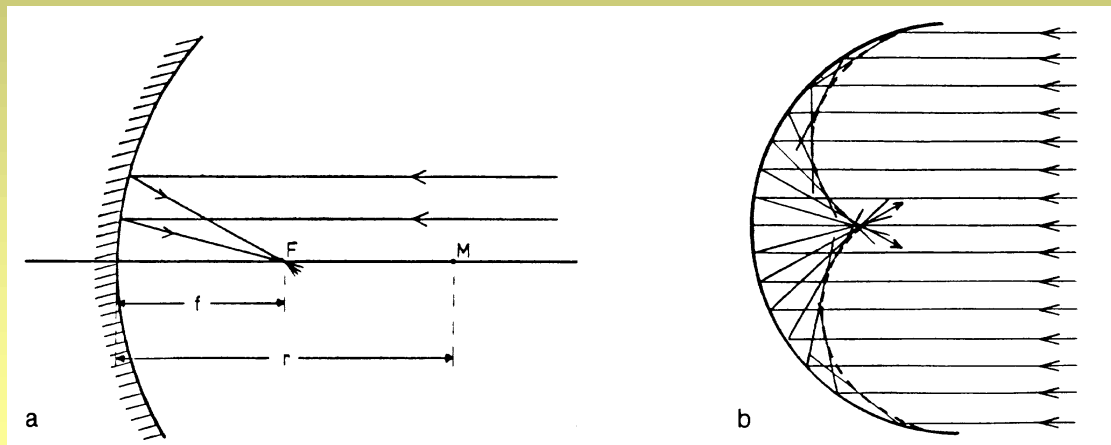
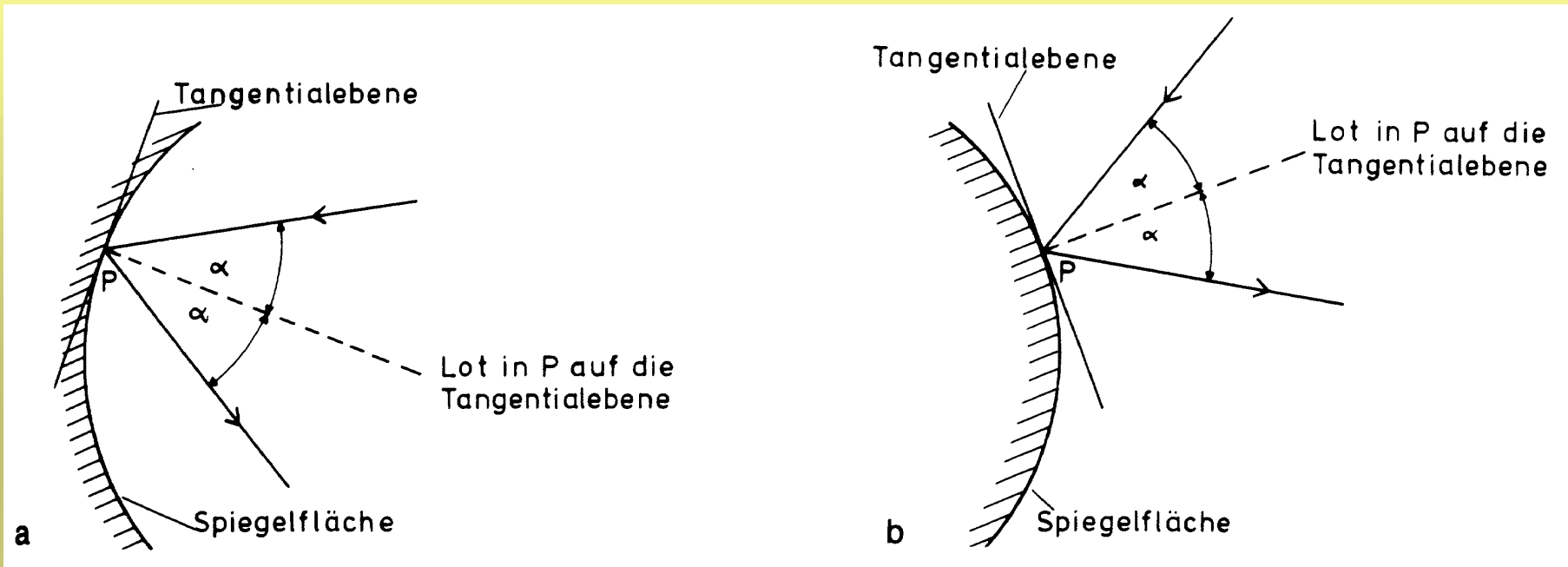


Elektromagnetisches Spektrum

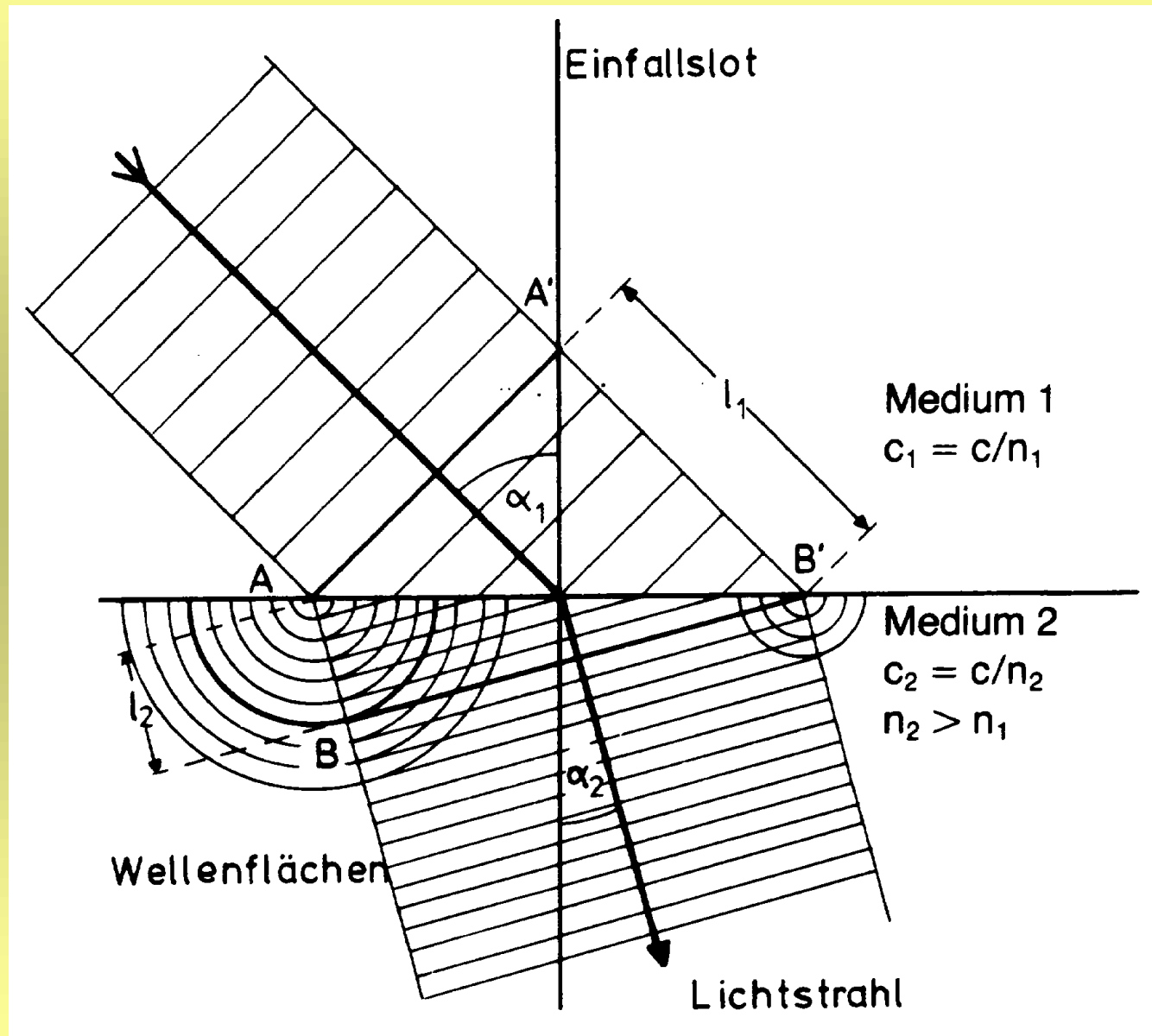
		Wellenlänge in m	Frequenz in Hz	Energie in eV
Rundfunk Wellen		10^4	$3 \cdot 10^4$	$1,24 \cdot 10^{-10}$
	Langwellen	$10^3 = 1 \text{ km}$	$3 \cdot 10^5$	$1,24 \cdot 10^{-9}$
	Mittelwellen	10^2	$3 \cdot 10^6$	$1,24 \cdot 10^{-8}$
	Kurzwellen	10^1	$3 \cdot 10^7$	$1,24 \cdot 10^{-7}$
	UHF Radar	$10^0 = 1 \text{ m}$	$3 \cdot 10^8$	$1,24 \cdot 10^{-6}$
	Ultrakurzwellen	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$	$1,24 \cdot 10^{-5}$
		$10^{-2} = 1 \text{ cm}$	$3 \cdot 10^{10}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$
optische Wellen		$10^{-3} = 1 \text{ mm}$	$3 \cdot 10^{11}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$
	Oberfläche des menschlichen Körpers	10^{-4}	$3 \cdot 10^{12}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$
	Wärme(IR) Strahlen	10^{-5}	$3 \cdot 10^{13}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$
	Oberfläche der Sonne	$10^{-6} = 1 \text{ } \mu\text{m}$	$3 \cdot 10^{14}$	1,24
	sichtbares Licht	10^{-7}	$3 \cdot 10^{15}$	$1,24 \cdot 10^1$
	ultraviolette Strahlen	10^{-8}	$3 \cdot 10^{16}$	$1,24 \cdot 10^2$
Röntgenstrahlen		$10^{-9} = 1 \text{ nm}$	$3 \cdot 10^{17}$	$1,24 \cdot 10^3$
	weiche Röntgenstrahlen	$10^{-10} = 1 \text{ } \text{Å}$	$3 \cdot 10^{18}$	$1,24 \cdot 10^4$
	harte Röntgenstrahlen	10^{-11}	$3 \cdot 10^{19}$	$1,24 \cdot 10^5$
	ultraharte Röntgenstrahlen	$10^{-12} = 1 \text{ pm}$	$3 \cdot 10^{20}$	$1,24 \cdot 10^6$
	Gammastrahlen	10^{-13}	$3 \cdot 10^{21}$	$1,24 \cdot 10^7$
	10^{-14}	$3 \cdot 10^{22}$	$1,24 \cdot 10^8$	

Reflexionsgesetz

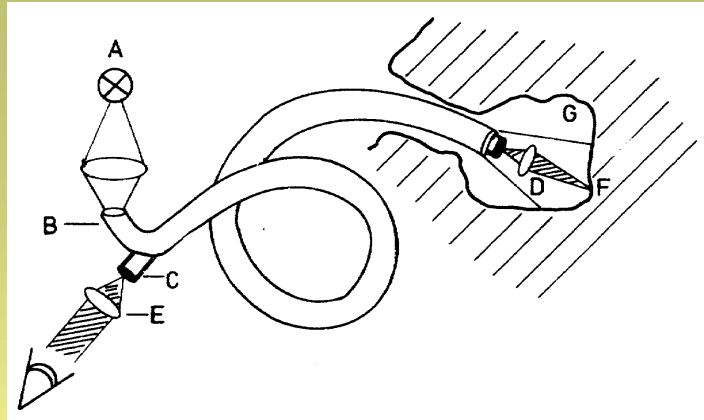
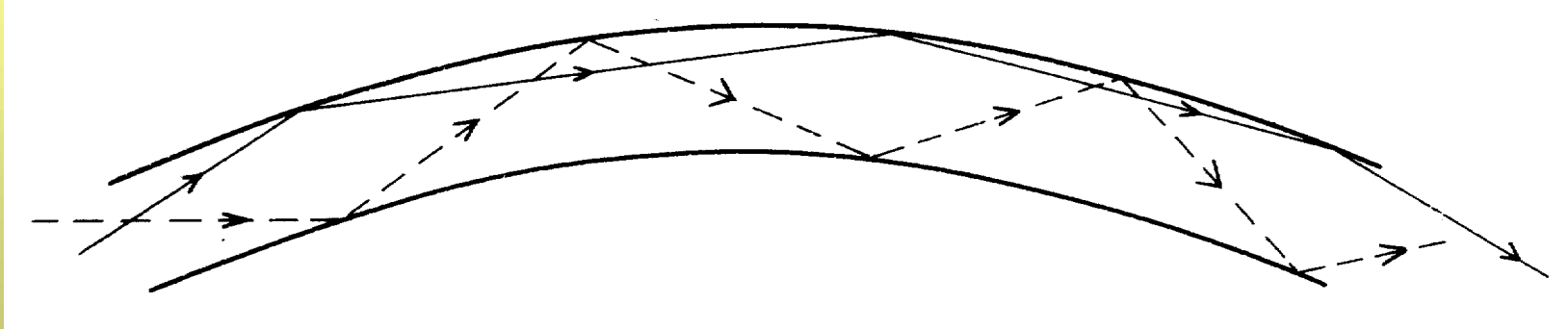


**Kaustik bei
achsenfernen
Strahlen**

Brechungsgesetz



Totalreflexion: Lichtleiter

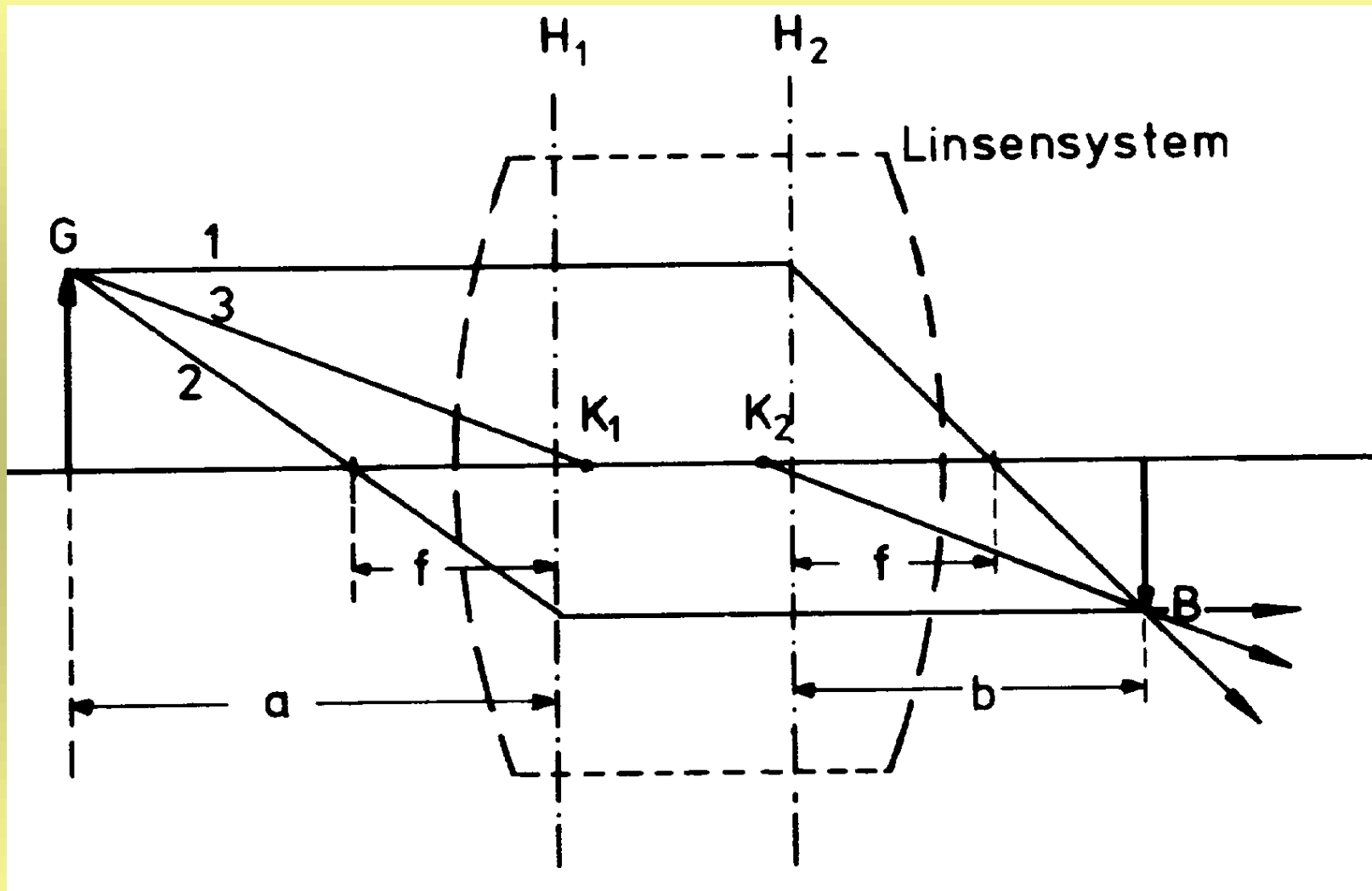


Prinzip Lichtleiterendoskop



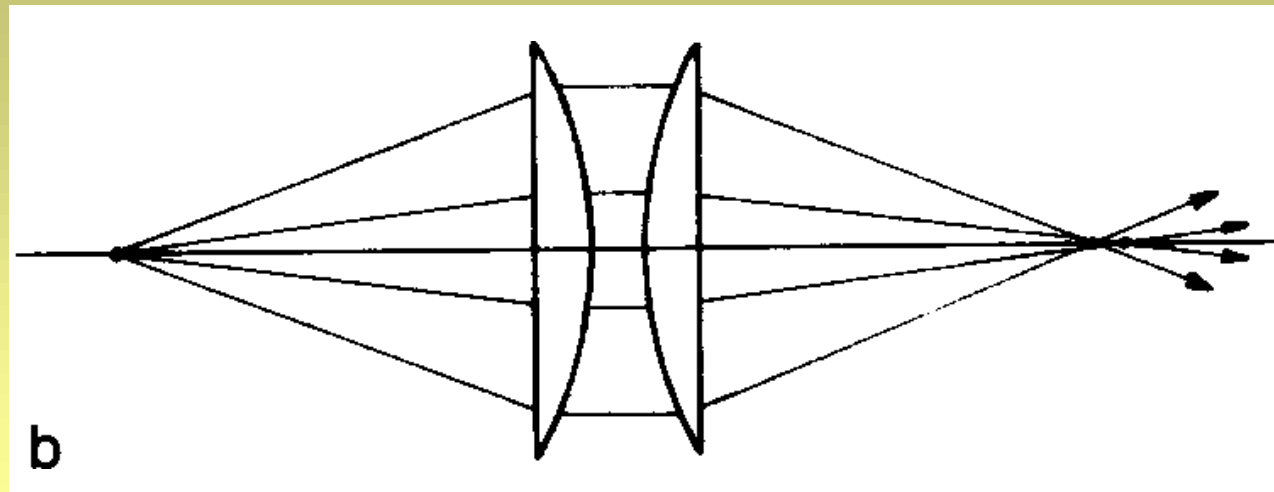
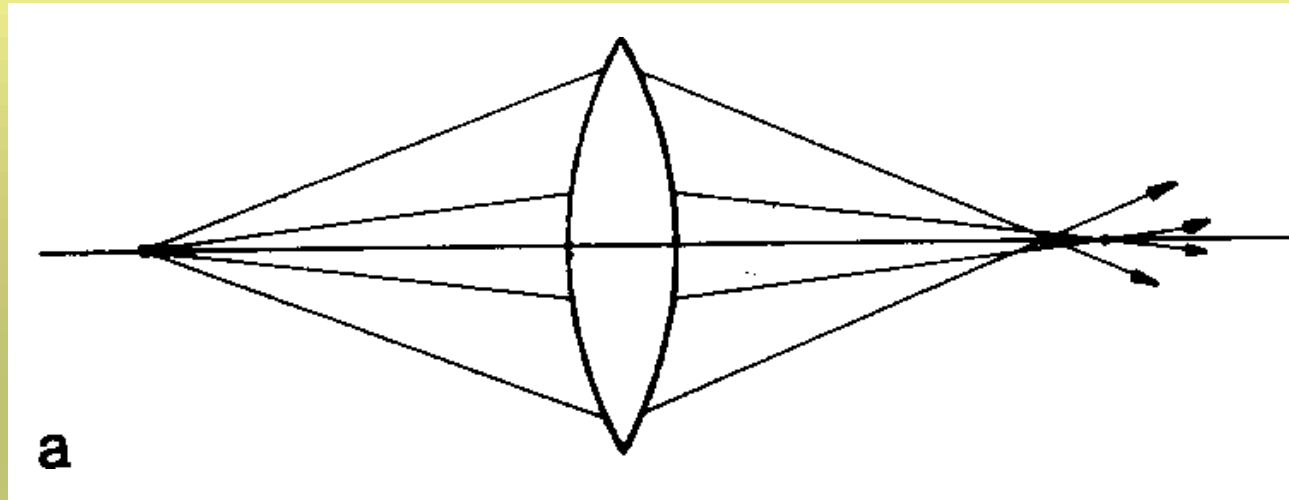
geordnetes Lichtleiterbündel
zur Bildübertragung

Dicke Linsen

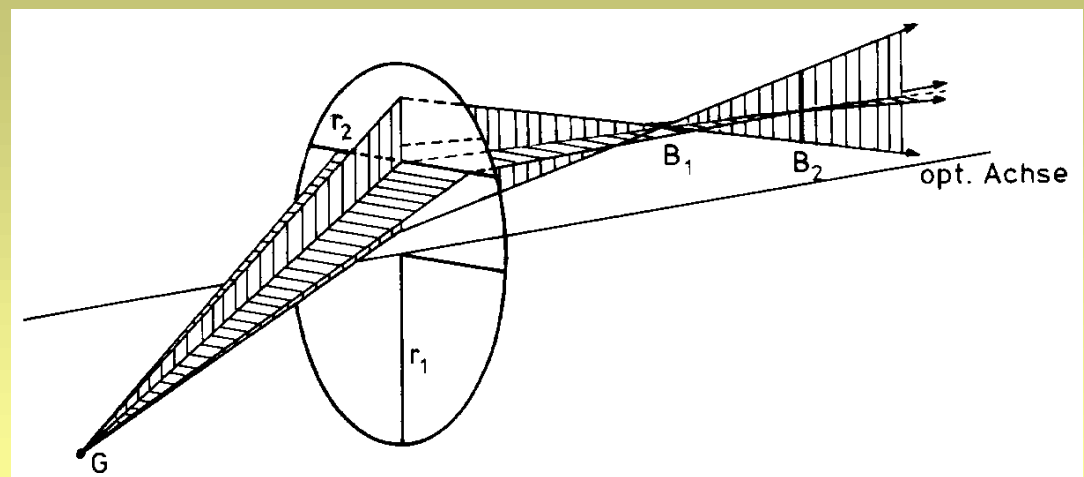
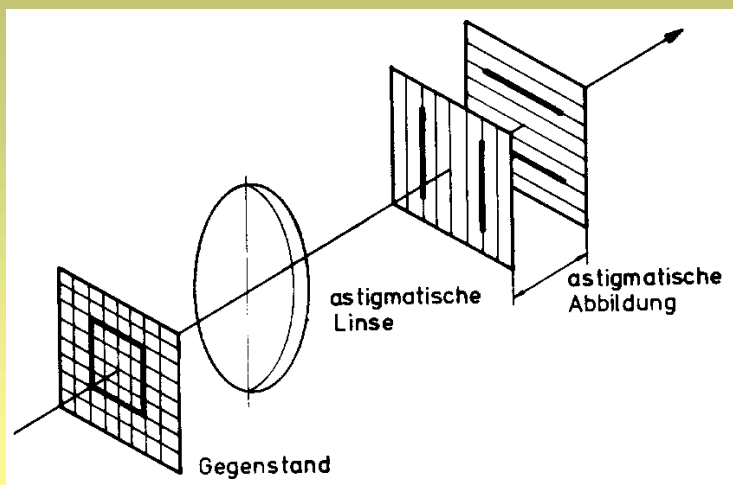
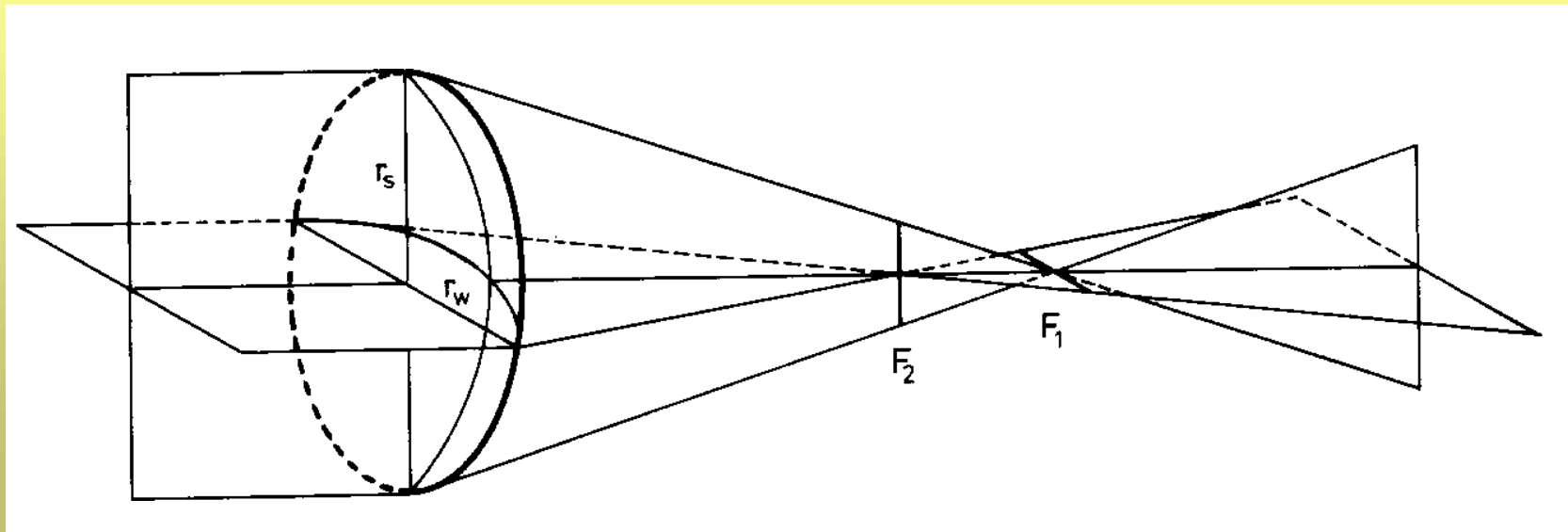


