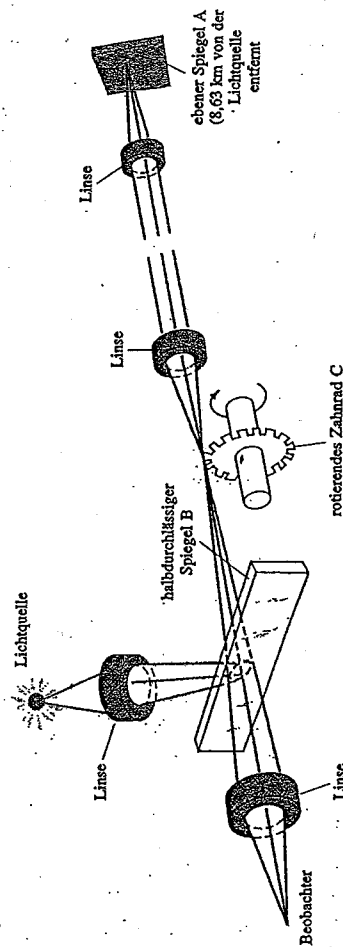


30.3 Die Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Foucault (stark vereinfachte Darstellung). Dreht sich der achteckige Spiegel in der Zeit, die das Licht für den Weg zum festen Spiegel und zurück benötigt, um  $\frac{1}{8} \cdot 360^\circ = 45^\circ$ , dann steht eine Seite des Spiegels in der richtigen Position, um das Licht in das Teleskop zu reflektieren.



30.2 Die Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Fizeau. Das von der Lichtquelle emittierte Licht wird am halbdurchlässigen Spiegel B reflektiert und gelangt durch eine Lücke im Zahnrad auf den Spiegel A. Bei einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit des Zahnrades kann das vom Spiegel A reflektierte Licht das Zahnrad passieren und der Beobachter sieht ein Bild der Lichtquelle.

GURUER - Feinuh. 29. Jun. Tent. 40pt. 3. m.d. Phys.

30.1 Die Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Ole Rømer. Die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Verfinsterungen des Jupitermondes Io wird größer, wenn sich die Erde entlang ABC bewegt, und kleiner, wenn sie sich entlang CDA bewegt. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, daß sich in der Zeit zwischen zwei Verfinsterungen der Abstand zwischen Erde und Jupiter verändert und der Weg des Lichts entsprechend größer oder kleiner wird. (Der Weg, den Jupiter in einem Erdenjahr zurücklegt, ist vernachlässigbar.)

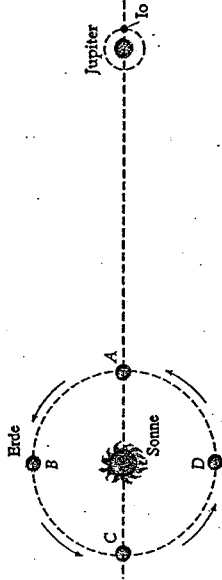
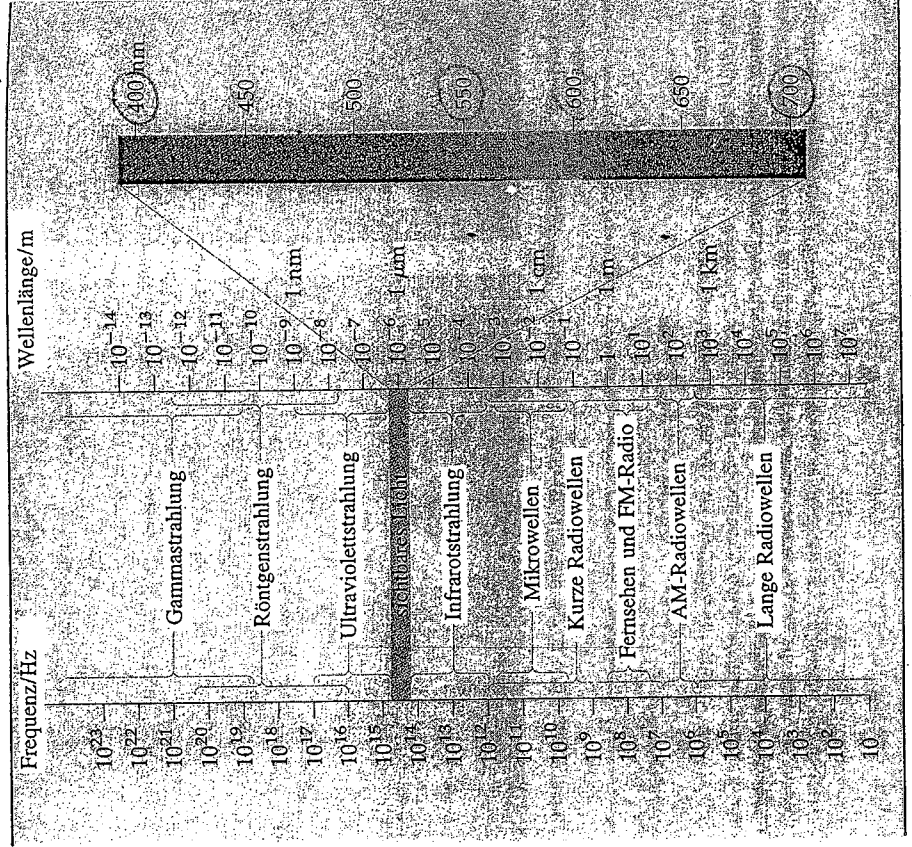
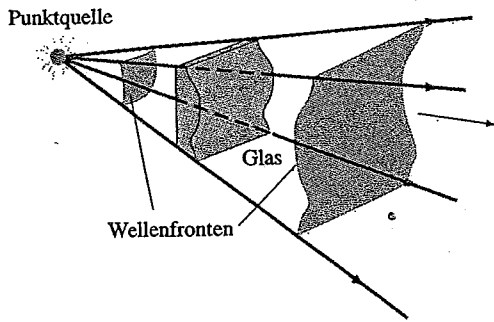


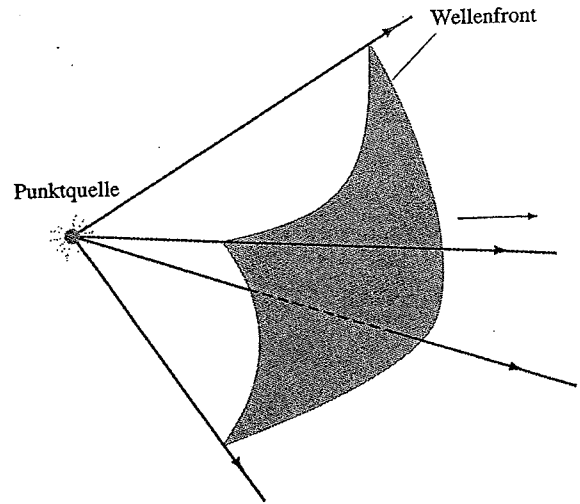
Tabelle 29.1 Das elektromagnetische Spektrum



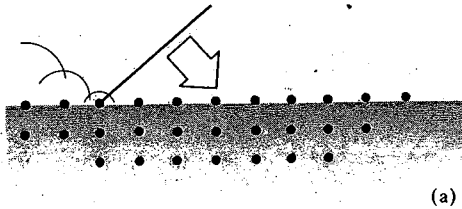
"Physik", Paul A. Tipler,  
Spektrum Verlag  
"Optik", Eugene Hecht,  
Addison Wesley



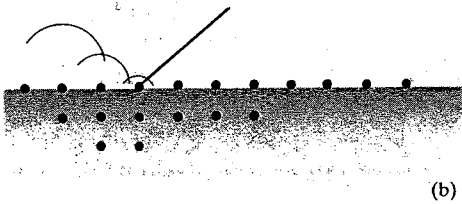
30.5 Die Wellenfront aus einer Punktquelle vor und nach dem Durchgang durch ein unregelmäßig geformtes Stück Glas.



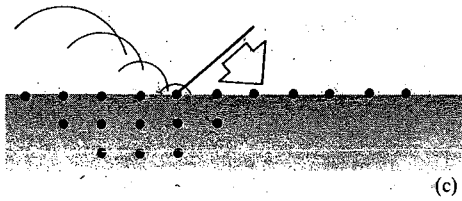
30.4 Kugelförmige Wellenfront, die von einer Punktquelle ausgeht.



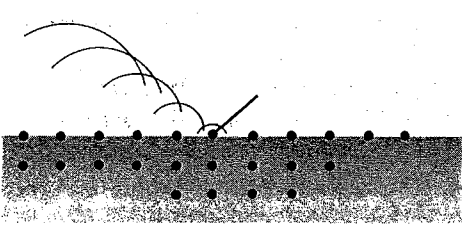
(a)



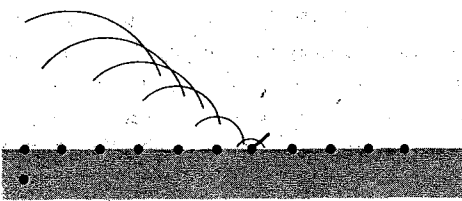
(b)



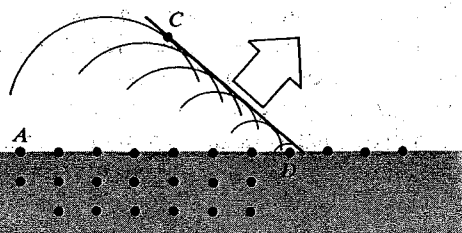
(c)



(d)

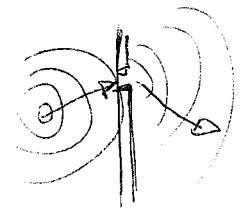
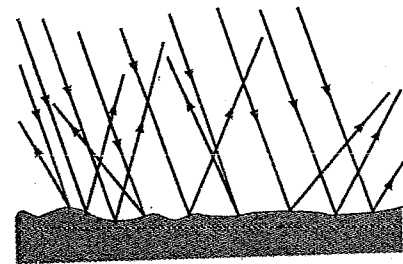


(e)



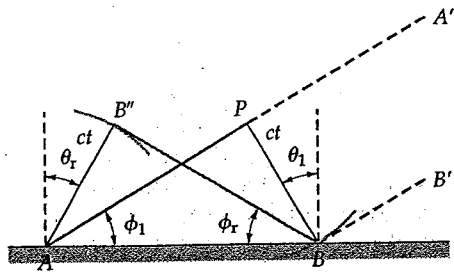
(f)

30.8 Die von einer Punktquelle P ausgehenden Strahlen werden an einem Spiegel reflektiert. Es scheint, als kämen die Strahlen von dem Bildpunkt P' hinter dem Spiegel. Das Bild lässt sich überall im farbig getönten Bereich beobachten.

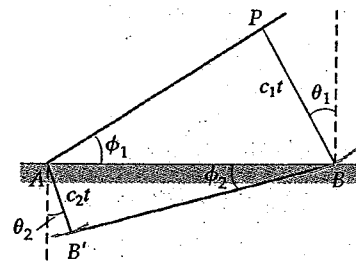


X. 1.)

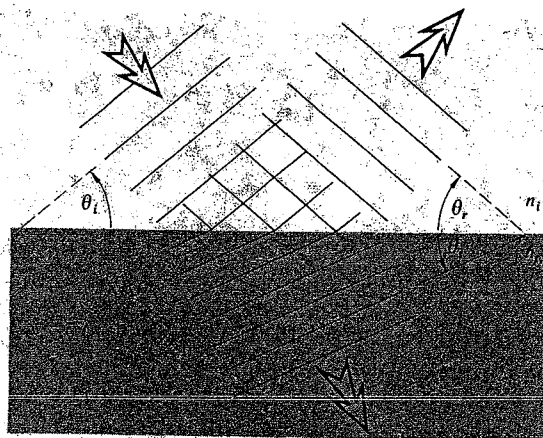
Abbildung 4.8 Die Reflexion einer Welle als Ergebnis der Streuung.



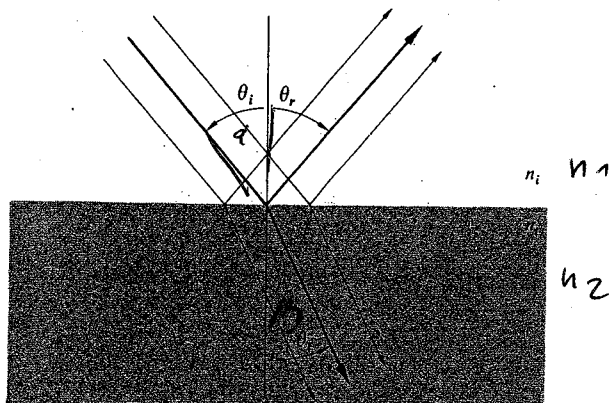
30.11 Geometrische Darstellung des Huygensschen Prinzips für die Herleitung des Reflexionsgesetzes. Die einfallende Wellenfront AP trifft den Spiegel zuerst im Punkt A. In der Zeit  $t$  erreicht die vom Punkt P ausgehende Elementarwelle den Spiegel im Punkt B, während gleichzeitig die von A ausgehende Elementarwelle am Punkt B' ankommt.



30.14 Anwendung des Huygensschen Prinzips auf die Brechung einer ebenen Welle an der Grenzfläche zweier Medien. Die Lichtgeschwindigkeiten  $c_1$  und  $c_2$  in den Medien sind unterschiedlich, wobei hier gilt:  $c_2 < c_1$ . In diesem Fall ist der Brechungswinkel  $\theta_2$  kleiner als der Einfallswinkel  $\theta_1$ .

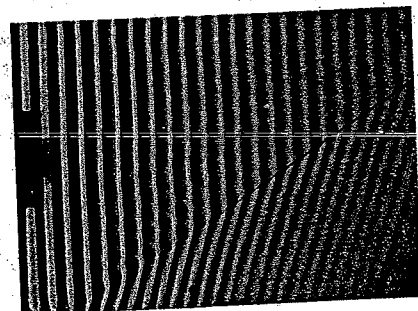


Wellendarstellung



Strahlendarstellung

Abbildung 4.10 Die Wellen- und Strahlendarstellung eines einfallenden, reflektierten und transmittierten Strahlenbündels.



30.15 Die Brechung ebener Wasserwellen. An der Grenzlinie ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen, weil sich die Wassertiefe ändert. Man beachte, daß an der Grenzlinie auch Reflexion auftritt. (Aus PSSC Physics, 2nd edition, 1965; D. C. Heath and Company, and Education Development Center, Inc., Newton, MA, USA)

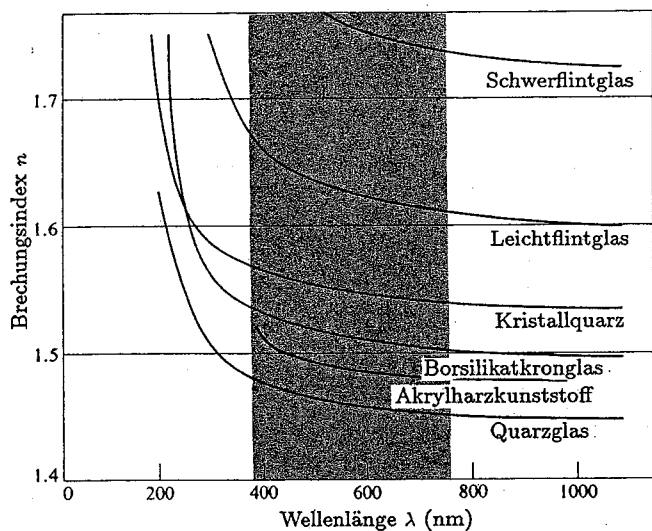
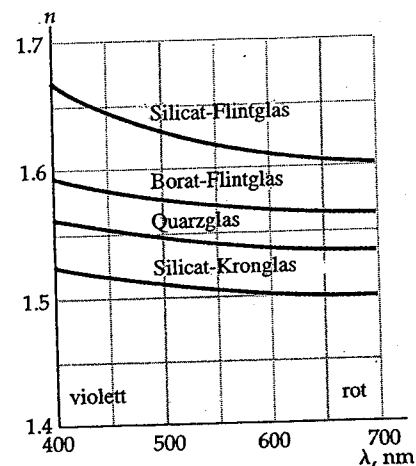
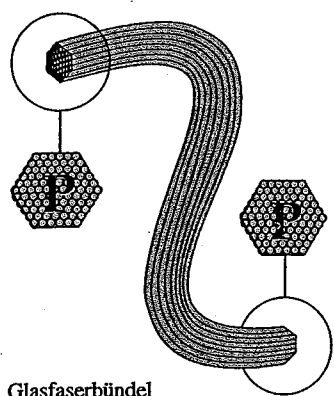


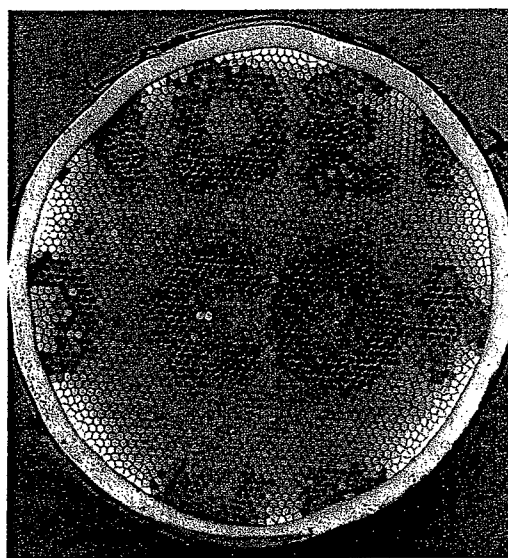
Abbildung 3.26 Die Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex für verschiedene Materialien.



