

## Beugung und Interferenz elektromagnetischer Wellen (am Bsp. sichtbaren Lichts)

Huygenssches Prinzip

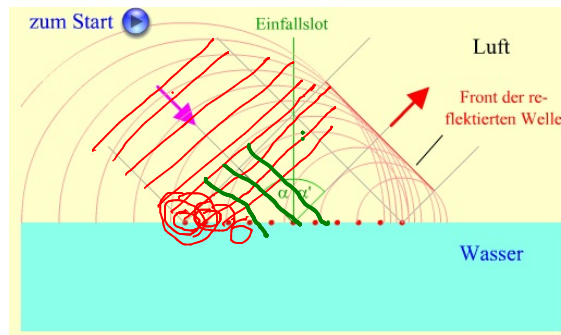
siehe auch:

[http://www.leifiphysik.de/web\\_ph10\\_g8/umwelt\\_technik/08huygens/re\\_bre\\_beu/refl\\_brech\\_beug.htm](http://www.leifiphysik.de/web_ph10_g8/umwelt_technik/08huygens/re_bre_beu/refl_brech_beug.htm)

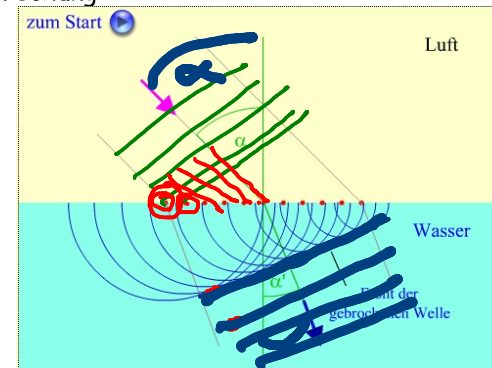
Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Zentrum einer Elementarwelle (hier: Kreiswelle) betrachtet werden.

Damit lassen sich folgende Phänomene erklären:

### Reflexion



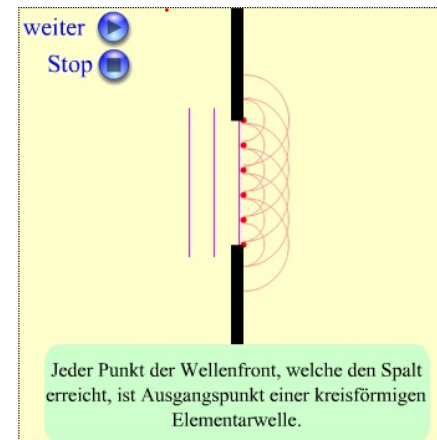
### Brechung



### Beugung

Mit Beugung meint man die Abweichung einer Wellenstrahlung von der geradlinigen Ausbreitung, die nicht auf Reflexion oder Brechung zurückzuführen ist.

Sie wird von Hindernissen bewirkt (die Wellen werden "um die Ecke" gebeugt).



### Zweiquelleninterferenz

siehe auch: [http://www.leifiphysik.de/web\\_ph11/simulationen/11wanne/wanne.htm](http://www.leifiphysik.de/web_ph11/simulationen/11wanne/wanne.htm)