H - Hauptebene K - Knotenpunkt

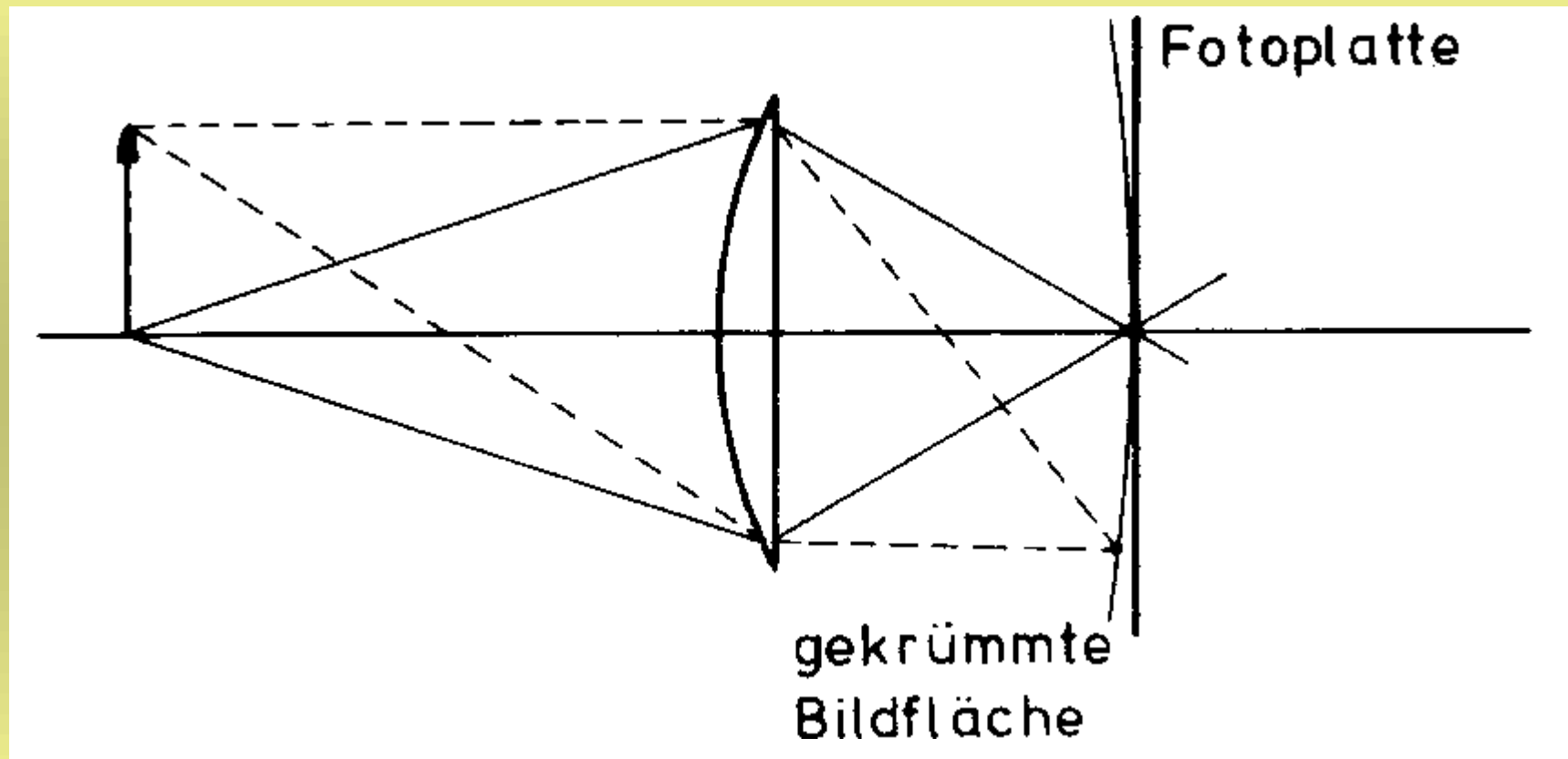
Linsenfehler: Sphärische Aberration



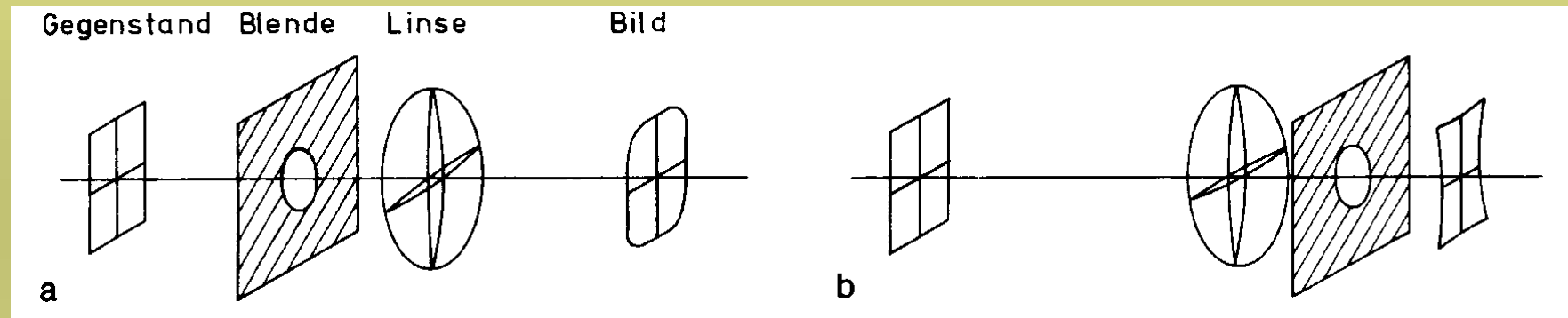
Linsenfehler: Astigmatismus



Linsenfehler: Bildfeldwölbung



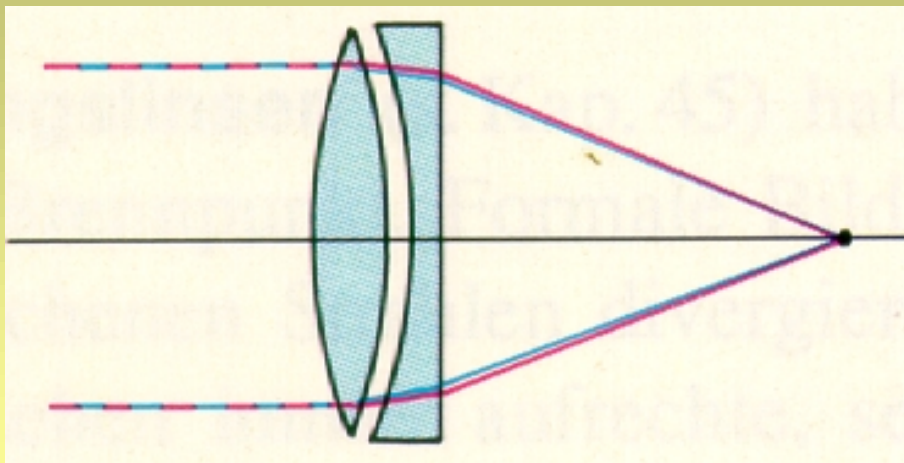
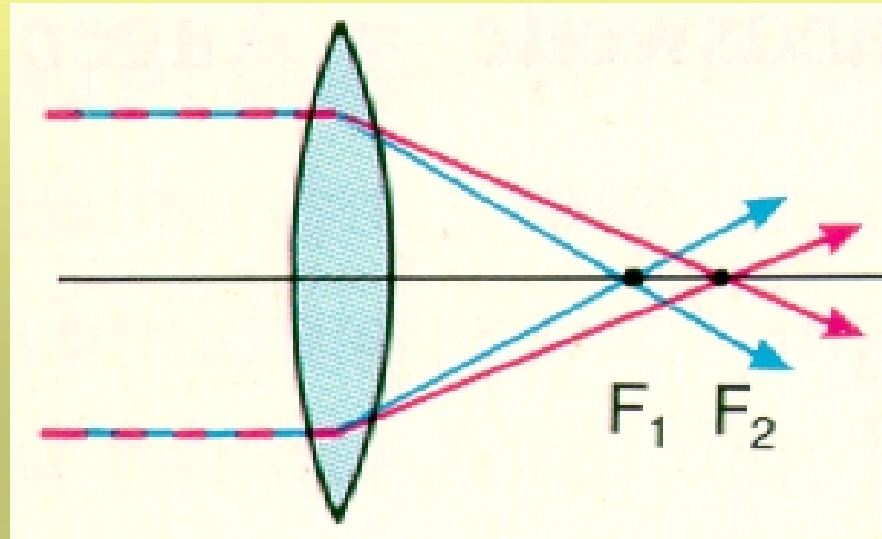
Linsenfehler: Verzeichnung



tonnenförmig

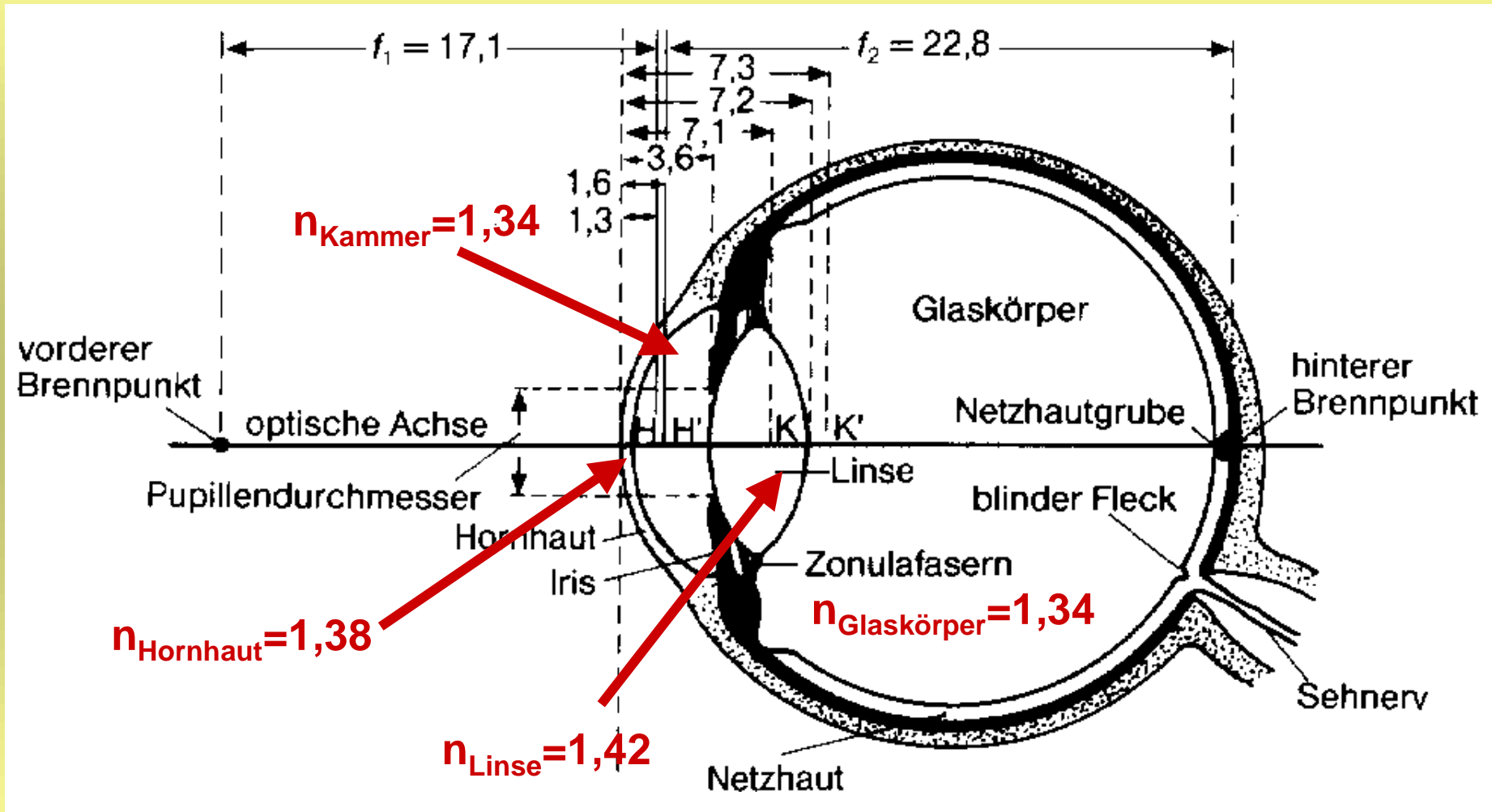
kissenförmig

Linsenfehler: Chromatische Aberration

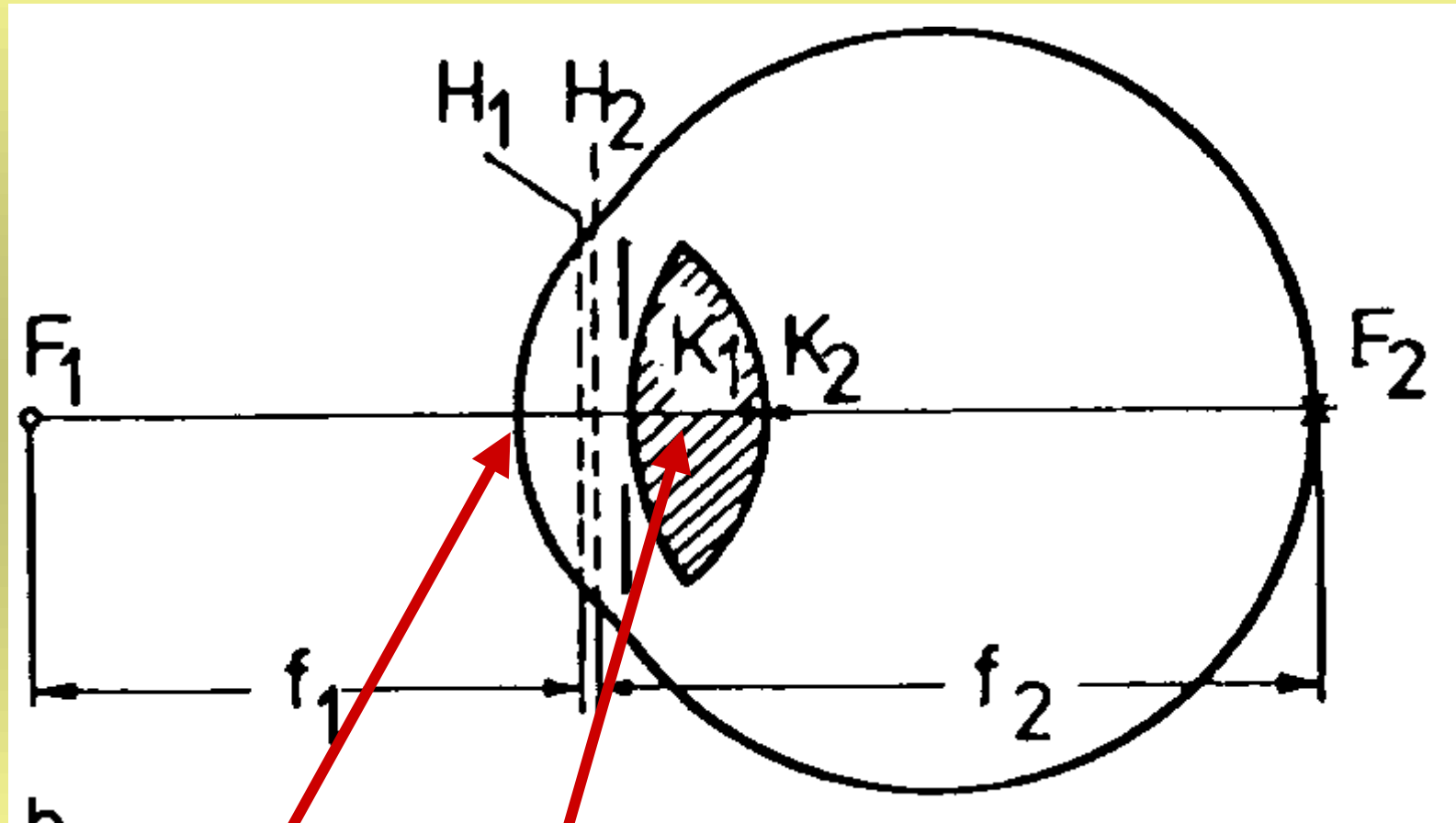


Achromat

Das Auge



Das Auge



42 dpt

19 dpt - 34 dpt

Auge_{gesamt}: 61 dpt - 76 dpt

Das Auge: Fehlsichtigkeit

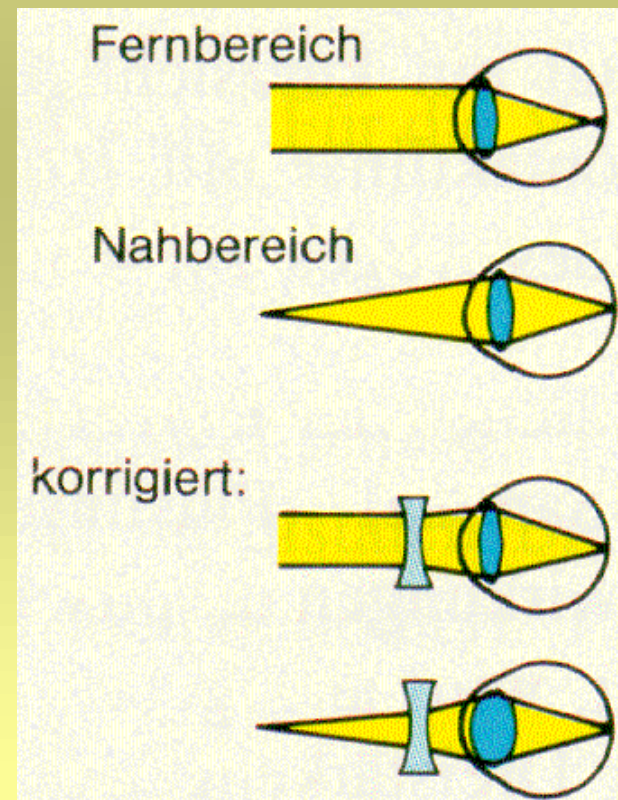
- Normalsichtigkeit (Emmetropie)

Bild entsteht auf der Netzhaut

- Kurzsichtigkeit (Myopie):

Bild entsteht vor der
Netzhaut,
weil entweder Brechkraft der
Linse zu groß oder
Glaskörper zu lang

**Korrektur durch
Zerstreuungslinse**



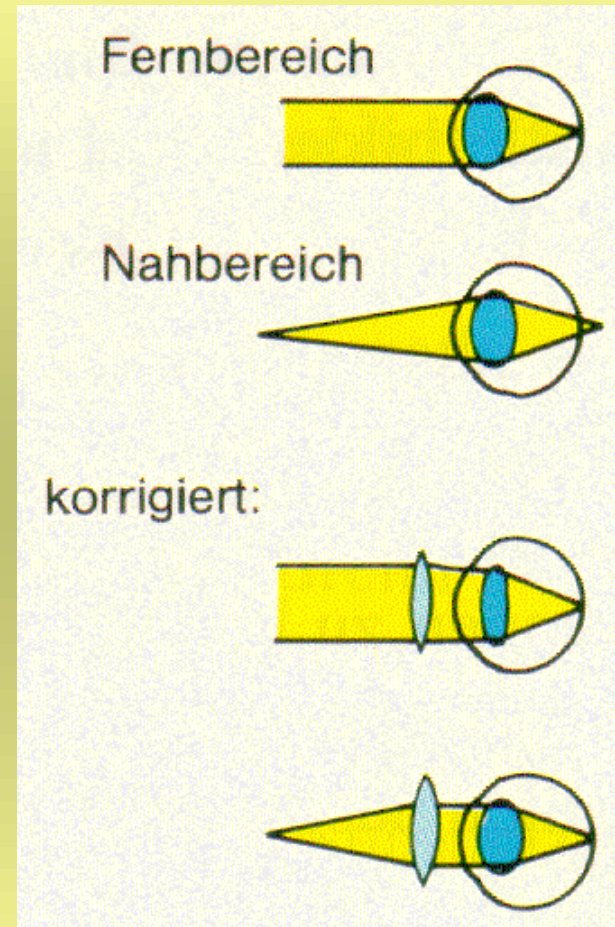
Das Auge: Fehlsichtigkeit

- Weitsichtigkeit (Hyperopie):

Bild entsteht hinter der Netzhaut, weil entweder Brechkraft der Linse zu klein oder Glaskörper zu kurz

Korrektur durch Sammellinse

(Altersweitsichtigkeit: Akkomodationsvermögen sinkt von 15 dpt auf 1 dpt)

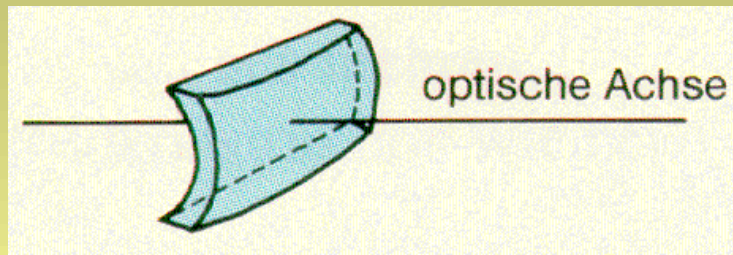
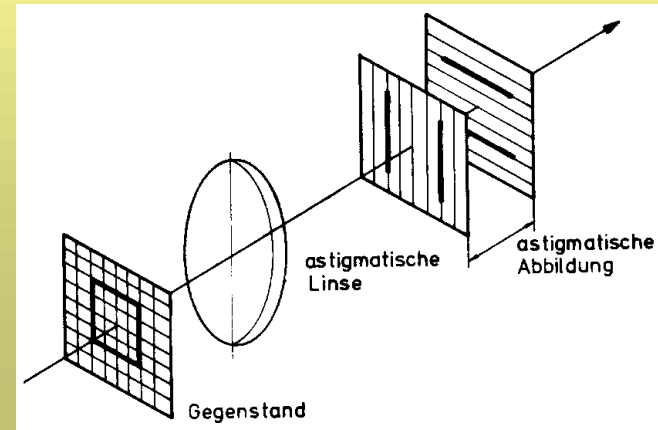


