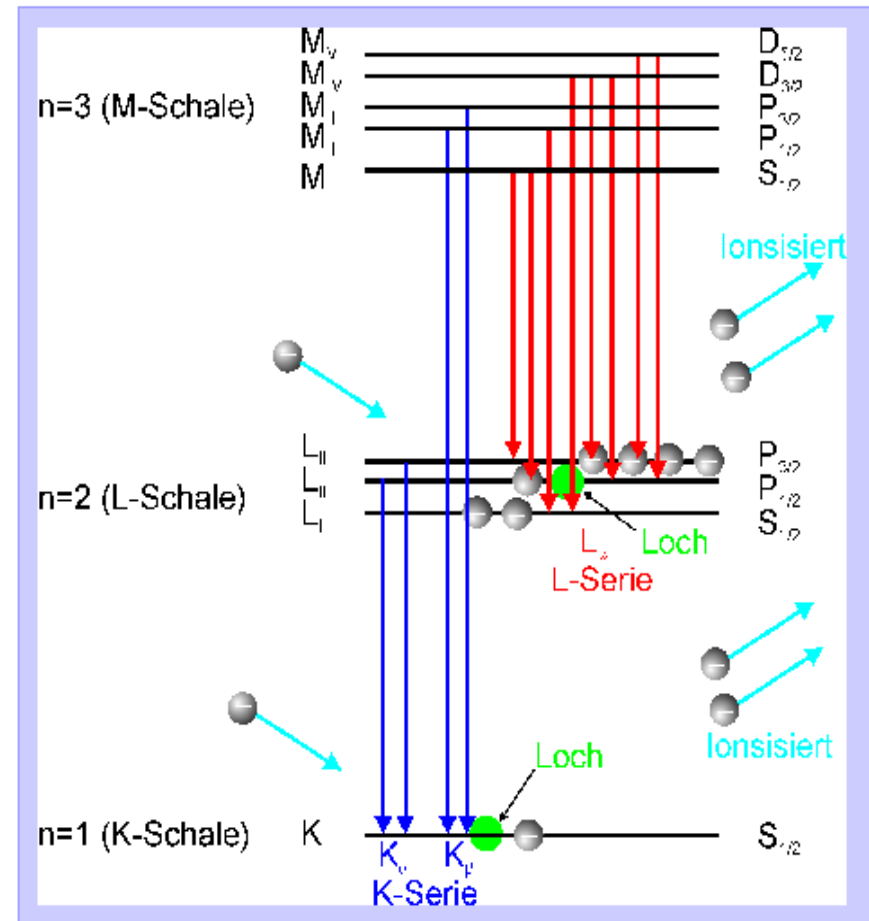
- ▶ Serien: K (n=1), L (n=2), M (n=3), N (n=4) ...
- ▶ Linien: α , β , γ , δ ...
- ▶ Feinaufspaltung: I, II, III, IV ...

Energie der Übergänge

$$\frac{1}{\lambda_{K\alpha}} \approx R_H (Z-1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda_{L\alpha}} \approx R_H (Z-7,4)^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$$

Hier schirmen innere Elektronen die Kernladung um $1e$ bzw. $7.4e$ ab.



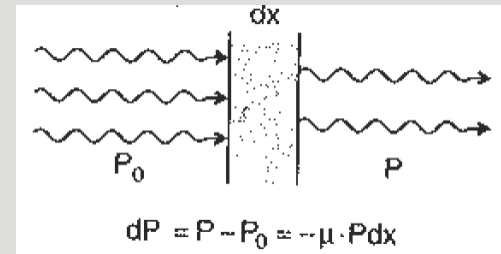
Die Ionisation der inneren Schale kann auch durch Röntgen-Strahlung erfolgen (**Photoionisation** , **Röntgen-Fluoreszenz**).

Röntgenabsorption

Paralleles Strahlungsbündel wird in Materialschicht der Dicke dx abgeschwächt: $dP = -\mu P dx$

μ ...Abschwächungskoeffizient

Es gilt: $P(x) = P_0 \cdot e^{-\mu x}$



Abschwächung infolge: Streuung und Absorption.

Schwächungskoeffizient $\mu = \mu_s + \mu_a$

μ_s**Streukoeffizient** proportional zu ω^4 wenn Teilchendurchmesser $d \ll \lambda$ (aus Streutheorie)

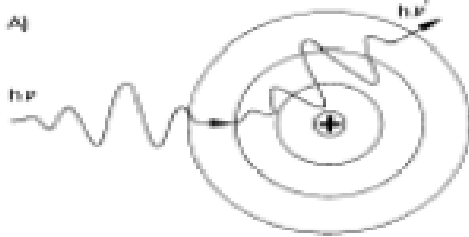
Daher bei hohen Energien Streuung dominant, bei kleinen Energien Absorption. Absorption $\propto$ Dichte $\rightarrow$ Massenabsorptionskoeff. $\kappa_\alpha = \mu_\alpha / \rho$

Bei Röntgenstr. nur κ_α wichtig.

$$I = I_0 \exp(-\kappa_\alpha \rho x)$$

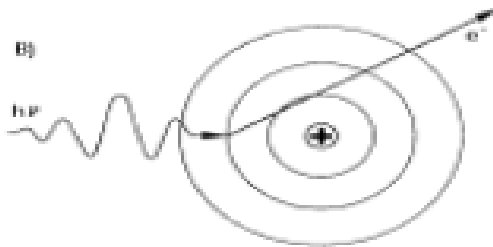
Wechselwirkung zwischen Photonen und Materie

4. VL



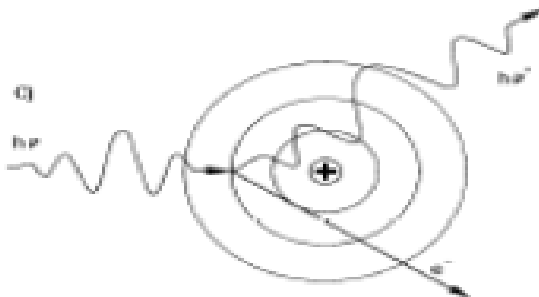
A) Kohärente Streuung

Thompson
Rayleigh
klassische Streuung



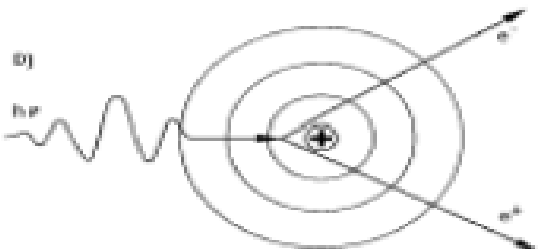
B) Photoeffekt

Teilchencharakter



C) Compton-Effekt

Teilchencharakter



D) Paarbildung

Energie->Masse

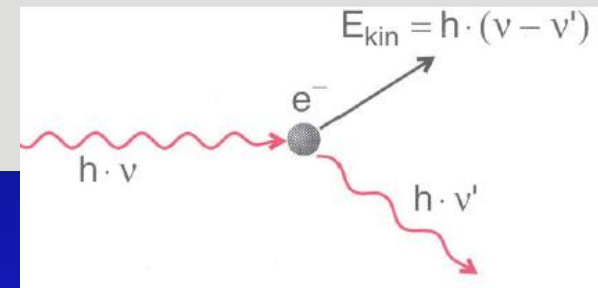
Energieabh. der Absorptionsprozesse

Photoeffekt: Röntgenquant $h\nu$ wird von Atom absorbiert - Elektron aus inneren Schale ionisiert $h\nu + A(E_k) \rightarrow A^+(E_{Ion}) + e^-(E_{kin})$

Energiebilanz: $E_{kin}(e^-) = h\nu - (E_{Ion} - E_k)$

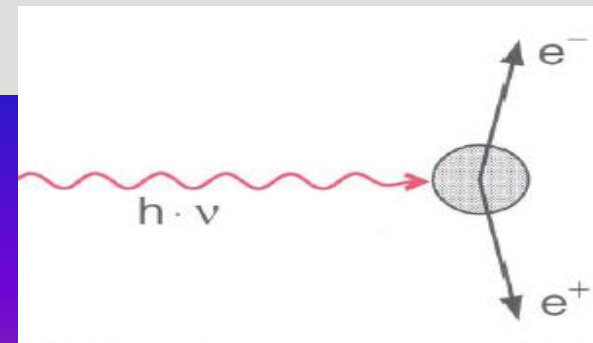
Compton-Effekt: Röntgenquant stößt mit "freien" Elektron der äußeren Schale zusammen - Bindungsenergie $E_B \ll h\nu$