30.21 Die Brechzahl einiger Glassorten in Abhängigkeit der Lichtwellenlänge.

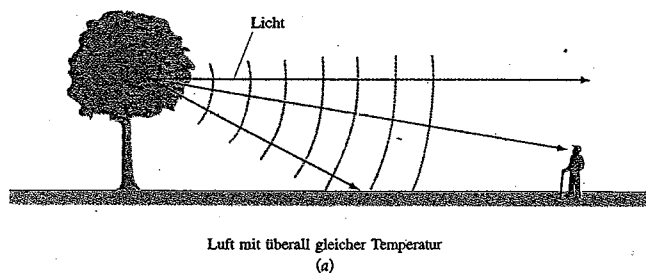


(a)

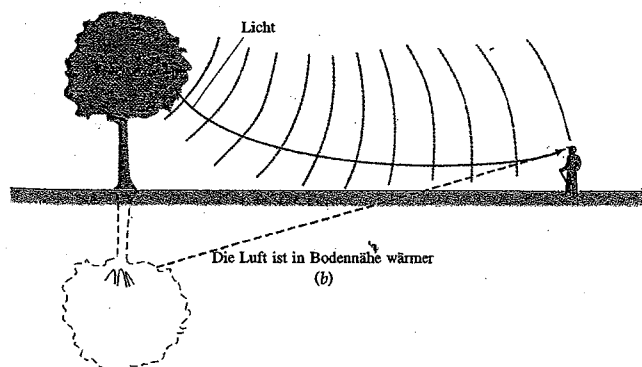


(b)

30.19 a) Das vom Gegenstand ausgehende Licht wird durch ein Glasfaserbündel übertragen und bildet auf der anderen Seite des Leiters ein Bild des Gegenstands. b) Ein Bild, das durch ein Faserbündel übermittelt wird. (© 1983 C. Falco/Photo Researchers)

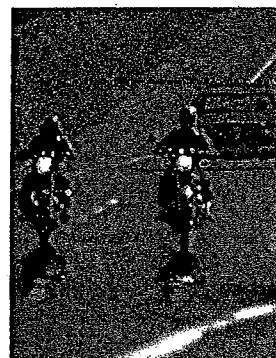


(a)



(b)

30.20 Eine Luftspiegelung: a) Wenn die Luft überall gleiche Temperatur hat, dann breiten sich die vom Baum reflektierten Lichtstrahlen geradlinig aus, und die Wellenfronten bleiben kugelförmig. b) Ist die Luft am Boden wärmer, dann bleiben die Wellenfronten nicht mehr kugelförmig, und die Lichtstrahlen (die Normalen auf den Wellenfronten) werden zu einer gekrümmten Linie gebrochen. Der Beobachter sieht den Baum so, als würden die Lichtstrahlen durch eine Wasserfläche am Boden reflektiert. c) Luftspiegelung auf einer heißen Straße. (© Robert Greenler)



(c)

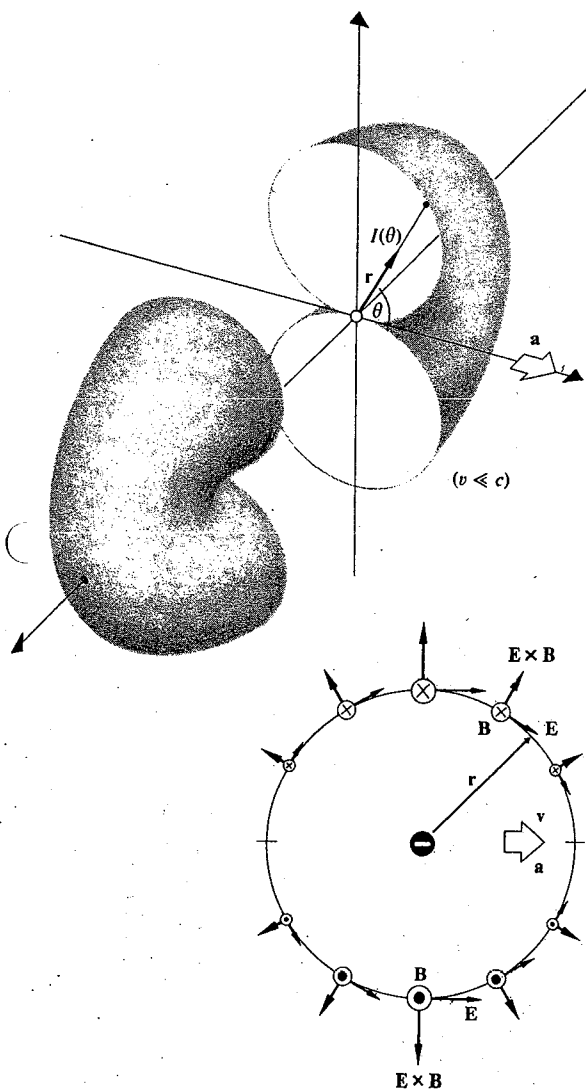
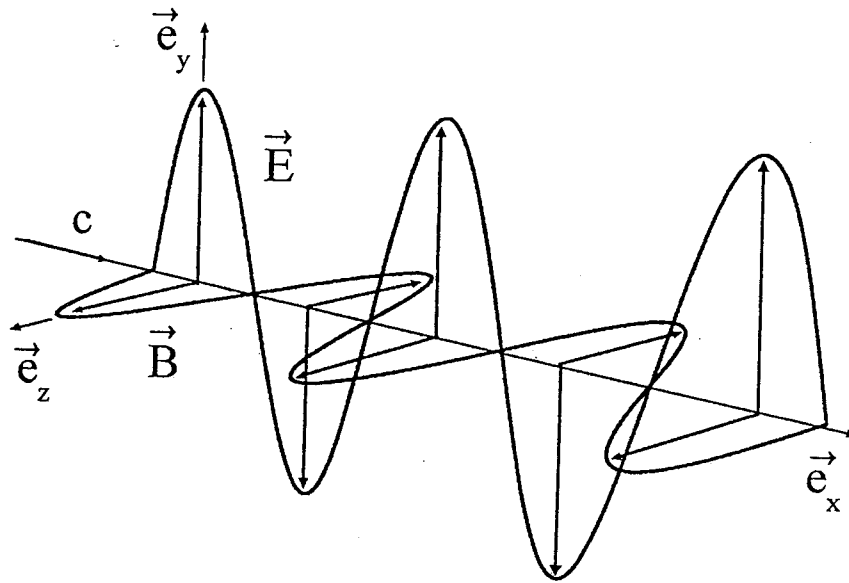


Abbildung 3.17 Das toroidale Strahlungsbild einer linear beschleunigten Ladung (aufgeschnitten, um den Querschnitt zu zeigen).

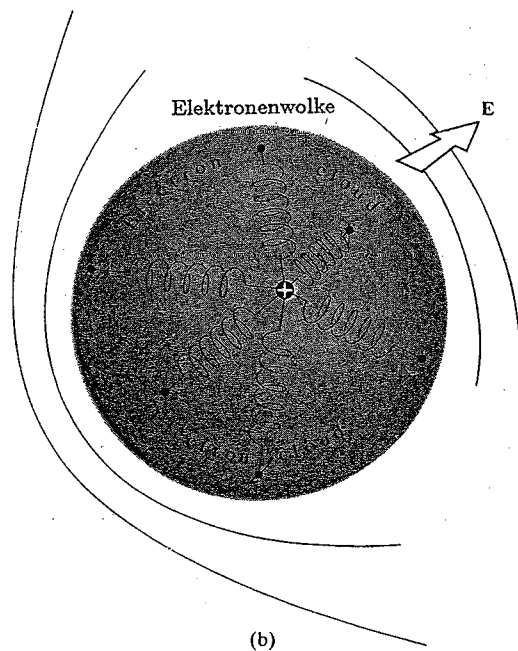
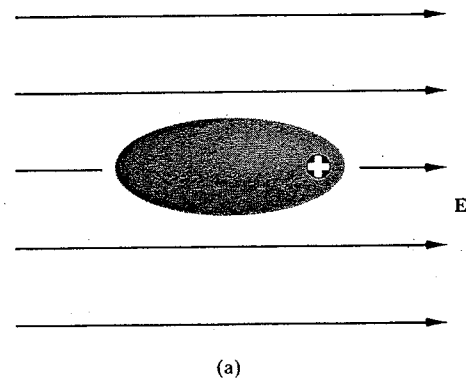


Abbildung 3.25 (a) Deformation einer Elektronenwolke als Reaktion auf ein angelegtes  $E$ -Feld. (b) Das mechanische Oszillatormodell für ein isotropes Medium — die Federn sind alle gleich, und der Oszillator kann in allen Richtungen gleich schwingen.

Abbildung 8.1 Linear polarisiertes oder lineares Licht.

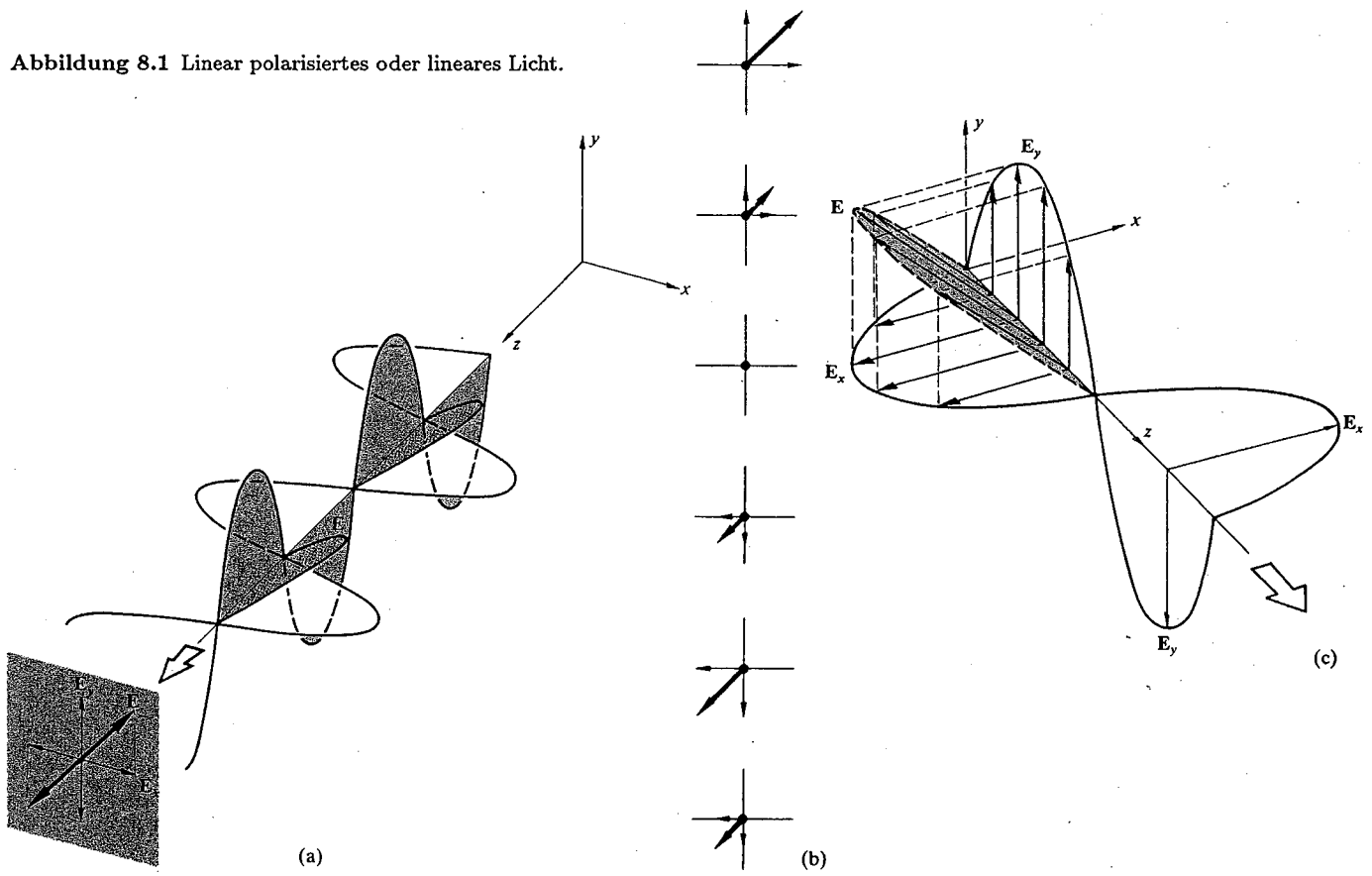


Abbildung 8.2 Lineares Licht.

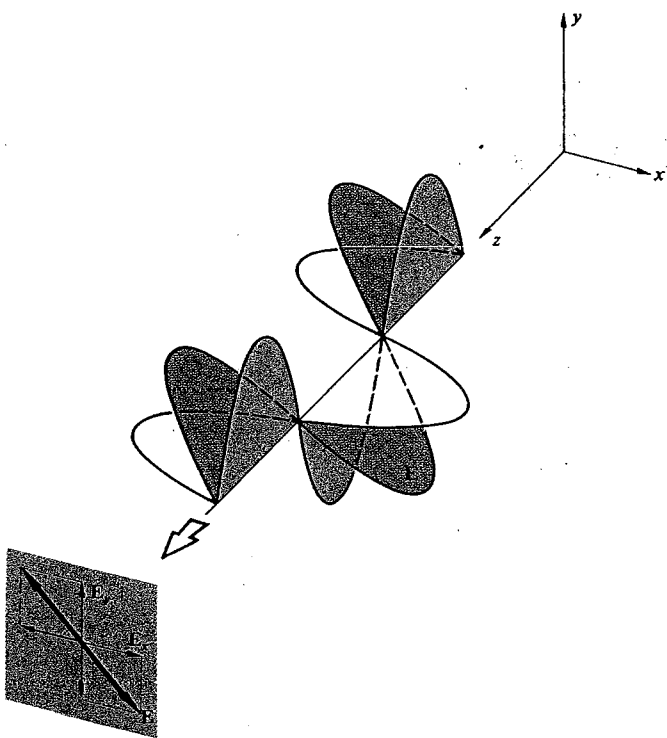
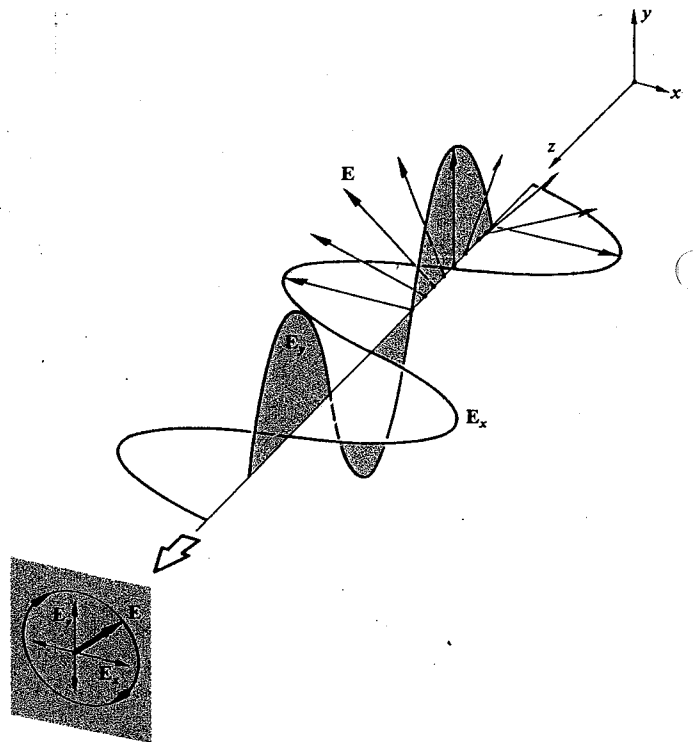


Abbildung 8.3 Rechts zirkular polarisiertes oder rechts zirkulares Licht.



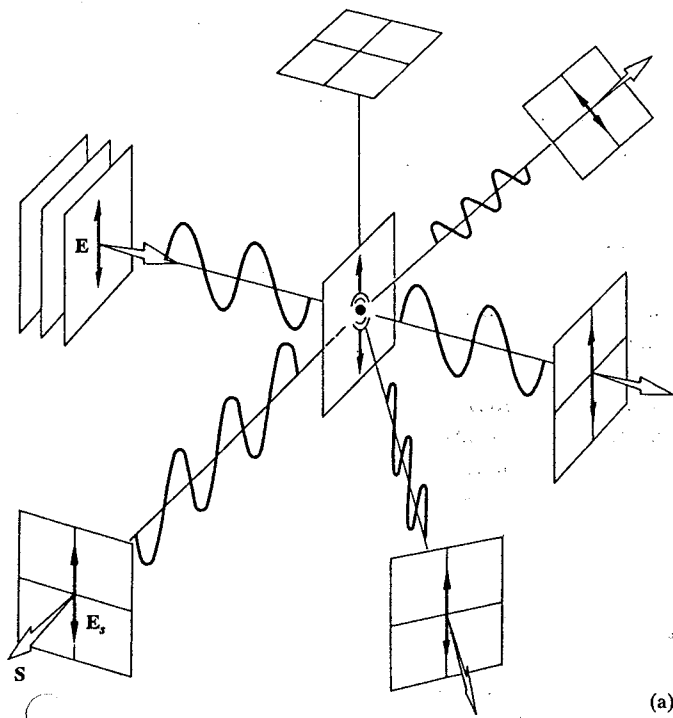


Abbildung 8.36 Streuung von polarisiertem Licht durch ein Molekül.

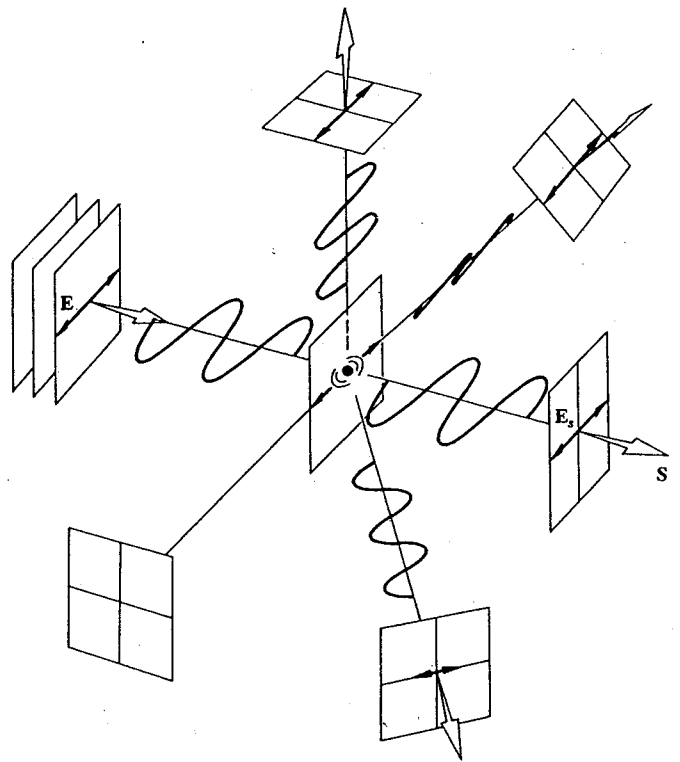


Abbildung 8.36b

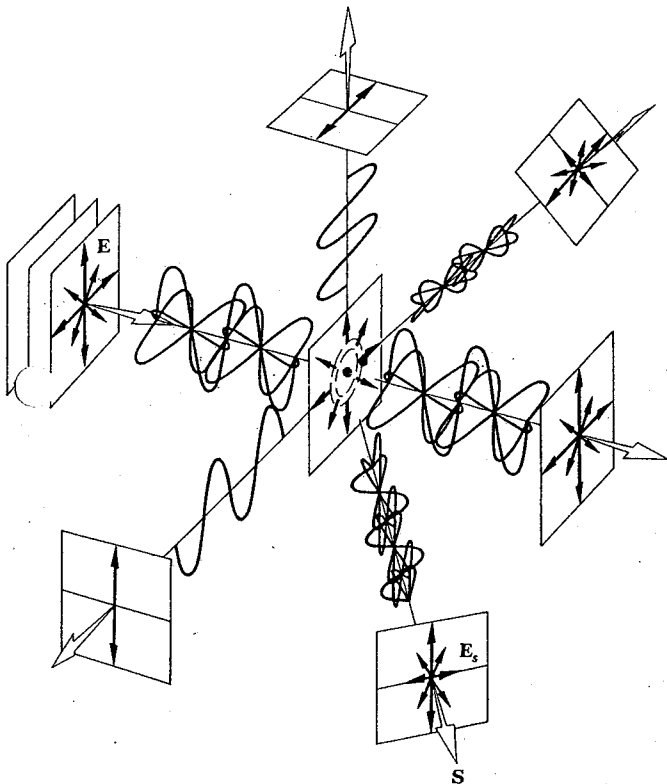


Abbildung 8.37 Streuung von unpolarisiertem Licht durch ein Molekül.