Das Auge: Fehlsichtigkeit

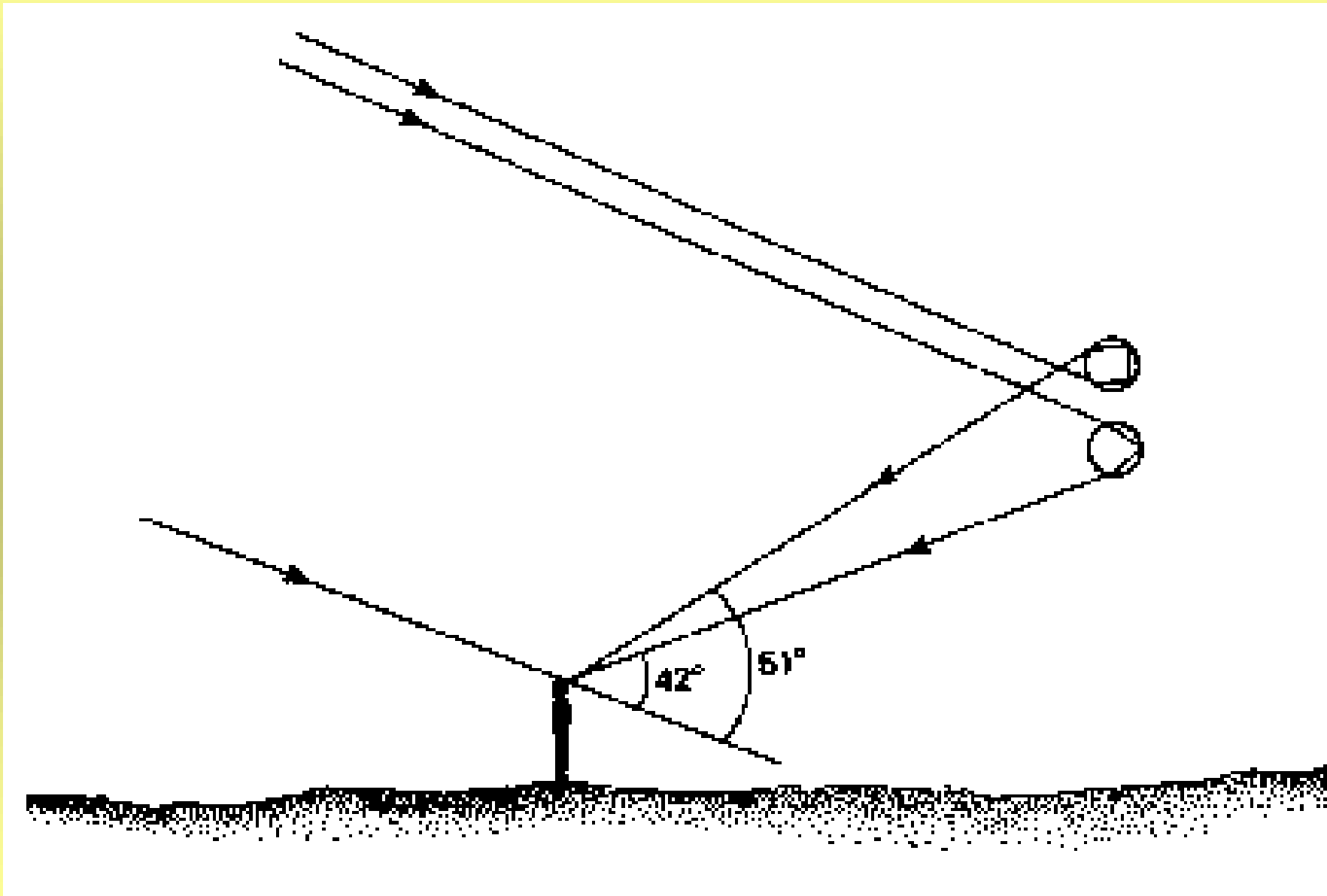
- Astigmatismus:

infolge von
Hornhautverkrümmung
(Abweichung von Kugelform)

Korrektur durch Zylinderlinse



Regenbogen



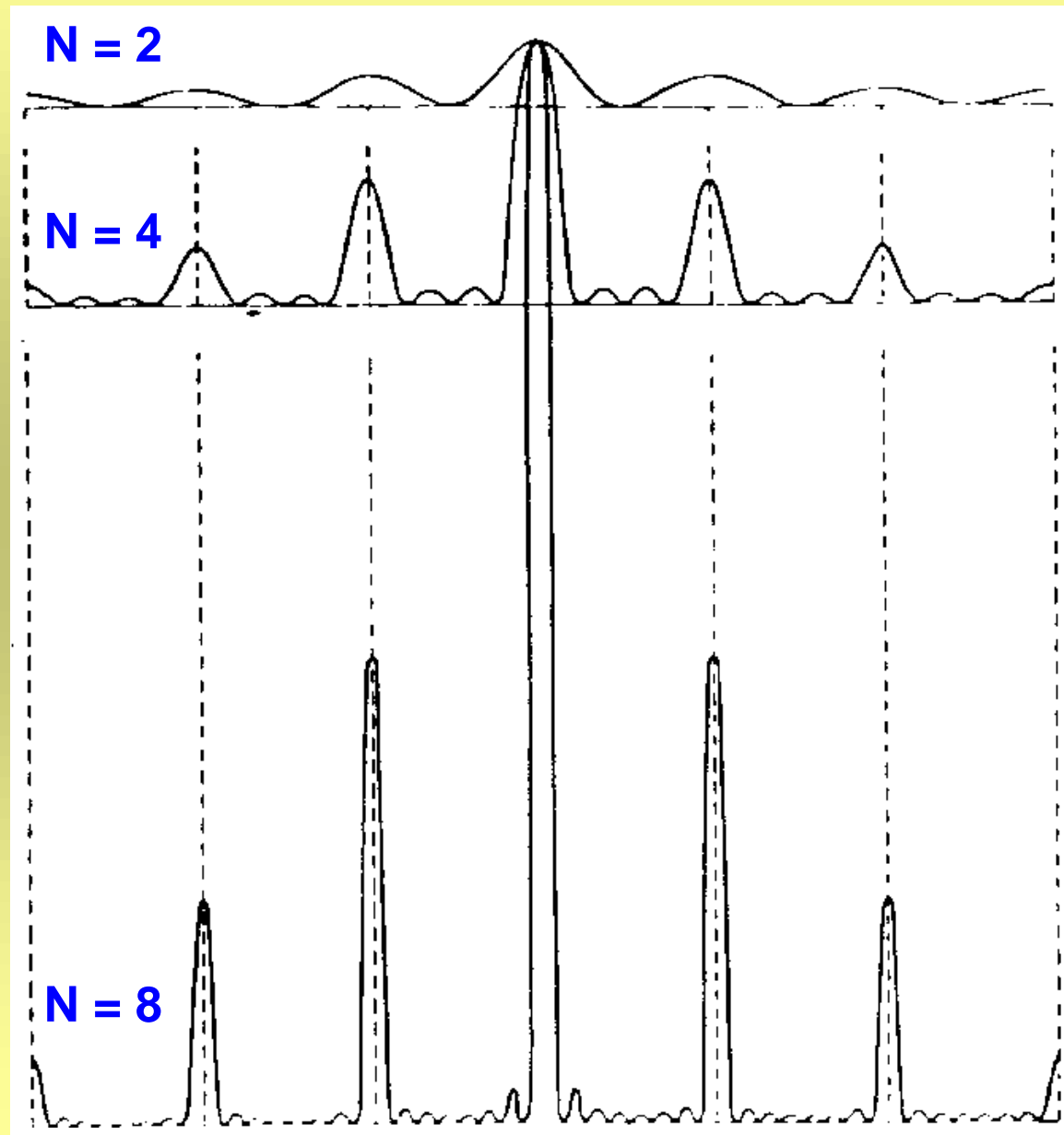
Doppelter Regenbogen



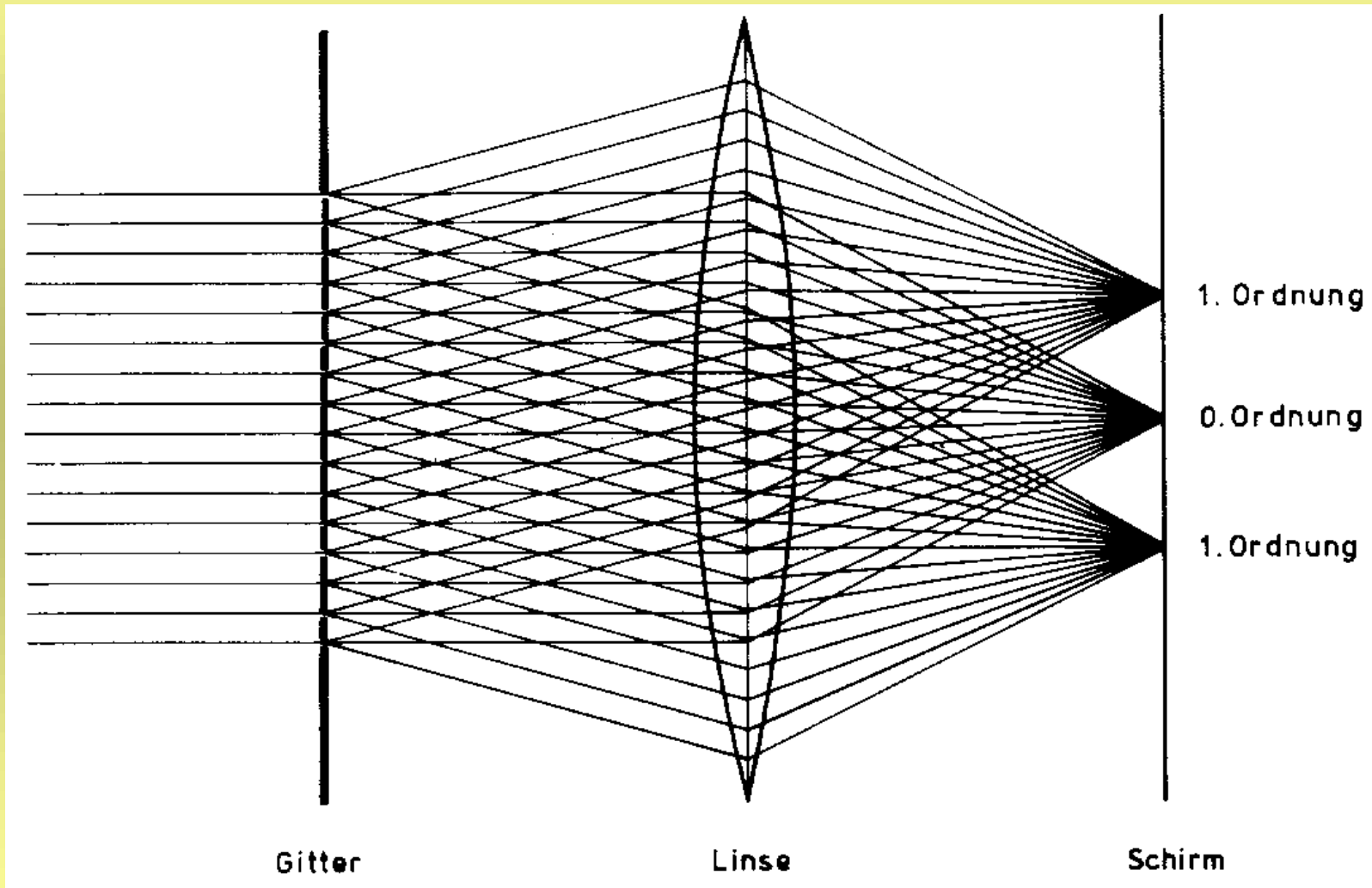
<http://www.schremmer.de/html/halos.htm>



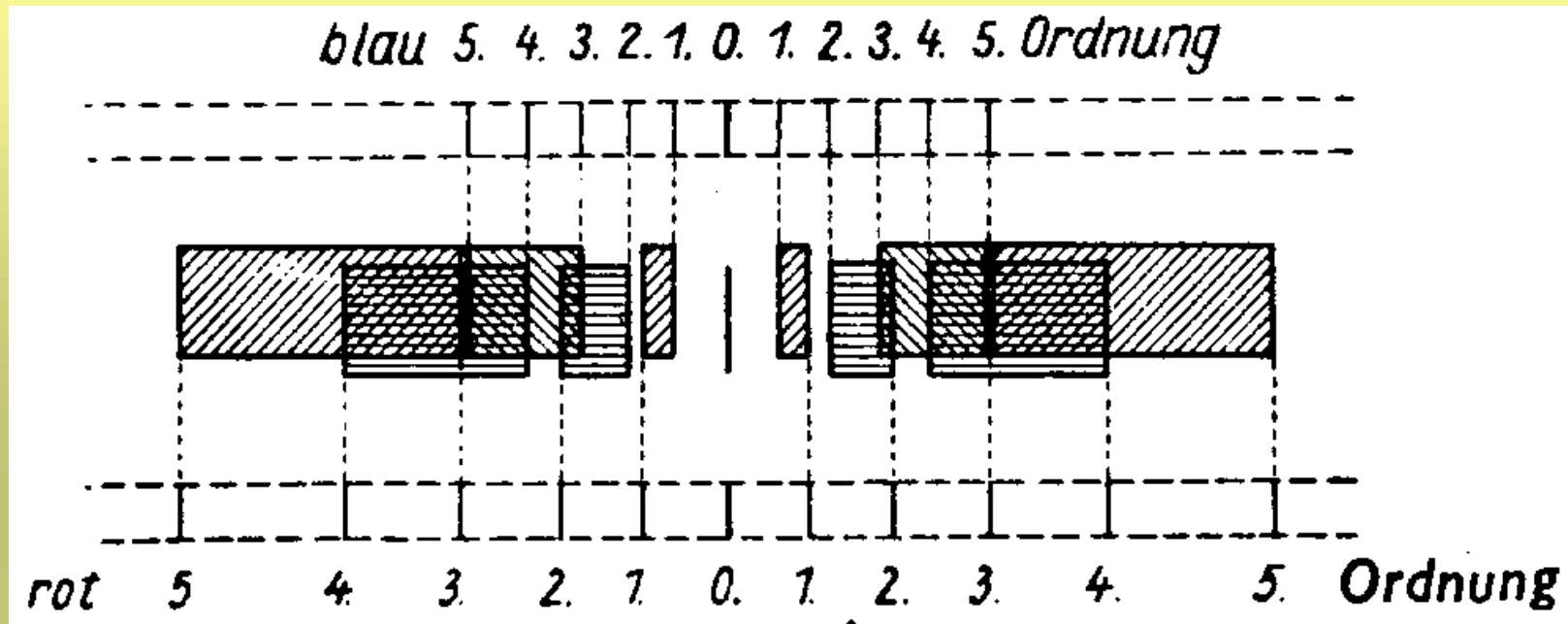
Vom Doppelspalt zum Gitter



Gitter



Gitter: Auflösungsvermögen



Auflösungsvermögen:

$$\frac{\lambda}{d\lambda} = k \cdot N$$

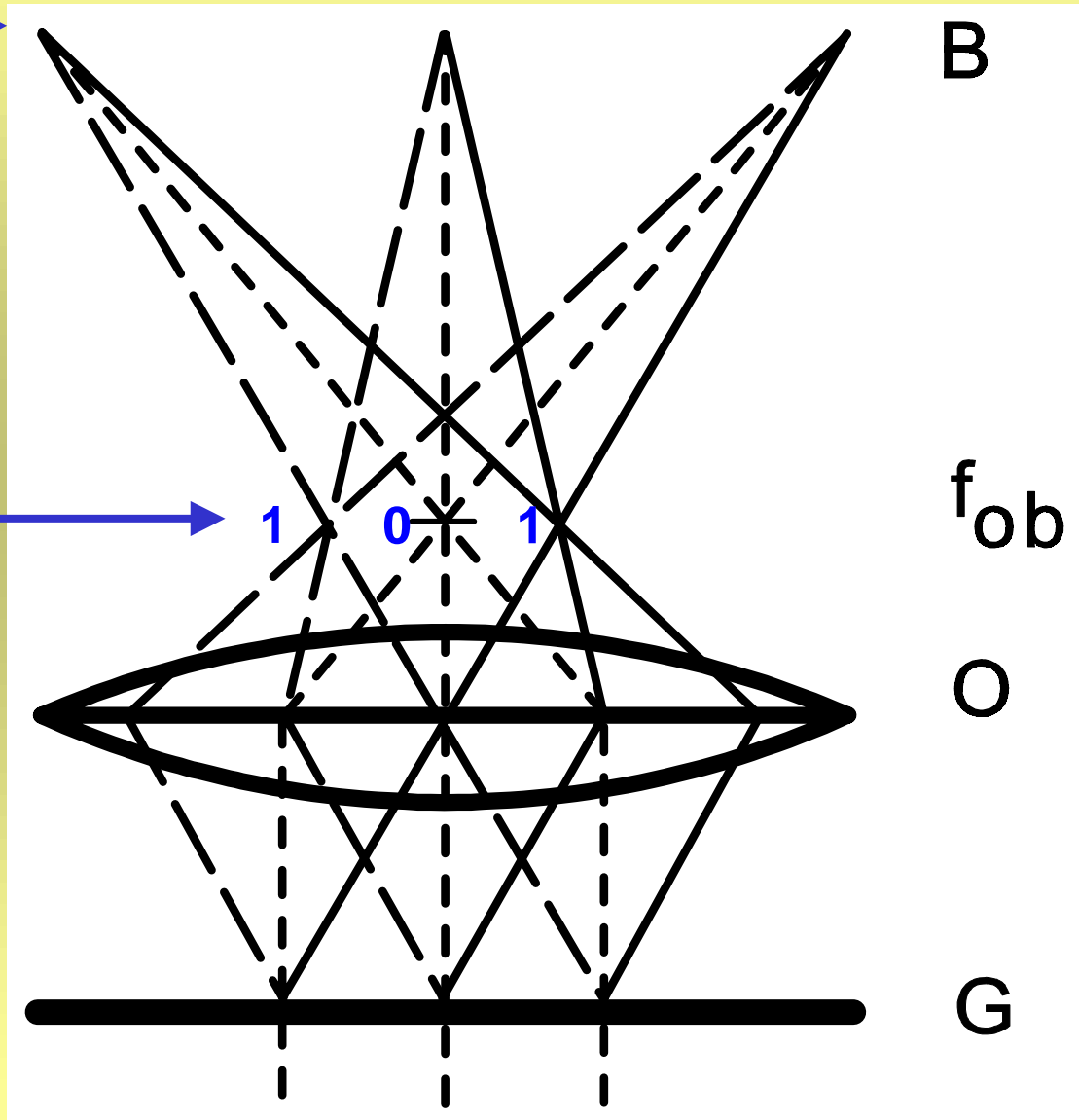
Mikroskop: Abbé'sche Theorie

Sekundäres Bild

Primäres Bild

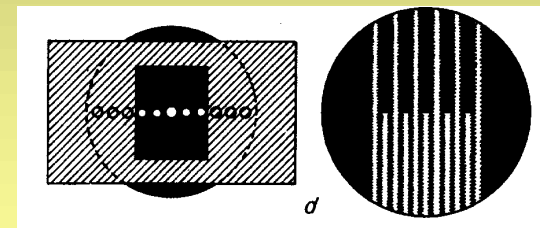
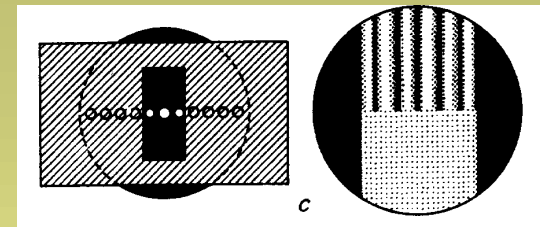
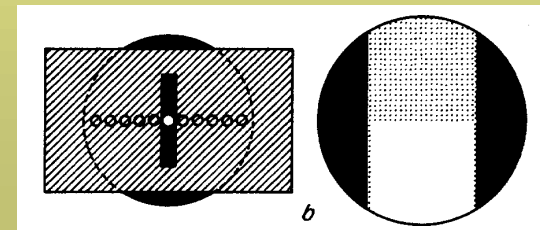
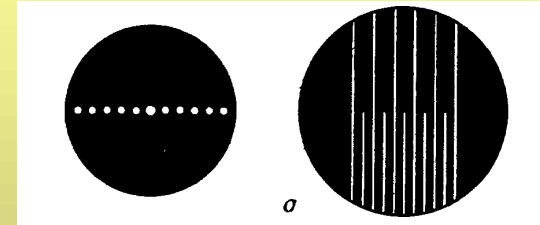
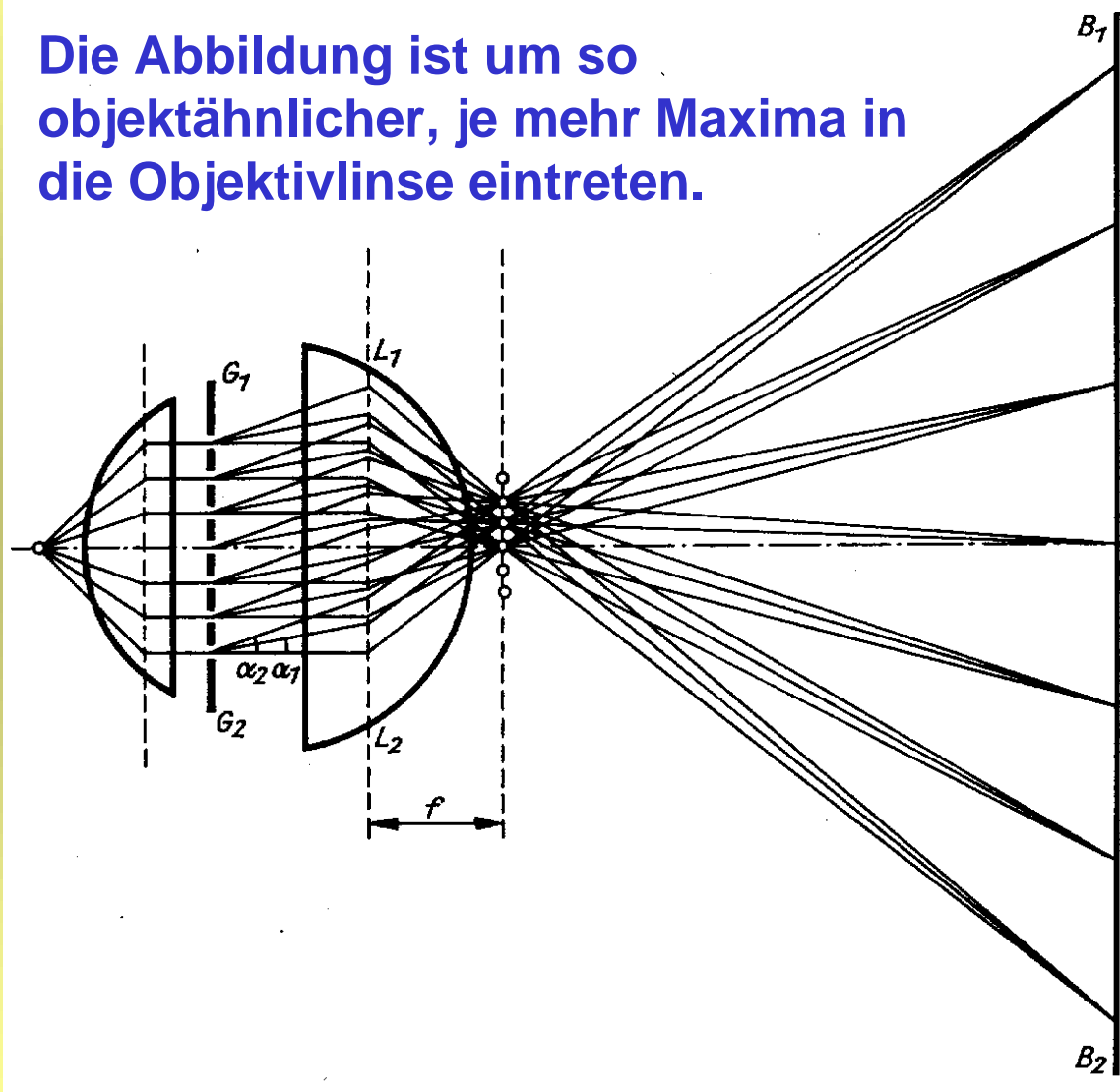
Am Gegenstand erfolgt
Beugung

Neben Maximum der
0. Ordnung muß
mindestens Maximum
der 1. Ordnung zum Bild
beitragen.