$h\nu + e^- \rightarrow e^-(E_{kin}) + h\nu'$

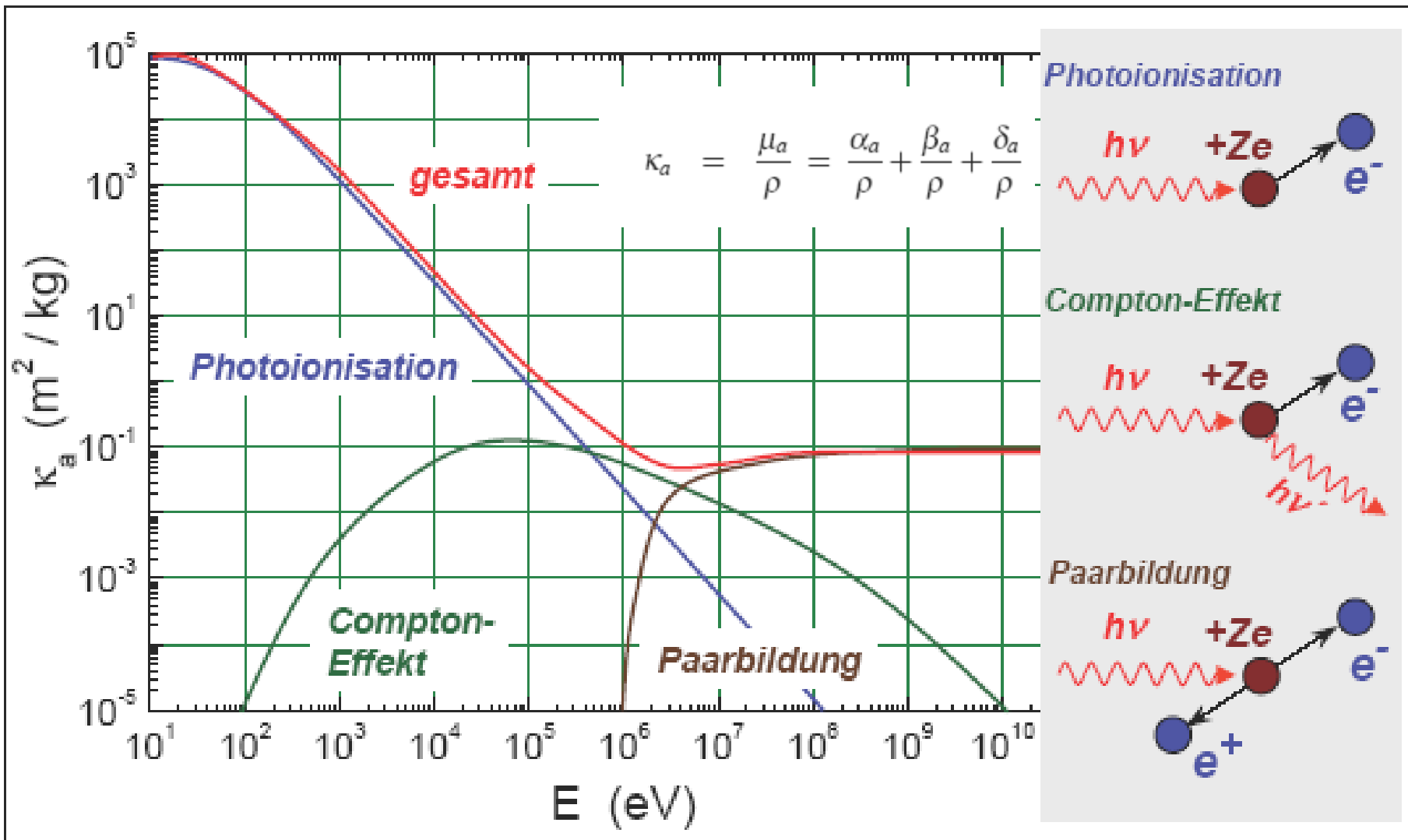


Paarbildung - bei $h\nu > 1\text{MeV}$ wird ein Elektron-Positronpaar erzeugt.

$h\nu \rightarrow e^- + e^+ + 2E_{kin}$ mit $h\nu = 2m_e c^2 + 2E_{kin}$



Energieabhängigkeit der Absorptionsprozesse



Energieabhängigkeit der Absorption

$$\kappa_a = \frac{\mu_a}{\rho} = \frac{\alpha_a}{\rho} + \frac{\beta_a}{\rho} + \frac{\delta_a}{\rho}$$

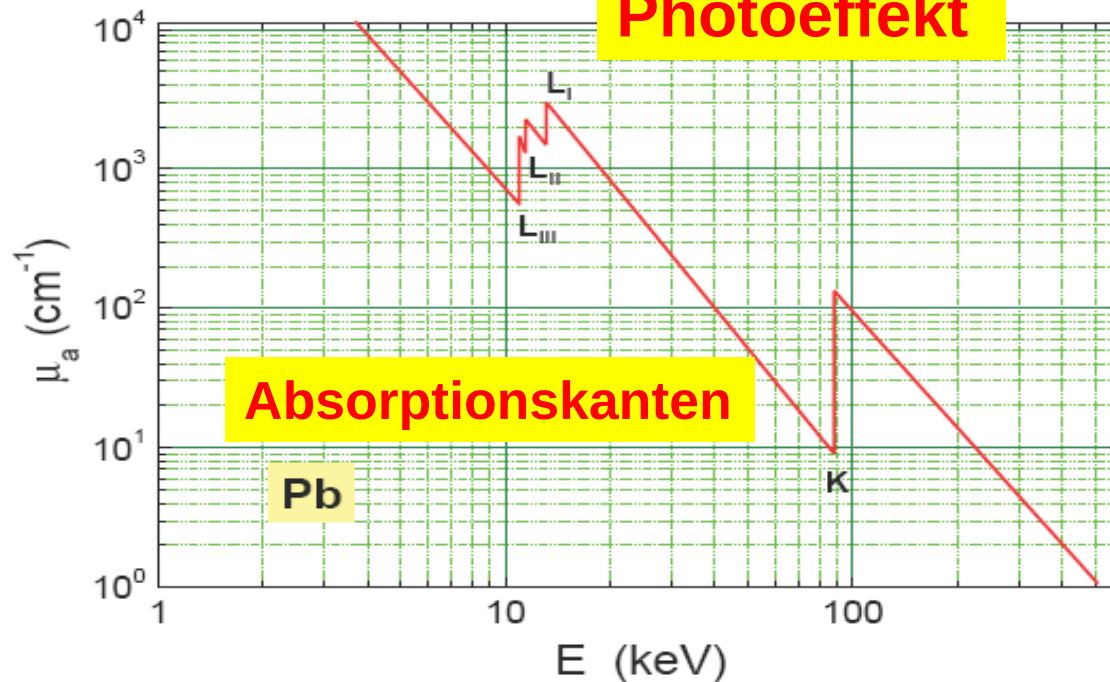
$$\frac{\alpha_a}{\rho} \propto \frac{Z^4}{(\hbar\omega)^3} \propto Z^4 \lambda^3$$