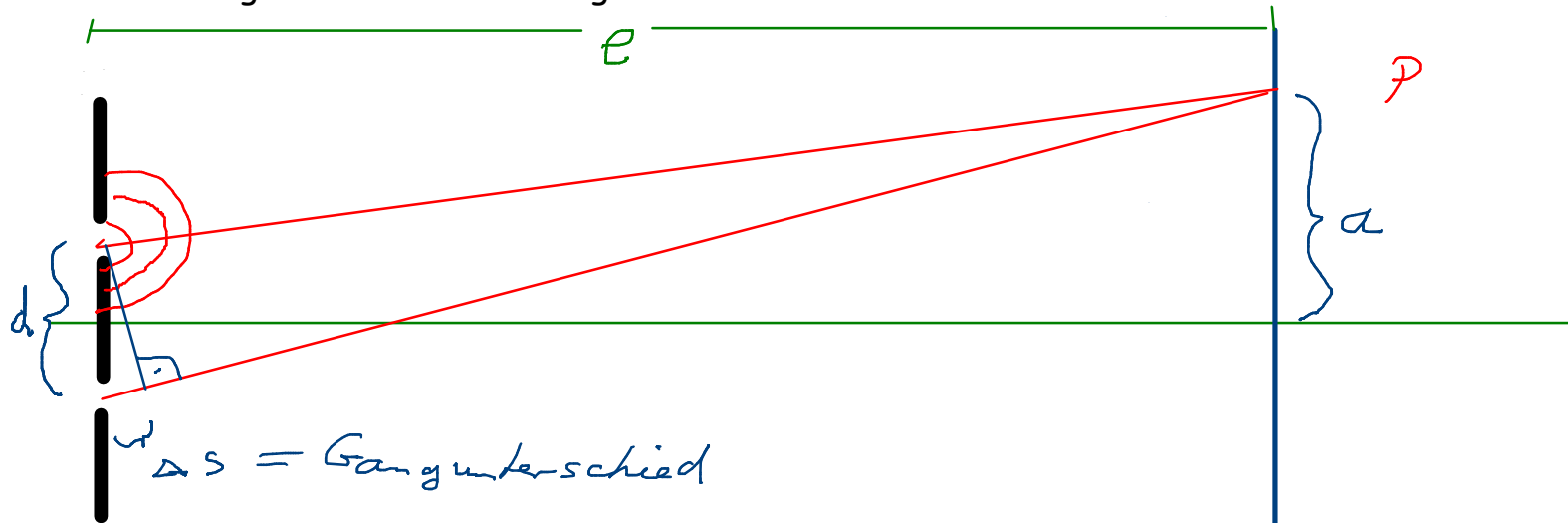
## Zweiquelleninterferenz

siehe auch: [http://www.leifiphysik.de/web\\_ph11/simulationen/11wanne/wanne.htm](http://www.leifiphysik.de/web_ph11/simulationen/11wanne/wanne.htm)

Als Interferenz bezeichnet man die Überlagerung von Wellen.

Trifft dabei ein Wellenberg auf ein Wellental, spricht man von destruktiver Interferenz.

Wellenberg/ -tal auf Wellenberg/ -tal: konstruktiver Interferenz



Wenn  $\Delta s = n \cdot \lambda$  : konstrukt. Int.

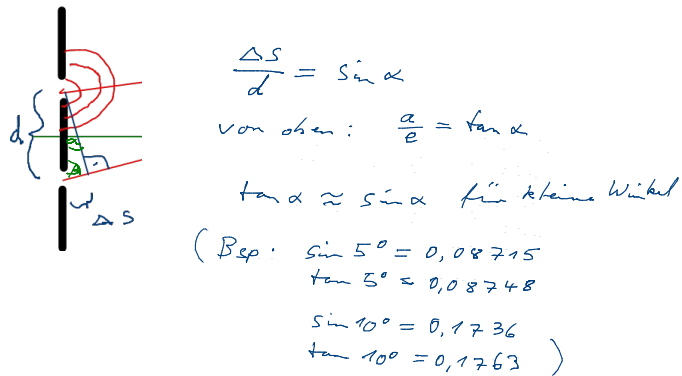
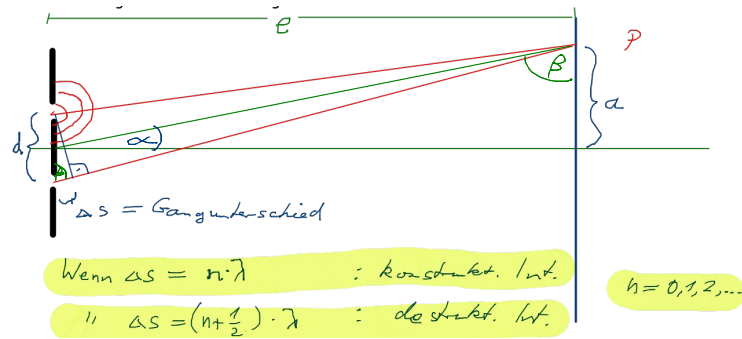
"  $\Delta s = (n + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$  : destrukt. Int.

$n = 0, 1, 2, \dots$

$(n + \frac{1}{2}) \lambda$



$\frac{1}{2} \lambda \left( \frac{3}{2} \lambda \mid \frac{5}{2} \lambda \right)$



$$\Rightarrow \frac{\Delta s}{d} = \frac{a}{e}$$

allgemein mit  $\Delta s = n \cdot \lambda$  bei Hell.-Max.