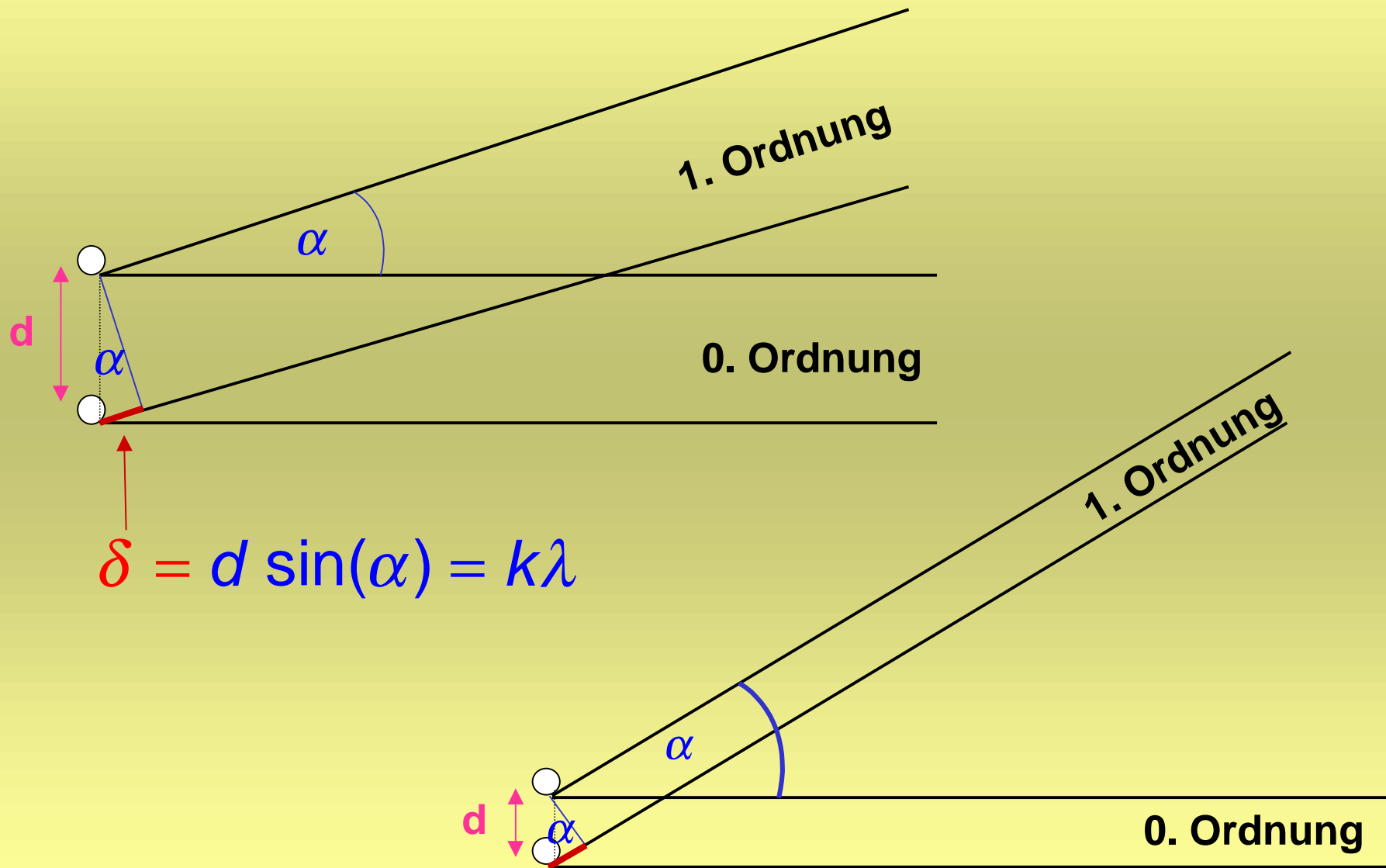


Mikroskop: Abbé'sche Theorie

Die Abbildung ist um so objektähnlicher, je mehr Maxima in die Objektivlinse eintreten.



Mikroskop: Auflösungsvermögen



Mikroskop: Auflösungsvermögen

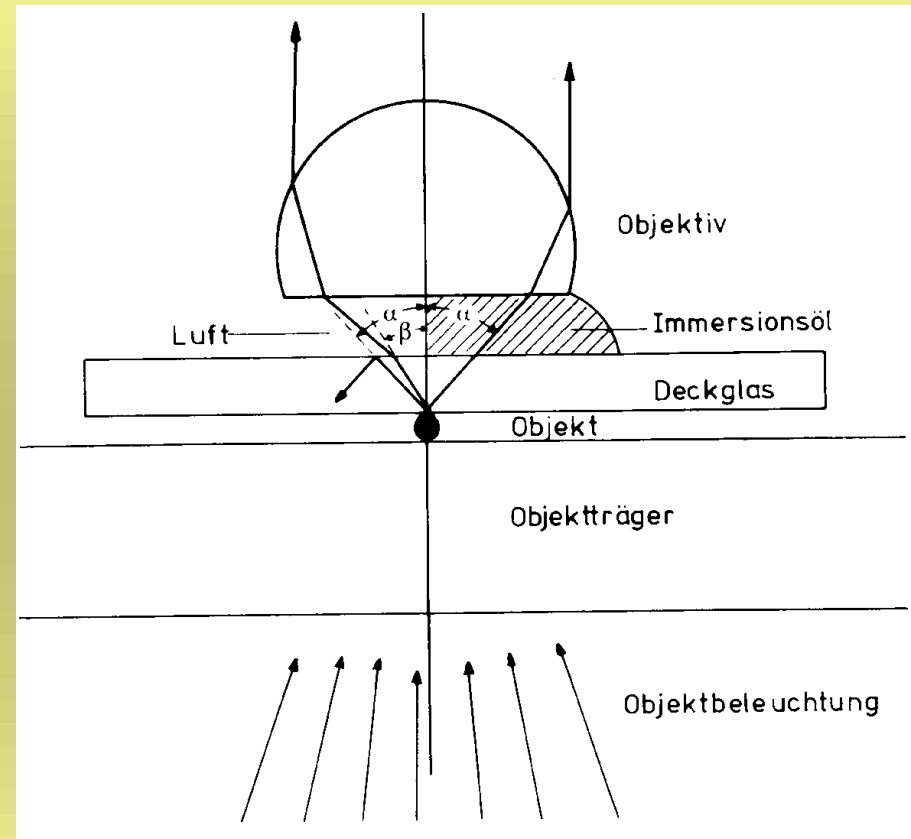
Auflösungsvermögen entspricht dem Kehrwert des kleinsten Abstands d , den man noch unterscheiden kann.

$$d \approx \frac{\lambda}{A} = \frac{\lambda}{n \sin \alpha}$$

Verbesserung des Auflösungsvermögens durch:

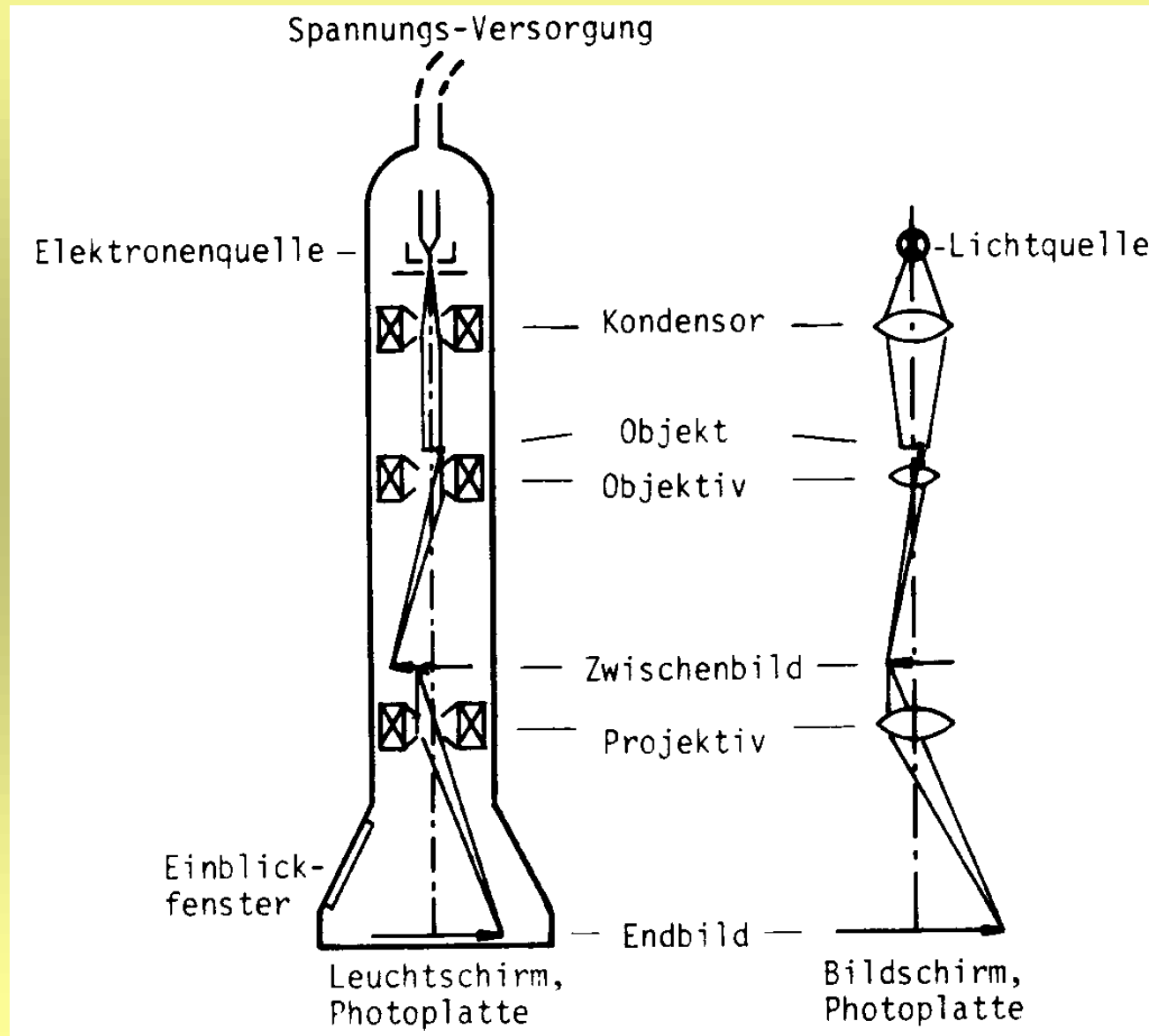
- Verkleinerung von λ
- Vergrößerung von A (Immersionssystem)

Förderliche Vergrößerung?

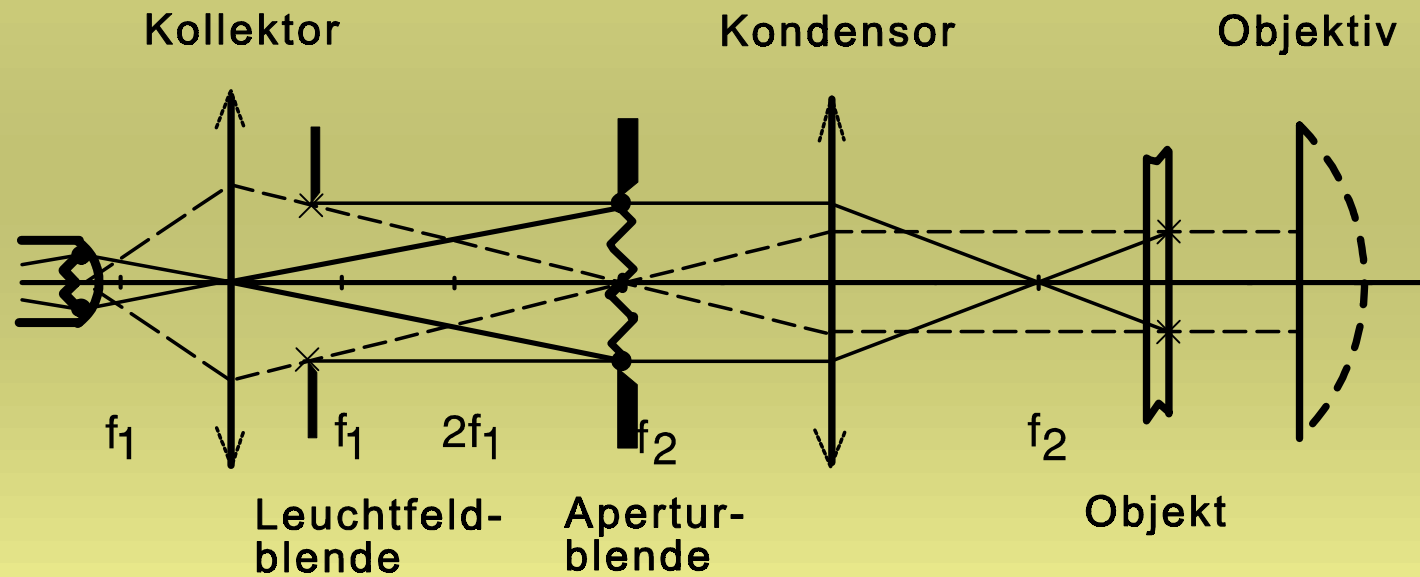


A numerische Apertur
 n Brechzahl zw. Objekt und Objektiv
 α halber Öffnungswinkel des Objektivs

Licht- und Elektronenmikroskop

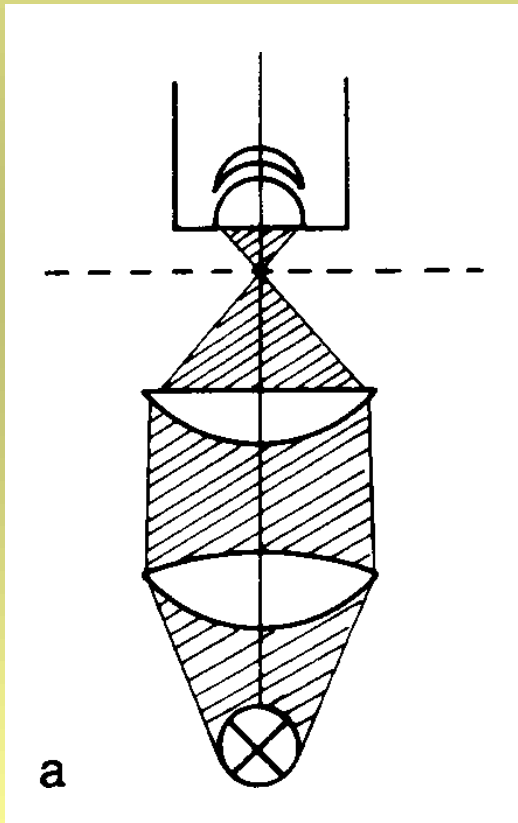


Mikroskop: Köhlersche Beleuchtung

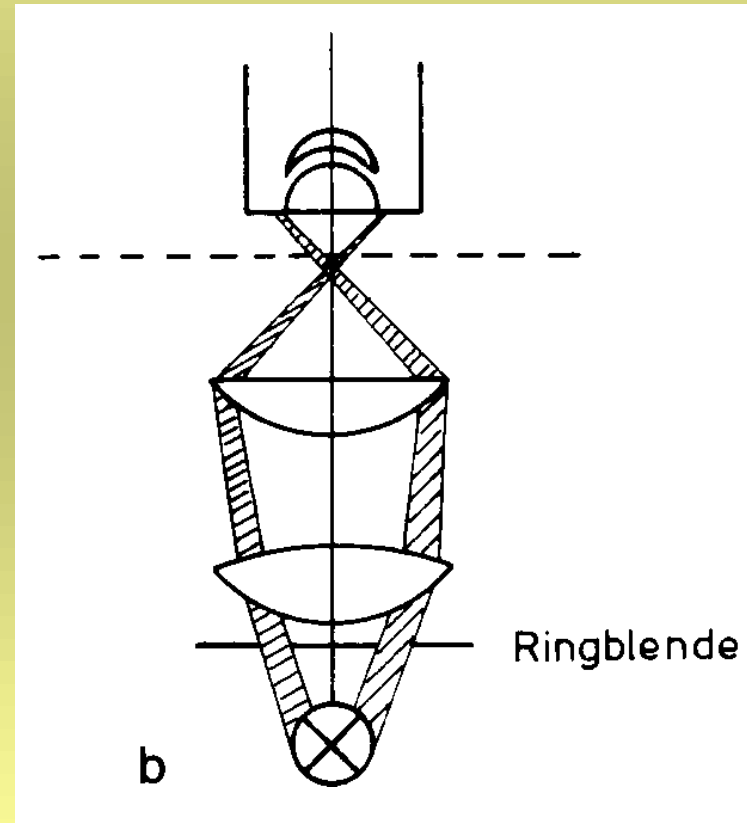


Mikroskop: Beleuchtungsverfahren

Hellfeldbeleuchtung



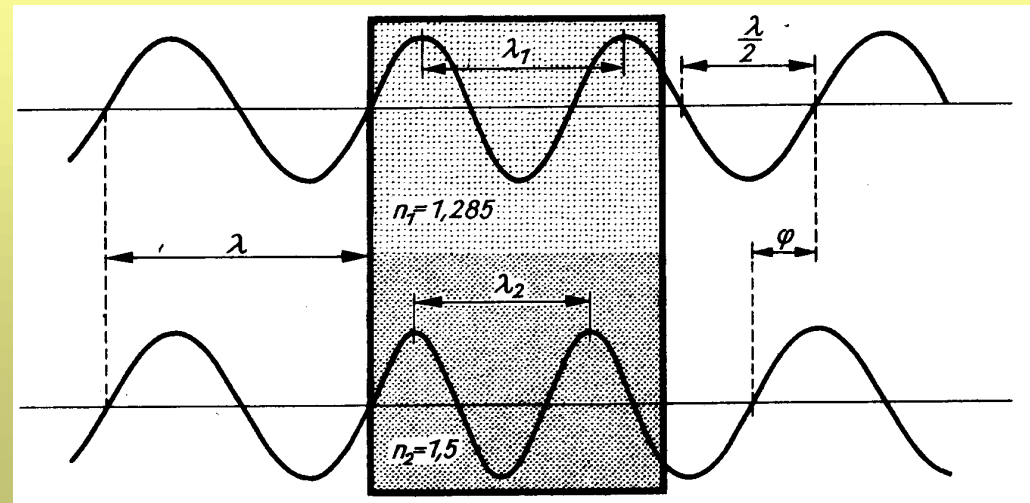
Dunkelfeldbeleuchtung



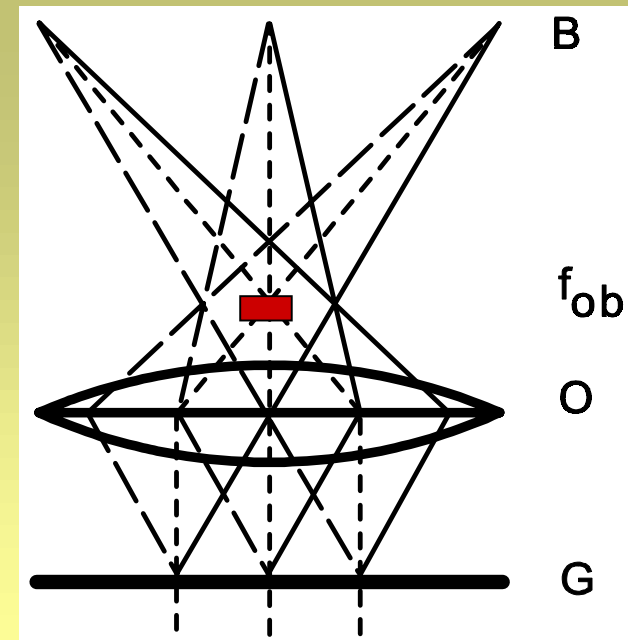
Phasenkontrastmikroskop

Phasengitter:

Brechzahlunterschiede
bewirken
Phasenverschiebung



Zusätzliche Phasenverschiebung
um 90° durch $\lambda/4$ -Plättchen in der
0. Ordnung im primären Bild,
damit durch teilweise
Auslöschung Amplitudenkontrast,
kein Anfärben notwendig



Polarisationsmikroskop

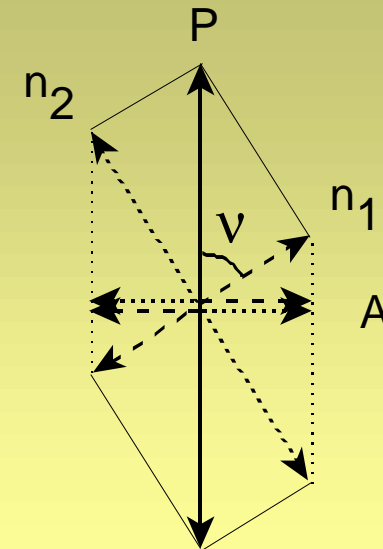
= „Normales“ Mikroskop, zusätzlich Polarisator zwischen Lichtquelle und Gegenstand sowie Analysator zwischen Objektiv und Auge

Kristalline und quasikristalline biologische Strukturen sind oft doppelbrechend

Ordentlicher (o) und außerordentlicher (ao) Strahl sind nach Durchgang durch den Gegenstand phasenverschoben.

o und ao können eigentlich nicht interferieren (senkrecht zueinander polarisiert)

„Trick“: diagonal gestellter Analysator, damit teilweise Interferenz möglich



Röntgenstrahlen

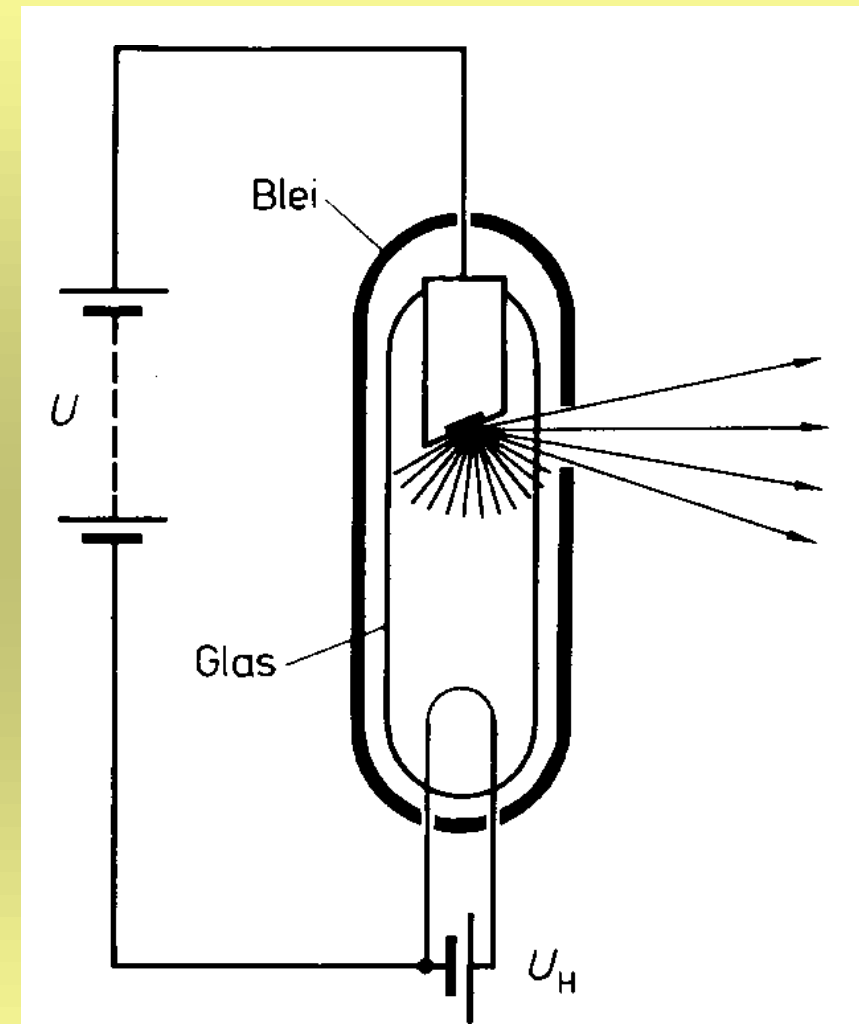
	Wellenlänge in m	Frequenz in Hz	Energie in eV
Rundfunk Wellen	10^4	$3 \cdot 10^4$	$1,24 \cdot 10^{-10}$
	Langwellen $10^3 = 1 \text{ km}$	$3 \cdot 10^5$	$1,24 \cdot 10^{-9}$
	Mittelwellen 10^2	$3 \cdot 10^6$	$1,24 \cdot 10^{-8}$
	Kurzwellen 10^1	$3 \cdot 10^7$	$1,24 \cdot 10^{-7}$
	$10^0 = 1 \text{ m}$	$3 \cdot 10^8$	$1,24 \cdot 10^{-6}$
	UHF → Radar → 10^{-1}	$3 \cdot 10^9$	$1,24 \cdot 10^{-5}$
	Ultrakurzwellen $10^{-2} = 1 \text{ cm}$	$3 \cdot 10^{10}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$
optische Wellen	$10^{-3} = 1 \text{ mm}$	$3 \cdot 10^{11}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$
	Oberfläche des menschlichen Körpers → Wärme(IR) Strahlen 10^{-4}	$3 \cdot 10^{12}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$
	10^{-5}	$3 \cdot 10^{13}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$
	Oberfläche der Sonne → sichtbares Licht $10^{-6} = 1 \mu\text{m}$	$3 \cdot 10^{14}$	1,24
	10^{-7}	$3 \cdot 10^{15}$	$1,24 \cdot 10^1$
	ultraviolette Strahlen 10^{-8}	$3 \cdot 10^{16}$	$1,24 \cdot 10^2$
Röntgenstrahlen	$10^{-9} = 1 \text{ nm}$	$3 \cdot 10^{17}$	$1,24 \cdot 10^3$
	weiche Röntgenstrahlen harte Röntgenstrahlen ultraharte Röntgenstrahlen $10^{-10} = 1 \text{ \AA}$	$3 \cdot 10^{18}$	$1,24 \cdot 10^4$
	10^{-11}	$3 \cdot 10^{19}$	$1,24 \cdot 10^5$
	$10^{-12} = 1 \text{ pm}$	$3 \cdot 10^{20}$	$1,24 \cdot 10^6$
	Gammastrahlen 10^{-13}	$3 \cdot 10^{21}$	$1,24 \cdot 10^7$
	10^{-14}	$3 \cdot 10^{22}$	$1,24 \cdot 10^8$

Röntgenstrahlen: Erzeugung

In Hochvakuumröhre emittiert eine Glühkathode Elektronen, die durch eine hohe Anodenspannung stark zur Anode beschleunigt werden.