$$\frac{\beta_a}{\rho} \propto \frac{1}{\hbar\omega} \propto \lambda$$

$$\frac{\delta_a}{\rho} \propto \frac{Z}{\ln(\hbar\omega)}$$

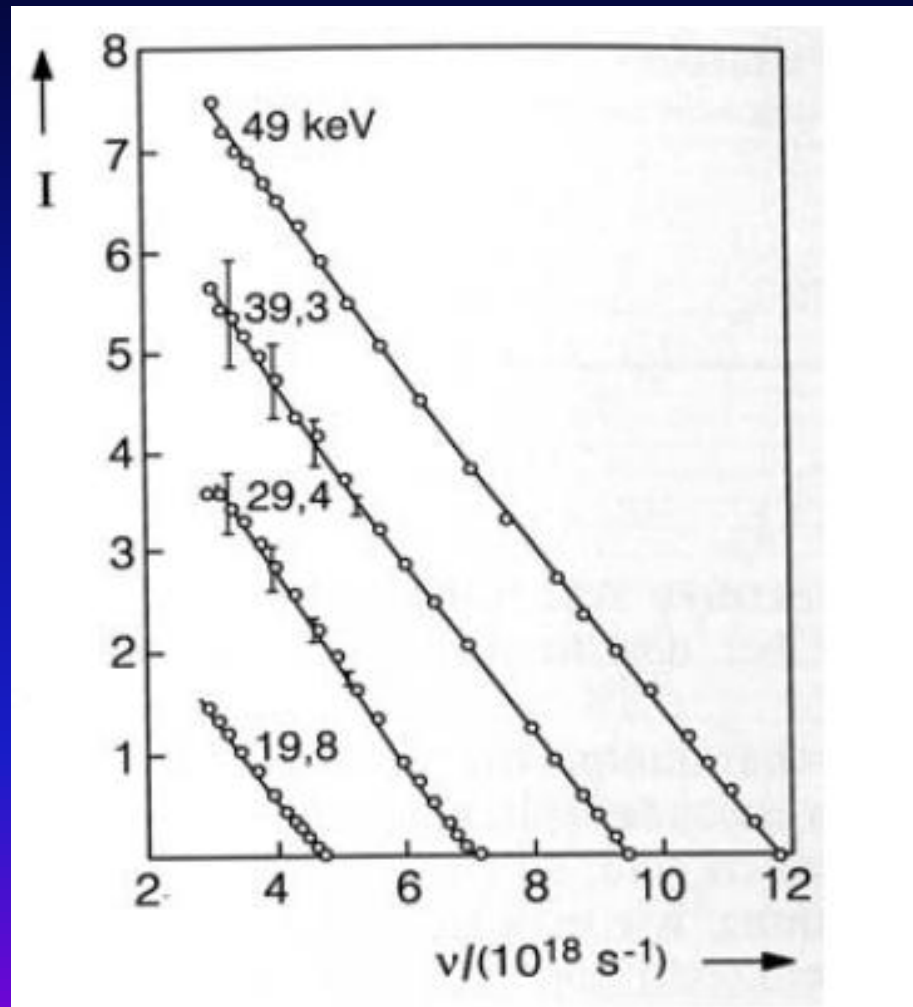
Photoeffekt

Compton Paarbildung



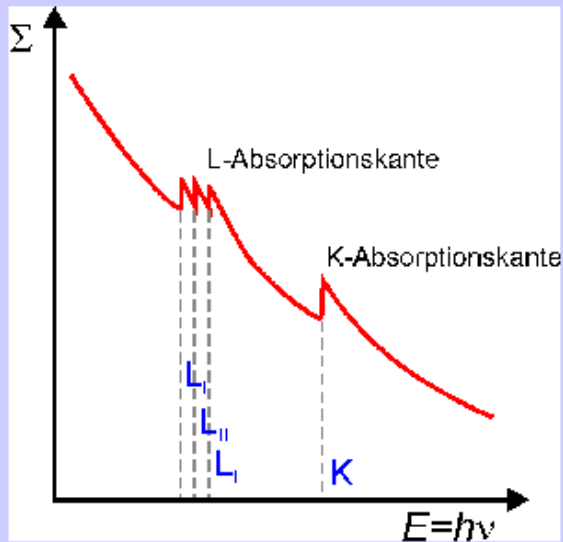
Da in das Abschwächungsgesetz $I = I_0 \exp(-\kappa_a \rho x)$ ferner die Dichte ρ des Absorbermaterials eingeht, verwendet man zur Abschwächung von Röntgenstrahlung Materialien mit hohem Z und hohem ρ . Aufgrund diesen Zusammenhangs schirmt z.B. Blei ($Z = 82$) Röntgenstrahlung wesentlich besser ab als Aluminium ($Z = 13$).

Intensität einer Röntgenröhre vs Frequenz



Zusammenfassung

Die Abschwächung von Röntgen-Strahlen in Materie wird durch den makroskopischen Wirkungsquerschnitt oder Absorptionskoeffizienten Σ beschrieben. ➡



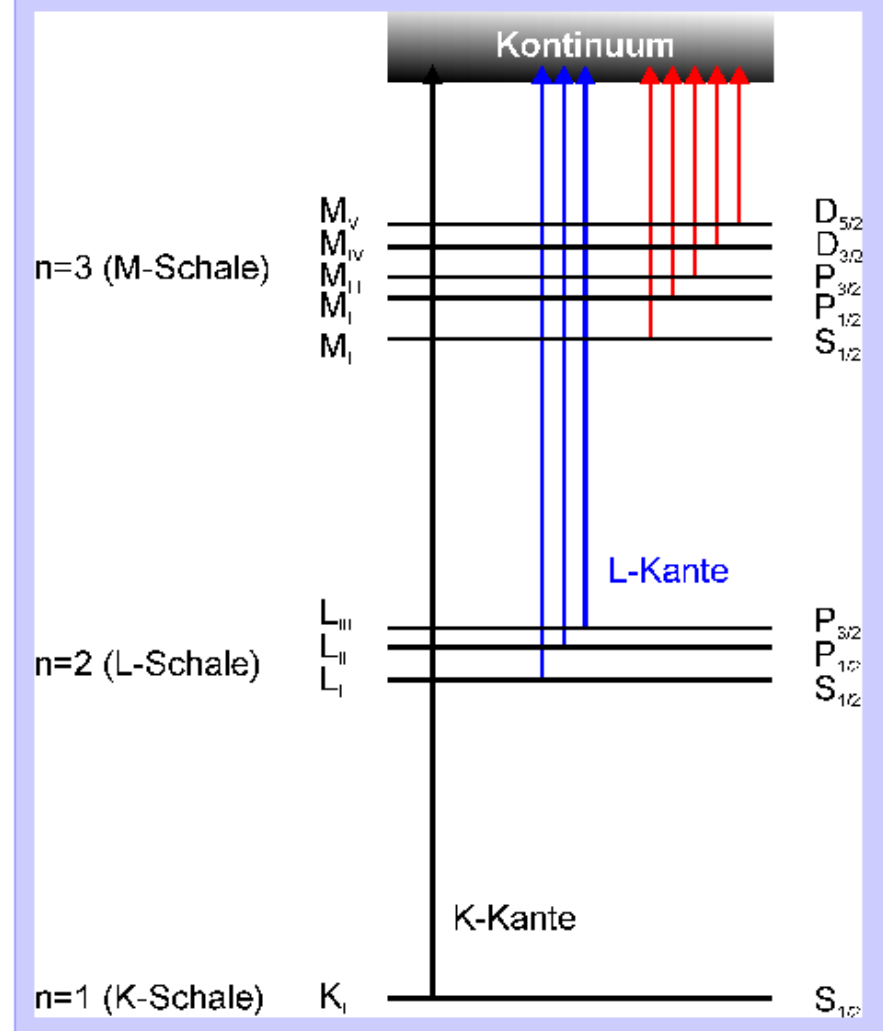
Wenn die Energie der Strahlung ausreicht, Elektronen aus einer tieferen Schale in das Kontinuum anzuregen, nimmt der Absorptionskoeffizient sprunghaft zu (s. rechts).

Man beobachtet:

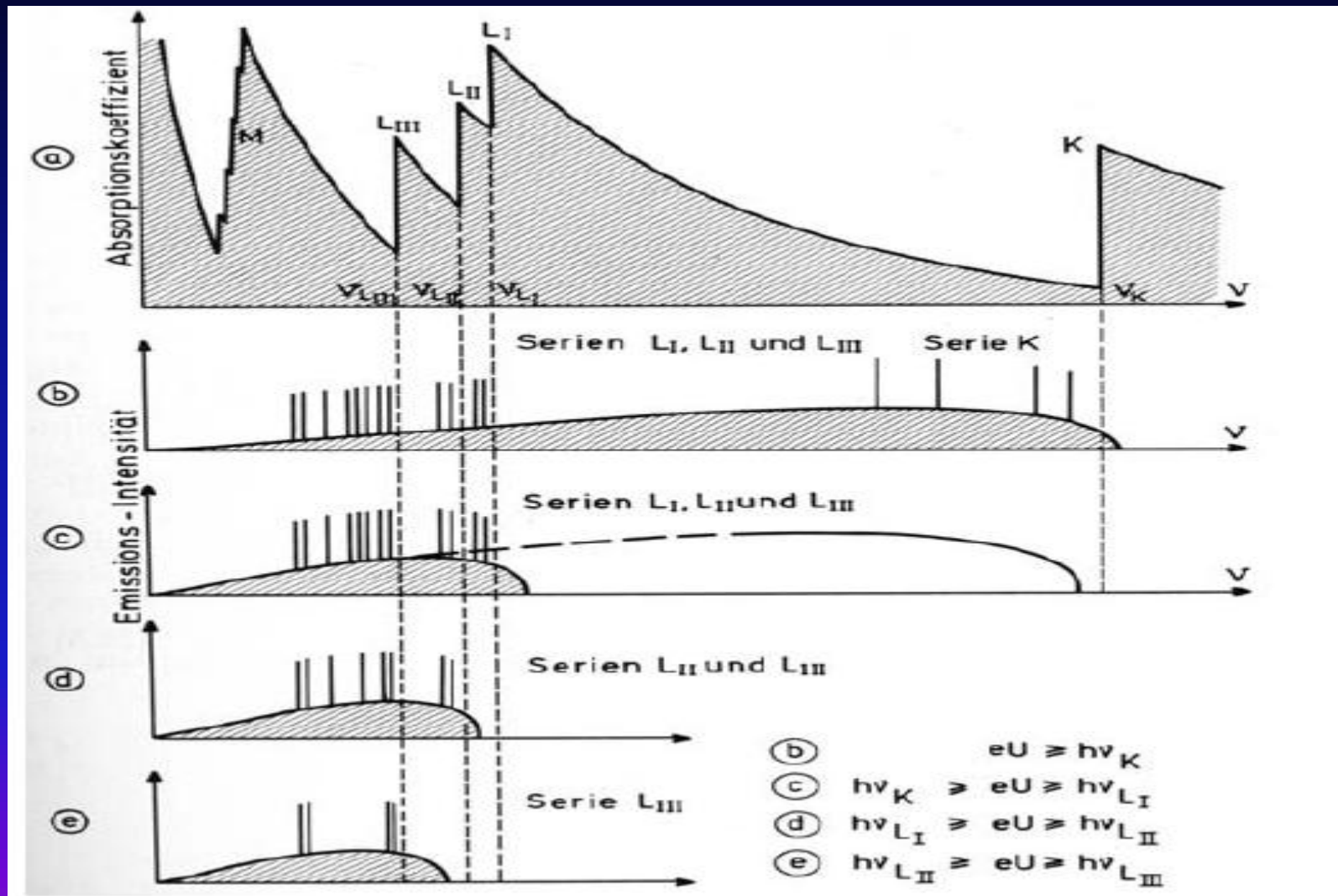
- Sprunghafte Zunahme von Σ mit der Energie der Strahlung (**Absorptionskanten**)
- Dazwischen Abnahme mit $Z^{3-4}/(h\nu)^3$

Halbwertsdicke d ist der Weg, nach dem die Strahlung auf halbe Intensität gesunken ist. ➡

Anregungen ins Kontinuum



Emission und Absorption



$$I = I_0 \exp(-\kappa_a \rho x)$$

Energie		Luft	H ₂ O	Al	Cu	W	Pb
E (eV)	λ (nm)	κ_a (m ² /kg)					
5	0.246	2	2.0	25	24	70	100
10	0.123	0.5	0.52	2.6	22.4	9.53	13.7
50	0.025	0.02	0.92	0.04	0.26	0.6	0.8
100	0.012	0.015	0.017	0.02	0.05	0.4	0.6

Tabelle 8.2: Massenabsorptionskoeffizienten κ_a verschiedener Absorbermaterialien Röntgenstrahlung verschiedener Energie.

Moseley-Gesetz

K_n ist eine von der Hauptquantenzahl n abhängige Konstante → Moseley-Gesetz.

Energie $h \cdot \nu_{ik}$ eines Röntgenquants kann beschrieben werden durch:

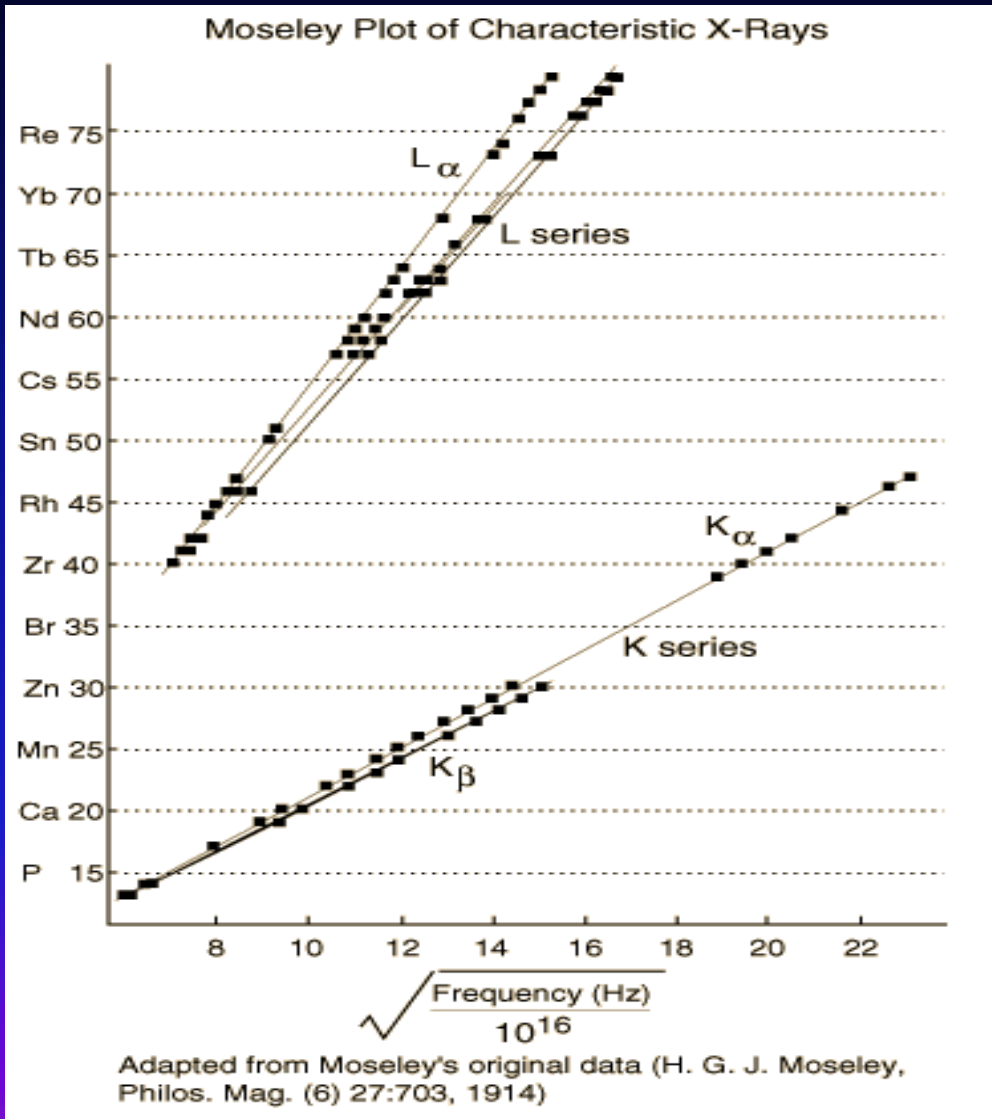
$$h \cdot \nu_{ik} = (Z - S)^2 \cdot Ry \cdot hc \left(\frac{1}{n_k^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

$$\bar{\nu}_{ik} = (Z - S)^2 \cdot Ry \left(\frac{1}{n_k^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad \text{Wellenzahl} = \nu/c = 1/\lambda$$

$(Z - S) = Z_{eff}$...auf Elektron wirkende effektive Kernladung

SAbschirmzahl.