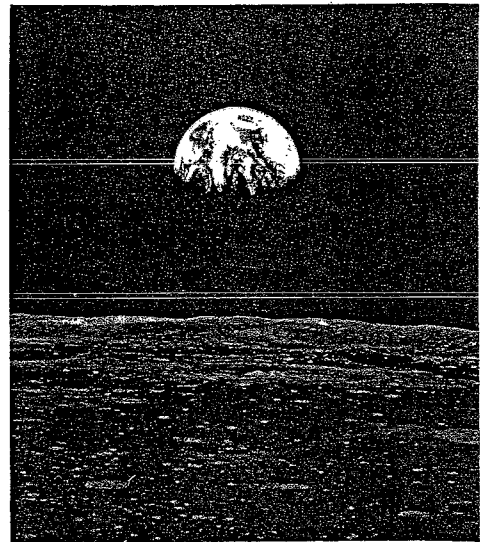


Abbildung 8.34 Die Halberde, die im schwarzen Mondhimmel hängt. (Photo mit freundlicher Genehmigung der NASA.)

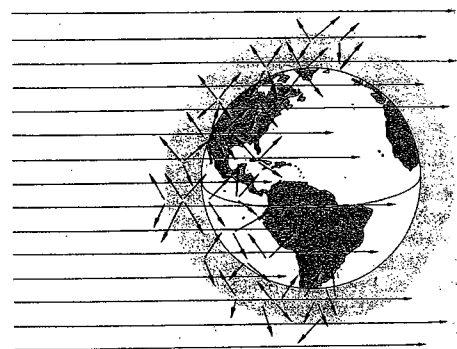
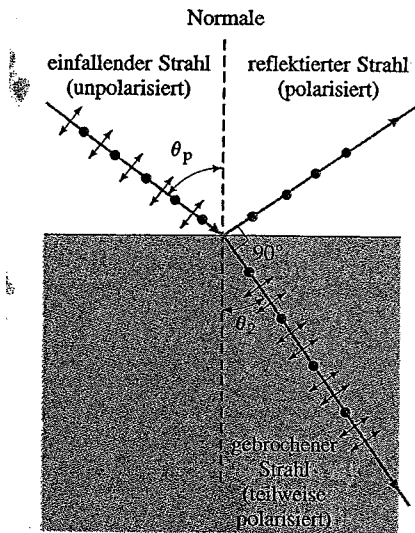
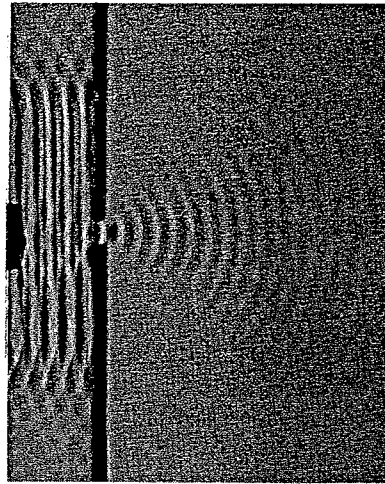


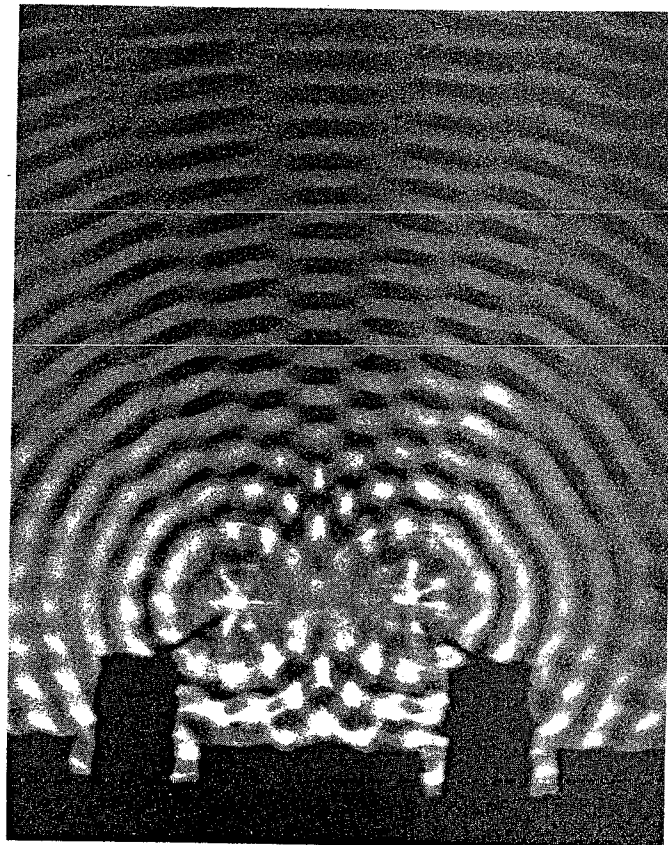
Abbildung 8.35 Streuung von Himmelslicht.



**30.36** Polarisation durch Reflexion. Der einfallende Lichtstrahl ist unpolarisiert. Das elektrische Feld läßt sich in Komponenten parallel zur Einfallsebene (Pfeile) und senkrecht dazu (Punkte) zerlegen. Fällt der Strahl unter dem Polarisationswinkel ein, dann ist der reflektierte Strahl vollständig polarisiert, wobei das elektrische Feld senkrecht auf der Einfallsebene steht.



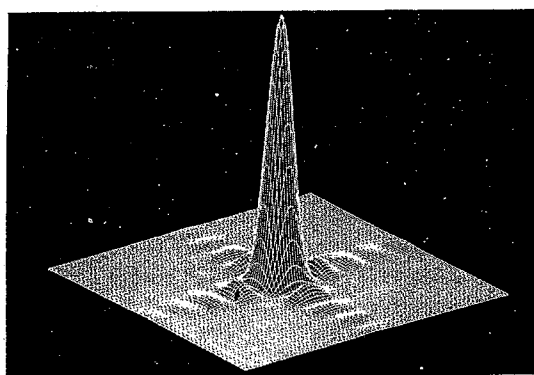
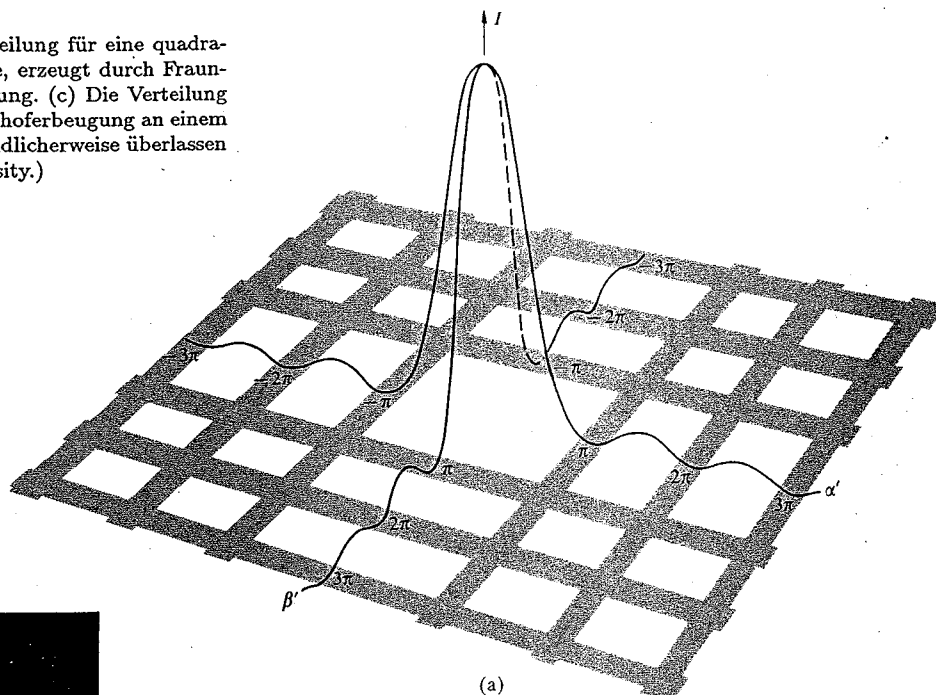
**33.7** Ebene Wasserwellen in einer Wanne stoßen auf ein Hindernis mit kleiner Öffnung. Hinter dieser entstehen konzentrische Wellenfronten, als befände sich in der kleinen Öffnung eine Punktquelle. (Aus *PSSC Physics*, 2nd ed., 1965, D.C. Heath & Co., and Education Development Center, Newton, MA, U.S.A.)



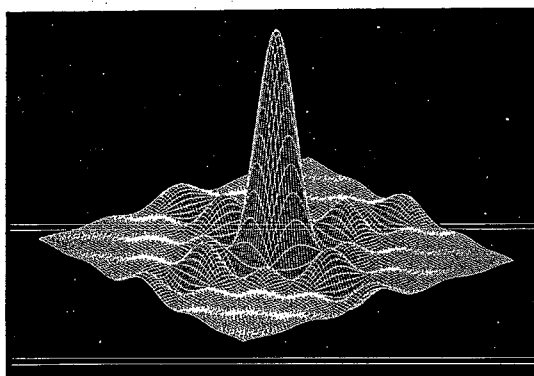
**Abbildung 9.1** Wasserwellen von zwei Punktquellen in der Wellenwanne.



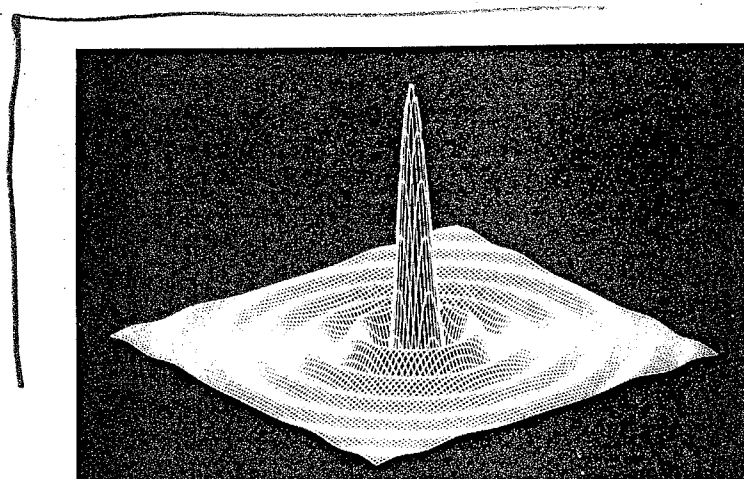
Abbildung 10.25 (a) Die Intensitätsverteilung für eine quadratische Öffnung. (b) Die Bestrahlungsstärke, erzeugt durch Fraunhoferbeugung an einer quadratischen Öffnung. (c) Die Verteilung des elektrischen Feldes, wie sie durch Fraunhoferbeugung an einem quadratischen Loch entsteht. (Photos freundlicherweise überlassen von R.G. Wilson, Illinois Wesleyan University.)



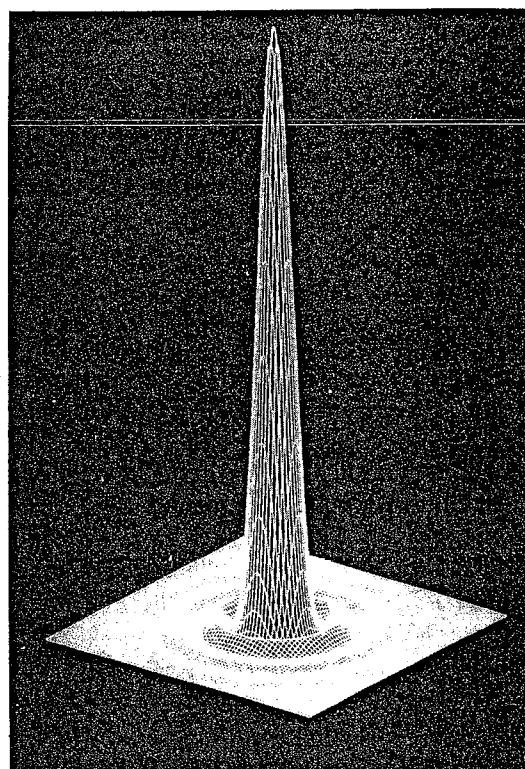
(b)



(c)



(b)



(c)

Abbildung 10.28 (a) Das Airy-Muster (b) Verteilung des elektrischen Feldes, die durch Fraunhoferbeugung an einer kreisrunden Öffnung entsteht. (c) Intensitätsverteilung, die bei Fraunhoferbeugung an einem kreisrunden Loch entsteht. (Photos freundlicherweise überlassen von R.G. Wilson, Illinois Wesleyan University.)

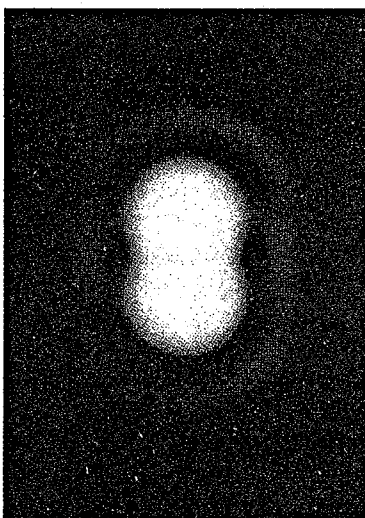
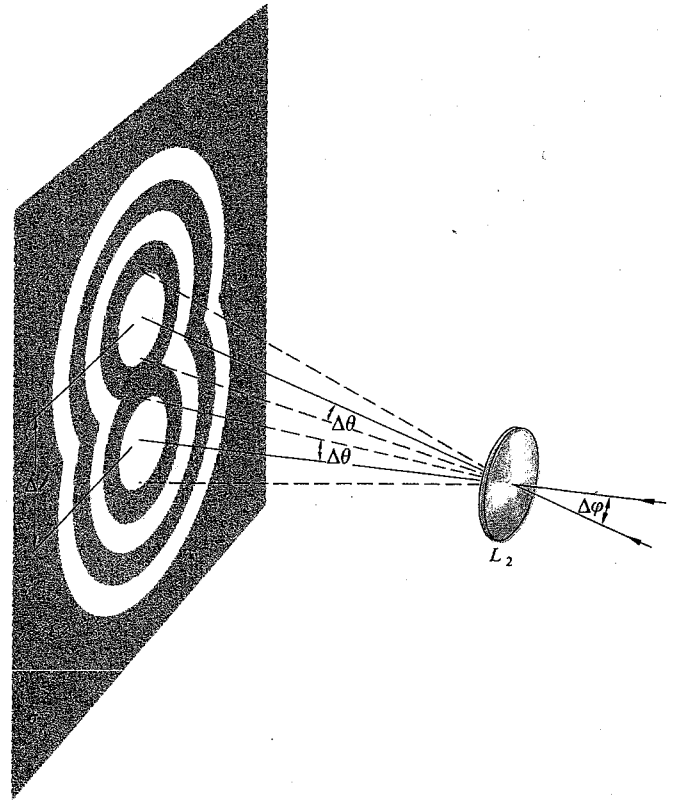
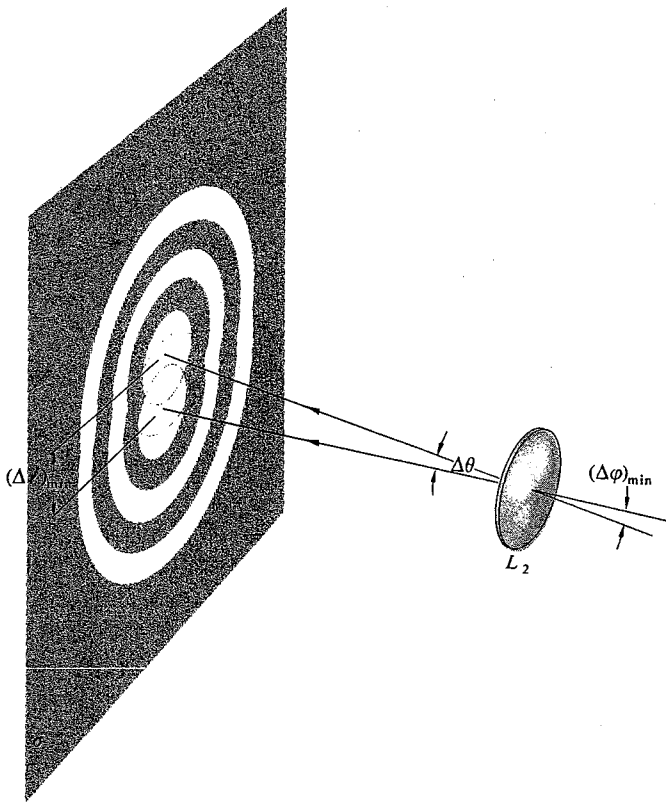
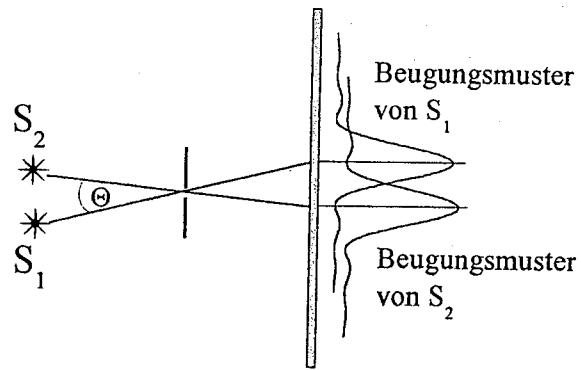


Abbildung 10.33 Beugungsbilder, die sich überlappen; gerade noch aufgelöst.

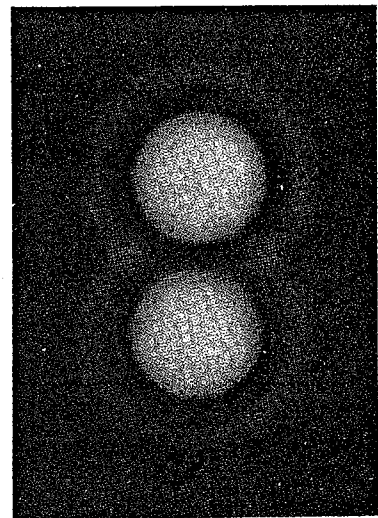


Abbildung 10.32 Beugungsbilder, die sich überlappen; gut aufgelöst.