Wärme:

entsteht durch Streuprozesse, meist $> 98\%$ der zugeführten Energie



Röntgenspektren

Bremsstrahlung (kontinuierliches Spektrum):

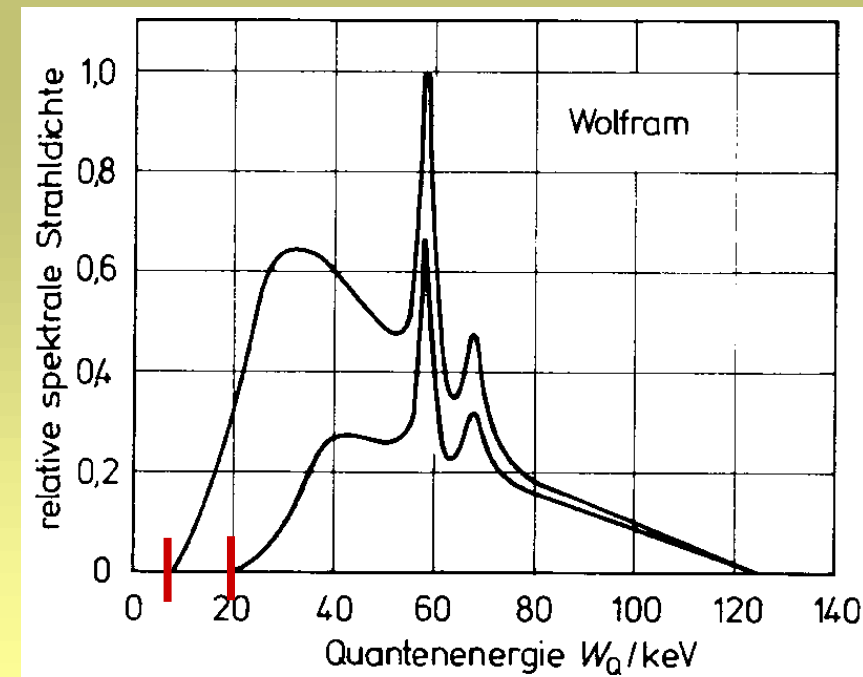
Abbremsung im Kernladungsfeld, Abgabe von elektromagnetischer Strahlung

Kurzwellige Kante: maximale Energie der Strahlung

$$eU_A = \frac{m}{2}v^2 = hf_{\max} = h\frac{c}{\lambda_{\min}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{ch}{eU_A} \approx \frac{1,24 \text{ nm}}{\text{Anodenspannung in kV}}$$

Härte der Röntgenstrahlung wächst mit U_A , damit Verschiebung der kurzwelligen Kante

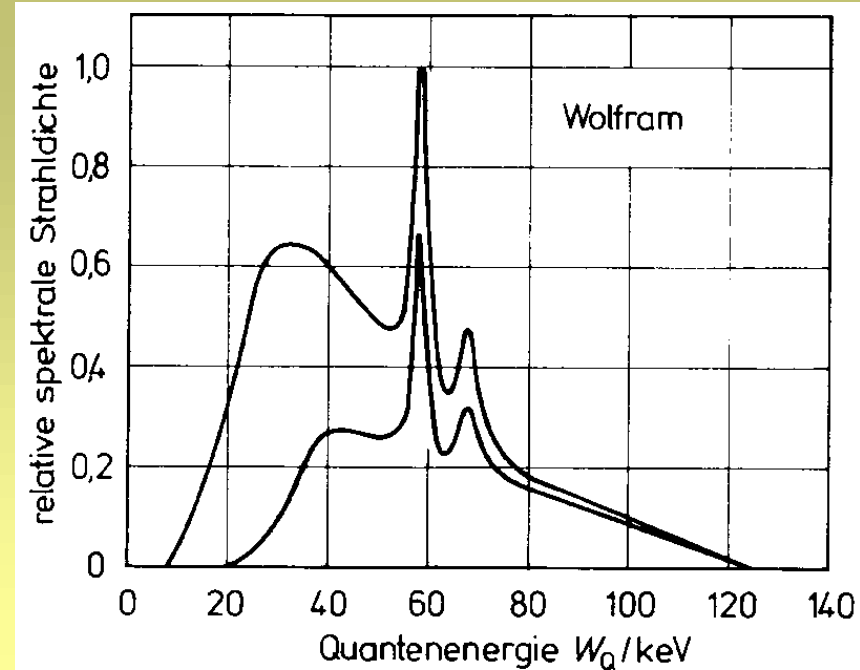
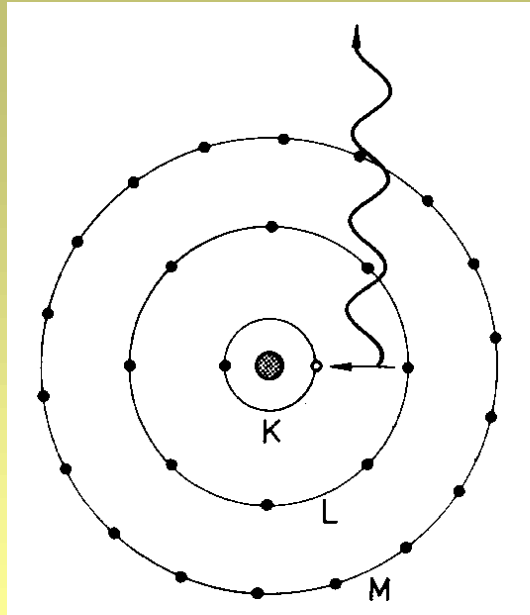


Röntgenspektren

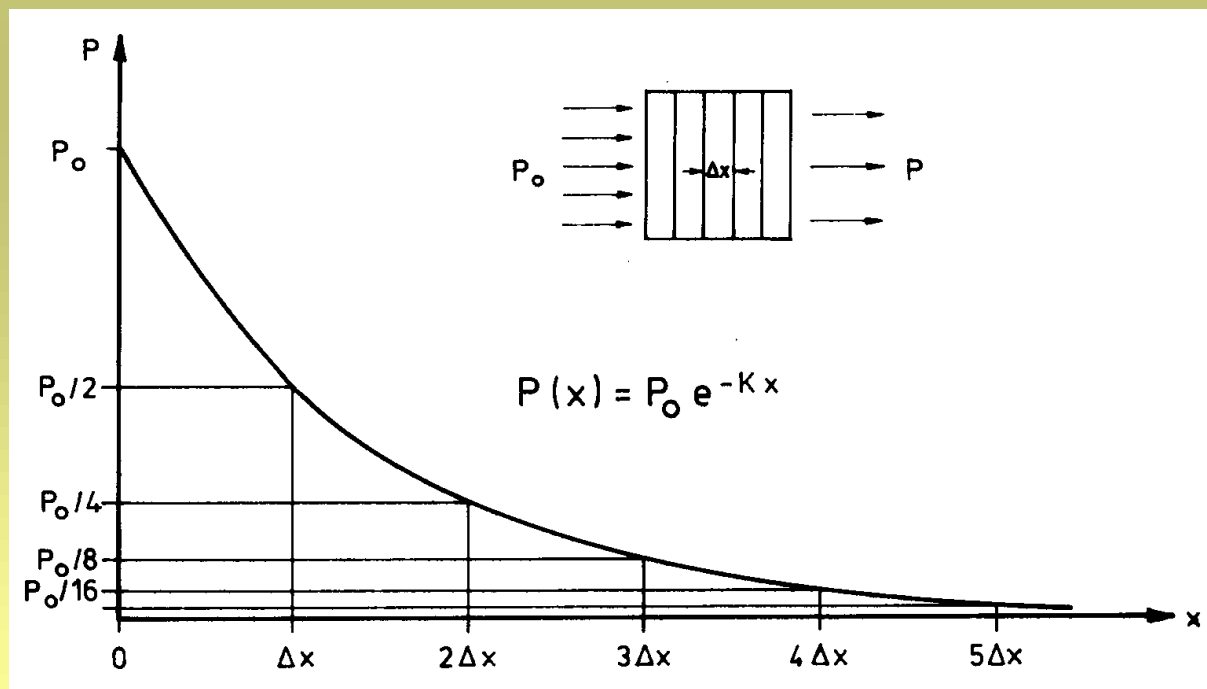
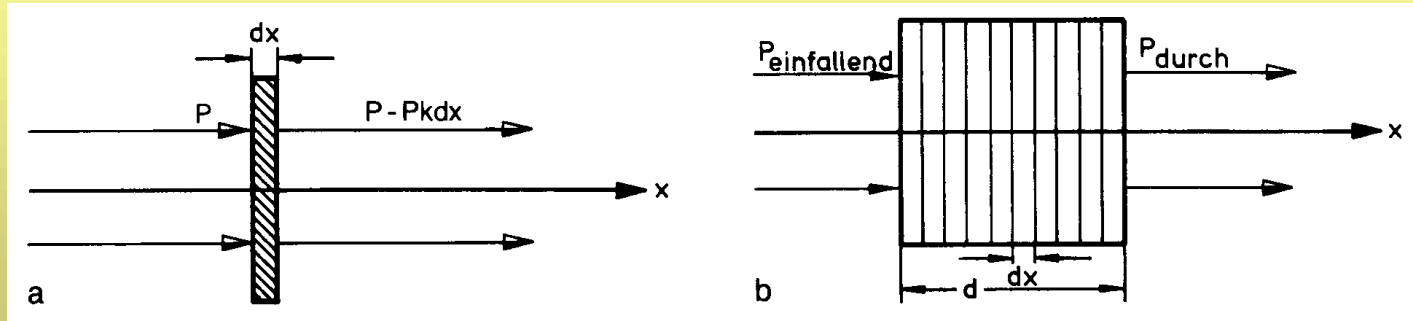
Charakteristische Strahlung (Linienspektrum):

Aus einem Anodenatom wird aus einer inneren Schale ein Elektron herausgeschlagen (instabiler Zustand)

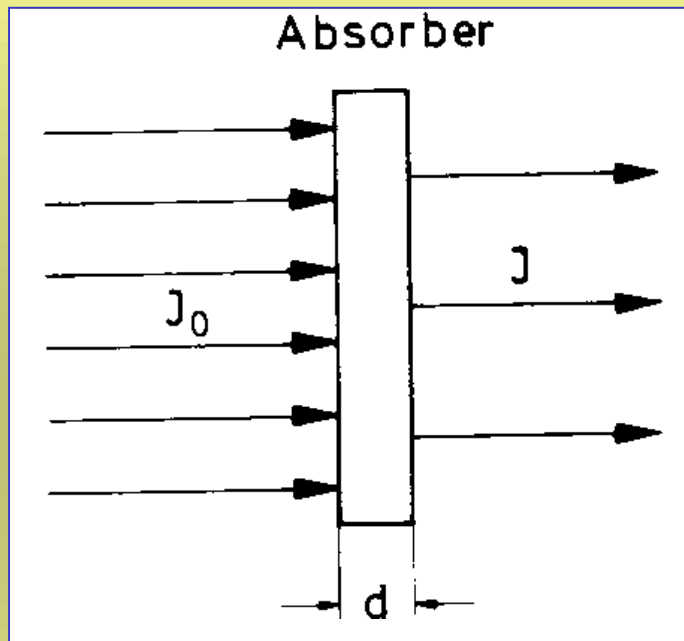
Auffüllen aus höherer Schale, dabei Abgabe der überschüssigen Energie als Röntgenquant mit typischer Energie $W = h f$



Absorptionsgesetz



Energieübertragung durch Röntgenstrahlung



Absorptionsgesetz:

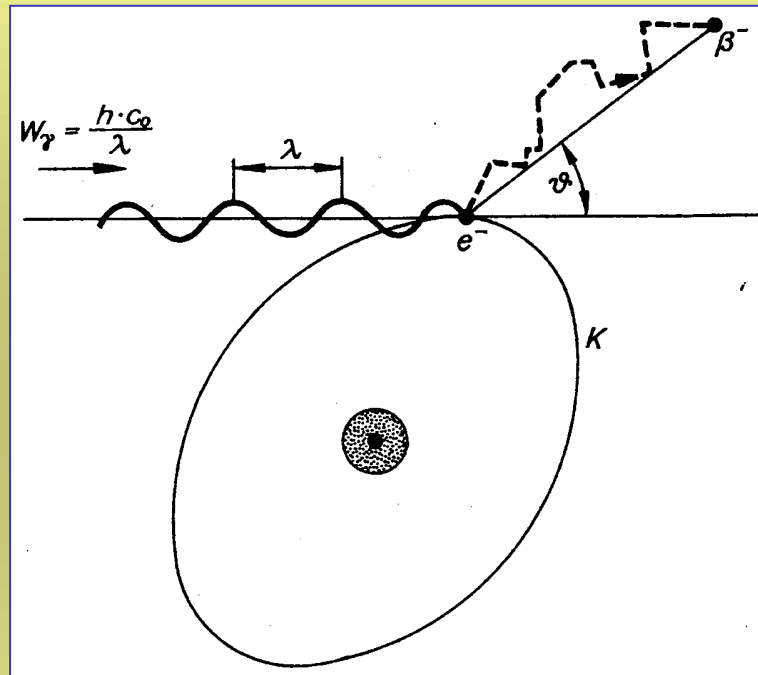
$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

Röntgenstrahlen werden von Atomen absorbiert, unabhängig von chemischen Bindungen

Bei monochromatischer Strahlung:

$$\mu = \mu_{Photo} + \mu_{Compton} + \mu_{Paar}$$

Primäreffekte: Photoeffekt



$$hf = W_A + \frac{m}{2} v^2$$

W_A Ablösearbeit

Dominierend bei Nukliden mit hoher Ordnungszahl und bei kleinen Photonenenergien

Was sind eV, keV, MeV?

Einer Röntgenröhre zugeführte Energie ist berechenbar aus Ladung der Elektronen und angelegter Anodenspannung:

$$W_{el} = e_0 \cdot U_A$$

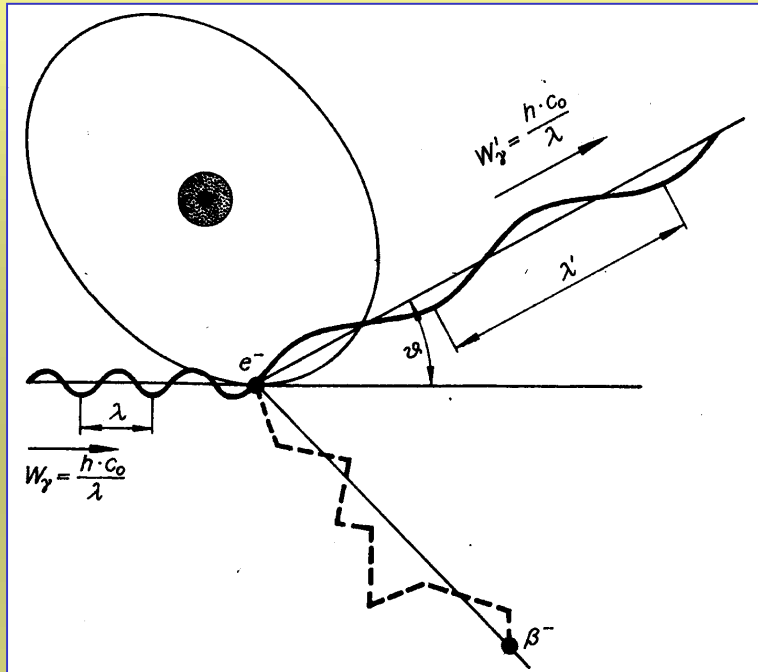
$$W_{el} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot [U_A \text{ in V}]$$

$$[1 \text{ As} \cdot 1 \text{ V} = 1 \text{ Ws}]$$

Definition:

1 eV ist diejenige Energie, die einem mit einer Elementarladung geladenen Teilchen bei Beschleunigung mit 1 V zugeführt wird.
(1eV = 1,6 10⁻¹⁹ Ws)

Primäreffekte: Comptoneffekt



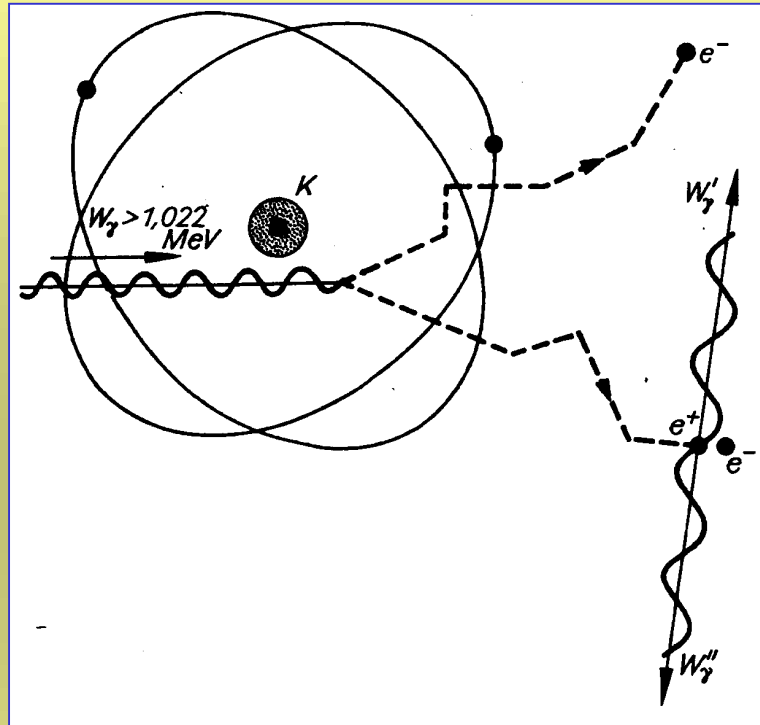
$$h(f - f') = W_A + \frac{m}{2} v^2$$

W_A Ablösearbeit

Photonenenergien 50 keV - 15 MeV und kleine Ordnungszahl (<12)
(biologisches Gewebe)

Photonenenergien 0,5 MeV - 1 MeV und große Ordnungszahl (>26)

Primäreffekte: Paarbildungseffekt



In der Nähe eines Atomkerns erfolgt Umwandlung eines Photons mit mehr als 1,22 MeV in ein Elektron und ein Positron (Masse-Energie-Äquivalenz)

Photonenenergien $> 15 \text{ MeV}$ und kleine Ordnungszahl (< 12)

Photonenenergien $> 5 \text{ MeV}$ und große Ordnungszahl (> 26)

Massenschwächungskoeffizient

Absorptionskoeffizient ist abhängig von

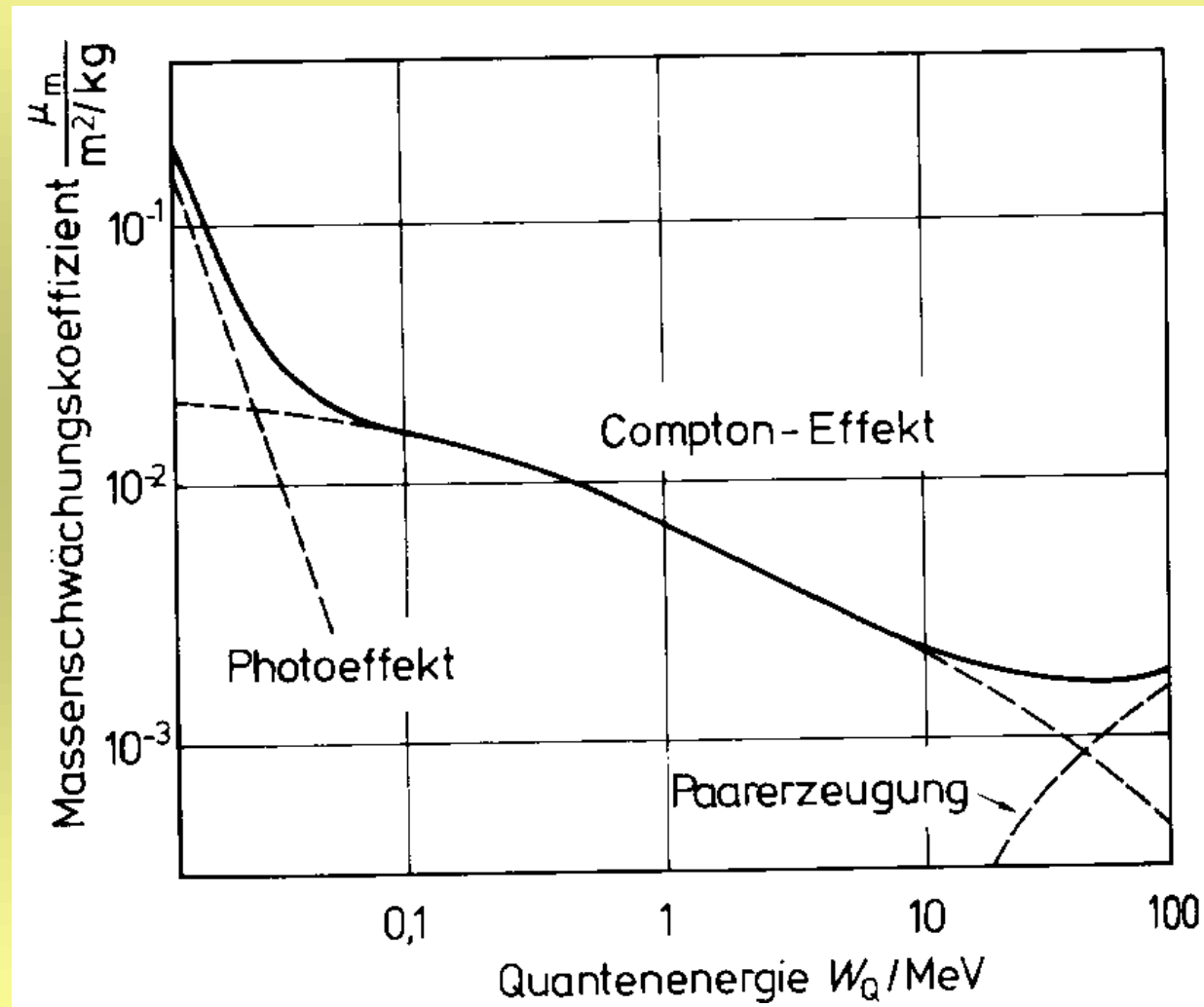
- Photonenenergie

- Dichte des Absorbers



Massenschwächungskoeffizient μ/ρ

Massenschwächungskoeffizient



**Gemessen für
Wasser,
entspricht etwa
den Werten für
biologisches
Gewebe**

Abbildung mit Röntgenstrahlen

Unterschiedliche Absorption bewirkt räumliche Intensitätsverteilung der durchtretenden Strahlung

[Knochen (Calcium!) absorbieren stärker als Weichgewebe]

Klassische Röntgenaufnahme ist „Schattenbild“

Registrierung z.B. durch

Schwärzung Röntgenfilm (negativ)