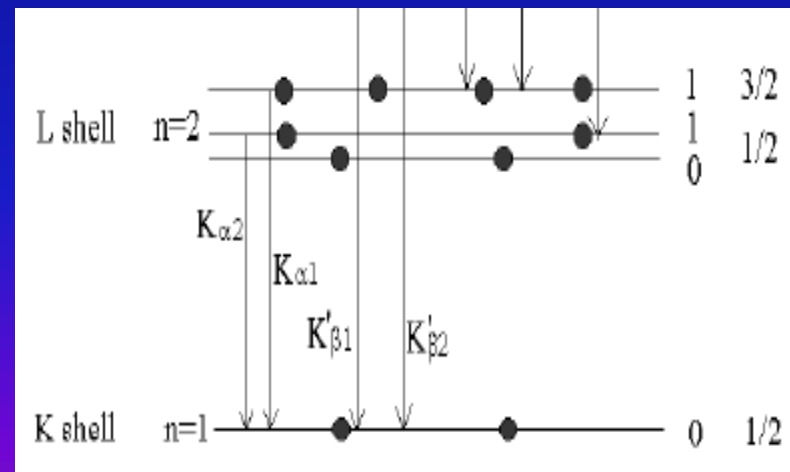
Moseley-Gesetz



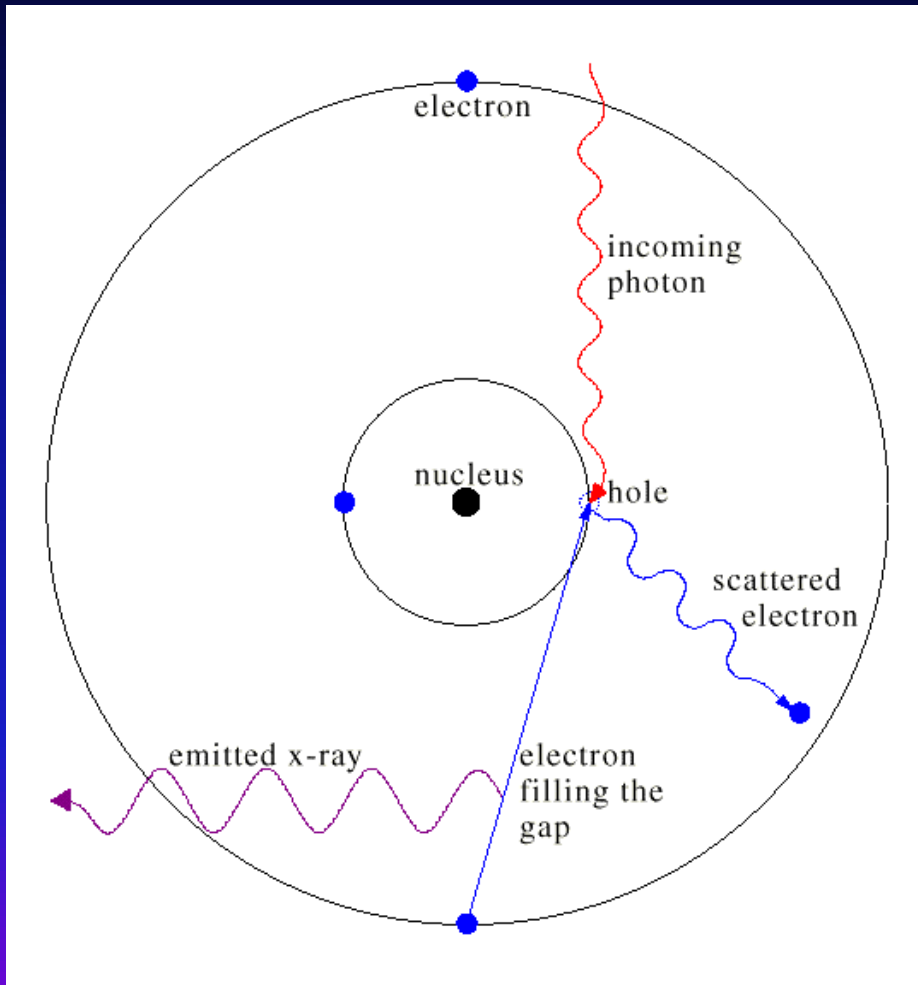
Moseley-Gesetz:

aus $E \propto Z^2$ folgt

$Z \propto \sqrt{\nu}$, wie von Moseley
zuerst beobachtet.



Röntgen Fluoreszenz



<http://ie.lbl.gov/xray/>

Fluoreszenz:

**durch einen Laserstrahl
oder Röntgenstrahlung
werden Atome angeregt
(=Elektronen in höheren
Schalen oder entfernt).**

**Bei Abregung:
Photon emittiert
(Röntgenstrahlung)**

Röntgen Fluoreszenz

Röntgen hat die Röntgenstrahlung unabhängig entdeckt, als er fluoreszenzfähige Gegenstände nahe der Röhre während des Betriebs der Kathodenstrahlröhre beobachtete, die trotz einer Abdeckung der Röhre (mit schwarzer Pappe) hell zu leuchten begannen.

Röntgens Verdienst ist es, die Bedeutung der neuentdeckten Strahlen früh erkannt und diese als erster wissenschaftlich untersucht zu haben. Zu Röntgens Berühmtheit hat sicherlich auch die Röntgenaufnahme einer Hand seiner Frau beigetragen, die er in seiner ersten Veröffentlichung zur Röntgenstrahlung abbildete.

Diese Berühmtheit trug ihm 1901 den ersten Nobelpreis für Physik ein, wobei das Nobelpreiskomitee die praktische Bedeutung der Entdeckung hervorhob. Röntgen nannte seine Strahlung: X-Strahlen, daher meistens x-rays auf Englisch.

X-ray fluorescence

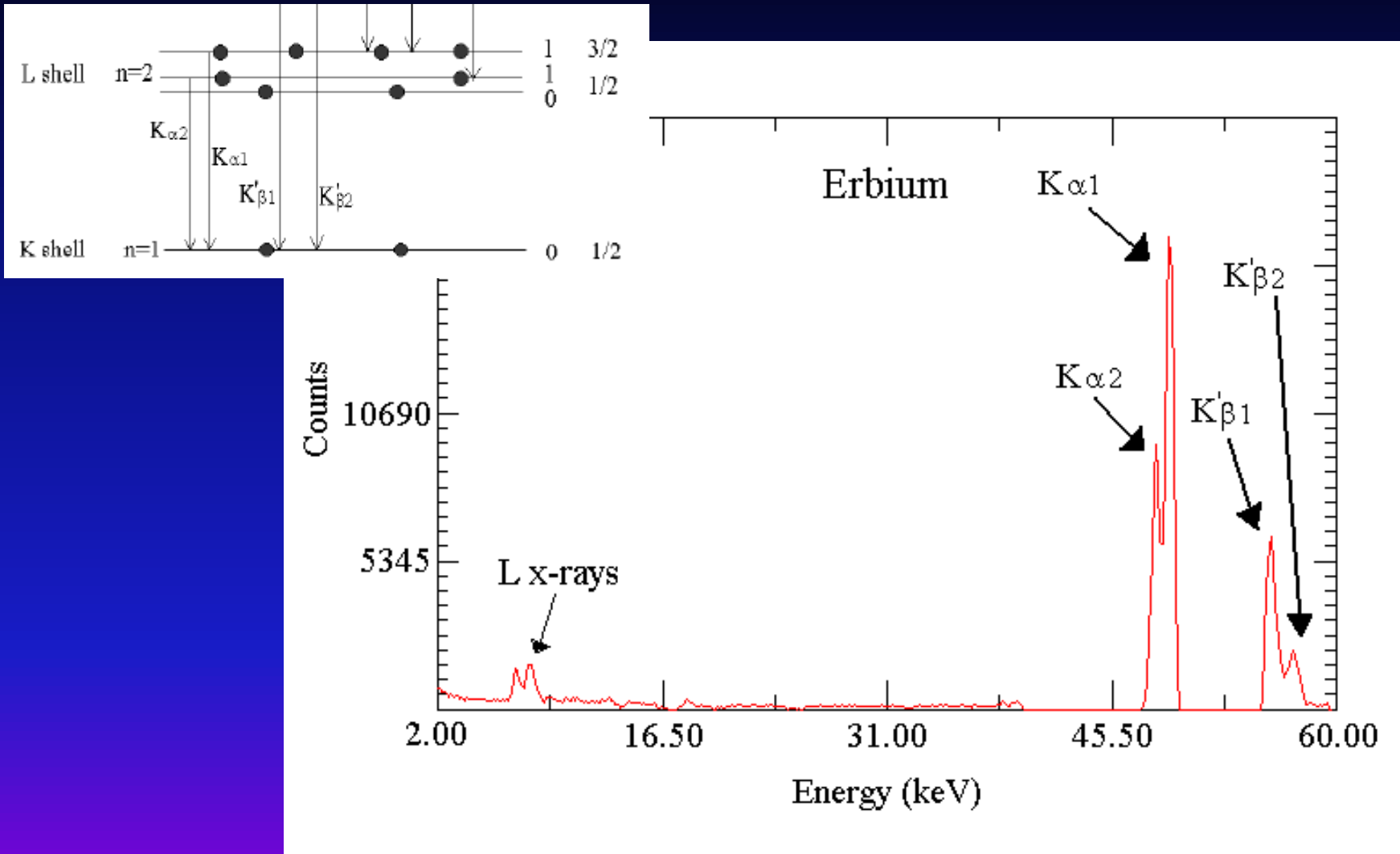


germanium x-ray Detektor
bei flüssigem Stickstoff
Temperatur
(ca. 80 K, damit thermisches
Rauschen reduziert wird)