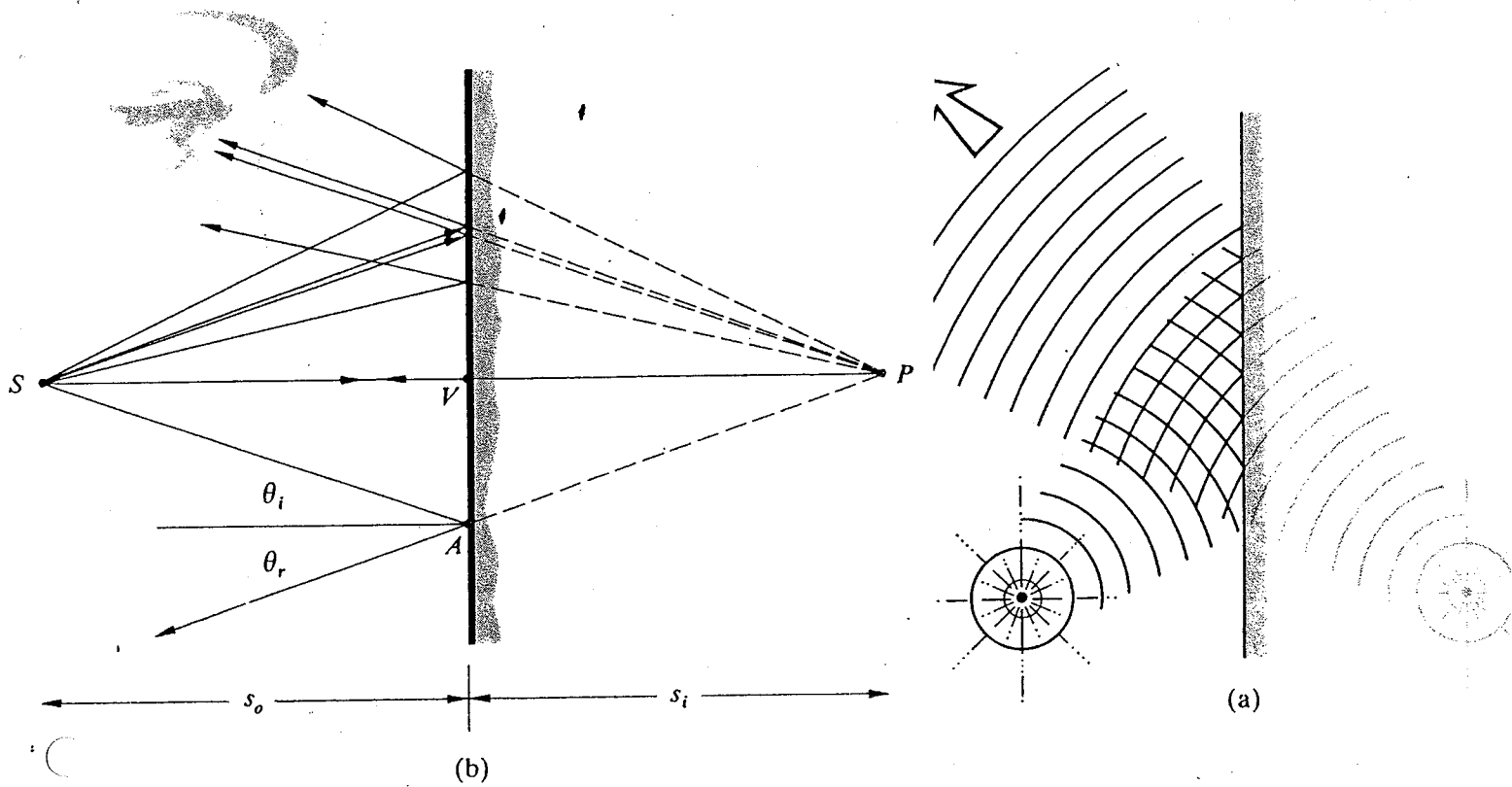
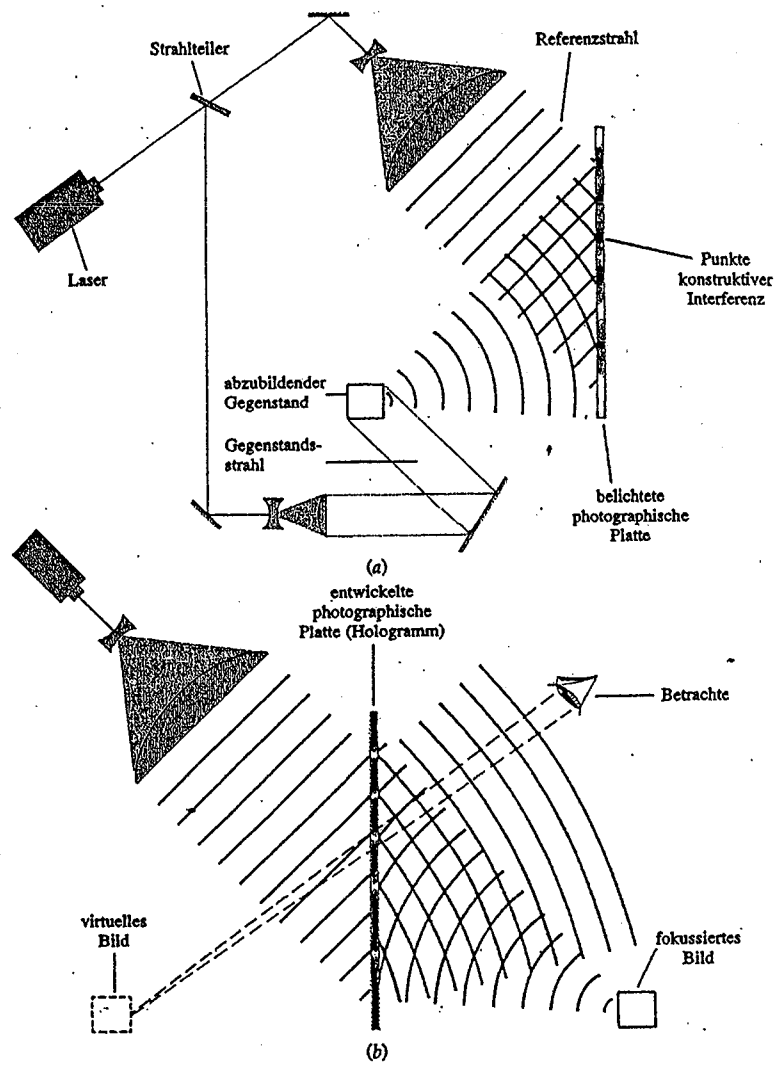
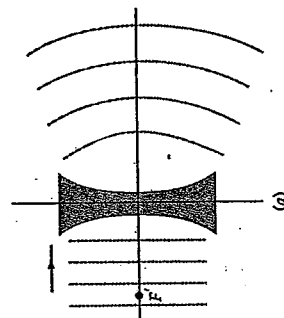
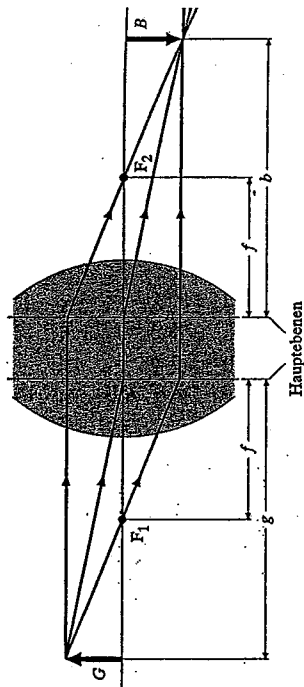


Abbildung 5.38 Ein ebener Spiegel. (a) Die Reflexion von Wellen. (b) Die Reflexion von Strahlen.

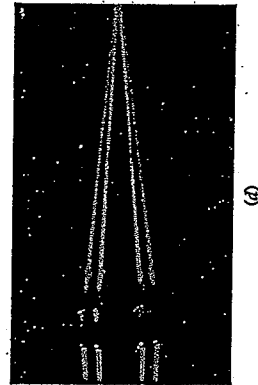
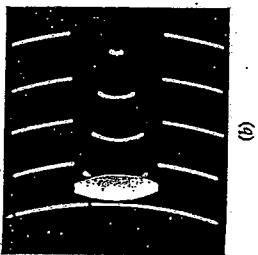
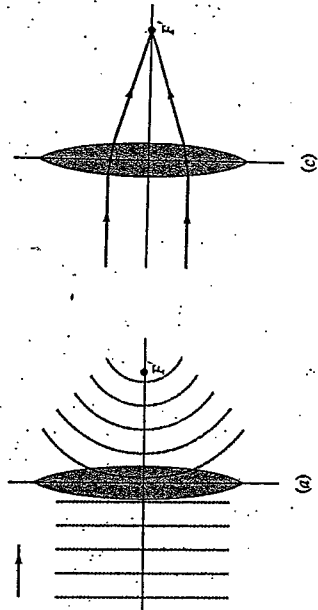
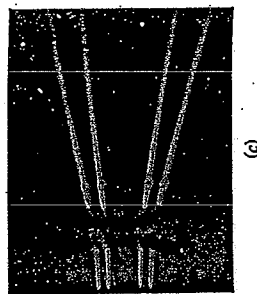
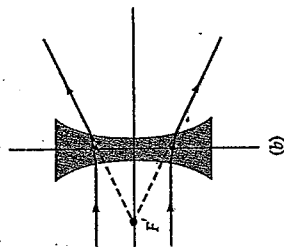
33.35 a) Die Erzeugung eines Hologramms. Das vom Referenzstrahl und vom Gegenstandsstrahl erzeugte Interferenzmuster wird auf einem photographischen Film aufgezeichnet. b) Wenn der Film entwickelt und dann mit kohärentem Laserlicht beleuchtet wird, lässt sich ein dreidimensionales Bild beobachten. Hologramme, wie sie beispielsweise auf Kreditkarten angebracht sind, werden als Regenbogen-Hologramme bezeichnet; sie sind komplizierter aufgebaut: Ein horizontaler Streifen des ursprünglichen Hologramms wird verwendet, um ein zweites Hologramm aufzunehmen. Der Betrachter kann ein dreidimensionales Bild des Gegenstandes sehen, wenn er seine Augen vor dem Hologramm hin und her bewegt. Wird dabei (wie es normalerweise der Fall ist) weißes Licht zur Beleuchtung verwendet, so ändert das Hologramm seine Farbe, wenn der Betrachter seinen Abstand (senkrecht) zum Hologramm ändert. Bei Verwendung von Laserlicht verschwindet das Bild, wenn das Auge des Betrachters sich oberhalb oder unterhalb des Bildes vom Streifen befindet.



31.35 Bildkonstruktion bei einer dicken Sammellinse. Der *achsenparallele Strahl* wird bis zur zweiten Hauptebene durchgezogen und verläuft von dort zum Brennpunkt  $F$ . Der *zentrale Strahl* wird bis zur ersten Hauptebene durchgezogen und dann bei der zweiten Hauptebene im gleichen Winkel zur Achse weitergeführt. (Dies entspricht der seitlichen Parallelverschiebung eines Lichtstrahls an einer planparallelen Platte, auf die er schräg auftrifft.) Der *Brennpunktstrahl* verläuft hinter der ersten Hauptebene achsenparallel. – Bei der hier gezeigten symmetrischen Bikonvexlinse sind die Brennweiten auf beiden Seiten gleich:  $f_1 = f_2 = f$ . Das beschriebene Verfahren zur Bildkonstruktion läßt sich genauso auf unsymmetrische dicke Linsen ( $f_1 \neq f_2$ ) anwenden.



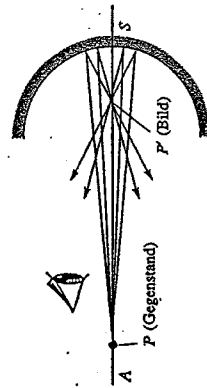
31.26 a) Wellenfronten einer ebenen Welle beim Durchgang durch eine Zerstreuungslinse. Hier wird der äußere Teil der Wellenfronten gegenüber dem mittleren Teil verzögert, und es entstehen auf der Transmissionsseite kugelförmige Wellenfronten, deren Mittelpunkt im Brennpunkt  $F$  liegt. b) Lichtstrahlen einer ebenen Welle, die auf eine Zerstreuungslinse treffen, werden an jeder Oberfläche nach außen gebrochen und divergieren so, als gingen sie vom Brennpunkt  $F$  aus. c) Lichtstrahlen, die eine Zerstreuungslinse durchlaufen. (© Fundamental Photographs).



31.25 a) Wellenfronten einer ebenen Welle beim Durchgang durch eine Sammellinse. Der mittlere (achsennahe) Teil der Wellenfronten wird gegenüber dem äußeren Teil verzögert, so daß sich auf der Transmissionsseite eine kugelförmige Welle ergibt, deren Mittelpunkt im Brennpunkt  $F$  liegt. b) Aufnahme realer Wellenfronten, die eine Linse durchqueren. Solche Bilder gelingen mit gepulsten Lasern und der Ausnutzung der Holographietechnik (siehe auch Kapitel 33). c) Die Lichtstrahlen einer ebenen Welle treffen auf eine Sammellinse. Nach der Brechung an beiden Oberflächen schneiden sie sich im Brennpunkt  $F$  (Foto: Nils Abramson). d) Lichtstrahlen, die durch eine Sammellinse fokussiert werden (© 1974 Fundamental Photographs).

(c)

(b)



31.8 Die von einem Punktgegenstand ausgehenden Lichtstrahlen bilden auf der Achse AS eines Hohlspiegels (Konkavspiegels) den Bildpunkt  $P$ . Wenn die Strahlen den Spiegel in der Nähe der Achse treffen, entsteht ein scharfes Bild.

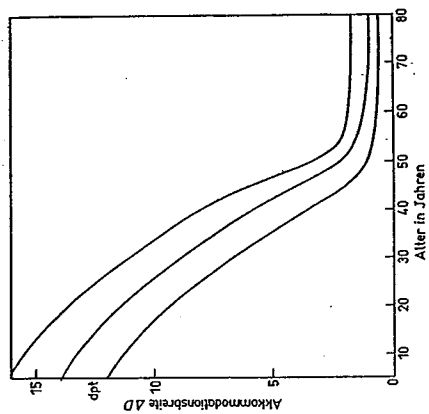


Abb. 1.107 Akkommodationsbreite des Auges als Funktion des Alters (mittlere Kurve); zusätzlich sind die noch zulässigen Grenzkurven eingetragen.

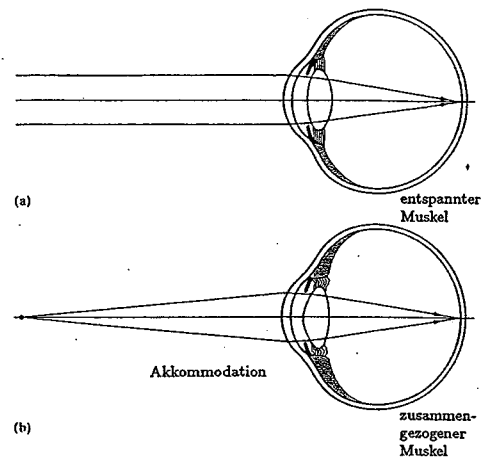


Abbildung 5.82 Akkommodation — Veränderung der Linsenform.

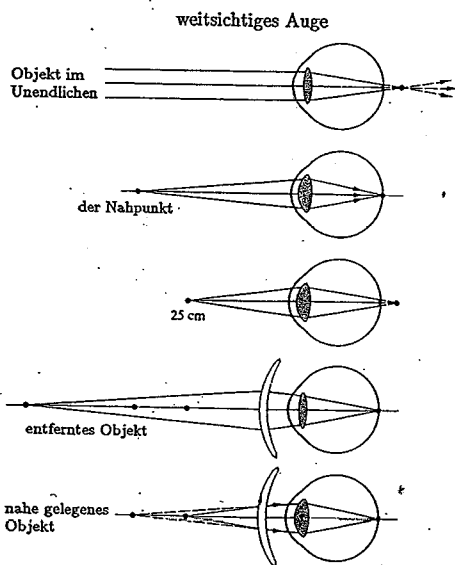


Abbildung 5.85 Korrektur des weitsichtigen Auges.

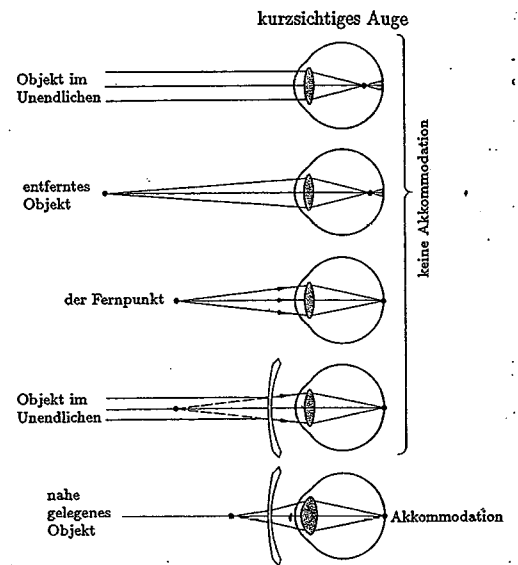


Abbildung 5.83 Korrektur des kurzsichtigen Auges.

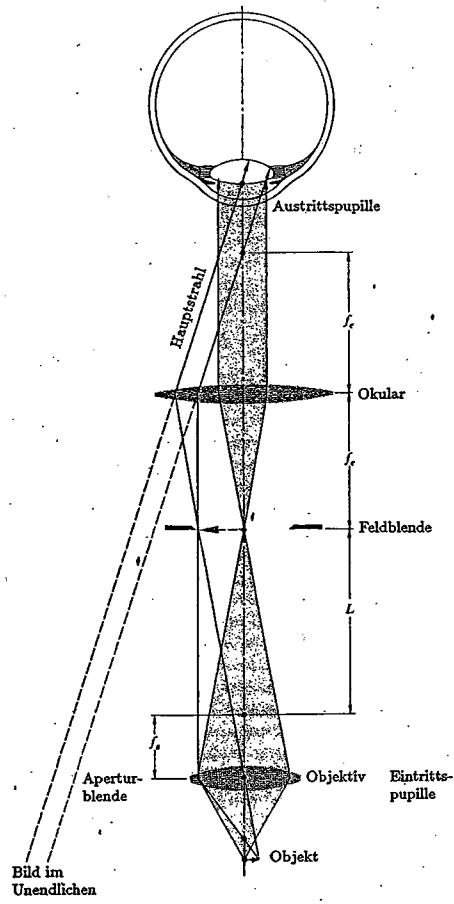


Abbildung 5.98 Ein elementares zusammengesetztes Mikroskop.

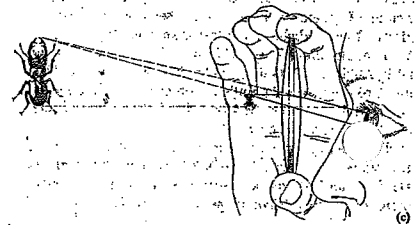
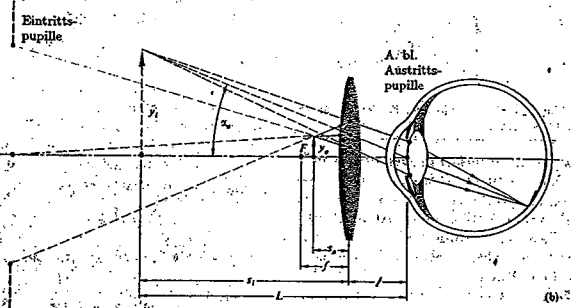
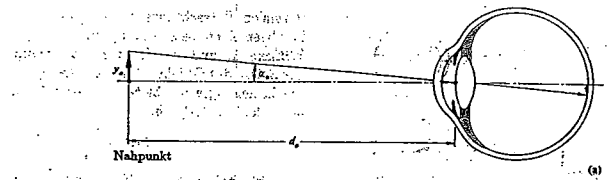


Abbildung 5.99 (a) Ein Objekt wird mit bloßem Auge betrachtet. (b) Der Blick durch ein Vergrößerungsglas. (c) Eine Sammellinse wird als ein Vergrößerungsglas verwendet. Die Objektweite ist kleiner als die Brennweite.