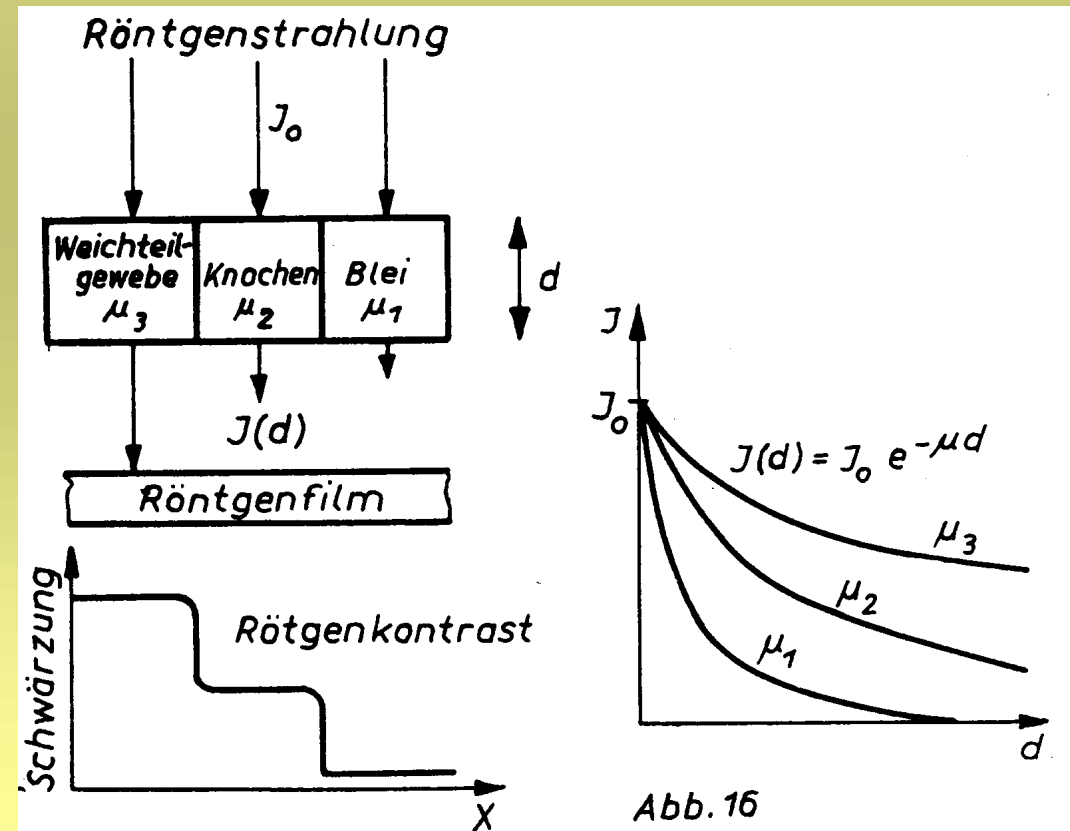
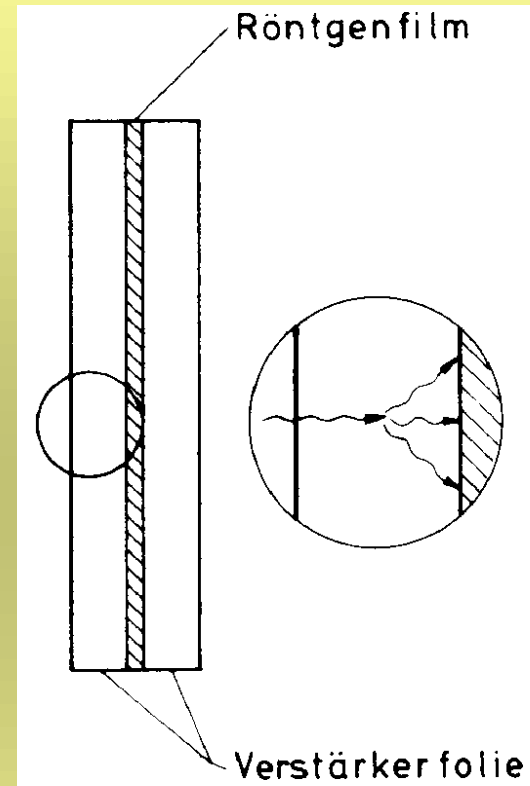


Abbildung mit Röntgenstrahlen

Registrierung z.B. durch

Fluoreszenz
(Verstärkerfolien)



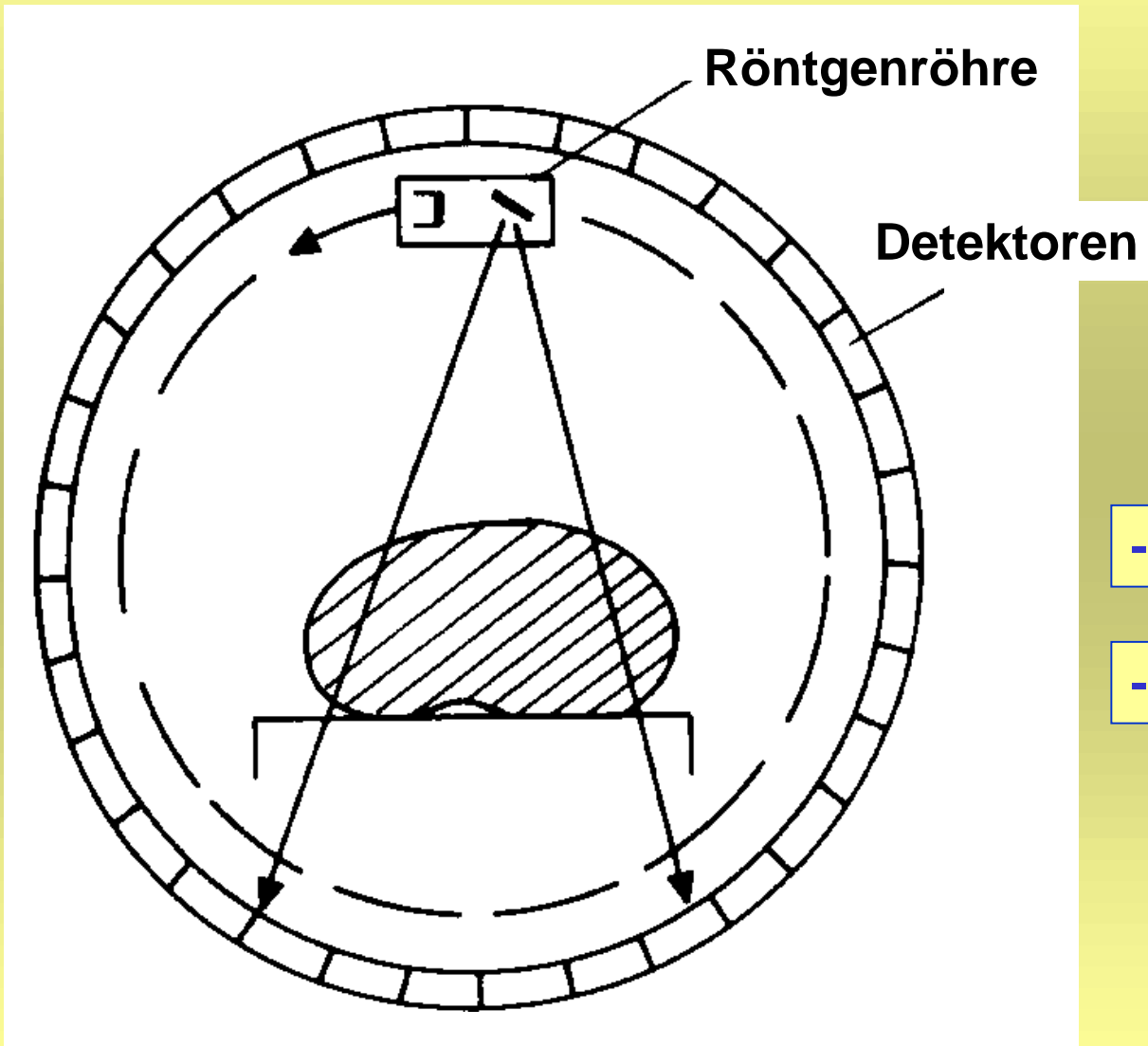
Wie ist Kontrasterhöhung im Weichgewebe erreichbar?

Kontrastmittel

CT



Röntgen-Computertomographie



Vorteile:

- Schnittbilder

- großer Gewebekontrast

Photometrie und Dosimetrie

bezogen auf

Sichtbares Licht

- Strahlungsmeßgrößen
- Lichtmeßgrößen

Energiereiche Strahlung

- Aktivität
- Dosisgrößen

Photometrie

Lichtmeßgrößen

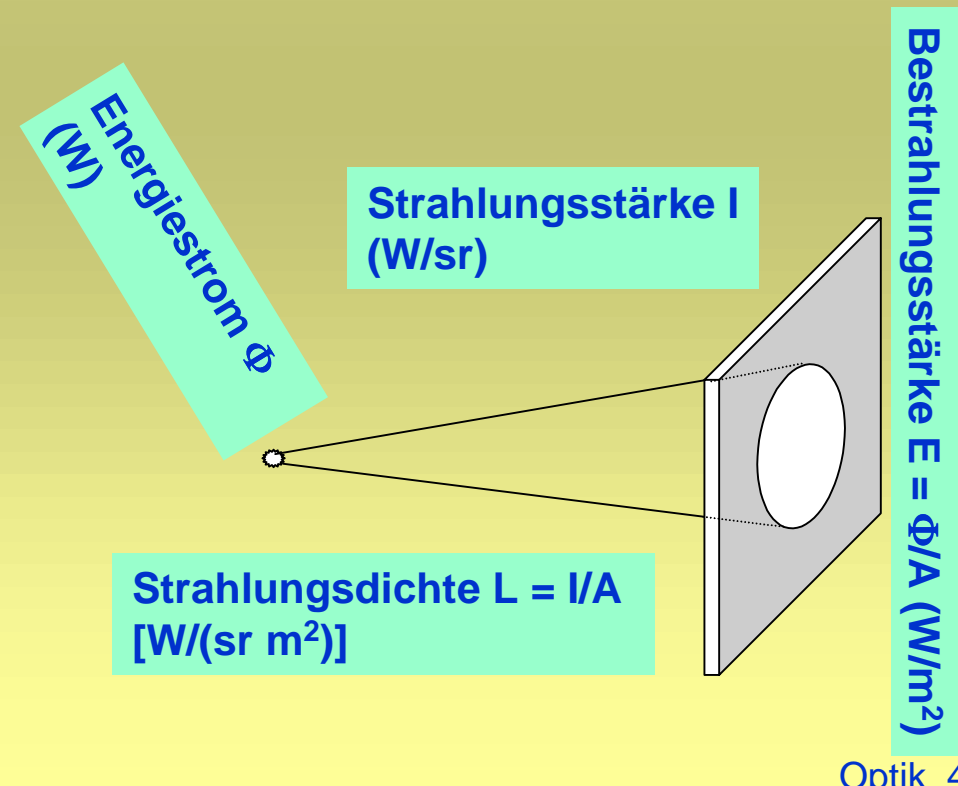
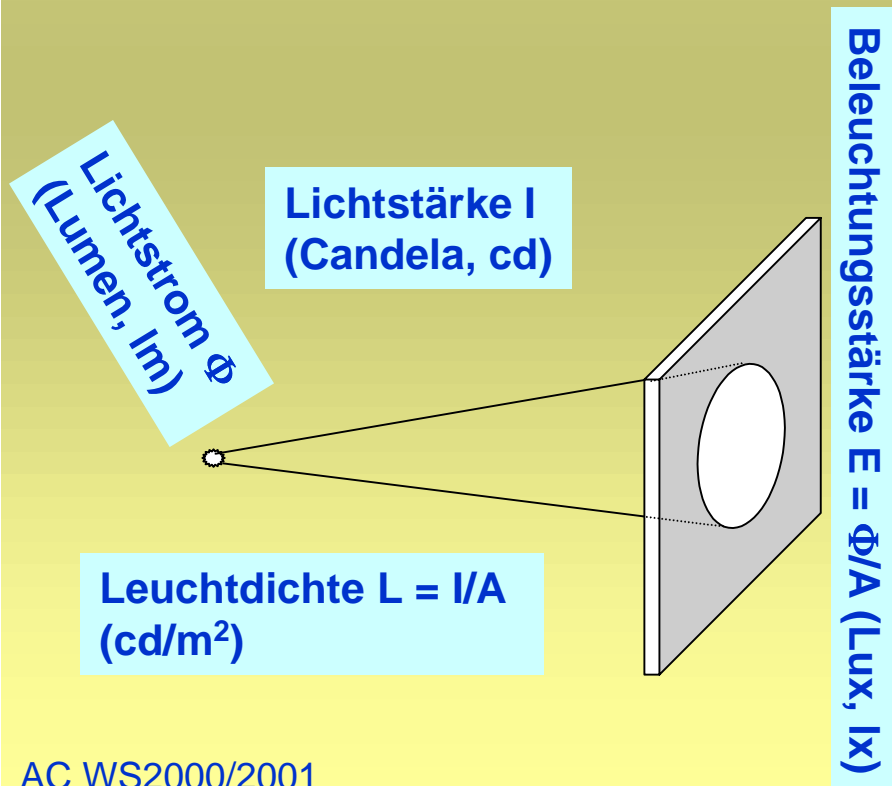
bezogen auf die
(subjektive) Empfindung
im Auge

spektral angepaßt

Strahlungsmeßgrößen

abgeleitet aus der mit
elektromagnetischen
Wellen transportierten
Energie

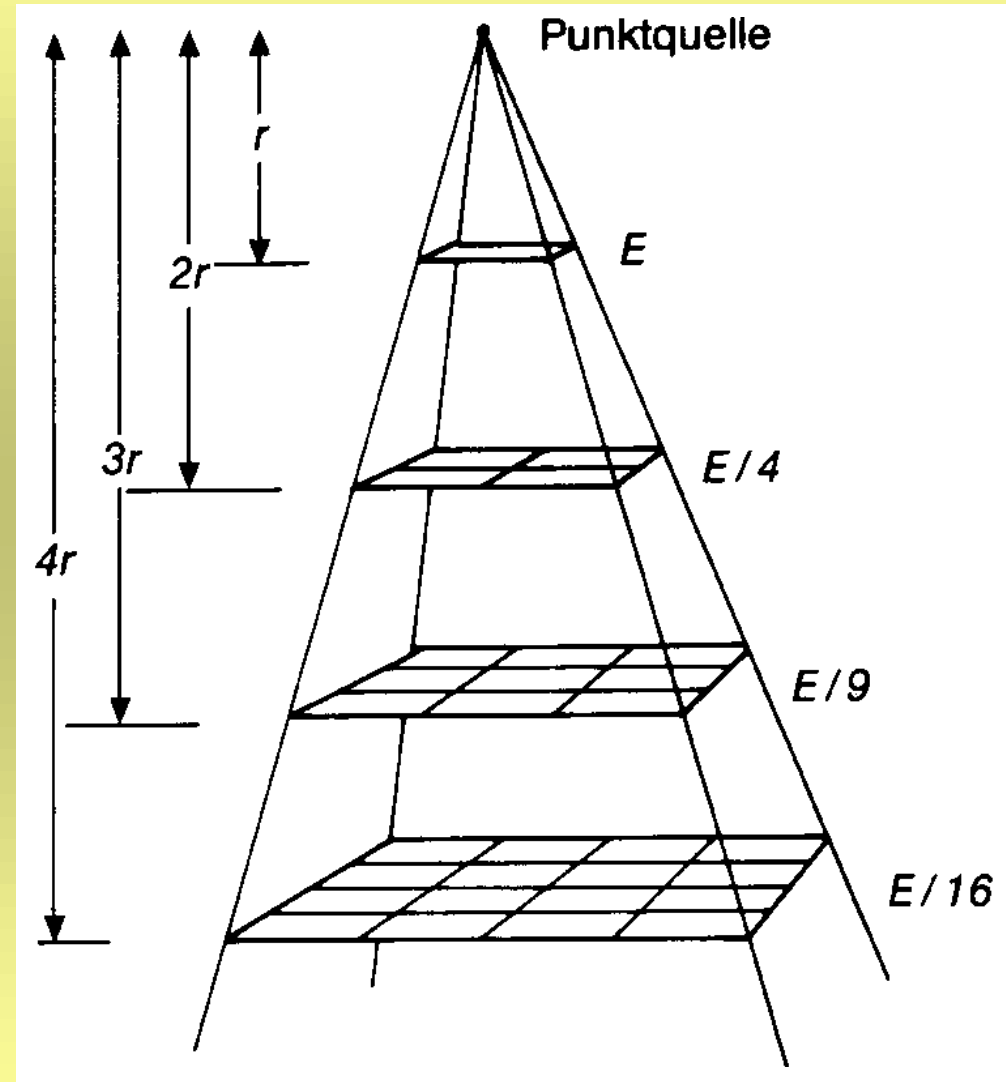
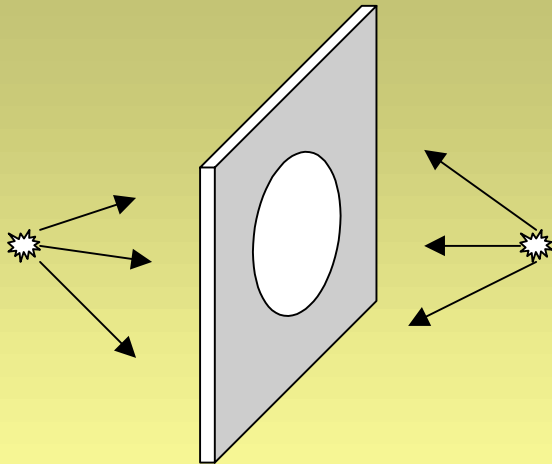
wellenlängenunabhängig



Photometrie

Abstandsgesetz

Fettfleckphotometer

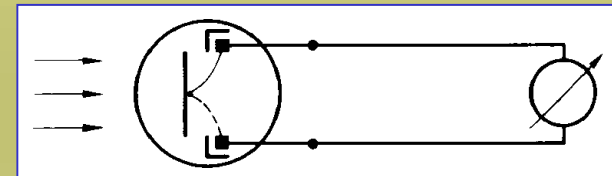


Strahlungsmessung

erfolgt mittels Detektoren, in denen absorbierte Strahlungsenergie in „registrierbare“ Energie umgewandelt wird (meist in elektrische)

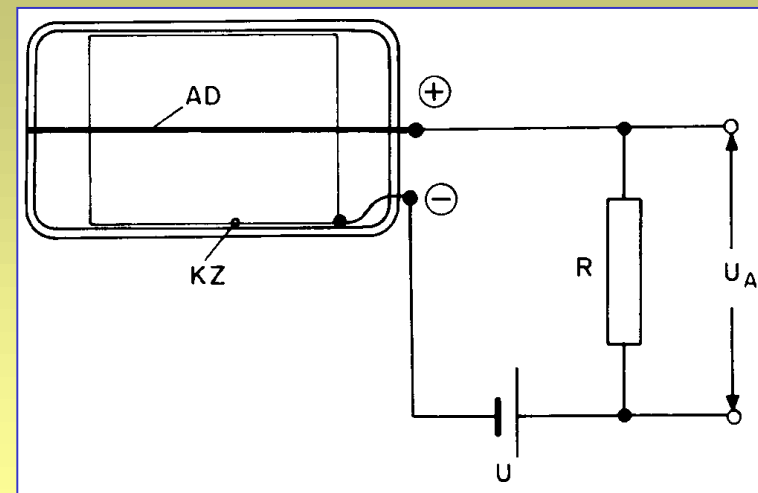
Beispiele:

Strahlungsthermoelement



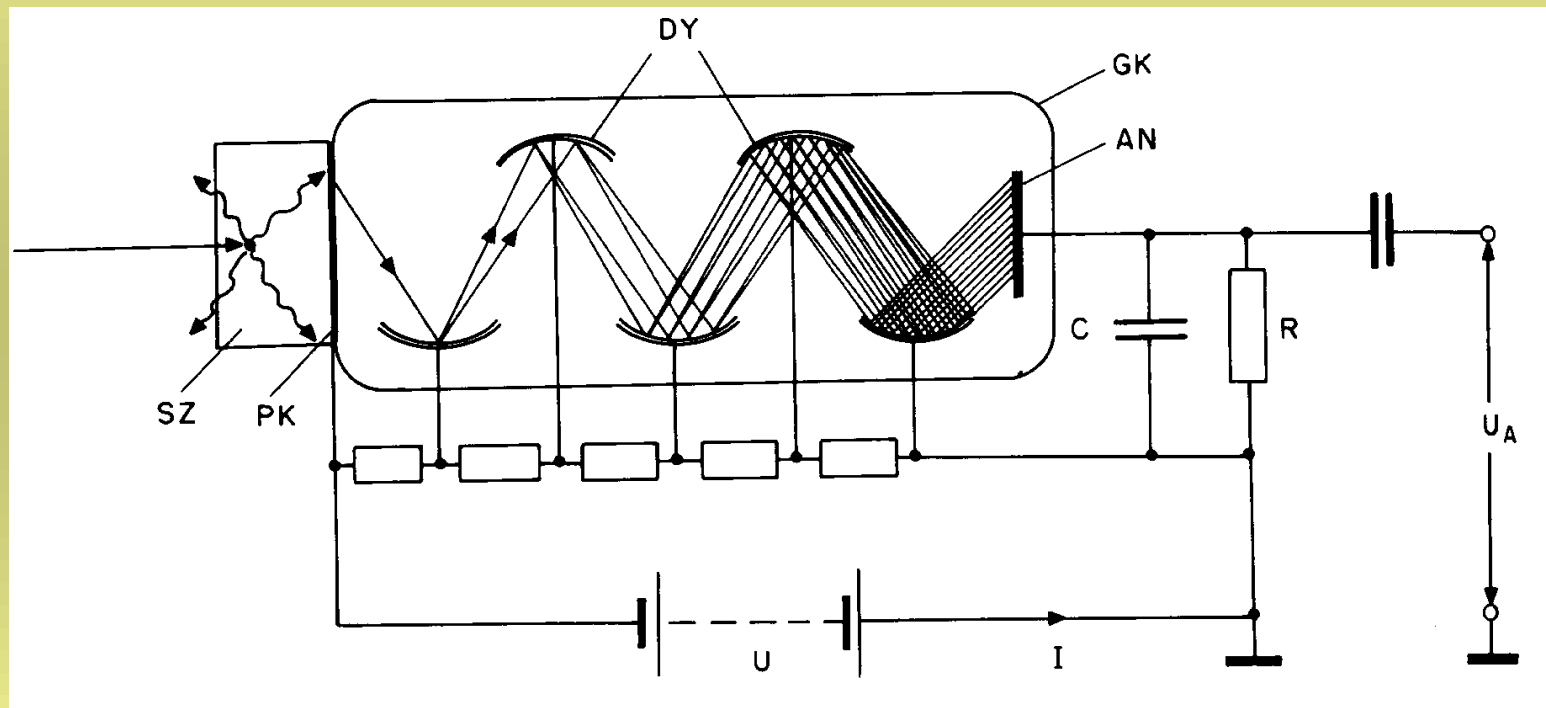
Zählrohr
(nach Geiger und Müller)

Zählrate nur abhängig von eingestrahelter Teilchenzahl, unabhängig von Energie.