Lötzinn mit Indium

²⁴¹Am radioaktive Quelle

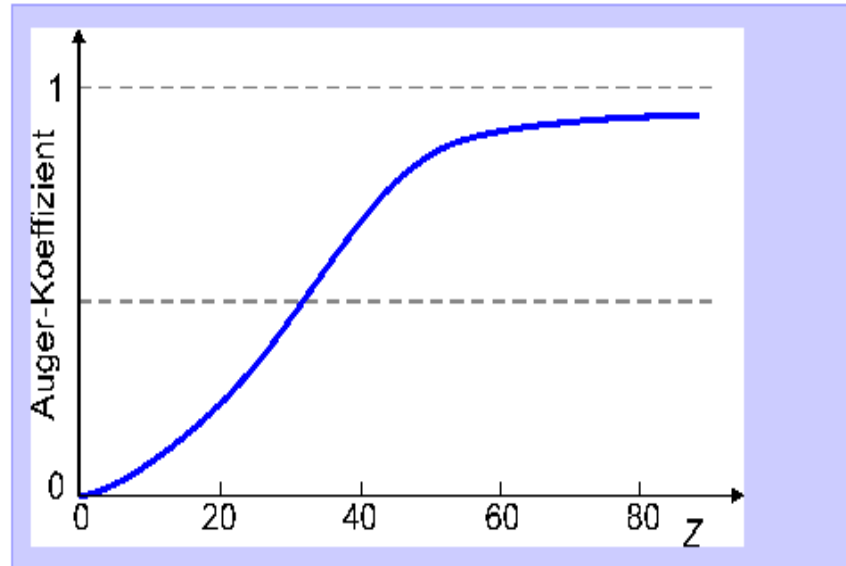
X-ray fluorescence spectrum



Auger-Elektronen (aus strahlungslosen Übergängen)

Nicht alle Atome mit einem fehlenden K- oder L-Elektron emittieren ein Röntgen-Quant beim Übergang in den Grundzustand.

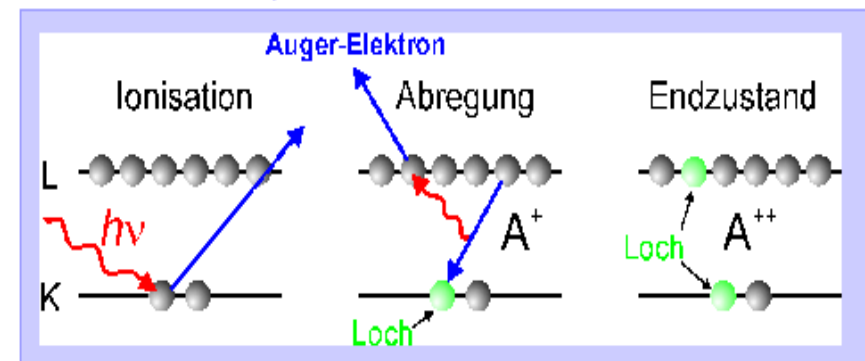
Auger-Koeffizient: Relative Zahl an Atome die mit Röntgen-Quant in Grundzustand übergehen.



Erklärung

Ein Teil der Atome geht über Emission eines Auger-Elektrons in den Grundzustand über:

- ▶ Ionisation innerer Schale durch Röntgen-Quant
- ▶ Übergang eines Elektrons aus höherer Schale unter Emission eines Quants
- ▶ Quant regt weiteres Elektron in einen Kontinuumzustand an (analog zum **atomaren Photoeffekt**)



Energie des Auger-Elektrons

$$E_{\text{Auger}} = E_K - E_L - E_L$$

Inneres Photon Bindungsenergie
Auger-Elektron

Auger Elektron Spektroskopie (AES)

Die AES wird überwiegend dazu eingesetzt, die atomare Zusammensetzung von Oberflächen zu bestimmen. Dabei wird die Probe mit Elektronen, deren kinetische Energie zwischen 1 und 10 keV beträgt, bestrahlt. Diese Elektronen erzeugen Ionen mit einer Lücke in einer inneren Schale (vgl. Abb. 1). Die so entstandenen Ionen relaxieren, indem die Lücke durch ein Elektron aus einer höher gelegenen Schale aufgefüllt wird. Die dabei freiwerdende Energie wird entweder in Form eines Röntgenphotons (X-ray fluorescence) oder durch die Emission eines zweiten Elektrons, dem Auger-Elektron, abgegeben.

Dabei wird die kinetische Energie des Auger-Elektrons lediglich durch die elektronischen Niveaus, die an dem Auger Prozess beteiligt sind, bestimmt und nicht durch die Energie der eingestrahlteten Elektronen.

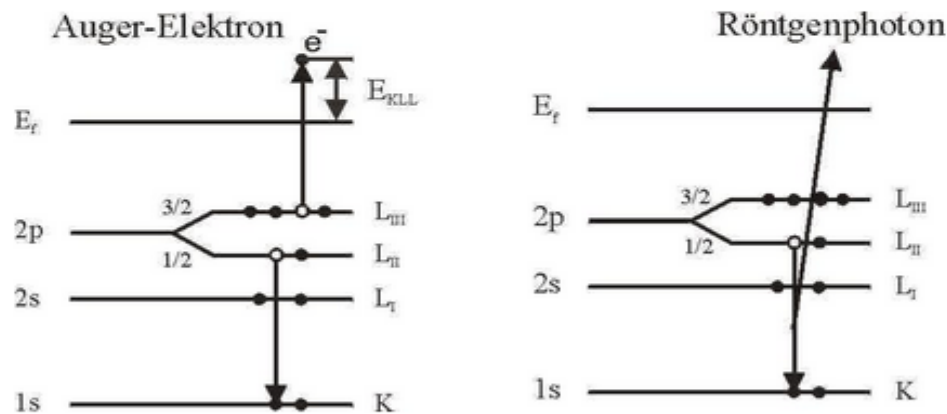


Abb.1 Schematische Darstellung der Auger-Elektronen Emission (links) und der Röntgenemission (rechts), nach dem Herauslösen eines K-Schalen-Elektrons

Aufgrund dieser Eigenschaft können für jedes Element Auger-Elektronen mit spezifischer kinetischer Energie detektiert werden, was eine Analyse der Oberflächenzusammensetzung ermöglicht.

Auger Elektron Spektroskopie (AES)

Detektiert man die von der Oberfläche kommenden Elektronen energieaufgelöst, beobachtet man ein Spektrum, das schematisch in Abbildung 2 a) dargestellt ist. Die Auger-Elektronen werden dabei als kleine Peaks auf einem intensiven Untergrund beobachtet, der von den herausgeschlagenen Sekundärelektronen herrührt. Zusätzlich sind die elastisch gestreuten Elektronen zu erkennen, sowie Elektronen, die inelastisch unter Abgabe von Energie an Moleküle an der Oberfläche gestreut wurden (Verlust-Elektronen) oder einen Teil ihrer Energie durch kollektive Anregung des Elektronensees (Plasmonen) verloren haben.

Um die Sichtbarkeit der Auger-Elektronen zu erhöhen, wird deshalb im Allgemeinen die differentielle Darstellungsweise gewählt, die in Abb. 2 b) veranschaulicht ist.

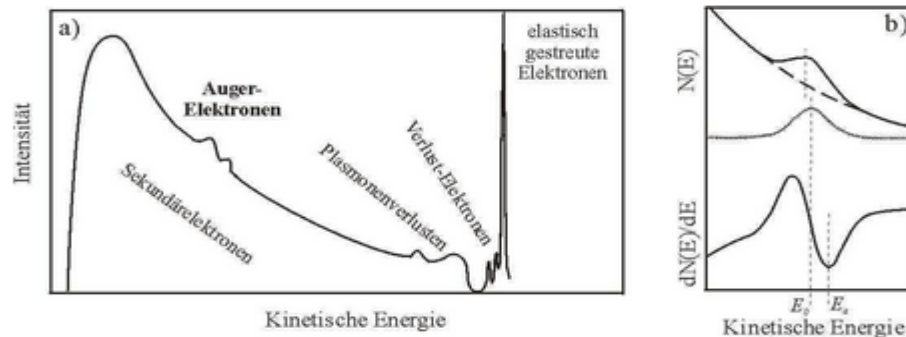


Abb.2 a) Energiespektrum von Elektronen, die von einer Oberfläche kommen, die mit einem Elektronenstrahl bestrahlt wird.

b) Verdeutlichung der differentiellen Darstellungsweise [Niem93].

Obwohl die eigentliche kinetische Energie der Auger-Elektronen dem Mittelwert des integralen Peaks (E_0) entspricht, wird im Allgemeinen die Energie des Minimums der Ableitung (E_A) angegeben.