$$\frac{n \cdot \lambda}{d} = \frac{a_n}{e}$$

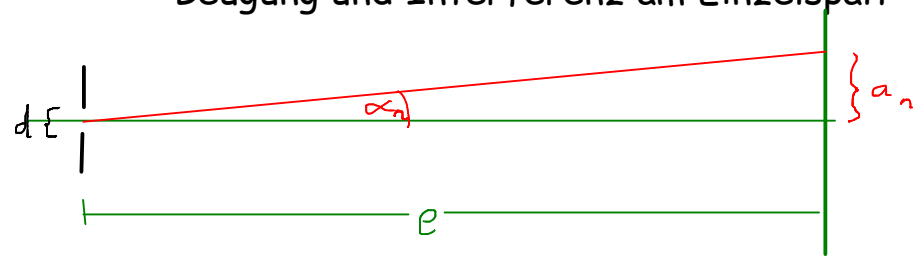
Aufgabe: Bestimme  $\lambda$  des Laserlichtes

$$\begin{aligned} 2 \cdot a_4 &= 61 \text{ mm} \\ d &= 0,6 \text{ mm} \\ e &= 6,60 \text{ m} = 6600 \text{ mm} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} a_3 = 45 \text{ mm} \\ 0,6 \text{ mm} \\ 6900 \text{ mm} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = 6,93 \cdot 10^{-4} \text{ mm} = 693 \text{ nm}$$

$$\lambda = 652 \text{ nm}$$

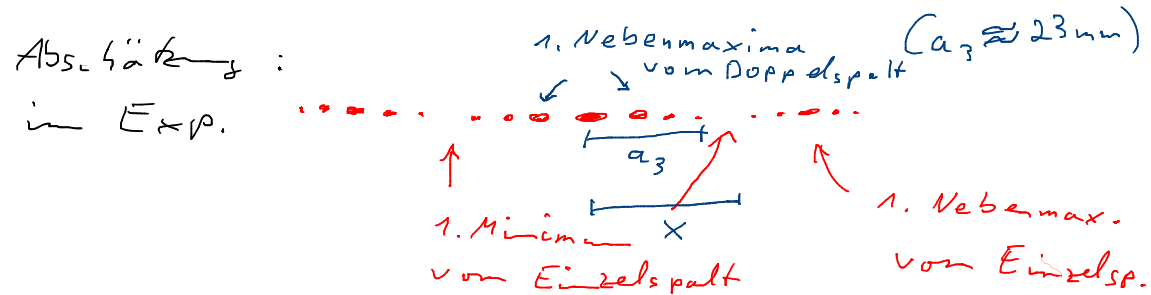
(Herstelleraussage: 632,8 nm)

## Beugung und Interferenz am Einzelspalt



abgemin mit  $\Delta s = n \cdot \lambda$  bei Hell. - ~~Minimum~~ <sup>Minimum</sup>

$$\frac{n \cdot \lambda}{d} = \frac{a_n}{e}$$



$x = a_1 =$  Ort des 1. Minimums Einzelspalt

$$\begin{aligned} \text{HA: Berechne } x &= a_1 = \frac{1 \cdot \lambda \cdot e}{d} \\ &= \frac{633 \text{ nm} \cdot 6,60 \text{ m}}{0,12 \text{ mm}} \\ &= 3,5 \text{ cm} \end{aligned}$$



War die Näherung zulässig? ( $\sin \approx \tan$ )

$$\frac{\Delta S}{d} = \sin \alpha$$

von oben:  $\frac{a}{e} = \tan \alpha$

$$\frac{n \cdot \lambda}{d} = \sin \left( \tan^{-1} \frac{a}{e} \right)$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{0,6 \text{ nm}}{3} \cdot \sin \left( \tan^{-1} \frac{22,5 \text{ nm}}{6900 \text{ nm}} \right)$$

Zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ , Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$  besteht der Zusammenhang:

$$c = \lambda \cdot f$$

Die allgemeine Gleichung einer Welle lautet

$$y(t, x) = \hat{y} \cdot \sin(\omega t - kx)$$

mit  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  und  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

HA: Eine Wasseroberflächenwelle habe die Wellenlänge  $\lambda = 7 \text{ m}$ , eine Amplitude von  $\hat{y} = 5 \text{ m}$ . Sie wird von einer Schwingung mit der Frequenz  $f = 5 \text{ Hz}$  angeregt.

- Berechne  $c$ .
- Berechne  $y(500\text{s}, 1000\text{m})$  und erkläre die Bedeutung dieses Ergebnisses.

$$y(t, x) = \hat{y} \cdot \sin(\omega t - kx)$$

mit  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  und  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

HA: Eine Wasseroberflächenwelle habe die Wellenlänge  $\lambda = 7 \text{ m}$ , eine Amplitude von  $\hat{y} = 5 \text{ m}$ . Sie wird von einer Schwingung mit der Frequenz  $f = 5 \text{ Hz}$  angeregt.

a) Berechne  $c$ .

b) Berechne  $y(500\text{s}, 1000\text{m})$  und erkläre die Bedeutung dieses Ergebnisses.