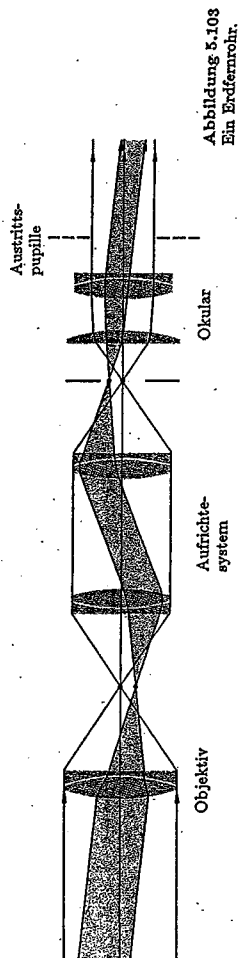


Abbildung 5.103 Ein Erdfernrohr.

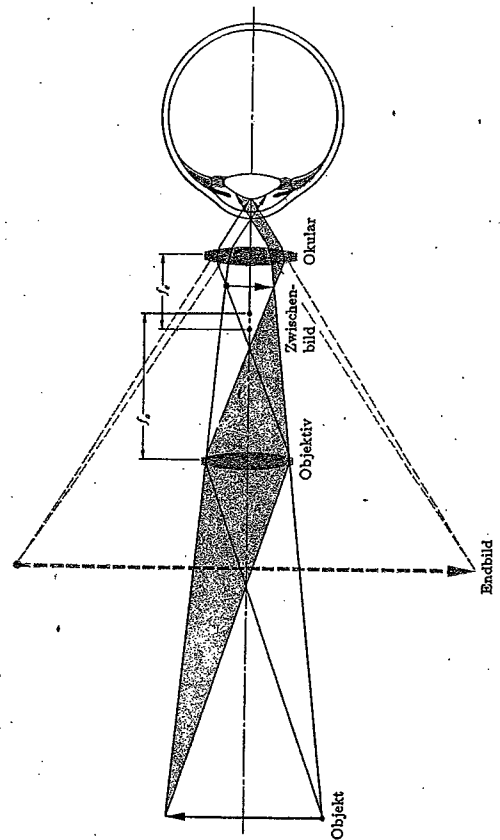


Abbildung 5.100 Das Keplersche Fernrohr (akkommodierendes Auge).

①

$$E_1 = A_1 \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} - \phi_1 \right), \quad E_2 = A_2 \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} - \phi_2 \right)$$

$$I = \frac{\langle E^2 \rangle}{2} = \frac{\langle (E_1 + E_2)^2 \rangle}{2}$$

Seilwelle (S.6)  
sin cos-Darstellung

$$I = \frac{1}{2} \langle (A_1 \cos \alpha + A_2 \cos \beta)^2 \rangle =$$

$$= \frac{1}{2} \langle A_1^2 \cos^2 \alpha + A_2^2 \cos^2 \beta + 2A_1 A_2 \cos \alpha \cos \beta \rangle =$$

$$= \frac{1}{2} \left\langle A_1^2 \cdot \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} + A_2^2 \cdot \frac{1 + \cos 2\beta}{2} + A_1 A_2 (\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)) \right\rangle =$$

$$= \frac{1}{2} \left\langle A_1^2 + A_1^2 \cos 2\alpha + A_2^2 + A_2^2 \cos 2\beta + 2A_1 A_2 (\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)) \right\rangle$$

$$= \frac{1}{2} [A_1^2 + A_1^2 \underbrace{\langle \cos 2\alpha \rangle}_0 + A_2^2 + A_2^2 \underbrace{\langle \cos 2\beta \rangle}_0 +$$

$$+ 2A_1 A_2 (\underbrace{\langle \cos(\alpha - \beta) \rangle}_0 + \underbrace{\langle \cos(\alpha + \beta) \rangle}_0)] =$$

$$= \frac{1}{2} [A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \left( \frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \phi_2 - \phi_1 \right)] \cdot 2\pi \left( \frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \phi_2 - \phi_1 \right) \cdot 2\pi \left( \frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \phi_2 - \phi_1 \right)$$

016  $I = \frac{\langle E^2 \rangle}{Z} = \frac{1}{2} \cdot \langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = \frac{1}{2Z} [(E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)^*]$  Seilwelle (S.6) ②  
exponentielle Darstellung  
(eleganter)

$E_1 = A_1 e^{j\alpha}$ ,  $\alpha = 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} - d_1)$ ;  $E_2 = A_2 e^{j\beta}$ ,  $\beta = 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} - d_2)$

$$I = \frac{1}{2Z} [(A_1 e^{j\alpha} + A_2 e^{j\beta}) \cdot (A_1 e^{-j\alpha} + A_2 e^{-j\beta})] =$$

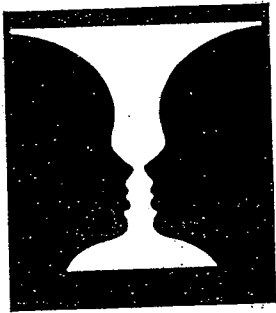
$$= \frac{1}{2Z} [A_1^2 \underbrace{e^{j\alpha} e^{-j\alpha}}_1 + A_2^2 \underbrace{e^{j\beta} e^{-j\beta}}_1 + A_1 A_2 e^{-j\alpha} e^{j\beta} + A_1 A_2 e^{j\alpha} e^{-j\beta}] =$$

$$= \frac{1}{2Z} [A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 \cdot \underbrace{(e^{j(\alpha-\beta)} + e^{-j(\alpha-\beta)})}_{2\cos(\alpha-\beta)}] =$$

$$= \frac{1}{2Z} [A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + d_2 - d_1)] \quad \text{s.o.} \checkmark$$



Teilchen- und Welleneigenschaften sind *komplementär*.



Es sind beide Modellvorstellungen (Teilchen & Welle)  
gleichzeitig notwendig, um  
Materie (Elektron) bzw. Licht  
zu beschreiben.

Zur mathematischen Modellbildung  
(= quantenmechanischen Zustandsbeschreibung)  
wird dazu das Konzept der *Wahrscheinlichkeit*  
eingeführt.

**Wahrscheinlichkeitswelle (Wellenfunktion)**

(Wie sagte schon Richard Feynman?)

Klassische Wellen:

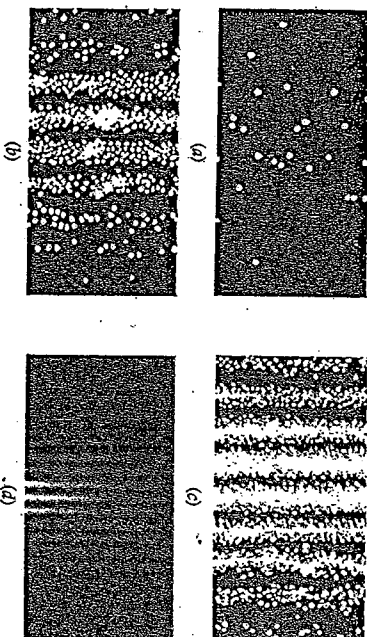
Energiedichte	
$p(\vec{r}, t) \rightarrow \text{const} \cdot p^2(\vec{r}, t) \rightarrow \int_V \text{const} \cdot p^2(\vec{r}, t) dV$	
Schallwelle	Energie im Volumen V

Energiedichte	
$\vec{E}(\vec{r}, t) \rightarrow \text{const} \cdot E^2(\vec{r}, t) \rightarrow \int_V \text{const} \cdot E^2(\vec{r}, t) dV$	
el. magn. Welle	Energie im Volumen V

**Wahrscheinlichkeitswelle:**

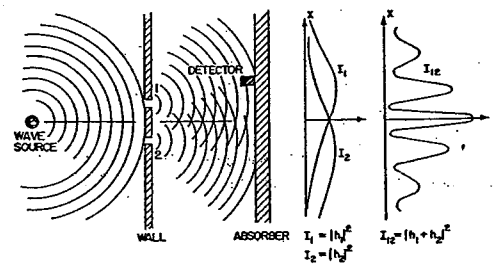
Wahrscheinlichkeitsdichte	
$\psi(\vec{r}, t) \rightarrow \psi^2(\vec{r}, t) \rightarrow \int_V \psi^2(\vec{r}, t) dV$	
Wellenfunktion	Wahrscheinlichkeit, ein Mikroobjekt im Volumen V anzutreffen
↑	↓
THEORIE	EXPERIMENT

36.2 Aufbau eines Interferenzmusters  
beim Doppelspaltexperiment. Die Abbil-  
dung ist durch Interferenz von a) 30 Pho-  
tonen, b) 1000 Photonen und c) 10000  
Photonen entstanden. d) zeigt ein Interfe-  
renzmuster, das von einigen Millionen  
Elektronen gebildet wurde. Die Photo-  
nen- und Elektronenmuster sind einander  
äquivalent. (Fotos: a, b, c: E.R. Higgins,  
d: C. Jönsson)

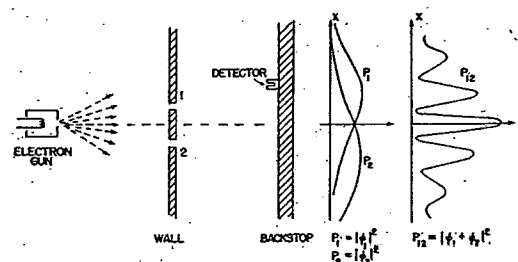


**Beispiel: Doppelspaltexperiment**

Wasserwellen, Licht:

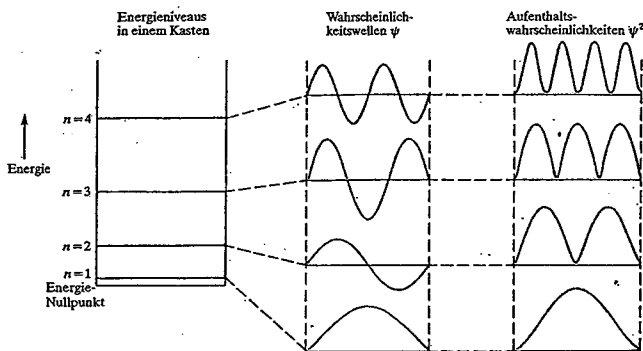


Mikroobjekte (Elektronen, ...):



universelles Interferenzprinzip:  
Interferenz eines Mikroobjekts "mit sich selbst"

h3



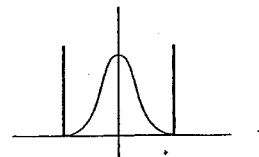
4.9 Energieniveaus für ein Quantenteilchen in einem Kasten. Das mittlere Diagramm zeigt die zugehörigen Wellenfunktionen, das rechte die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen für das Teilchen; diese ergeben sich aus dem Quadrat der jeweiligen Wellenfunktion.

Dreidimensionale (klassische) stationäre Schwingungszustände (stehende Wellen) gibt es z.B. in Kristallen; (z.B. elektrisch erregte Quarzkristalle).

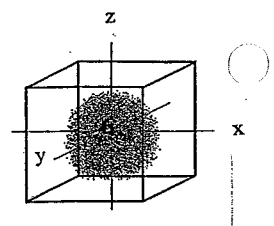
In der Quantenmechanik wird ein stabiler Atomzustand durch eine dreidimensionale stationäre Wellenfunktion modellhaft beschrieben.

eindimensionales Kastenpotential      dreidimensionales Kastenpotential

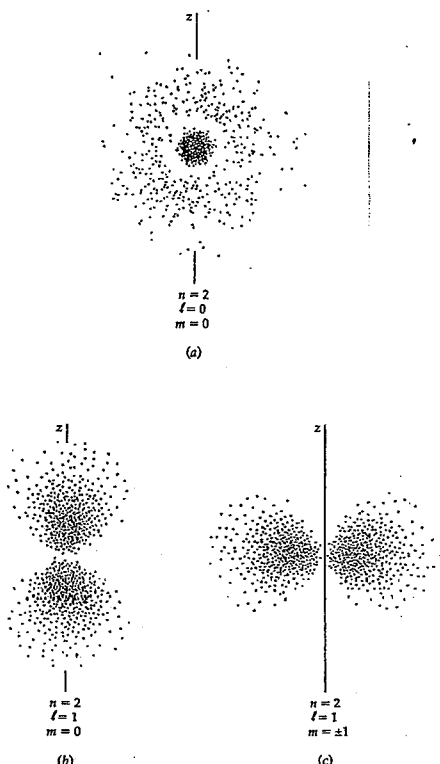
$$|\psi_1(x)|^2$$



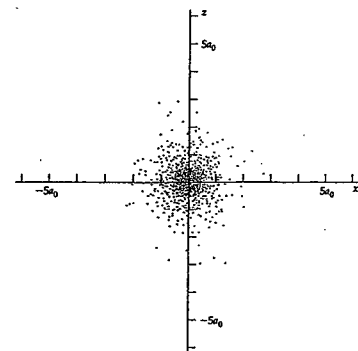
$$|\psi_{111}(x, y, z)|^2$$



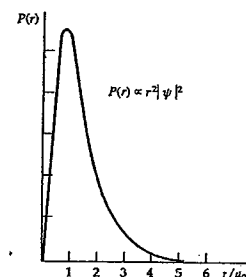
$|\psi|^2$  für einige angeregte Zustände des H-Atoms



$|\psi|^2$  für den Grundzustand des H-Atoms



radiale Wahrscheinlichkeitsdichte  
(=Wahrscheinlichkeitsdichte, ein Elektron im Abstand  $r$  vom Kern anzutreffen:  $P(r) = 4\pi r^2 |\psi|^2$ )



37.6 Für den Grundzustand des Wasserstoffatoms ist hier die radiale Wahrscheinlichkeitsdichte  $P(r)$  gegen den Radius  $r$  aufgetragen; dieser ist in Vielfachen des ersten Bohrschen Radius  $a_0$  angegeben.  $P(r)$  hat hier ihr Maximum bei  $r = a_0$ .

14

$$\boxed{\Delta x \cdot \Delta k \simeq 1} \quad (\leftarrow \text{Fourieranalyse})$$

$$p = \hbar k; \quad \Delta p = \hbar \Delta k; \quad \Delta k = \frac{\Delta p}{\hbar}$$

$$\boxed{\Delta x \cdot \Delta p \simeq \hbar \simeq 10^{-34} \text{ Js}}$$

Unschärferelation

2 Bsp.:

⊗ Makrokosmos:

$$m = 1 \text{ ng} = 10^{-9} \text{ g} = 10^{-12} \text{ kg}$$

$$\Delta p = m \cdot \Delta v; \quad \Delta v = 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$$

$$\Delta x = 10^{-6} \text{ m}$$

$$\underbrace{10^{-6}}_{\Delta x} \cdot \underbrace{10^{-12} \cdot 10^{-6}}_{\Delta p} = 10^{-24} \text{ Js} (>> \hbar)$$

✓

⊗ Mikrokosmos: ("Planetenbahn" eines  $e^-$  um den Kern)

$$m = 10^{-30} \text{ kg} \quad (\simeq \text{Elektronenmasse})$$

$$v_{(1)} \simeq \frac{c}{10} = 3 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}, \quad \Delta v = 1\% \text{ von } v = 3 \cdot 10^5 \text{ ms}^{-1}$$

$$\Delta x \simeq 10^{-15} \text{ m} \quad (\text{Kern } \phi)$$

$$\underbrace{10^{-15}}_{\Delta x} \cdot \underbrace{10^{-30} \cdot 3 \cdot 10^5}_{\Delta p} = 3 \cdot 10^{-40} (<< \hbar)$$

✗

- ⊗ Wellengleichung für dynam. Wellen: (eindim)

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \quad y = E, B$$

$$y(x,t) = A e^{j(kx - \omega t)}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -A k^2 e^{j(\dots)} = -k^2 y; \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\omega^2 y$$

$$-k^2 y = -\frac{\omega^2}{c^2} y \Rightarrow k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}, \quad \hbar k^2 = \frac{\hbar \omega^2}{c^2} \checkmark$$

$$p^2 = \frac{E^2}{c^2}, \quad p = \frac{E}{c}$$

- ⊗ Wellengleichung für Materie (Elektronen): (eindim)

$$E_{\text{ges}} = \frac{mv^2}{2} + U = \frac{p^2}{2m} + U; \quad p = \hbar k \text{ (de Broglie)}$$

↑  
1. Ableitung von  
y nach t

→ 2. Ableitung von  
y nach x

$y = \psi(x,t)$   
"Wellenfunktion"  $\psi(x,t) = A e^{j(kx - \omega t)}$

Schrödinger- (Wellen)gleichung

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} + U(x,t) \psi(x,t) = j\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} (-k^2) \psi + U(x,t) \psi = j\hbar (-j\omega) \psi$$

$$\left( \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + U \right) \psi = \hbar \omega \psi \quad \checkmark$$