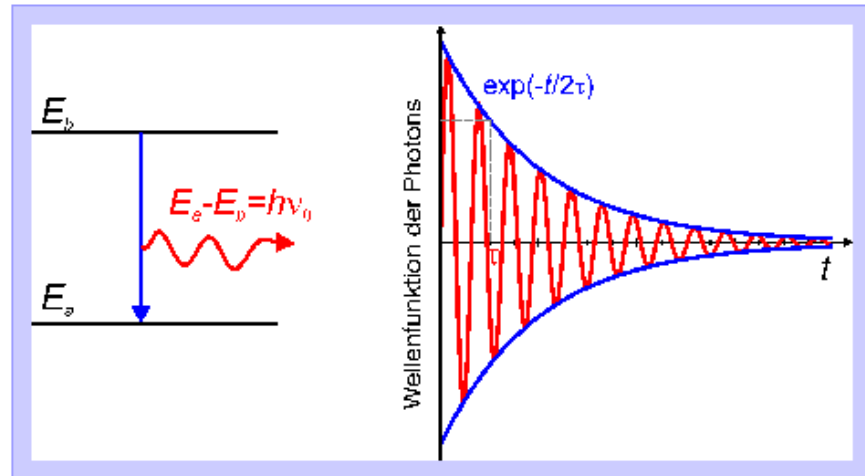
Linienformen

Angeregte Zustände zerfallen exponentiell in der charakteristischen Zeit τ (mittlere Lebensdauer)

$$N(t) = N_0 \exp(-t/\tau)$$

Wellenfunktion des emittierten Quants:

$$\psi(t) = \psi_0 \left(e^{i\omega_0 t} e^{-t/2\tau} + CC \right)$$



Resultierende Spektrum aus Fourier-Transformierten:

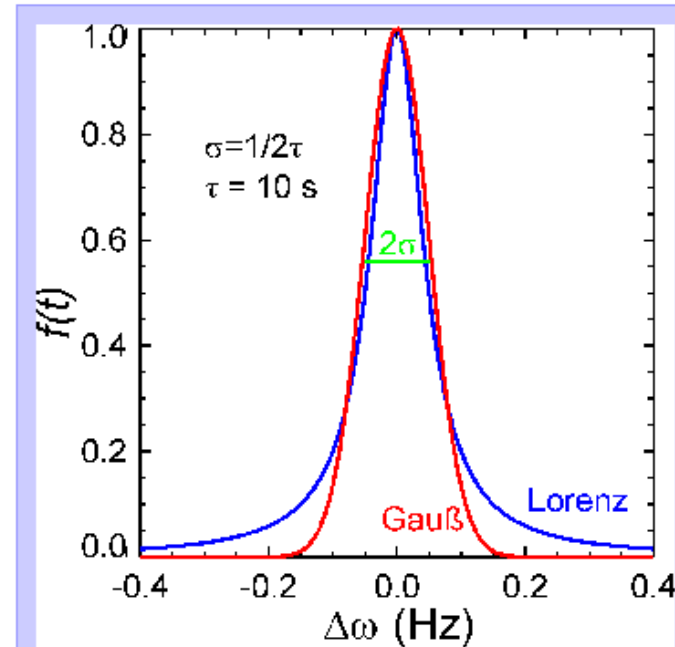
$$C(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i\omega t} dt$$

Integration ergibt:

$$C(\omega) = \frac{-\psi_0}{i(\omega_0 - \omega) - 1/2\tau} + \varepsilon$$

Die natürliche Linienform ist ein **Lorenz-Profil**

$$|C(\omega)|^2 = \frac{I}{(\omega_0 - \omega)^2 + (1/2\tau)^2}$$



Beobachtet man Linien die von einem heißen Gas emittiert werden, so bewirkt der Doppler-Effekt ein **Gauß-Profil**

$$|C(\omega)|^2 = I \exp\left(-(\omega_0 - \omega)^2 / 2\sigma^2\right)$$

Synchrotronstrahlung (-> sehr intensive Bremsstrahlung)

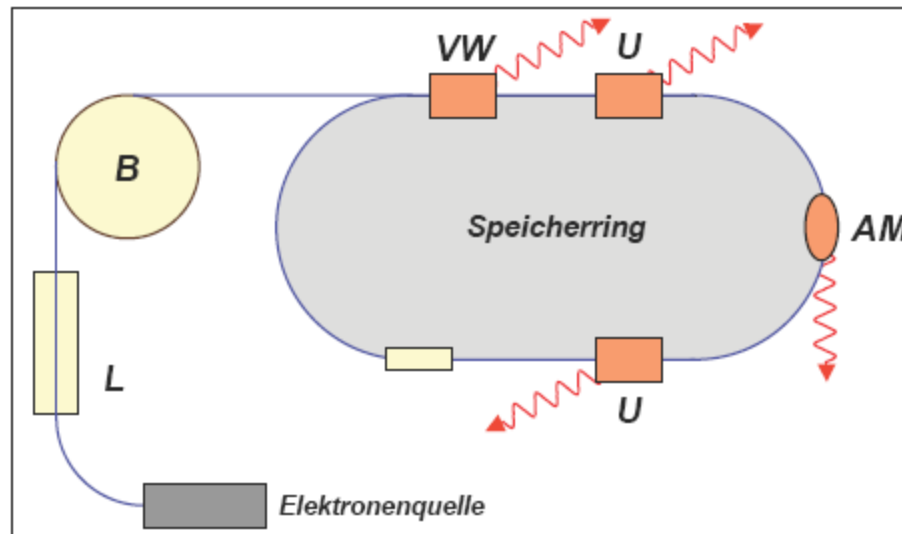


Abbildung 8.10: Schematische Darstellung einer Synchrotronstrahlungsquelle. Der Linearbeschleuniger L sorgt für die Anfangsbeschleunigung, der Booster B ist ein Synchrotron, mit dem die Elektronen bis auf ihre Endenergie (einige GeV) beschleunigt werden. Im Speicherring befinden sich einige Insertion Devices (Undulatoren U , Vielpolwiggler VW oder Ablenkmagneten AM etc.). Mit der Hochfrequenzbeschleunigungsstrecke RF wird der Energieverlust pro Umlauf ausgeglichen.

Synchrotronstrahlung (-> sehr intensive Bremsstrahlung)

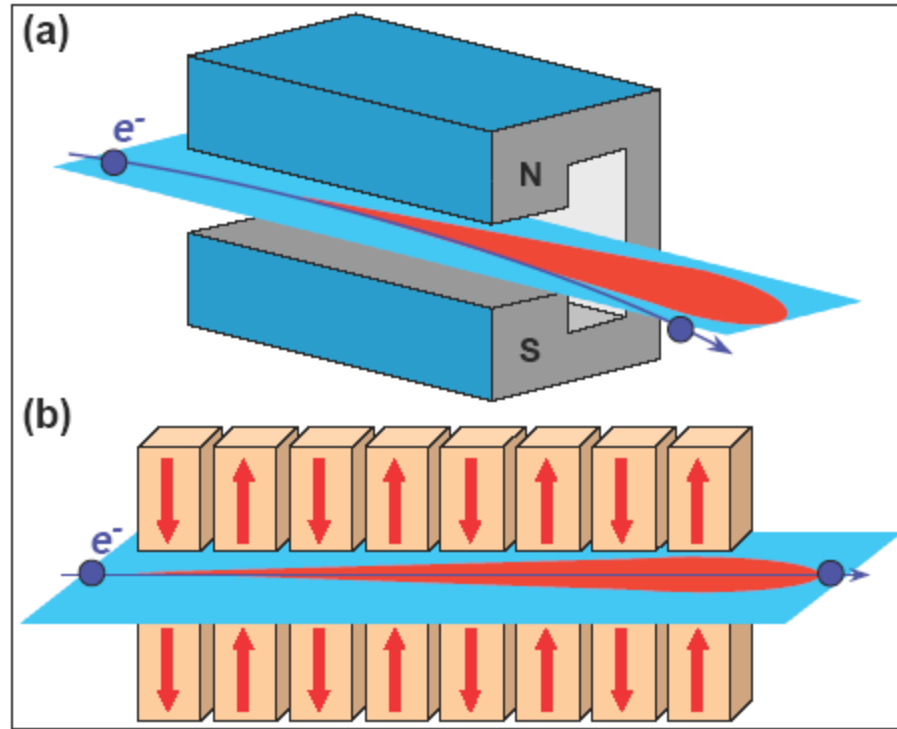


Abbildung 8.11: (a) Schematische Darstellung eines Dipolmagneten zur Ablenkung des Elektronenstrahl in einem Speicherring. (b) Schematische Darstellung eines Undulators. Durch die periodische Variation der Feldrichtung wird der Elektronenstrahl in der Strahlebene hin- und hergelenkt. Die Abstrahlung der Synchrotronstrahlung erfolgt gerichtet in Strahlrichtung (Quelle: ESRF).