a)  $c = \lambda \cdot f = 35 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

b) 
$$y(500\text{s}, 1000\text{m}) = 5 \text{ m} \cdot \sin\left(2\pi f \cdot 500\text{s} - \frac{2\pi}{7\text{m}} \cdot 1000\text{m}\right)$$
$$= \underline{\underline{3,85 \text{ m}}}$$

# Beugung und Interferenz am Gitter

Interferenzmaximum, wenn  $\Delta S = n \cdot \lambda$

$$\frac{n \cdot \lambda}{d} = \frac{\Delta S}{d} = \sin \alpha_n$$

$$\tan \alpha_n = \frac{a_n}{e} \Leftrightarrow \alpha_n = \tan^{-1} \left( \frac{a_n}{e} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{n \cdot \lambda}{d} = \sin \left( \tan^{-1} \left( \frac{a_n}{e} \right) \right)$$

$$\sin \alpha_n = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + e^2}}$$

$$\Rightarrow \frac{n \cdot \lambda}{d} = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + e^2}}$$

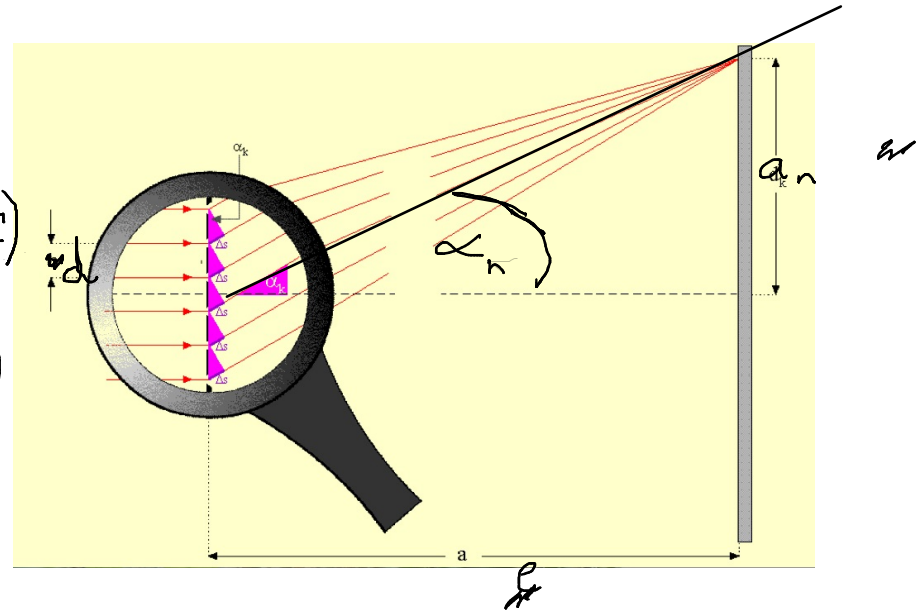
Meistens ist beim Gitter die sog. Gitterkonstante  $g$  angegeben, z.B.  $g = 570/\text{mm}$ .  
 $\Rightarrow d = 1/g$  (im Bsp.  $d = 1/570 \text{ mm}$ )

Aufgaben:

[http://www.leifiphysik.de/web\\_ph11\\_g8/musteraufgaben/14licht/](http://www.leifiphysik.de/web_ph11_g8/musteraufgaben/14licht/)

z.B. CD, Interferenz am Gitter, ...

HA: Moodle

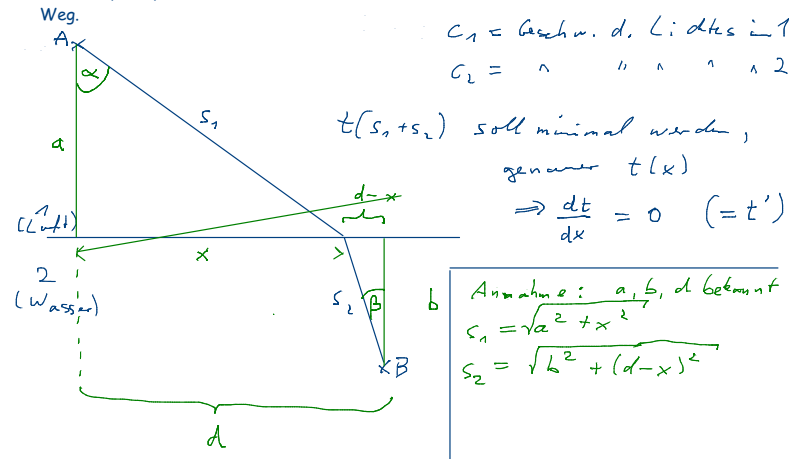


$$\left. \begin{array}{l} a_1 = 2,52 \text{ m} \\ e = 6,60 \text{ m} \\ d = \frac{1}{570} \text{ mm} \end{array} \right\} \Rightarrow 626 \text{ nm}$$

(Wow!)