24.6.2007

## Einführung in die "Moderne Physik" (Quantenphysik)

- Photoelektrischer Effekt: klassischer Erklärungsversuch (erzwungene Schwingung) versagt; Photonenmodell (Einstein 1905/1921), Photonenenergie  $E = h\nu$ , eV-Skala als Energieskala im Kleinen; Energiebilanz, Austrittsarbeit, Grenzwellenlänge; Hinweis auf Comptoneffekt; DUALISMUS von LICHT
- Relativitätstheorie:  $c$  ist fundamentale Konstante; Quantentheorie:  $h$  (Planck'sches Wirkungsquantum WQ) ist fundamentale Konstante;  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ;
- Schlüsse auf Atombau nur indirekt möglich (Streuexperimente, Spektren);
- Rutherford'sches Streuexperiment zeigt keine gleichmäßige Ladungsverteilung (vgl Thompson-„Rosinenkuchen“) innerhalb des Atomvolumens, sondern die Konzentration der Masse des Atoms in einem sehr kleinen Kern ( $10^{-15} \text{ m}$ ,  $10^5 \times$  kleiner als Atomdurchmesser);
- klass. „Planetenmodell“ des Atombaus „funktioniert nicht“; Maxwell-Theorie erlaubt keine stabilen Bahnen (Emission von Dipolstrahlung); Emission von diskreten Frequenzen nicht verständlich; klassisch ist es auch unverständlich, wieso alle Atome gleich aufgebaut sind;
- Bohr'sches Atommodell (AM): erstmals Einbindung des Quantisierungs-/Diskretisierungsgedankens; das Planck'sche WQ als Einheit des Drehimpulses; Dimensionsbetrachtung;  $\hbar$  ( $\hbar = h/2\pi \sim 10^{-34} \text{ Js}$ );
- Bohr'sches AM kann Spektren des Wasserstoffs erklären!! sonst versagt es aber völlig; Bohrsches AM wurde später von Sommerfeld noch relativistisch verfeinert; Bohr'sches AM ist - aus heutiger Sicht - ein „ermutigender“ erster (noch nicht universeller) Quantisierungsschritt; Exp von Franck & Hertz zeigt (Energie)Schalenstruktur der Atomhülle;
- deBroglie: Postulat, auch Materie (Elektronen) hat Welleneigenschaften; Forderung nach einer zu Licht analogen Gleichung für die Wellenlänge von Elektronen („Materiewellenlänge“);  $\lambda = h/p$ ;
- exp Bestätigung der Welleneigenschaften von Elektronen durch die (Beugungs)Experimente von Davisson, Germer und Thompson; DUALISMUS von MATERIE (ELEKTRONEN); Symmetrie zu Licht!! Licht und Materie zeigen zugleich Teilchen- und Wellen-Eigenschaften;
- Größenordnung der Materie-Wellenlänge (zB Elektron, 100V Beschleunigungsspannung:  $10^{-10} \text{ m}$ )
- Beugungsexperiment von Jönsson an künstlichen Doppelspalten (1960) zeigt den neuartigen Wellencharakter von Elektronen; „schönstes Exp aller Zeiten“!!; Verknüpfung der Wellen- und Teilcheneigenschaften über das Prinzip der Wahrscheinlichkeit(sichte); WELLENFUNKTION (WF) als neues Beschreibungsmodell; Absolutquadrat der WF = Wahrscheinlichkeitsdichte für den Aufenthaltsort des Teilchens;
- das Wahrscheinlichkeitsprinzip/modell gilt ebenso für Licht! (vgl. zB opt Abbildung bei extrem kleinen Intensitäten!)
- im Mikrokosmos regiert der Zufall!!! Für „Mikroobjekte“ nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich;
- die Frage, was ist Licht/sind Elektronen nun „wirklich“, ist (physikalisch) nicht zu beantworten; Wellen-&Teilcheneigenschaften sind komplementäre und nicht ausschließende Eigenschaften; „Schieberegler“; beide Modell werden gleichzeitig benötigt, um das Verhalten von Licht&Materie zu beschreiben;
- „Wer A (Welle) sagt, muss auch B (Unschärfeprinzip) sagen“! (vgl spektrale Zusammensetzung eines Wellenpakets); Heisenbergsche Unschärferelation ist fundamental; im Makrokosmos vernachlässigbar (prakt exp Unschärfen viel größer als prinzipielle Unschärfen), im Mikrokosmos bestimmend; es gibt keine klassischen Bahnen mehr, sondern nur mehr zeitliche Entwicklungen von Wellenfunktionen (zB Bewegung und Dispersion eines Wellenpakets);
- SCHRÖDINGERGLEICHUNG (SG) als neue Wellengleichung im Mikrokosmos; Vergleich mit Wellengleichung für Licht; stationäre und instationäre SG und Lösungen (vgl instationäre und stationäre klassische Wellenformen = Wellenpakete und stehende Wellen)
- Lösung der SG für einen Potential“kasten“ (einfachstes eindim Atommodell = gebundenes Elektron): diskrete Abfolge von Wellenformen und Energiewerten  $E_n = n^2 \hbar^2 / 8ma^2$ ;
- Lösung der SG für ein H-Atom ist noch analytisch möglich; SG wird sonst numerisch gelöst; Energie-Orbitale; stationäre Zustände mit fester Energie und Drehimpuls; SG = Eigenwertgleichung;
- chem Bindung = Überlappung von Wellenfunktionen verschiedener Atome;
- Sichtbarmachen von stehenden Elektronenwellen im Raster-Tunnelmikroskop;
- Elektronen haben auch noch Eigendrehimpuls (Spin); Spin =  $\hbar/2$ ; Teilchen mit halbzahligem Spin = Fermion (zB Elektron); Pauliprinzip; Aufbau des Periodensystems: Einbau neuer Elektronen in die Hülle nach dem Prinzip kleinstmöglicher (Gesamt)Energie & Pauliprinzip; Elektronen-konfiguration = Satz von Quantenzahlen (QZ); 3 „äußere“ QZ: HauptQZ/BahndrehimpulsQZ/ magnQZ), 1 „innere“ QZ (SpinQZ);
- Teilchen mit ganzzahligem Spin = Boson (zB Photon: Spin =  $\hbar$ );

- Aufbau des Atomkerns (AK): „Maßeinheit“ der Energieskala ist MeV ( $10^6$  eV), nicht eV!!; kleinste Energie eines an einen Raumbereich der Größe  $a$  gebundenen Teilchens der Masse  $m$ :  $E \sim \hbar^2/8ma^2$ ; alle Prozesse im AK sind wesentlich energiereicher als in der Atomhülle; im AK können keine Elektronen existieren;
- AK hat  $m$ ,  $q$ ,  $s$ ,  $M$  ( $m$  = Masse,  $q$  = Ladung,  $s$  = Spin,  $M$  = magnetisches Moment vgl Kreisstrom)
- welche Kraft hält den AK zusammen? Coulomb-Abstoßung der Protonen!!; Gravitationskraft ist mikroskopisch völlig bedeutungslos ( $10^{39}$  x schwächer als Coulomb-Abstoßung!!); neue Kraftwirkung in ganz kleinem Abstand ( $10^{-15}$  m): starke Wechselwirkung (WW) (ca 100x stärker als el. Abstoßung); wirkt nur zwischen Nukleonen (Protonen & Neutronen); endliche/kurze Reichweite (vgl: elektromagn WW hat unendliche Reichweite);
- Isotop (Kernsorte); Charakterisierung durch Kernladungs- und Massenzahl (= Protonen- + Neutronenzahl), bei schweren Kernen (Nukliden) überproportionaler Einbau von Neutronen;
- stabile und instabile Kerne; Zerfallsarten ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -Zerfall); radioaktiver Zerfall ist zufälliger Prozess; keine genaue Aussage für einzelnen Kern, nur Wahrscheinlichkeitsaussage; exponentielles radioaktives Zerfallsgesetz: von einer großen Anzahl von Kernen zerfällt in der Halbwertszeit die Hälfte der noch vorhandenen Kerne;
- „Tröpfchenmodell“ des AK: innerhalb des Kernvolumens sind Nukleonen frei beweglich;
- Bindungsenergie des AK; Massendefekt beim Zusammenschluss von Nukleonen zum AK; Kern-Verschmelzung und -Spaltung, um die Bindungsenergie/Nukleon zu erhöhen;
- Elektronen sind „punktförmig“ (haben keine Substruktur, aber  $m$ ,  $q$ ,  $s$  und  $M$ !!); Nukleonen haben Substruktur („Subteilchen“ = Quarks): nicht-ganzzahlige Ladung (Vielfache von  $1/3$  der Elementarladung); Quarks sind nicht isoliert beobachtbar: „Quark-Einschluss“ = Confinement; WW wird mit zunehmendem Abstand größer (vgl Kraft zum Dehnen eines Gummibandes); Quarks sind aber durch hochenergetische Streuexperimente nachweisbar (Elektron-Positron- und Proton-Proton Streuung mit sehr hohen Energien);
- bei energiereichen Stößen entstehen neue Teilchen/Massen aus „reiner Energie“; Masse-Energie Äquivalenz wird unmittelbar sichtbar;
- modernes WW-Modell: Austausch von Botenteilchen („Ballspiel“), Energieunschärfe erlaubt für kurze Zeiten die Erzeugung von solchen Botenteilchen (Gluonen, Photonen, Vektorbosonen, „Gravitonen“ (zur Zeit noch spekulativ)); Botenteilchen sind immer Bosonen;
- 4 fundamentale WW: starke WW ( $\times 10^2$ ), elmag WW ( $\times 1$ ), schwache WW ( $\times 10^{-3}$ ), Gravitation:  $\times 10^{-36}$ ;
- mehrere 100 Elementarteilchen („Zoo“) : Ordnungschema (Baryonen bestehen aus 3 Quarks, Mesonen bestehen aus 2 Quarks, Leptonen sind punktförmig); Baryonen + Mesonen = Hadronen), zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen (zB: Elektron & Positron; Elektron+Positron: Zerstrahlung/Annihilation = es entstehen zwei Photonen in entgegengesetzten Richtungen);
- Baryonen sind Fermionen, Mesonen sind Bosonen;
- neue Teilcheneigenschaften sind notwendig: Farbladung, Seltsamkeit (Strangeness), Charm, ... ;
- Erhaltungssätze bestimmen die Modellbildung der Physik: Energie, Impuls, Drehimpuls, Ladung, Masse/Energie, Baryonenzahl, Leptonenzahl, Seltsamkeit; ... ;
- ein großes Ziel der Theoretischen Physik ist die Vereinigung aller WW-Theorien: Vereinigung von Elektrizität & Magnetismus zur (Maxwell'schen) Theorie des Elektromagnetismus (Erweiterung zur Theorie der Quantenelektrodynamik); Vereinigung von elektromagnetischer und schwacher WW zur elektroschwachen WW;
- die Quantentheorie der Farbladung (Quantenchromodynamik), das Quarkmodell und die elektroschwache WW bilden heute das „Standardmodell der Elementarteilchen“;
- eine „Große Vereinheitlichte Theorie“ der Elementarteilchen unter Einbeziehung der starken WW ist noch offen;
- ebenso ist die Einbindung der GravitationsWW ein „heißes“ (dh noch ungelöstes) Thema der Theoretischen Physik (Stringtheorie??); es gibt noch keine Quantentheorie der GravitationsWW.

Bsp 1 a.) Scheinbare Tiefe eines von Objekt im Wasser.

$$n_L = 1$$

$$n_W = \frac{4}{3} = 1,33$$

$$t, d \Rightarrow t' = ?$$

$$B \Leftrightarrow n_W, d$$

$$n_W, d \Leftrightarrow B$$

$$t, d \Rightarrow d'$$

$$d, n_W, d \Rightarrow t'$$

$$t' = ? \quad n_W \sin \alpha = d = t \cdot \tan \alpha$$

$$n_W \cdot d = B$$

(linearisiertes Brechungsgesetz)

$$t' = \frac{d}{\tan \beta} = \frac{d}{n_W \cdot \alpha} = \frac{t \cdot \cancel{\alpha}}{n_W \cdot \alpha} = \frac{t}{n_W} = \frac{t}{(\frac{4}{3})} = \underline{\underline{\frac{3}{4} t}}$$

→ in  $\frac{3}{4} t$  virtuelles Bild.

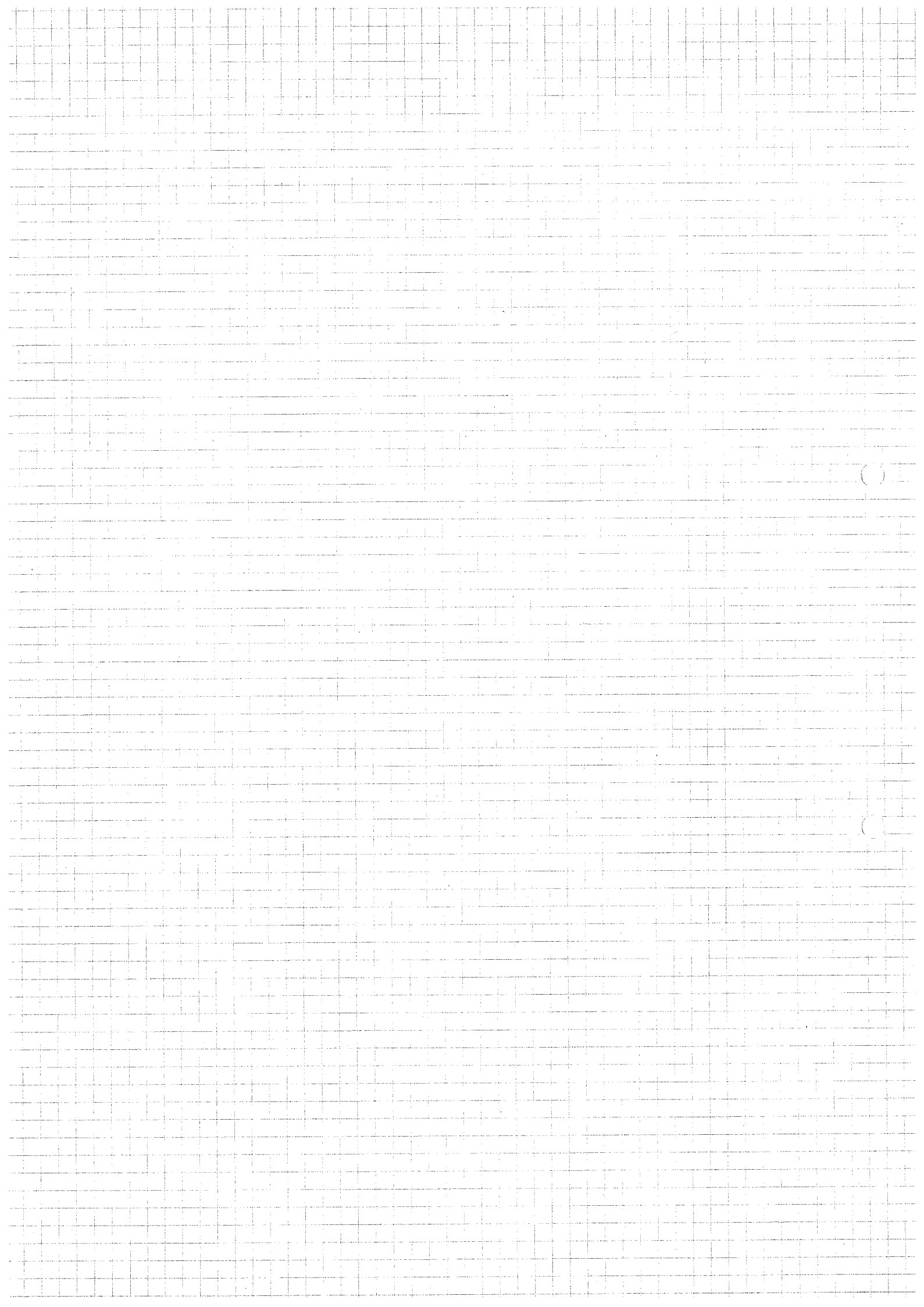
b) Radius des Objektes  $\varnothing$  an Wasseroberfläche.  
(Lichtkreis)

$$n_W \cdot \sin(\alpha_G) = 1 \quad / \quad \sin(\alpha_G) = \frac{1}{n_W} \quad / \quad \sin^{-1} \alpha_G = \sin^{-1}\left(\frac{1}{1,33}\right)$$

$$\tan(\alpha_G) = \frac{r_0}{t} \quad / \quad r_0 = \tan(\alpha_G) \cdot t \quad / \quad \underline{\underline{r_0 = 1,13 \cdot t}} \quad \alpha_G = 48,5^\circ$$

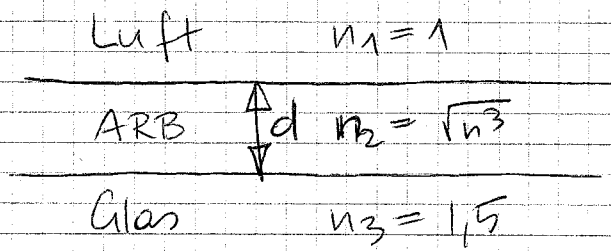
$$n_W \Rightarrow \alpha_G$$

$$\alpha_G, t \Rightarrow r_0$$





Bsp 2.) Dicke ARB für Glaslinse.



$$\lambda, n_3 \Rightarrow d = ?$$

$$\boxed{\begin{array}{l} n_3 \Rightarrow n_2 \\ \lambda, n_2 \Rightarrow d \end{array}}$$

$$n_2 = \sqrt{1,5} = 1,22$$

$$2dn_2 = \frac{\lambda}{2} \quad / \quad d = \frac{\lambda}{4n_2} = \frac{500 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 1,22} = \underline{102,06 \text{ nm}}$$

Minimum der Reflexion:

$$D_{12} = 2d \cdot \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \alpha}$$

$$D_{12} = 2d \cdot \sqrt{n_2^2 - 0}$$

$$\begin{array}{l} k = 0, 1, 2, 3, \dots \\ D = \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2} = \underline{\underline{\frac{\lambda}{2}}} \\ D = \frac{2dn_2}{2} = \underline{\underline{\frac{\lambda}{2}}} \end{array}$$

~~Für~~

~~Für Minimum:~~

$$\begin{array}{l} D = k \cdot \lambda \\ \text{Für Maximum:} \\ D = \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2} \end{array}$$

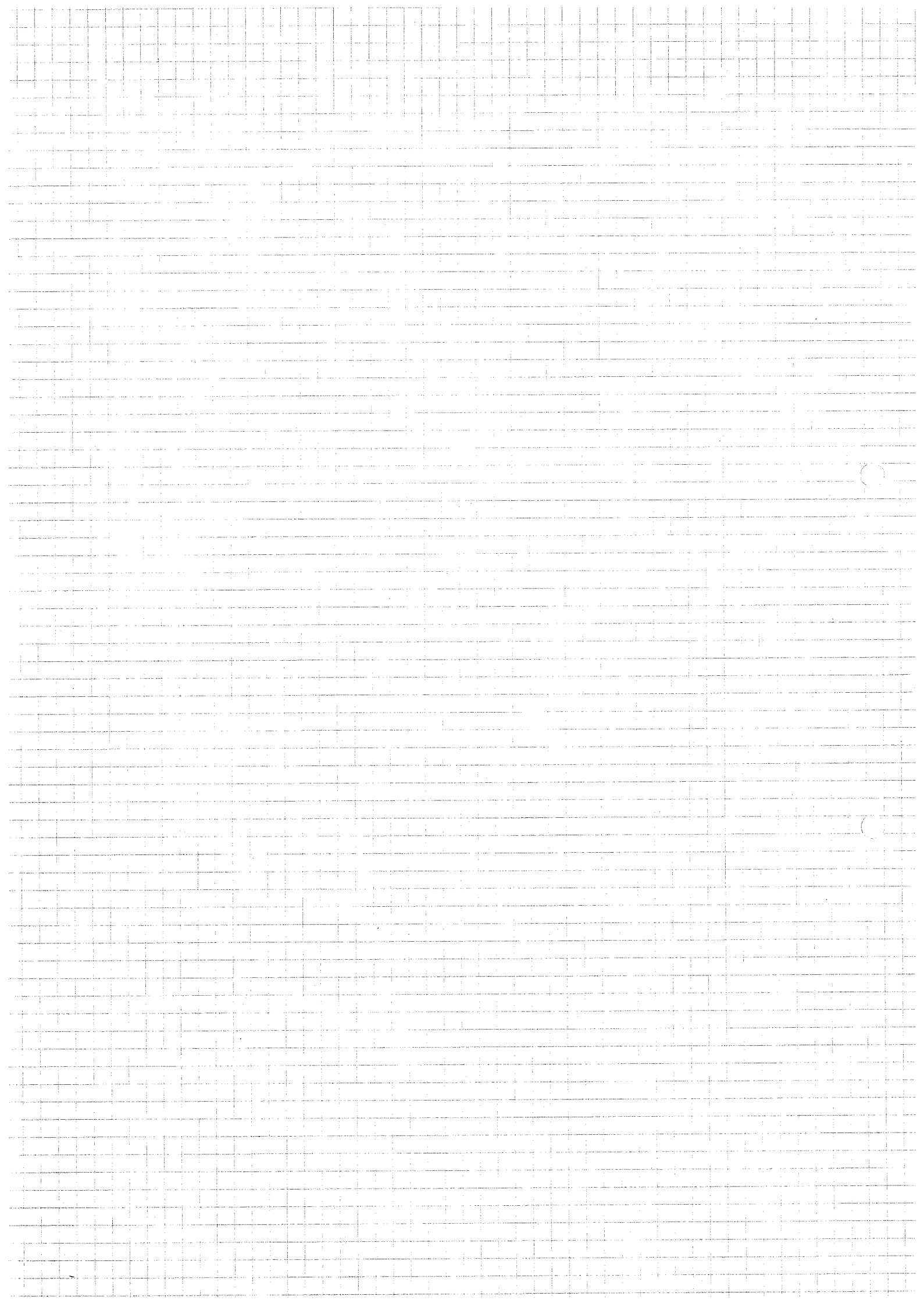
Für ~~Minimum~~ <sup>Max</sup>

$$D = k \cdot \lambda$$

Für ~~Maximum~~ <sup>Min</sup>

$$D = \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2}$$

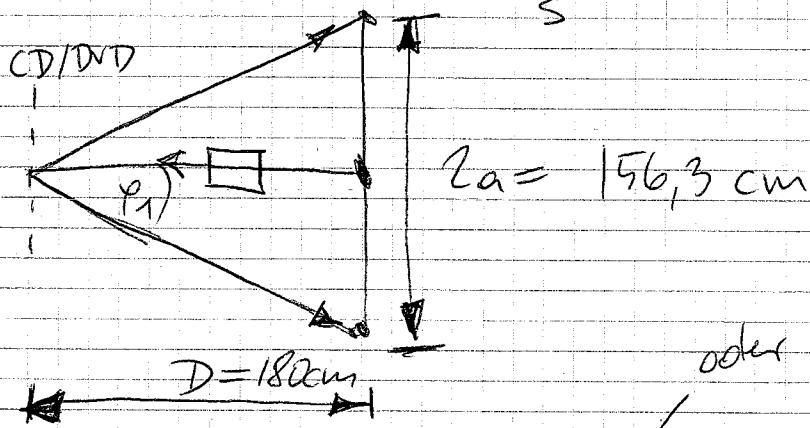
↓  
 Dispersion  
 Zettel + Skriptum



### Bsp 3.) Bestimmung Sphärabstand einer CD, DVD.

Formeln  $s \cdot \sin(\varphi) = k \cdot \lambda$

$$\sin(\varphi_k) = \frac{k \cdot \lambda}{s}$$



$$2a, D \Rightarrow \varphi_1$$
$$\varphi_1, \lambda \Rightarrow \underline{s}$$

oder  $\frac{156,3}{2 \cdot 1,8}$

$$\tan \varphi_1 = \frac{a}{D} = \frac{(1,563/2)}{1,80} \quad / \quad \varphi_1 = 23,47^\circ$$

$$s \cdot \sin(\varphi_1) = \lambda \quad / \quad s = \frac{\lambda}{\sin(\varphi_1)} = \frac{633 \cdot 10^{-9}}{\sin 23,47} = \frac{633 \cdot 10^{-9}}{0,398} = \underline{1,6 \mu\text{m}}$$