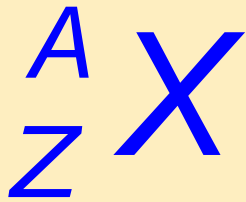
Strahlungsmessung

Szintillationskristall und Sekundärelektronenvervielfacher (SEV)



Schwärzung von Photoplatten

Nuklide



X .. Nuklid
A .. Massenzahl
Z .. Kernladungszahl (Protonen)
N .. Anzahl der Neutronen

$$N = A - Z$$

Isotope:

Nuklide mit gleichem Z, aber unterschiedlichem A

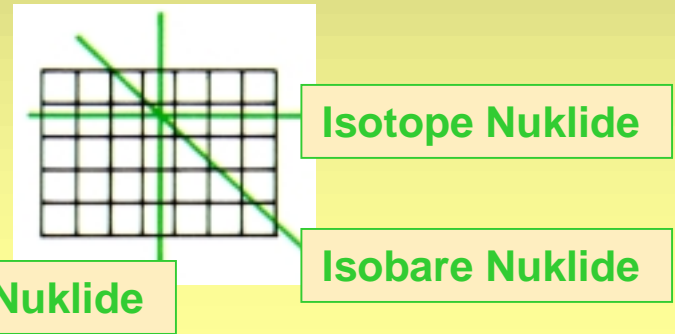
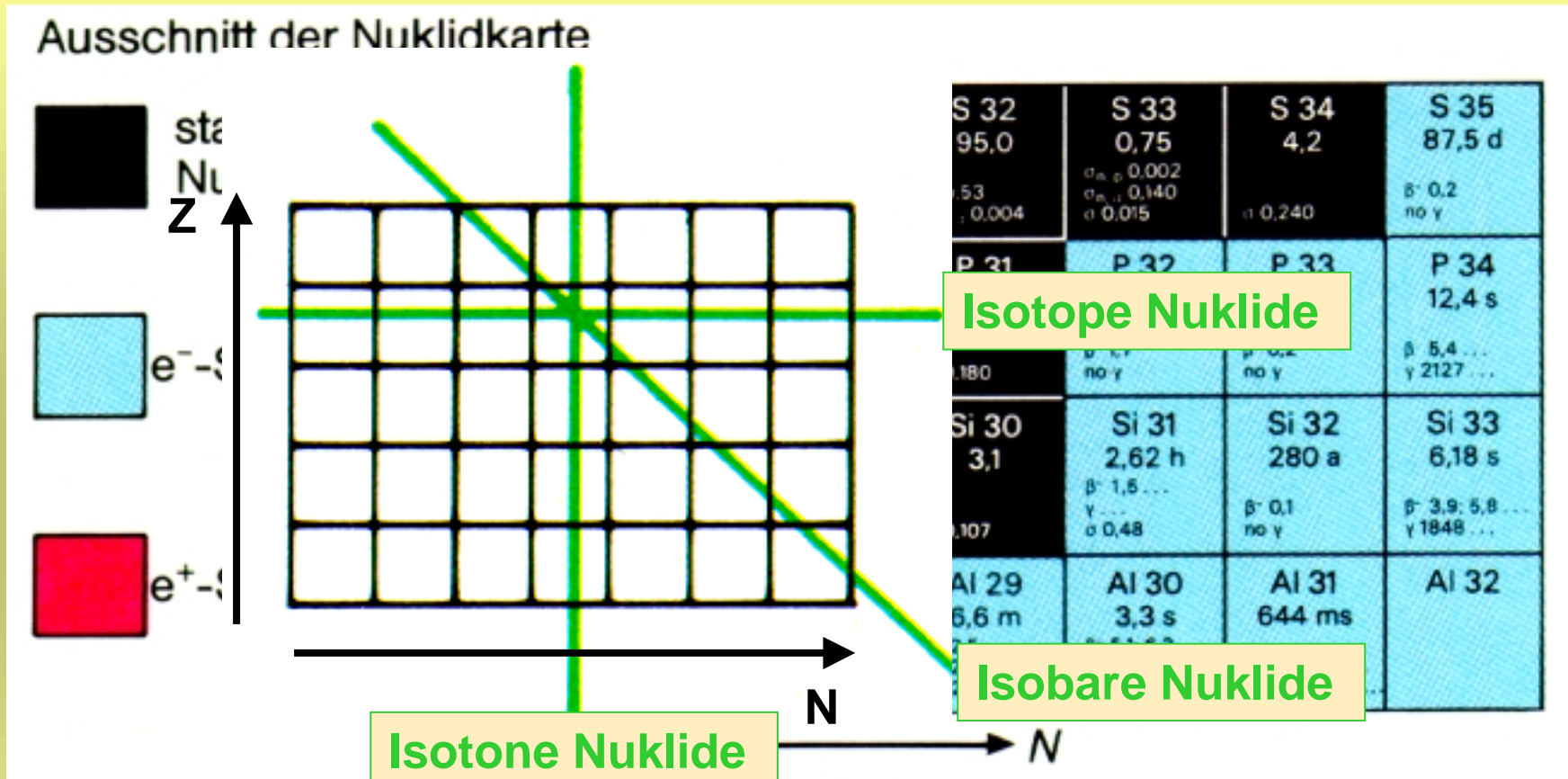
Stabile Nuklide: Verändern sich nicht (A = konst)

Instabile Nuklide (Radioaktive Nuklide):

Zerfallen in andere Nuklide,
abhängig vom Verhältnis N/Z

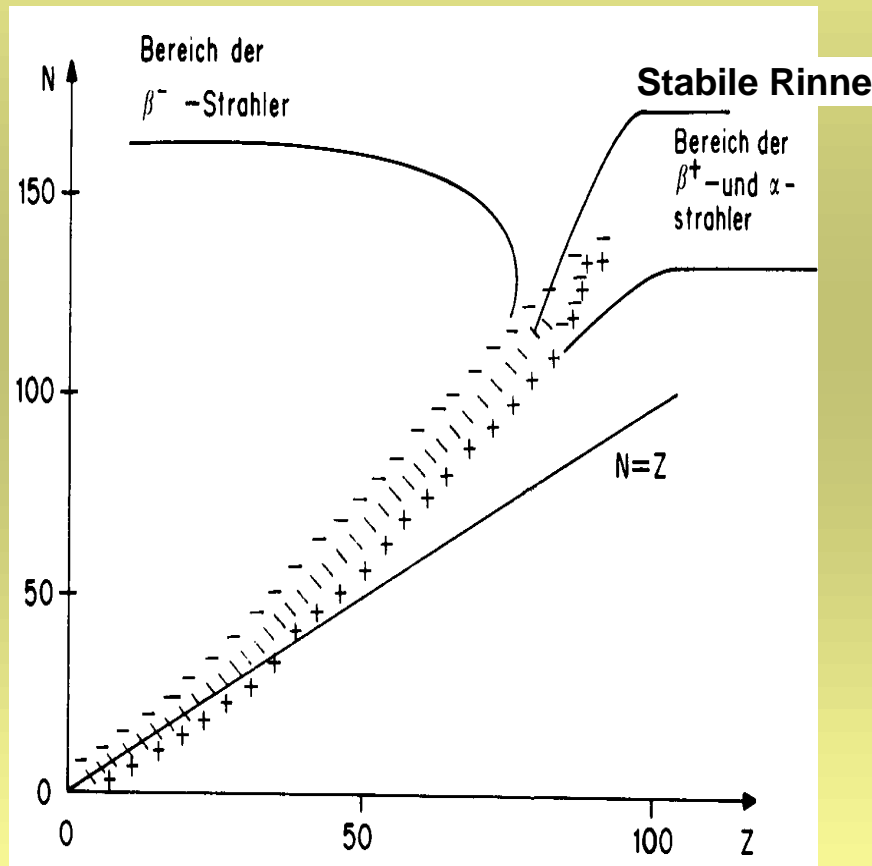
Zerfall erfolgt spontan und ist nicht beeinflussbar

Nuklidkarte



Radioaktiver Zerfall

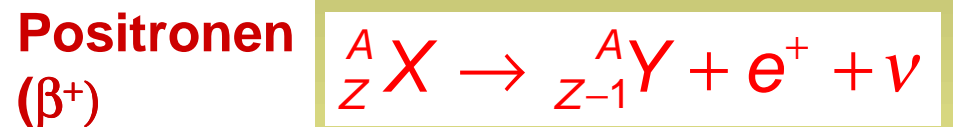
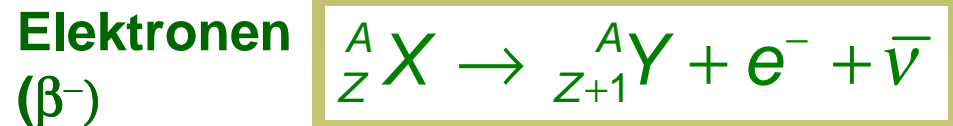
Zerfallsart instabiler Nuklide hängt von der Lage in der Nuklidtafel ab.



Ausgangsnuklid \rightarrow Folgenuklid

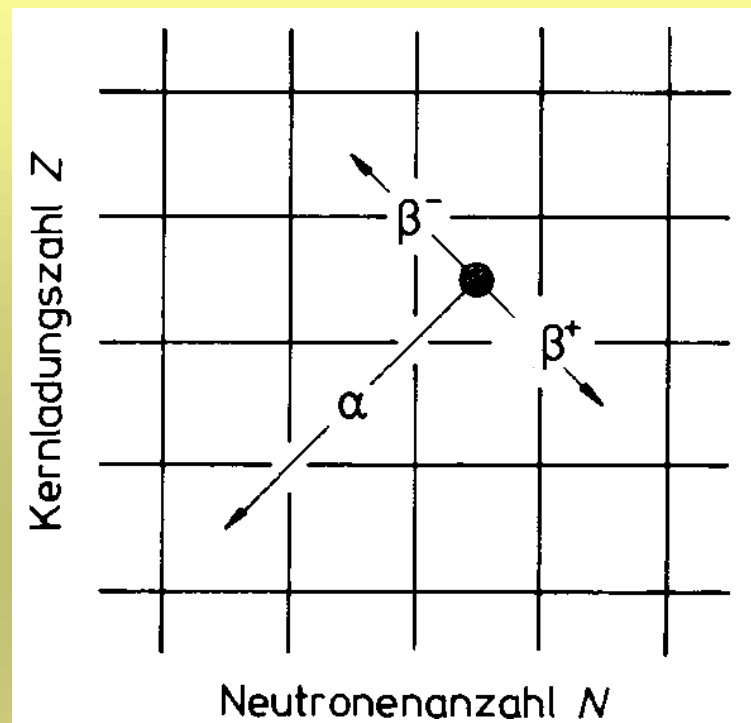


Beta-Zerfall



Übergang eines angeregten Kerns in den Grundzustand

Radioaktiver Zerfall



Zerfallsart	emittiert wird	ΔZ	ΔN	ΔA
α	${}^4_2\text{He}$	-2	-2	-4
β^-	Elektron	+1	-1	0
β^+	Positron	-1	+1	0
γ	Photon	0	0	0

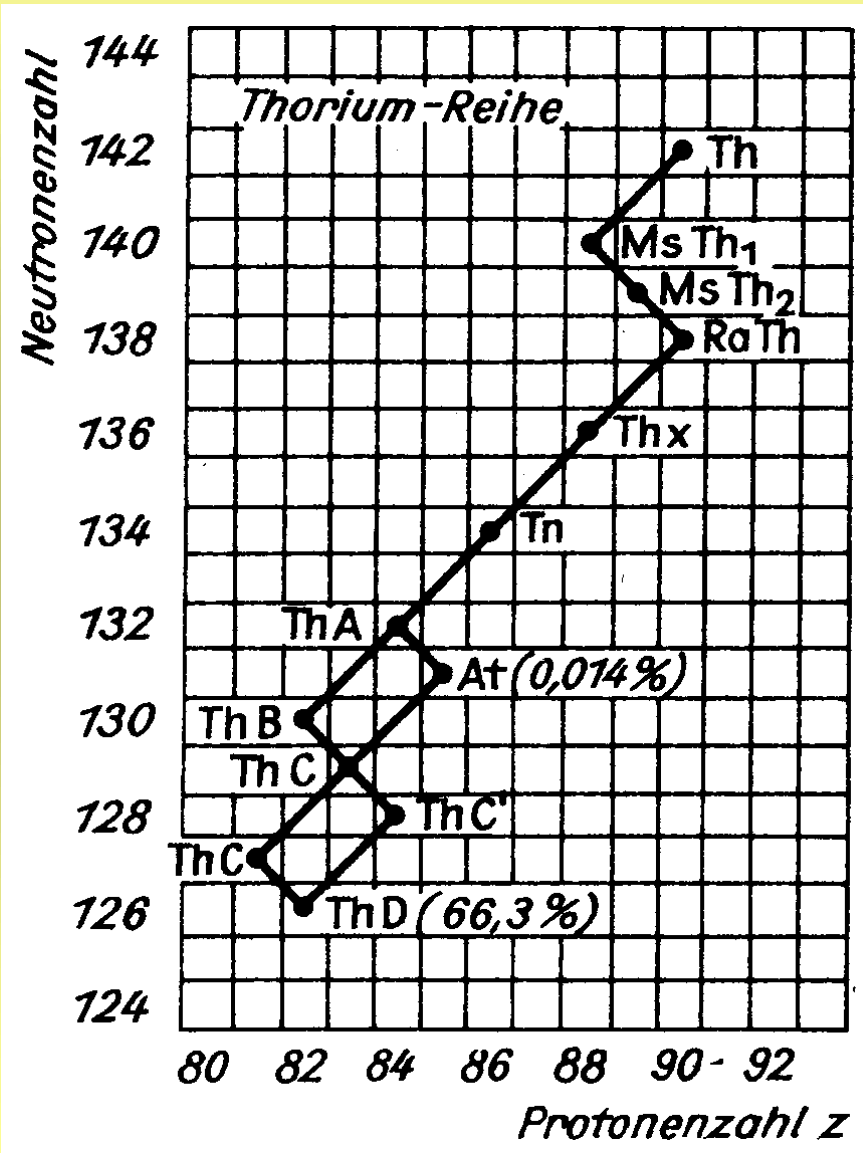
Zerfallsreihen

Das Folgenuklid eines Zerfalls kann wieder radioaktiv sein.

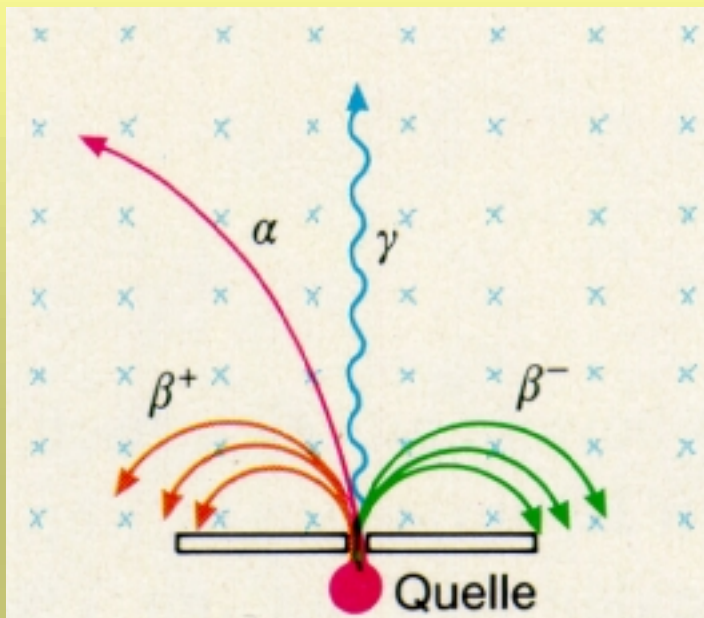


Zerfallsreihe

Uran-Radium
Uran-Actinum
Plutonium
Thorium



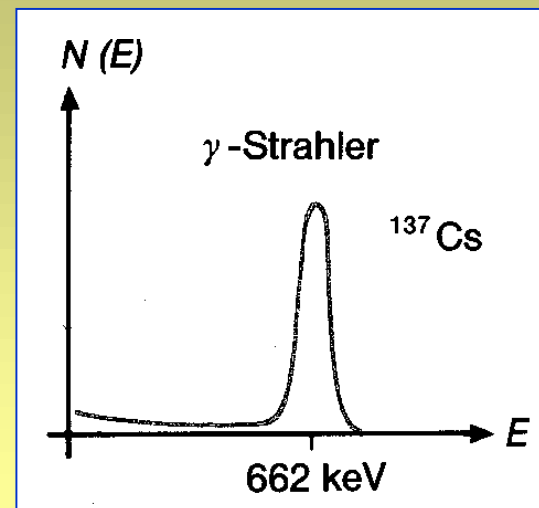
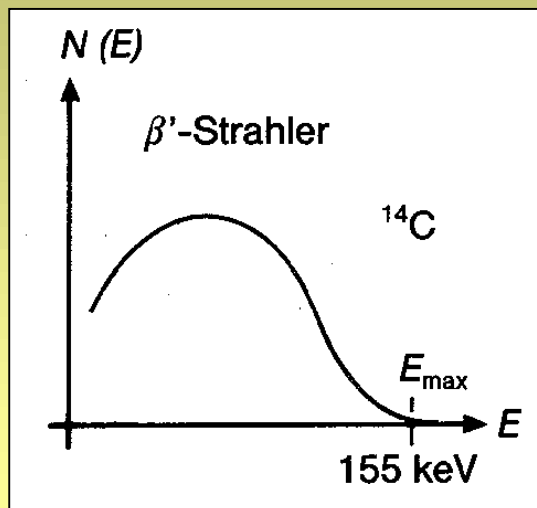
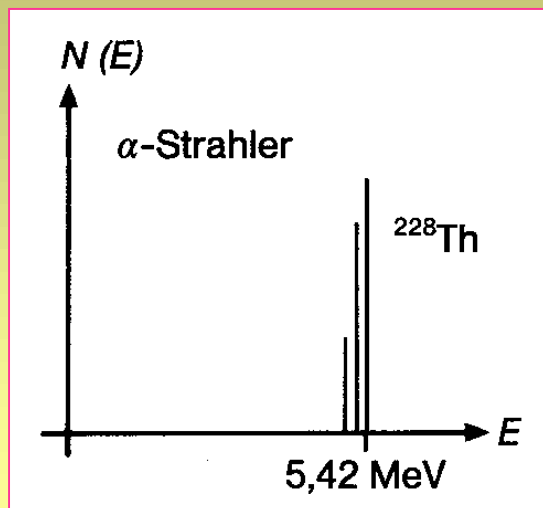
Radioaktive Strahlung



Alpha-Strahlung:
geringe Eindringtiefe ($\ll 1\text{mm}$ in Gewebe), also Abgabe der Energie auf kurzer Strecke

Beta-Teilchen
Eindringtiefe mm bis cm in Gewebe

Gamma-Strahlung
sehr durchdringend



Zerfallsgesetz

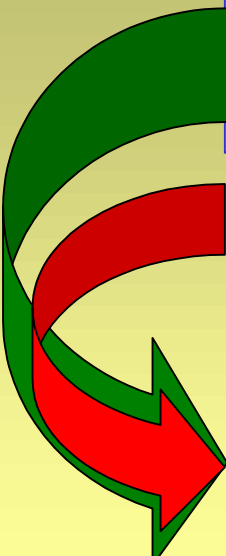
$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

N_0 Anzahl der Nuklide bei $t=0$

τ mittlere Lebensdauer des Nuklids

(entspricht der Zeit, nach der N auf $1/e$,
d. h. ca. 37%, abgefallen ist)

$\lambda = 1/\tau$ Zerfallskonstante



Halbwertzeit (physikalische): $t_{1/2 \text{ phys}} = \ln 2 / \lambda \approx 0,7 / \lambda$
Zeit, nach der die Hälfte der bei $t=0$ vorhandenen Nuklide zerfallen ist.

Halbwertzeit (biologische): $t_{1/2 \text{ biol}}$
Zeit, nach der die Hälfte der Substanz ausgeschieden ist

Effektive Halbwertzeit:

$$\frac{1}{t_{1/2 \text{ effektiv}}} = \frac{1}{t_{1/2 \text{ phys}}} + \frac{1}{t_{1/2 \text{ biol}}}$$

Aktivität

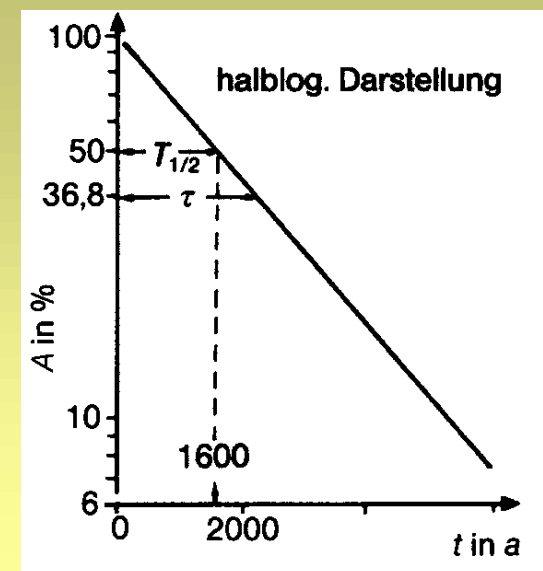
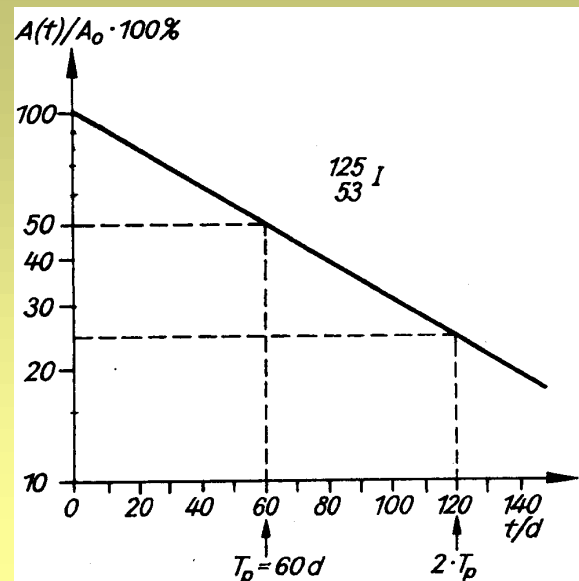
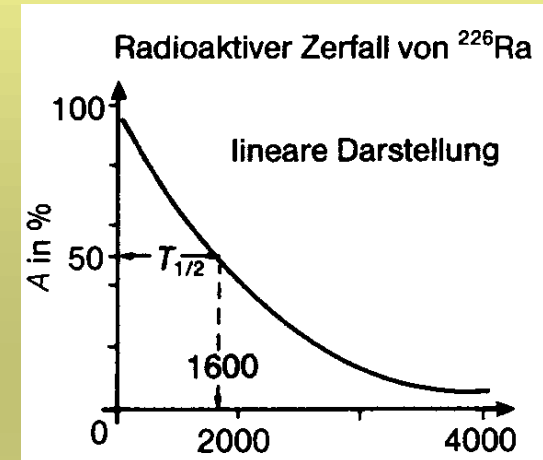
Zerfallsgesetz ist Lösung einer Differentialgleichung, die Aussagen über die Umwandlungsrate eines radioaktiven Nuklids macht:

Definition:

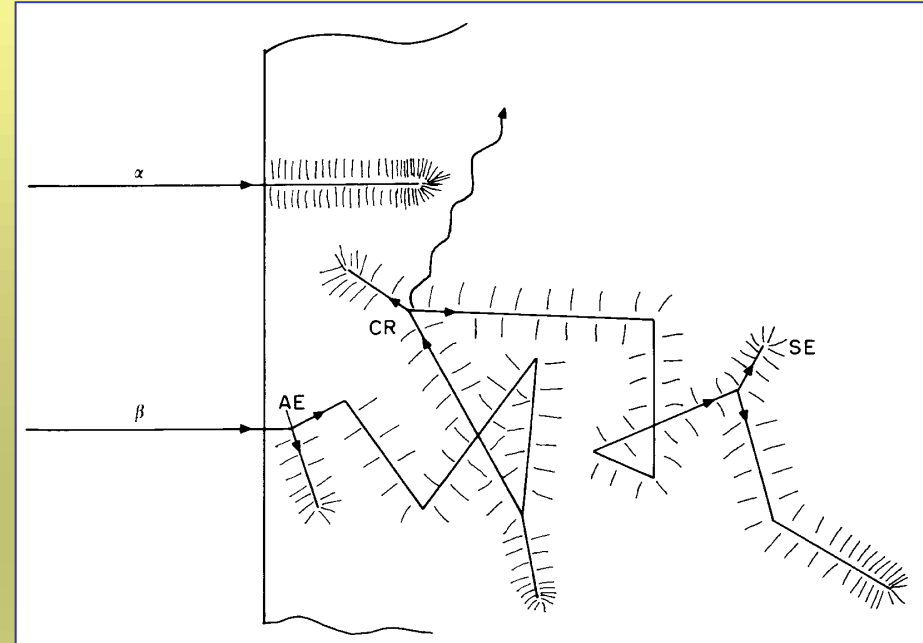
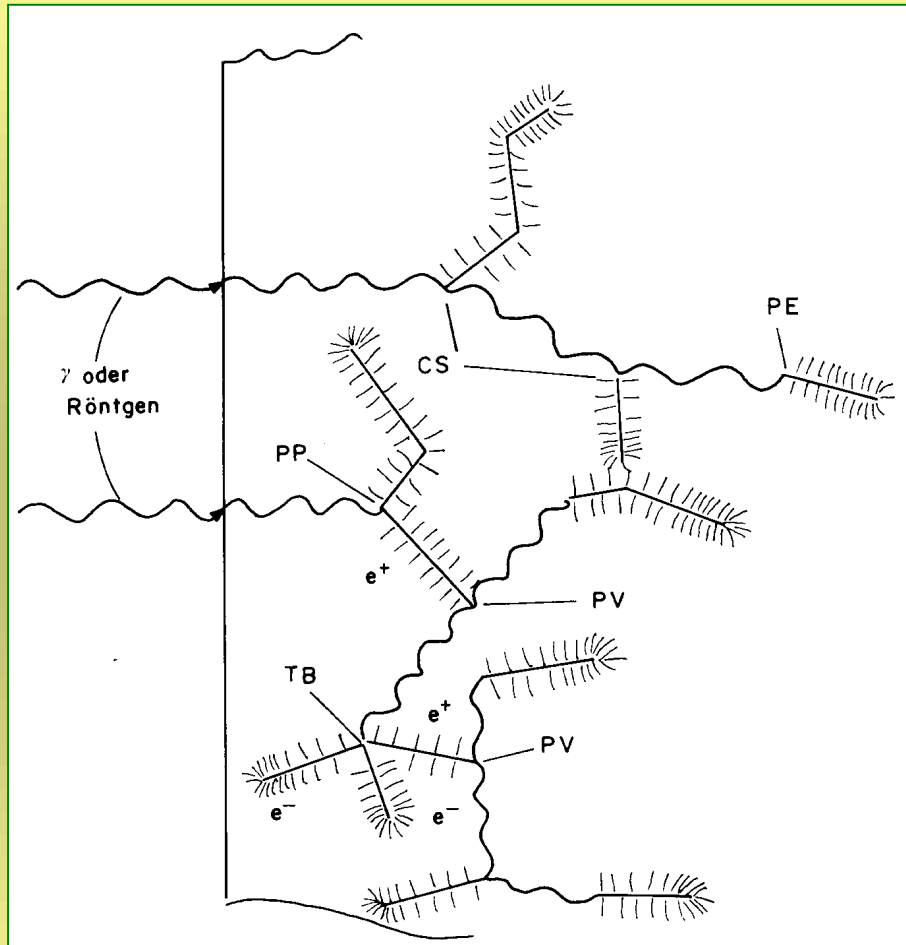
Aktivität $A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N$

Einheit: Bequerel (Bq) [1 Bq = 1/s]
 Alt: Curie (Ci) [1 Ci = 3,77 • 10¹⁰

Bq]



Wechselwirkungen im Gewebe



Ionisierungsprozesse und Teilchenbahnen schwerer und leichter geladener Teilchen in Materie
 (AE: Auger-Elektronen, CR: charakteristische Röntgenstrahlung, SE: Sekundärelektronen, Strichelung: Ionenpaare)

Ionisierungsprozesse bei Photonenstrahlung
 (Wellenlinien: Photonenbahnen, gerade Linien = e^- bzw. e^+ -Bahnen, PE: Photoeffekt, CS: Comptonstreuung, PP: Paarbildung, TB: Triplettbildung, PV: Paarvernichtung, Strichelung: Ionenpaare)

Wechselwirkung Strahlung/Lebewesen

PHYSIKALISCHE PHASE

Energieübertragung
von der Strahlung
auf Gewebemoleküle:
Entstehung von Ionen und Radikalen;
Radiolyse des Wassers.