Zum Mitnehmen

- Ein- und Mehrelektronenanregungen in Atomen können durch Absorption elektromagnetischer Strahlung oder durch inelastische Stoßprozesse erhalten werden.
- Werden Elektronen aus den inneren Schalen eines Atoms herausgelöst, spricht man von Innerschalenanregungen.
- Röntgenstrahlung entsteht
 1. beim Abbremsen von Elektronen mit Energien im keV-Bereich. Das resultierende Bremsspektrum ist kontinuierlich.
 2. durch Übergänge von Elektronen auf freie Plätze in inneren Schalen. Das daraus resultierende Spektrum ist ein Linienspektrum, das für jedes Atom charakteristisch ist (charakteristische Röntgenstrahlung).
- Die typische Wellenlänge von Röntgenstrahlung liegt zwischen etwa 100 und 0.1 Å, was in etwa Frequenzen ν zwischen 10^{16} und 10^{19} Hz und Photonenenergien $h\nu$ zwischen 0.1 und 100 keV entspricht.
- Die Absorption von Röntgenstrahlung erfolgt über (i) die Photoionisation, (ii) die Compton-Streuung und (iii) die Paarbildung für $E_\gamma \geq 2m_0c^2 \simeq 1$ MeV.
- Der Absorptionskoeffizient aufgrund der Photoionisation steigt als Funktion der Energie der absorbierten Photonen immer dann sprunghaft an, wenn die Photonenenergie gerade dazu ausreicht, ein Elektron aus einer inneren Schale ins Kontinuum anzuheben. Es entstehen für jedes Atom charakteristische Absorptionskanten.
- Das charakteristische Linienspektrum und die Absorptionskanten zeigen eine Feinstruktur, die durch die Feinstruktur der inneren Schalen L, M, N, ... verursacht wird.
- Röntgenstrahlung kann durch Beugung an einem Kristallgitter oder durch Filterung mit dünnen Metallfolien monochromatisiert werden.

Elektronenanordnung im Grundzustand

Schale			K	L		M			N
Z		Element	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s
1	H	Wasserstoff	1						
2	He	Helium	2						
3	Li	Lithium	2	1					
4	Be	Beryllium	2	2					
5	B	Bor	2	2	1				
6	C	Kohlenstoff	2	2	2				
7	N	Stickstoff	2	2	3				
8	O	Sauerstoff	2	2	4				
9	F	Fluor	2	2	5				
10	Ne	Neon	2	2	6				
11	Na	Natrium	2	2	6	1			
12	Mg	Magnesium	2	2	6	2			
13	Al	Aluminium	2	2	6	2	1		
14	Si	Silizium	2	2	6	2	2		
15	P	Phosphor	2	2	6	2	3		
16	S	Schwefel	2	2	6	2	4		
17	Cl	Chlor	2	2	6	2	5		
18	Ar	Argon	2	2	6	2	6		
19	K	Kalium	2	2	6	2	6		1
20	Ca	Calcium	2	2	6	2	6		2
21	Sc	Scandium	2	2	6	2	6	1	2
22	Ti	Titan	2	2	6	2	6	2	2
23	V	Vanadium	2	2	6	2	6	3	2
24	Cr	Chrom	2	2	6	2	6	5	1
25	Mn	Mangan	2	2	6	2	6	5	2
26	Fe	Eisen	2	2	6	2	6	6	2
27	Co	Kobalt	2	2	6	2	6	7	2

Schale			K	L		M			N			O	
Z		Element	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	5s	5p
28	Ni	Nickel	2	2	6	2	6	8	2				
29	Cu	Kupfer	2	2	6	2	6	10	1				
30	Zn	Zink	2	2	6	2	6	10	2				
31	Ga	Gallium	2	2	6	2	6	10	2	1			
32	Ge	Germanium	2	2	6	2	6	10	2	2			
33	Ar	Arsen	2	2	6	2	6	10	2	3			
34	Se	Selen	2	2	6	2	6	10	2	4			
35	Br	Brom	2	2	6	2	6	10	2	5			
36	Kr	Krypton	2	2	6	2	6	10	2	6			
37	Rb	Rubidium	2	2	6	2	6	10	2	6		1	
38	Sr	Strontium	2	2	6	2	6	10	2	6		2	
39	Y	Yttrium	2	2	6	2	6	10	2	6	1	2	
40	Zr	Zirkonium	2	2	6	2	6	10	2	6	2	2	
41	Nb	Niob	2	2	6	2	6	10	2	6	4	1	
42	Mo	Molybdän	2	2	6	2	6	10	2	6	5	1	
43	Tc	Technetium	2	2	6	2	6	10	2	6	6	1	
44	Ru	Ruthenium	2	2	6	2	6	10	2	6	7	1	
45	Rh	Rhodium	2	2	6	2	6	10	2	6	8	1	
46	Pd	Palladium	2	2	6	2	6	10	2	6	10		
47	Ag	Silber	2	2	6	2	6	10	2	6	10	1	
48	Cd	Cadmium	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	
49	In	Indium	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	1
50	Sn	Zinn	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	2
51	Sb	Antimon	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	3
52	Te	Tellur	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	4
53	I	Iod	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	5
54	Xe	Xenon	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	6

Elektronenanordnung im Grundzustand

Schale			N	O					P
Z		Element	4f	5s	5p	5d	5f	6s	
55	Cs	Cäsium		2	6			1	
56	Ba	Barium		2	6			2	
57	La	Lanthan		2	6	1		2	
58	Ce	Cer	2	2	6			2	
59	Pr	Praseodym	3	2	6			2	
60	Nd	Neodym	4	2	6			2	
61	Pm	Promethium	5	2	6			2	
62	Sm	Samarium	6	2	6			2	
63	Eu	Europium	7	2	6			2	
64	Gd	Gadolinium	7	2	6	1		2	
65	Tb	Terbium	9	2	6			2	
66	Dy	Dysprosium	10	2	6			2	
67	Ho	Holmium	11	2	6			2	
68	Er	Erbium	12	2	6			2	
69	Tm	Thulium	13	2	6			2	
70	Yb	Ytterbium	14	2	6			2	
71	Lu	Lutetium	14	2	6	1		2	
72	Hf	Hafnium	14	2	6	2		2	
73	Ta	Tantal	14	2	6	3		2	
74	W	Wolfram	14	2	6	4		2	
75	Re	Rhenium	14	2	6	5		2	
76	Os	Osmium	14	2	6	6		2	
77	Ir	Iridium	14	2	6	7		2	
78	Pt	Platin	14	2	6	9		1	
79	Au	Gold	14	2	6	10		1	

Schale			N	O					P			Q
Z		Element	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	7s	
80	Hg	Quecksilber	14	2	6	10		2				
81	Tl	Thallium	14	2	6	10		2	1			
82	Pb	Blei	14	2	6	10		2	2			
83	Bi	Bismut	14	2	6	10		2	3			
84	Po	Polonium	14	2	6	10		2	4			
85	At	Astat	14	2	6	10		2	5			
86	Rn	Radon	14	2	6	10		2	6			
87	Fr	Francium	14	2	6	10		2	6		1	
88	Ra	Radium	14	2	6	10		2	6		2	
89	Ac	Actinium	14	2	6	10		2	6	1	2	
90	Th	Thorium	14	2	6	10		2	6	2	2	
91	Pa	Protactinium	14	2	6	10	2	2	6	1	2	
92	U	Uran	14	2	6	10	3	2	6	1	2	
93	Np	Neptunium	14	2	6	10	5	2	6		2	
94	Pu	Plutonium	14	2	6	10	6	2	6		2	
95	Am	Americium	14	2	6	10	7	2	6		2	
96	Cm	Curium	14	2	6	10	7	2	6	1	2	
97	Bk	Berkelium	14	2	6	10	8	2	6	1	2	
98	Cf	Californium	14	2	6	10	10	2	6		2	
99	Es	Einsteinium	14	2	6	10	11	2	6		2	
100	Fm	Fermium	14	2	6	10	12	2	6		2	
101	Md	Mendelevium	14	2	6	10	13	2	6		2	
102	No	Nobelium	14	2	6	10	14	2	6		2	
103	Lr	Lawrencium	14	2	6	10	14	2	6	1	2	
104	Rf	Rutherfordium	14	2	6	10	14	2	6	2	2	