( Für DVD:

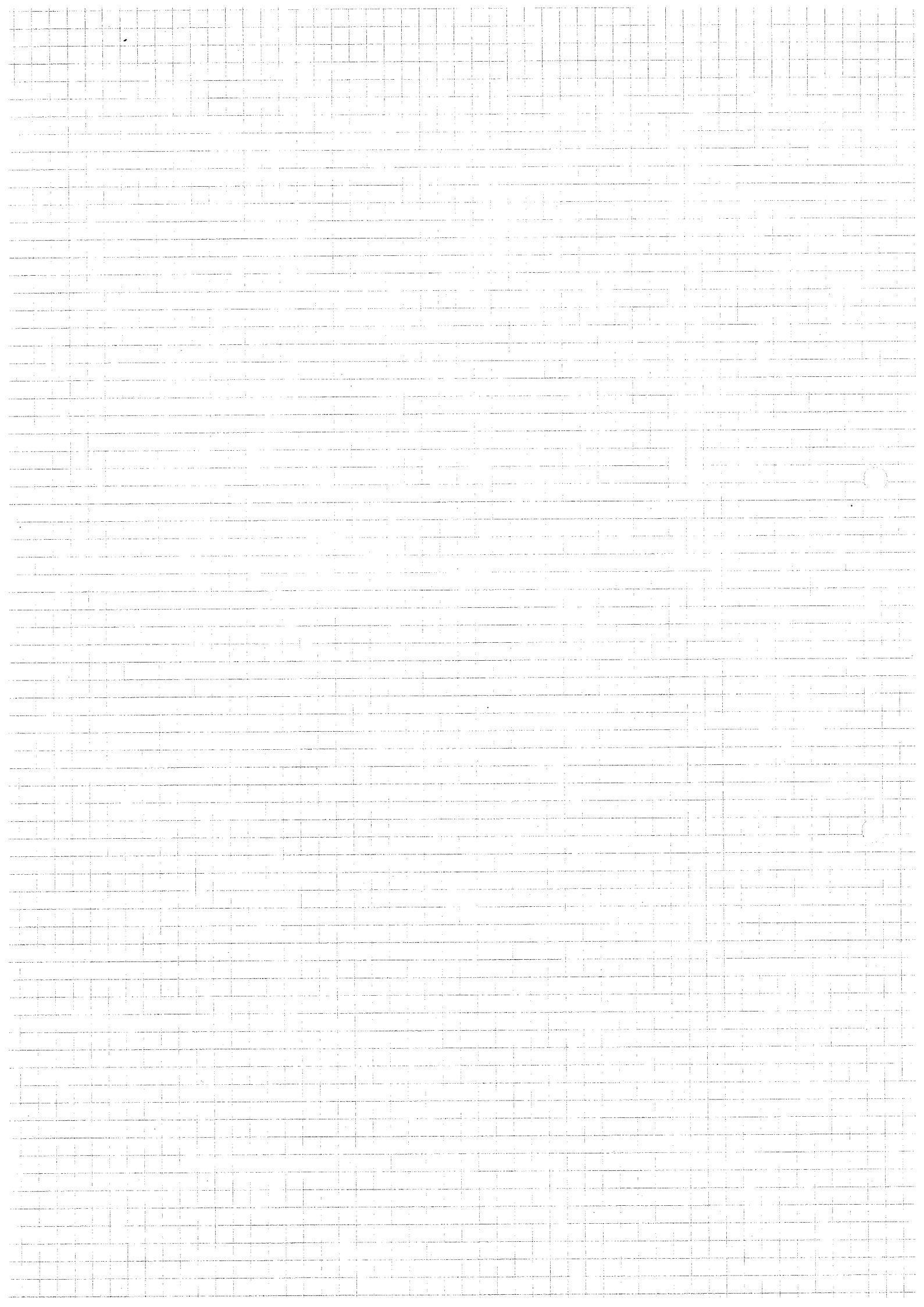
$$2a = 300 \text{ cm} = 3 \text{ m}$$

$$D = 1,8 \text{ m}$$

$$\tan(\varphi_1) = \frac{a}{D} = \frac{3/2}{1,8} \quad / \quad \varphi_1 = 39,8^\circ$$

$$\underline{s} \cdot \sin(\varphi_1) = \lambda \quad / \quad s = \frac{\lambda}{\sin(\varphi_1)} = \frac{633 \cdot 10^{-9}}{0,64} = 0,987 \mu\text{m}$$

falsche Zahlenwerte; sollte  
~~ca. 0,7 μm~~ ca. 0,7 μm sein



# Bsp 4.) Auflösung einer Apertur,

Spalt:  $\sin(\varphi_{\min}) = \frac{\lambda}{a}$

Loch:  $\sin(\varphi_{\min}) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{a}$

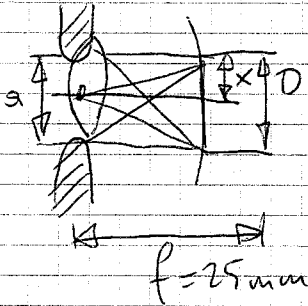
$\lambda, a \Rightarrow \varphi_{\min}$
$\varphi_{\min}, f \Rightarrow D$

Aug. (Linse + Pupille):

$$a = 2 \text{ mm} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\lambda = \lambda_{\text{grün}} \approx 500 \text{ nm}$$

$$\sin(\varphi_{\min}) = \frac{500 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-3}} = 250 \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{2,5 \cdot 10^{-4}}} \approx \varphi_{\min}$$

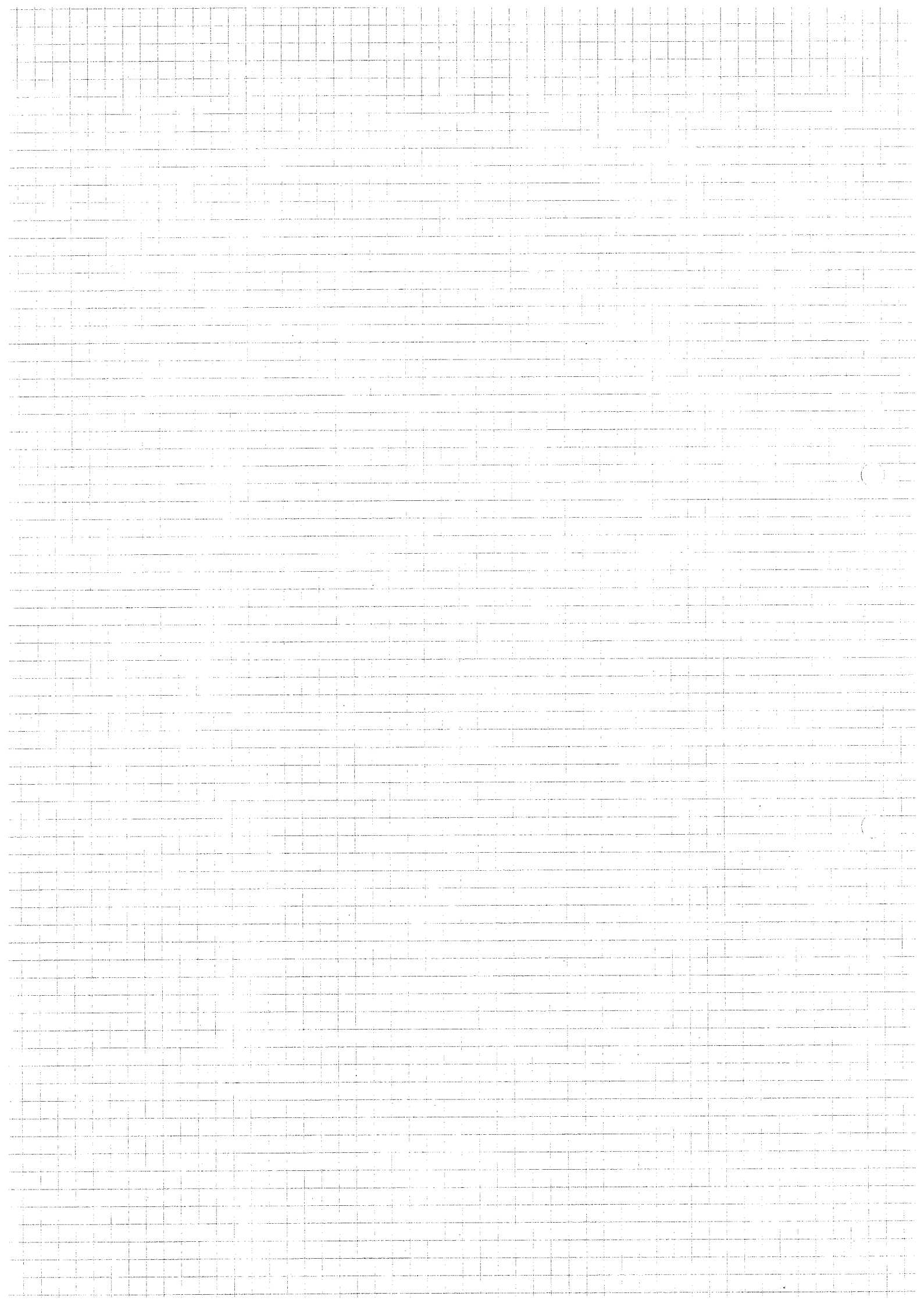


$$x = f \cdot \tan(\varphi_{\min})$$

$$\Rightarrow D = 2 \cdot f \cdot \tan\left(\frac{\varphi_{\min}}{2}\right) \approx$$

$$\approx f \cdot \varphi_{\min} =$$

$$= 25 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{6,25 \mu\text{m}}}$$



Bsp 4a.) Spionagesatellit; Apertur dimensionieren.

↓  
von mir  
(bzw. minimal)

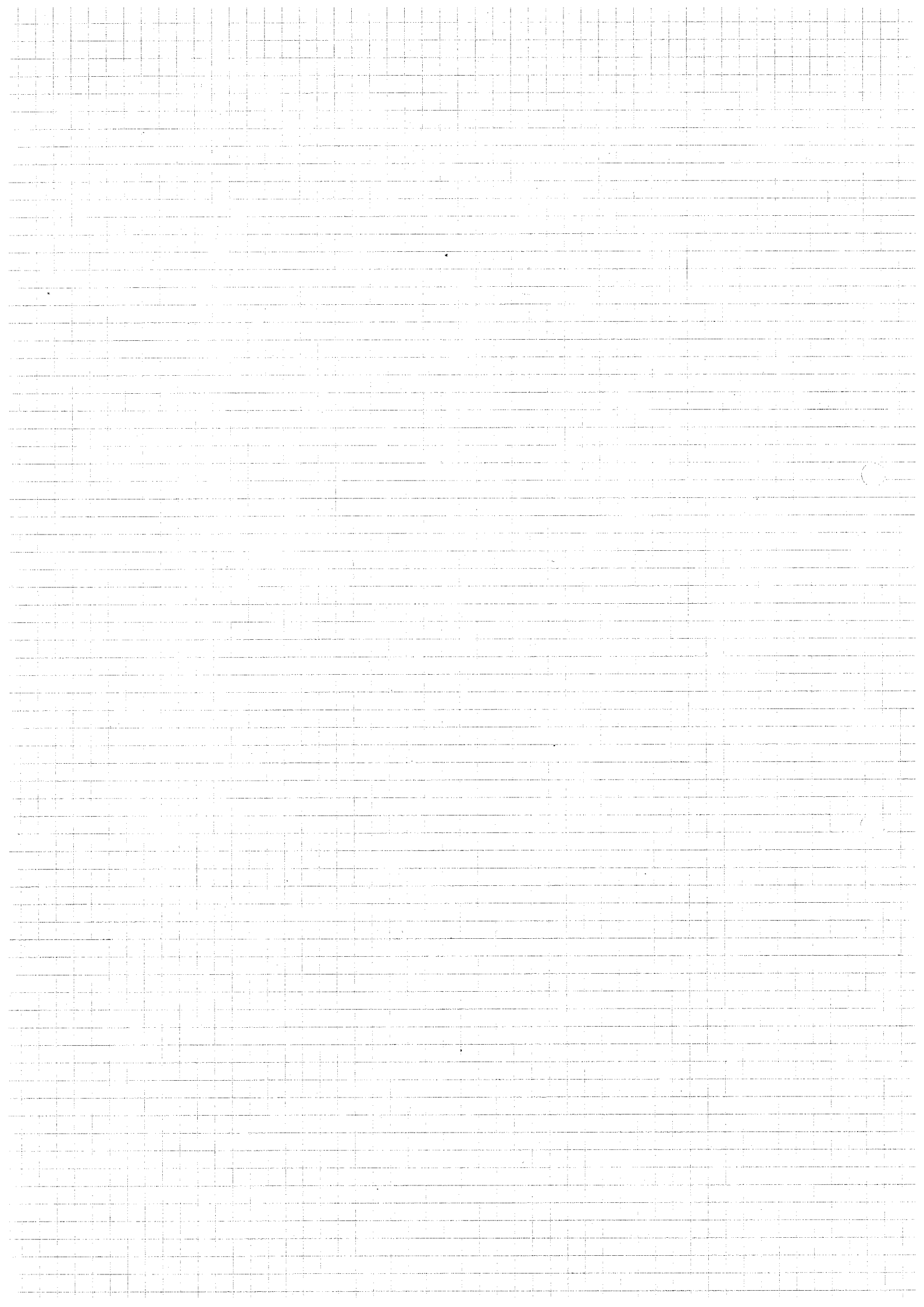
Geg. Flughöhe 500 km  
2 Punkte in 1 m Abstand noch auflösen sollen.  
 $\lambda = 500 \cdot 10^{-9}$  (grün) als mindest-Frequenz des Lichts

$$\varphi_{\min} = \frac{1}{500 \cdot 10^3} = \frac{1}{5 \cdot 10^5} = 0,2 \cdot 10^{-5} / \underline{\underline{\varphi_{\min} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ rad}}}$$

$$\varphi_{\min} = \frac{\lambda}{a} / a = \frac{500 \cdot 10^{-9}}{\varphi_{\min}} = 0,25 \text{ m} / \underline{\underline{a = 25 \text{ cm}}}$$

$2 \cdot 10^{-6}$

$\lambda, h \Rightarrow \varphi_{\min}$   
 $\varphi_{\min}, \lambda \Rightarrow a$





# Bsp. 5.) LCD-Beamer

Geg.