BIOCHEMISCHE PHASE

Molekulare Reaktionen:
Direkte und indirekte Schädigung
lebenswichtiger Moleküle.
DNS-Synthesestörung, Oxydation der
SH-(Sulfhydryl-)Gruppe von Enzymen
(= Zerstörung der Enzyme).



Wechselwirkung Strahlung/Lebewesen



BIOLOGISCHE PHASE
Zelluläre Reaktionen:
Mitosestörung, Zelltod, Mutation,
Reparatur und Erholung.

SOMATISCHE GEWEBEREAKTION

**GENETISCHE
GEWEBEREAKTION**

Akute Schäden vom
Erythem bis zur
Strahlenkrankheit

Nichtmaligne
Spätschäden: z.B.
Augenkatarakt

Maligne
Neoplasmen:
Tumoren,
Leukämie.

Genveränderungen
in Keimzellen

REAKTIONEN DES GESAMTORGANISMUS

Heilung oder
Exitus

verminderte
Lebensqualität

Heilung oder
Exitus

Schäden bei
Nachkommen

nicht-stochastische Schäden

stochastische Schäden

Nutzen/Risiko

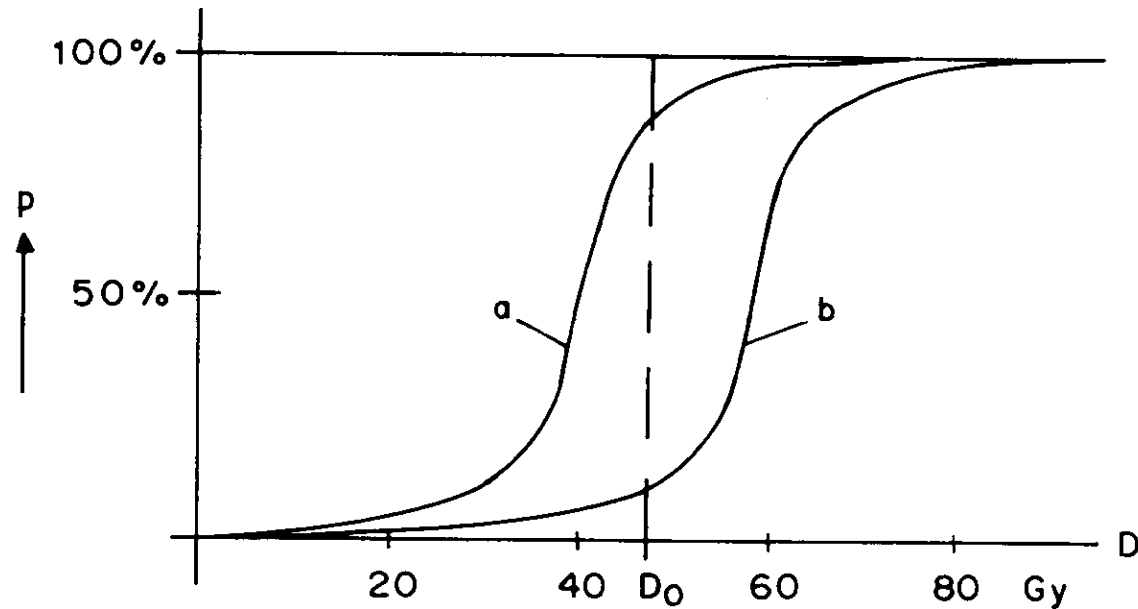
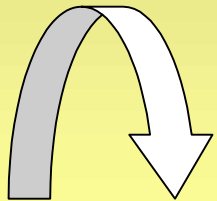


Abb. 22.4. a = Tumorheilungskurve, d. h. Wahrscheinlichkeit p für Heilung. b = Kurve für die Wahrscheinlichkeit p von ernststen Strahlungsschäden am gesunden Gewebe. Die Abszissenwerte illustrieren nur die typischen Größenordnungen der erforderlichen Strahlungsdosen D . Abstand und Steigung der beiden Kurven sind im konkreten Fall stark von der Tumorart und -größe abhängig. D_0 ist die optimale Therapiedosis; sie kann von Fall zu Fall sehr unterschiedlich sein und hängt auch von der Strahlenart



Dosimetrie

zur quantitativen Erfassung der durch Strahlung hervorgerufenen Effekte

Dosimetrie

Energiedosis	$D=W/m$	von einer bestrahlten Substanz je Masseinheit absorbierte Energie
---------------------	---------	---

Einheit:	Gray (Gy)	[1 Gy = 1 J/kg]
alt:	Rad (rad)	[1 rad = 0,01 Gy]

Ionendosis	$J=Q/m$	durch ionisierende Strahlung in Luft erzeugte Ladung je Masseinheit
-------------------	---------	---

Einheit:		[1 C/kg]
alt:	Röntgen (R)	[1 R = 2,58 • 10⁻⁴

C/kg]

Ionendosisleistung	dJ/dt	Ionendosis je Zeiteinheit
---------------------------	---------	----------------------------------

Einheit:		[1 C/(kg s)]
alt:		[1 R/s]

Dosimetrie

Energiedosis wird meist aus Ionendosis berechnet.

Beispiel Luft:
Energiedosis (Luft) = 34 J/C •

Für andere „Materialien“ meist empirischer Faktor.

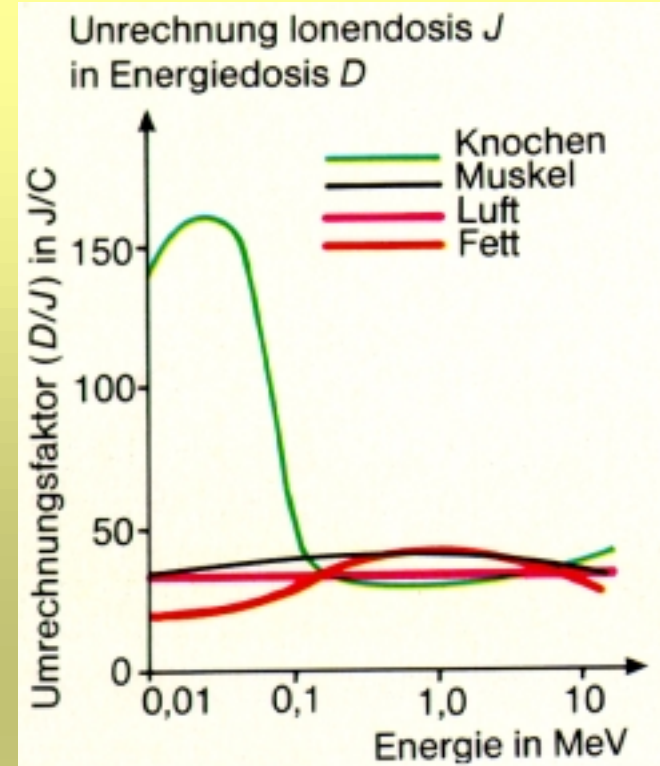
Problem:

Bei gleicher Energiedosis zeigen unterschiedliche Strahlenarten verschiedene biologische Strahlenwirkung.

Einführung eines Wichtungsfaktors q (Qualitätsfaktor der Strahlenart) gestattet die Abschätzung einer Äquivalentdosis D_q :

$$D_q = q \cdot D$$

Einheit:	Sievert (Sv)	[1 Sv = 1q • Gy]
alt:	Rem (rem)	[1 rem = 0,01 Sv]



Dosimetrie

$$D_q = q \cdot D$$

Strahlenart	Teilchenenergie E	Qualitätsfaktor q
1. Röntgen-, γ - und β -Strahlen	Maximalenergie bis 30 keV	1,7
	größer als 30 keV	1,0
2. Protonen	bis 10 MeV	10
3. Neutronen	thermisch	3,0
	10 keV	3,8
	100 keV	8,0
	1 MeV	10,5
	10 MeV	6,5
	100 MeV	4,7
4. α -Teilchen, Spaltungsbruchstücke und schwere Rückstoßkerne	1 GeV	3,4
		20 und größer

Strahlenbelastung

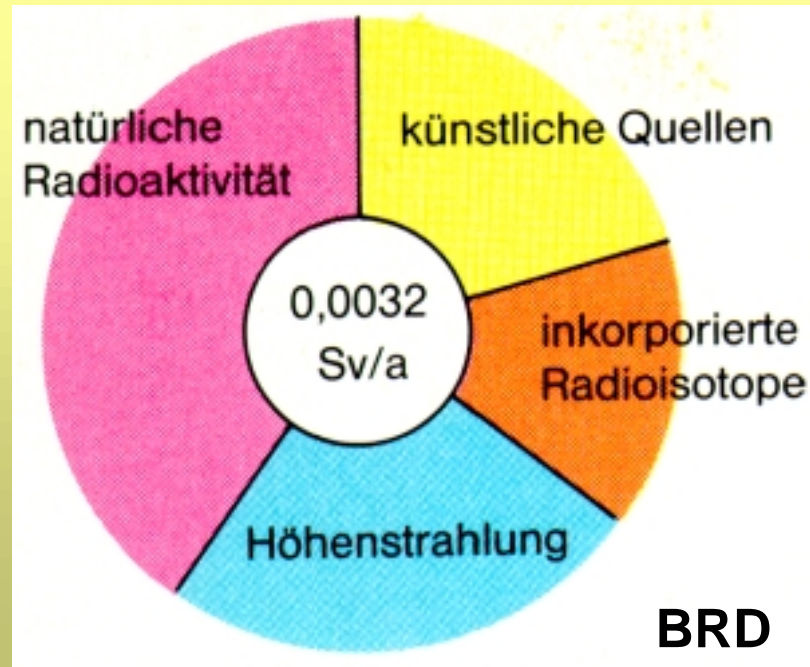


Tabelle 22.7. Beispiele für durchschnittliche zivili-satorische Ganzkörper-Strahlenexpositionen pro Jahr in Mitteleuropa

Quelle	Belastung
kerntechnische Anlagen	< 0,01 mSv
Röntgendiagnostik	0,5 mSv
Strahlentherapie	< 0,01 mSv
Nuklearmedizin	< 0,01 mSv
Fall-Out von Kernwaffenversuchen	< 0,02 mSv

Strahlenbelastung durch	Mittelwert
a) Kosmische Strahlung (40° geographische Breite)	
Seehöhe 0 bis 500 m	0,40 mSv/a
1000 m	0,45 mSv/a
2000 m	0,70 mSv/a
5000 m	3,60 mSv/a
8000 m	8,00 mSv/a
b) Umwelt:	
^{238}U , ^{40}K und ^{232}Th und Umwandlungsprodukte im Boden	0,47 mSv/a
^{220}Rn und ^{222}Rn in der Luft	0,02 mSv/a
Extremwerte:	
Kerala/Indien	13 mSv/a (Monazitsand)
NO-Küste Brasiliens	5 mSv/a bis über 100 mSv/a

Strahlendosis-Grenzwerte

Tabelle 22.6. Auszug aus der deutschen Röntgenverordnung, Anlage IV. Kategorie *A* = Personen, die in Kontrollbereichen tätig sind; Kategorie *B* = Personen, die sich i. a. nicht in Kontrollbereichen aufhalten

Körperbereich	Grenzwerte der Körperdosen für beruflich strahlenexponierte Personen im Kalenderjahr der	
	Kategorie <i>A</i>	Kategorie <i>B</i>
1. Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark	50 mSv	15 mSv
2. Hände, Unterarme, Füße, Unterschenkel, Knöchel, einschl. dazugehöriger Haut	500 mSv	150 mSv
3. Schilddrüse, Knochenoberfläche, Haut, soweit nicht unter 2 angeführt	300 mSv	90 mSv
4. alle nicht unter 1, 2, und 3 genannten	150 mSv	45 mSv

Grenzwerte in Deutschland für Ganzkörperbestrahlung:

- 50 mSv/a bei beruflicher Strahlenexposition
- 1,5 mSv/a sonst

Strahlenschutz

Weggehen

quadratisches Abstandsgesetz

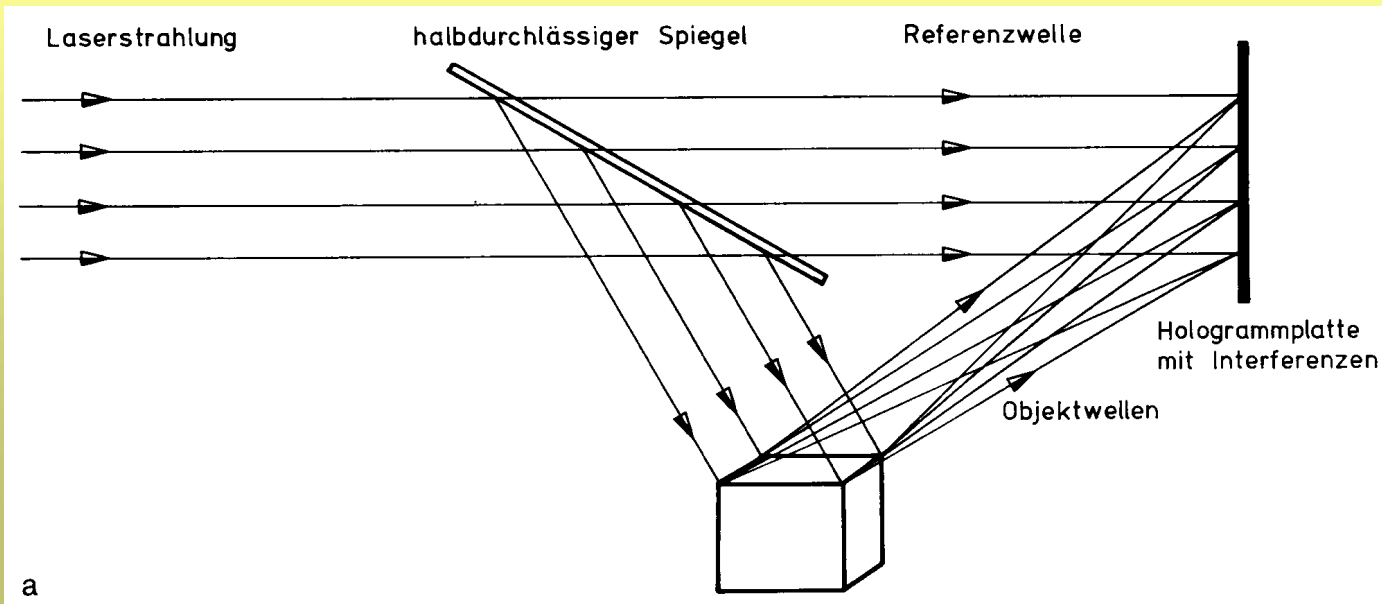
Abschirmen

Blei, Kontrolle vom Nebenraum

Dosis reduzieren

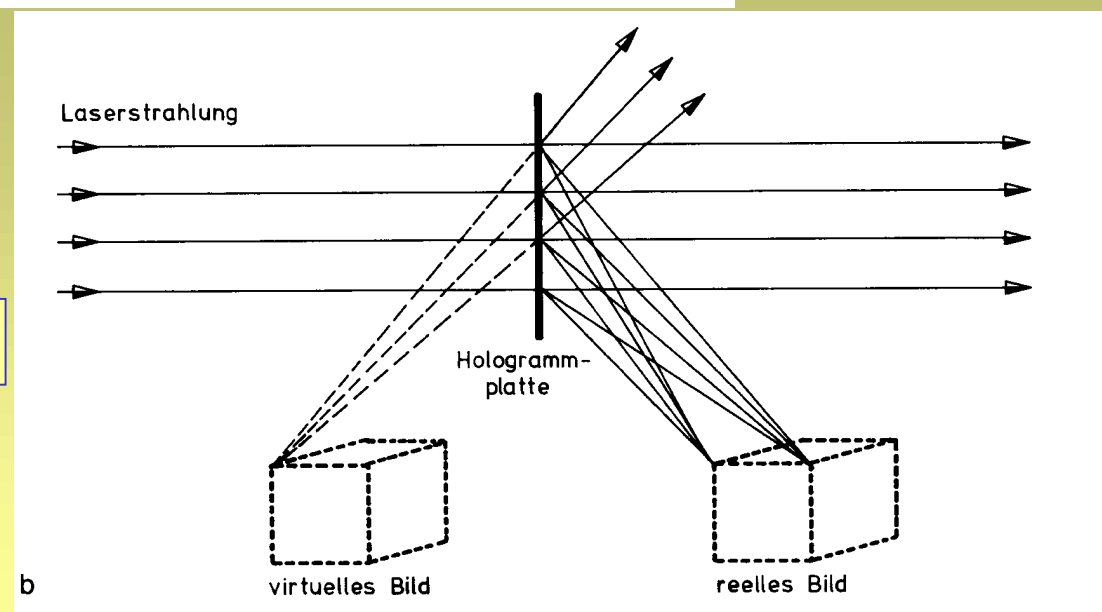
Ist Einwirkung wirklich notwendig?

Holographie



Aufnahme

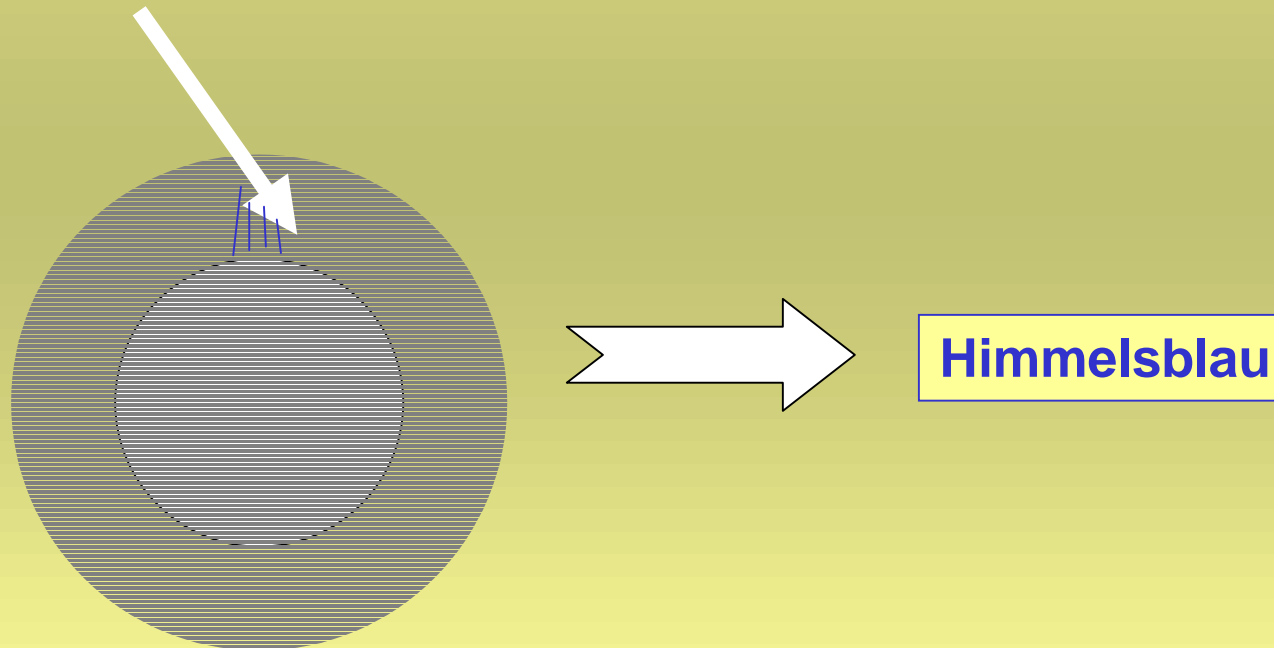
Wiedergabe



Himmelsblau

Streuung an kleinen Teilchen in der Luft ist $\sim 1/\lambda^4$

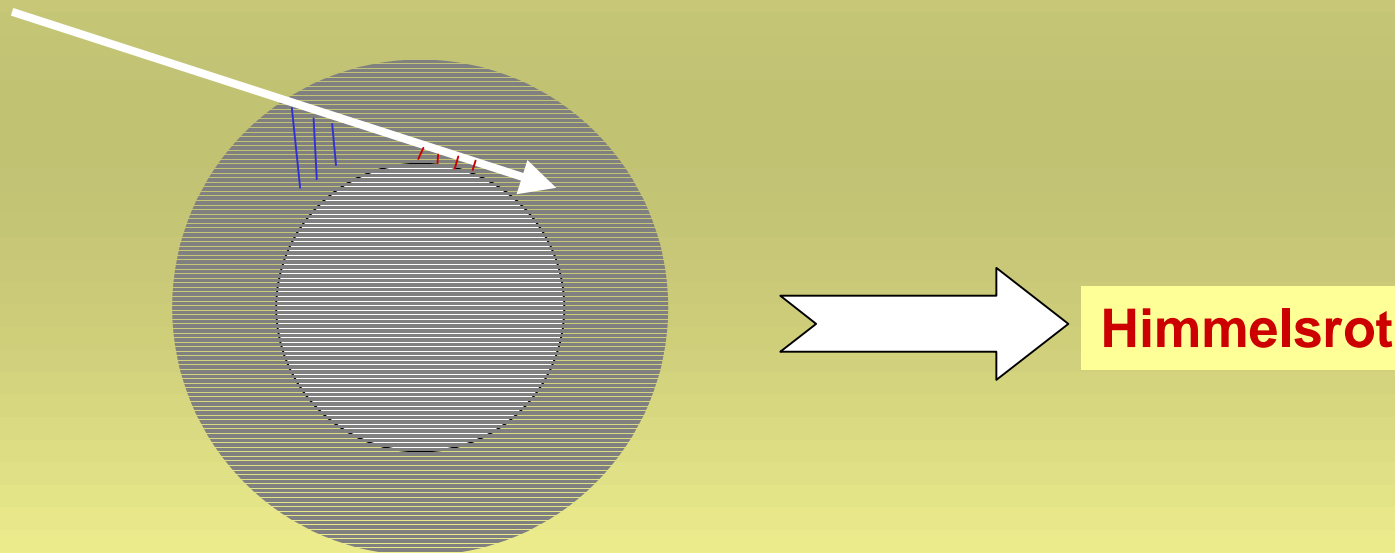
Da $\lambda_{\text{rot}} \approx 2 \lambda_{\text{blau}}$, ist die Streuung von blauem Licht ca. 16x so groß wie von rotem Licht



<http://www.schremmer.de/html/halos.htm>

Morgen- und Abendrot

Bei sehr flachem Einstrahlwinkel (langer Weg durch die Atmosphäre) kommen nur noch die nicht vorher „weggestreuten“ langwelligeren Anteil an.



<http://www.schremmer.de/html/halos.htm>