Gegenstandsgröße  $G = 25 \text{ mm}$

Wentfernung  $s = 10 \text{ m}$

mit Zielgröße  $B = 3 \text{ m}$  abbilden

( $n_1 = n_2 = n$ ;  $n_a = 1,5$ )

Ges. Brennweite  $f$

Gegenstandsweite  $g$

Krümmungsradius  $r$

$$\begin{array}{l} B, G \Rightarrow V \\ \uparrow g, b, V, s \Rightarrow f \\ \downarrow V, s \Rightarrow g(\Rightarrow b) \\ n, f \Rightarrow r \end{array}$$

$$V = \frac{B}{G} = \frac{3}{25 \cdot 10^{-3}} = 120$$

$$s = g + b \quad | \quad s = g \cdot gV \quad | \quad s = g \cdot (1 + V) \quad | \quad g = \frac{s}{1 + V} \quad | \quad g = \frac{10}{1 + 120} =$$

$$V = \frac{b}{g} \quad | \quad g = \frac{b}{V} \quad | \quad b = Vg$$

$$g = 82,6 \text{ mm}$$

$$(s = g + b \quad | \quad b = s - g \quad | \quad b = 10 - 82,6 \cdot 10^{-3} = 9,9174 \text{ m} = b)$$

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad | \quad \frac{1}{g} + \frac{1}{gV} = \frac{1}{f} \quad | \quad \frac{1}{f} = 12,2 + 0,1 = 12,3$$

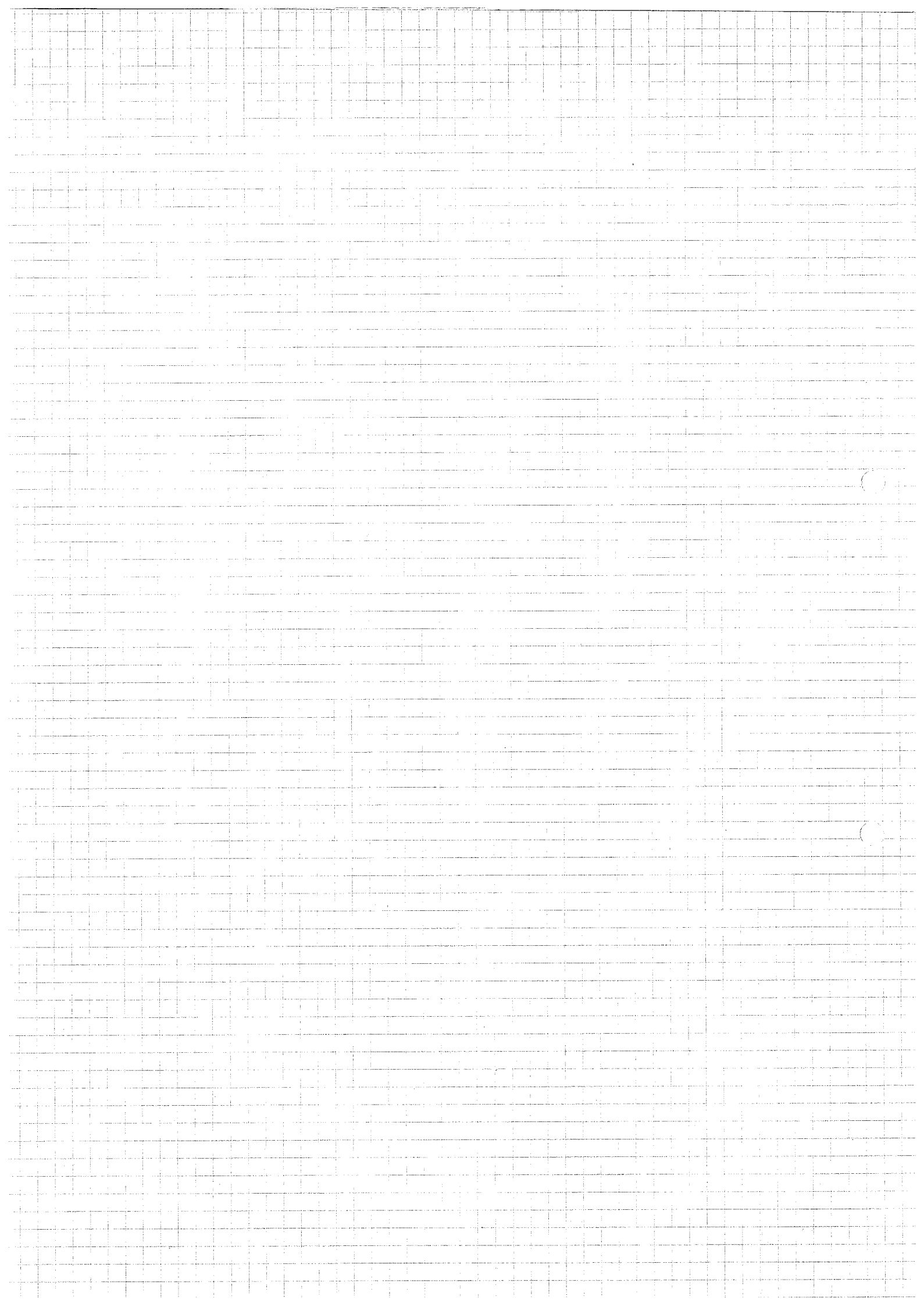
$$\left( \frac{1}{f} = 12,2 \quad | \quad f = \frac{1}{12,2} \quad | \quad f = 8,2 \cdot 10^{-2} = 8,2 \text{ cm} \right)$$

$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \frac{2}{r} \quad | \quad 12,2 = \frac{2 \cdot (n-1)}{r} \quad | \quad r = \frac{2 \cdot (n-1)}{12,2} \quad | \quad r = 82 \text{ mm}$$

$n = 1,5$

$$g \approx f \quad ; \quad \text{bei Glas } r \approx f$$

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad | \quad \frac{1}{f} = (n-1) \cdot \frac{2}{r} \quad | \quad g + b = s \quad | \quad V = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$



1a) Scheinbare Tiefe im Wasser:

$$d = t \cdot \tan(\alpha)$$

$$n_w \cdot d = b \rightarrow \text{allg. "Abstand"}$$

$$t' = \frac{d}{\tan \beta}$$

$$\left( \frac{d}{\tan \beta} \right)$$

$$t, d \Rightarrow d$$

$$n_w, d \Rightarrow b$$

$$d, n_w \Rightarrow t'$$

1b) Scheinbarer Radius Objekt an der Wasseroberfläche.  
("Lichtkreis")

$$n_w \cdot \sin(\alpha_g) = 1$$

$$\tan(\alpha_g) = \frac{r_0}{t}$$

$$n_w \Rightarrow \alpha_g$$

$$\alpha_g, t \Rightarrow r_0$$

2.) Dicke ARB für Liux.

$$n_2 = \sqrt{n_3}$$

$$2d n_2 = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow d = \frac{\lambda}{4 n_2}$$

$$n_3 \Rightarrow n_2$$

$$\lambda, n_2 \Rightarrow d$$

$$\text{Min. Reflexion: } D = \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2}$$

$$\text{Max. Reflexion: } D = k \cdot \lambda$$

3.) Spurabstand bestimmen.

$$\tan(\varphi_1) = \frac{a}{D}$$

$$S \cdot \sin(\varphi_k) = k \cdot \lambda$$

$$2a, D \Rightarrow \varphi_1$$

$$\varphi_1, \lambda \Rightarrow \underline{\underline{S}}$$

4.) Auflösung einer Apertur. (Ape)

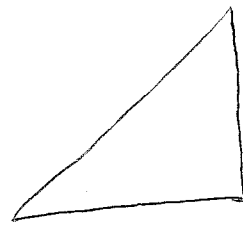
$$\sin(\varphi_{\min}) = \frac{\lambda}{a}$$

$$\frac{D}{2} = x = f \cdot \tan(\varphi_{\min})$$

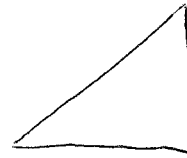
$$D = 2 \cdot f \cdot \tan\left(\frac{\varphi_{\min}}{2}\right) \approx f \cdot \varphi_{\min}$$

$$\lambda, a \Rightarrow \varphi_{\min}$$

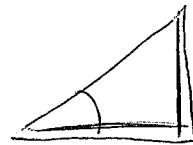
$$\varphi_{\min}, f \Rightarrow D$$



sin



cos



tan

~~4a.)~~

4a.) Aufspionagesatellit; Auflösung  $\rightarrow$  Apertur.

$$\sin = \frac{G}{H} \quad \cos = \frac{A}{H}$$

$$\tan = \frac{G}{A} = \frac{\sin}{\cos}$$

$$\varphi_{\min} = \frac{\text{Aufl. dist.}}{h} \approx \dots \text{ rad}$$

$$\varphi_{\min} = \frac{\lambda}{a} \approx \dots$$

$$\text{Aufl. dist.}, h \Rightarrow \varphi_{\min}$$

$$\varphi_{\min}, \lambda \Rightarrow a$$

5.) LCD-Beamer.

Gegeben:  $G, s, B$ .

Gesucht:  $f, g, r$ .

$$V = \frac{B}{gG} = \frac{b}{g}$$

$$g + b = s$$

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \left| \quad \frac{1}{f} = (n-1) \cdot \frac{2}{r} \right.$$

$$B, G \Rightarrow V$$

$$V, s \Rightarrow g (\Rightarrow b)$$

$$V, s, (g) \Rightarrow f$$

$$n, f \Rightarrow r.$$

27.6. Kap. 5.7. GEOMETRISCHE OPTIK. Beugung.

- Wieviele: nur Überblick Atombau & -physik

↳ nur was es am Mittwoch erzählt (27.6.)

- Beugung: Mit dem Effekt kann man "schief anfangen",  
z.B. \* Beugungsgittermuster für Hologramme (Rechner berechenbar).

- 25 cm  $\frac{1}{10}$  mm auflösen kann.

- Beugung am Loch (<sup>loch:</sup> "Pupille"): wie kann ich ein opt. Instrument

- Aperture: Öffnung

[möglichst hoch-auflösend machen?]

(Abb. 10.32, 10.33 → für Beugung an 2 Öffnungen

→ was ist der kleinste Winkel, bei dem ich 2 Punkte noch auflösen kann

[Raghu]

tw. auch subjektiv → Rayleigh Kriterium.

- Brennweite: Sonnenlicht gebündelt

- Schärfen: Hell / dunkel - empfindliche.

(- z.B. Spionage satelliten. z.B. in 500 km Höhe

1 m Abstand (2 Punkte) noch ~~was~~ auflösen wollen

$$\rightarrow \varphi_{\min} = \frac{1}{5 \cdot 10^3} = \frac{1}{5 \cdot 10^5} = 0,2 \cdot 10^{-5} = 2 \cdot 10^{-6} = \frac{1}{500000} \text{ rad}$$

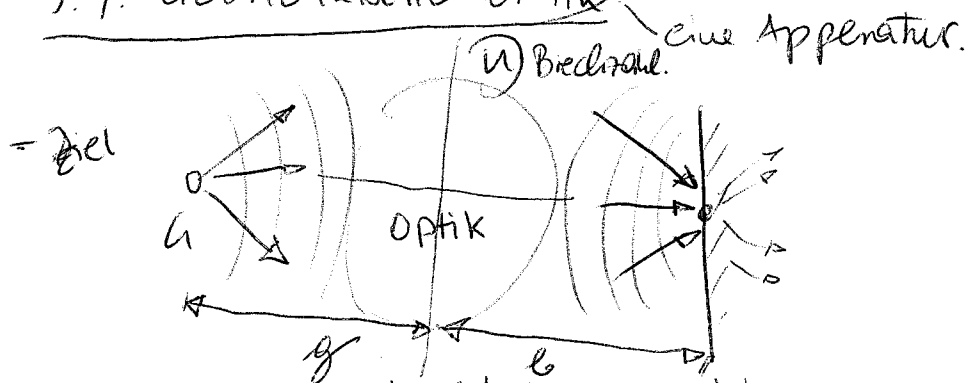
$$\alpha = \frac{\lambda}{\varphi_{\min}} = \frac{500 \cdot 10^{-9} \text{ m} - 500 \text{ nm (grün)}}{2 \cdot 10^{-6}} = 250 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 25 \text{ cm}$$

( $\ll 10^\circ$ )  
→ kl. Winkelnäherung.

→ "Aper ist Alles für Auflösung"

↑ Beugung am.

# 5.7. GEOMETRISCHE OPTIK



→ müssen Lichtstrahlen biegen

(gibt 3 Möglichkeiten:

Reflexion / Spiegel

Brechung / Linsen

Beugung / Diffraktivoptik

- Beugungslinse (Fresnel-Linse) <sup>Optik-Anw.</sup> ~~Auto.~~ nicht im sichtb. Licht.  
nicht so sinnvoll; auch Beugungsoptik nicht ~~so~~  
→ fast ausschl. Brechungsoptik (Linsen)

- Abbildungs-Gleichung soll nur einen Zusammenhang zw.  $g \leftrightarrow b$  herstellen & Eigenschaften des opt. Elements miteinbeziehen soll.

- je größer Brechungsstahl der Linse  $\rightarrow$  z.B. 1,5  $\rightarrow$  hohe Brechkraft

! Gibt kein opt. Element, das jeden Lichtpunkt/Gegenstand (gibt es an geometr. Bild nicht & aus Beugungseffekten heraus nicht) Punkt in Bildpunkt.

- Linse: zumeist <sup>h</sup>parabolische Fläche (parabolisch) ~~gegenüber~~ möglich

einfacher, billiger

asphärisch

Form. bessere Linsen

Abb-2 bi-konvexe Linse

Plankonvexe Linse = Sammellinse.

- $\cap$  gibt da auch sphärische Linsen  
→ Sten Linsen

- Linsengleichung nicht erwartet.  
→ viele Winkel & Abstände; dann wieder sehr stark vereinfachen (chl. Winkel-Näherung).

!

- Seite 0-23 f Linsengleichungen f. konvexe & konk. Linsen.

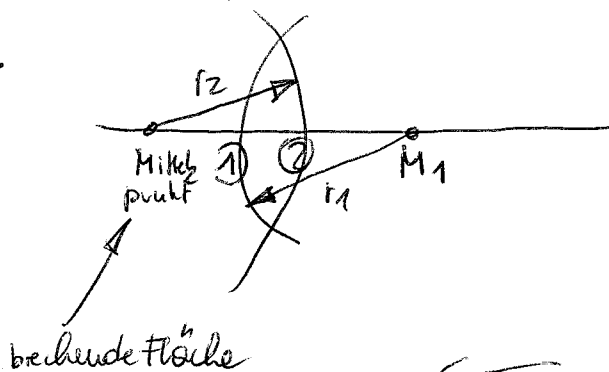
$$\left( \frac{1}{p} \right) + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \Bigg| \quad \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \rightarrow \quad b=f$$

Dist.  $\rightarrow \infty$  → wenn etwas weit weg ist.

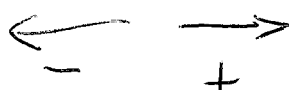
- Krümmungsradien & Brechungsindex sind die wichtigen eigensch. einer Linse.

$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

↓  
bekommen wir.  
(Brennweite)



1. & 2. brechende Fläche

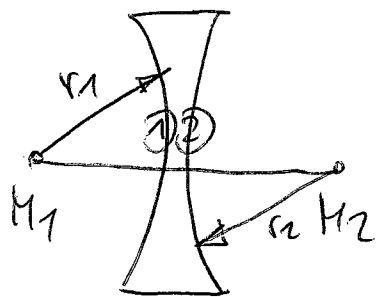


→  $r_2$  negativ.  
 $r_1$  pos.

Bsp.  $r_1 = r_2 = r$

$$(n-1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \approx (n-1) \cdot \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{(-r)} \right) = (n-1) \cdot \frac{2}{r}$$

- f für Sammellinse ist  $> 0$ !

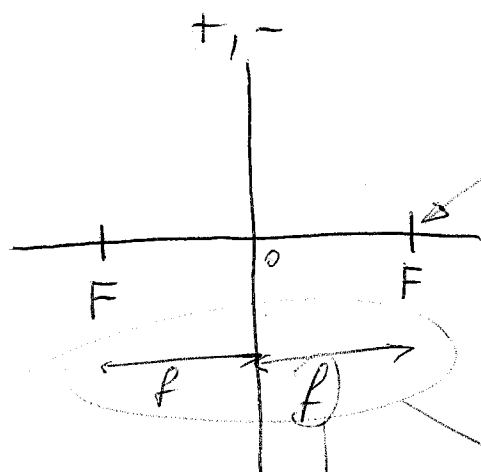


$$\rightarrow f_{\text{STRAB}} < 0 \quad !$$

$$\begin{array}{c} \leftarrow \quad \rightarrow \\ - \quad + \\ r_1 < 0 \quad r_2 > 0 \end{array}$$

$$\cancel{f_{\text{STRAB}} < 0}$$

- keine Eigenschaften der Linse  $\rightarrow$  kann mir  $f$  ausrechnen
- Grafische Lsg. (ohne Taschenrechner)

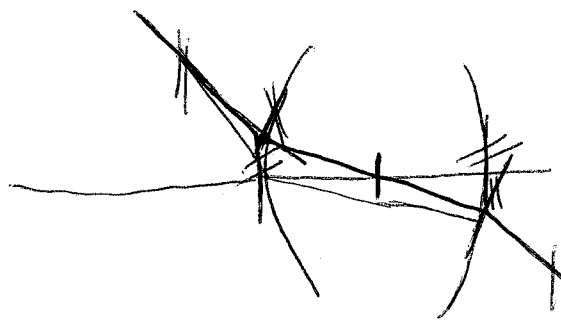


Brennpunkt.

Brennweite.

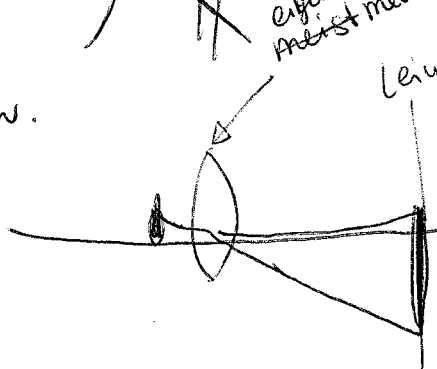
$\rightarrow$  gilt nur für dünne Linsen (Näherung)  
dafür

- Lichtstrahl der durch Mittelpunkt der Linse geht  $\rightarrow$  unabgelenkt. / 2x gebrochen

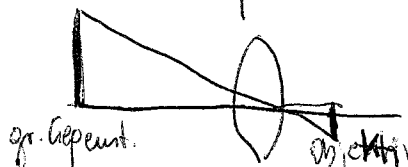


eigentlich immer  
mehrere Linsen (Linsensystem)  
Leinwand

- Projektor-Anw.

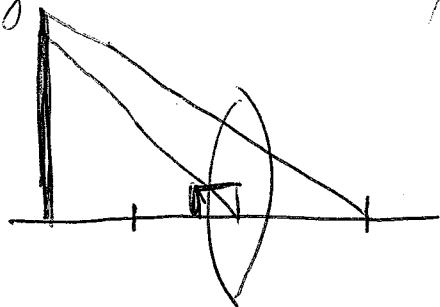


- Teleobjektiv-Anw.





- Gegenstand sehr nahe / in Optik in weniger als der Brennweite.



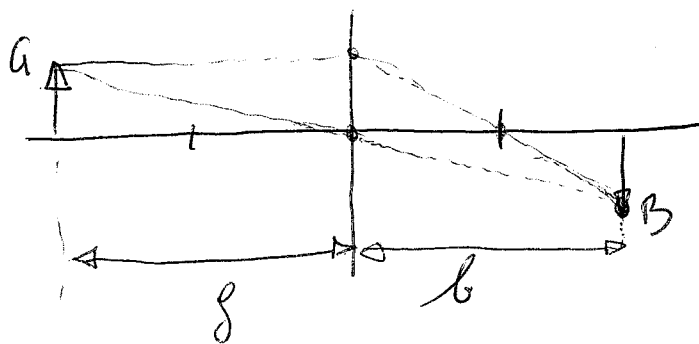
→ Bildweite neg. → virtuelles Bild

- Formeln auf Seite 0-25 nicht mehr eindeutig; einfacher.

einfach umformen:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \Bigg| \quad b = \frac{g \cdot f}{g - f} \quad \Bigg| \quad \left( \frac{b}{g} \right) = \frac{f}{g - f} \quad \Bigg| \quad \frac{B}{G} = \frac{f}{g - f} = V$$

$\frac{b}{g} \parallel \frac{B}{G}$ 
↓
Vergrößerung




$$V = \frac{-B}{G} = -\frac{b}{f}$$

Winkelvergrößerung, & lateralvergrößerung ~~ist~~ gibt's

$$\boxed{b = \frac{g \cdot f}{g - f} \quad \vee \quad V = -\frac{b}{f}}$$

→ alles herleiten, was wir brauchen

!

- bei dicker Linse  $\rightarrow$  Hauptebenen  $\rightarrow$  Brennweiten  
(sonst schwer vorstellbar) aber Außenseite  Linse.

- Blende offen  $\rightarrow$  Bildstör auffälliger, heller.  
Blende zu  $\rightarrow$  schärfer.
- die Koma, einer der zahlr. Bildfehler.
- Brechungsindex hängt auch von  $\lambda$  ab!  $\rightarrow$  verwaschen  
 $\rightarrow$  chromatische Aberrationen  
 $\rightarrow$  gibt zahlreiche Abbildungsfehler.
- Astigmatismus: aus Punkt wird Linie.

- groß  $\rightarrow$  kl.  
kl.  $\rightarrow$  gr.

## ↑ OPTIK

$\rightarrow$  nächster Ideal hoch. Phyz. n. & Atomphys. n.

- Schrödinger - Gl. sicher die am häufigsten gelöste Gleichung d. Phyz. n. (weil es bei komplexeren Fragestellungen keine allg. Form mehr gibt)  $\rightarrow$  numerisch).