## Das Fermatsche Prinzip und die Lichtbrechung

Extremalprinzip: Das Licht nimmt immer den zeitlich kürzesten



$$t(x) = \frac{s_1}{c_1} + \frac{s_2}{c_2} = \frac{1}{c_1} \sqrt{a^2 + x^2} + \frac{1}{c_2} \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

$$\Rightarrow t' = \frac{dt}{dx} = \frac{1}{c_1} \cdot \frac{1}{2} (a^2 + x^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot 2x + \frac{1}{c_2} \cdot \frac{1}{2} (b^2 + (d-x)^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot 2(d-x) \cdot (-1)$$

$$\stackrel{!}{=} 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{c_1} \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \frac{1}{c_2} \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

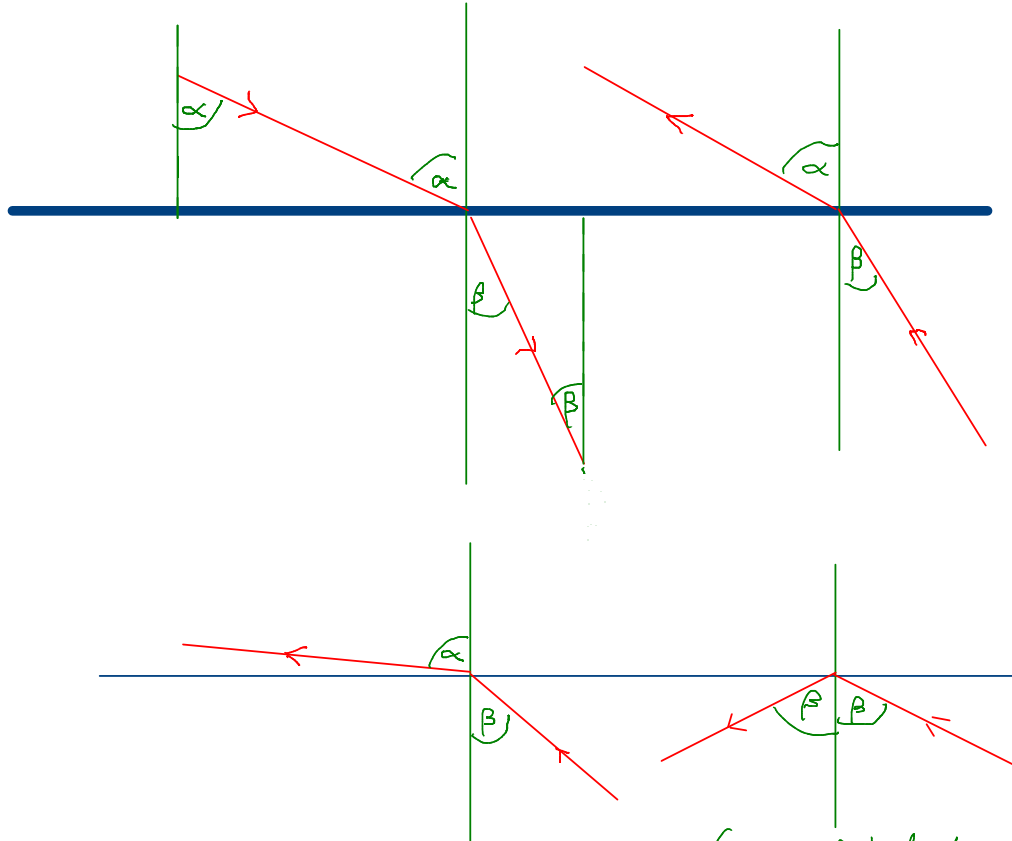
$$\Leftrightarrow \frac{1}{c_1} \frac{x}{s_1} = \frac{1}{c_2} \frac{d-x}{s_2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

$c_0 = \text{max. Lichtgeschw.}$   
 $= \text{Vakuumlichtg.}$   
 $= 300\,000 \text{ km/s}$   
 $c_1 = \frac{c_0}{n_1}, \quad c_2 = \frac{c_0}{n_2}$   
 $n_1, n_2: \text{Brechzahl / Brechungsindex}$

Snelliussches  
 Brechungsgesetz



Bsp.  $H_2O$ :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_w}{n_l} \Rightarrow \frac{\sin 30^\circ}{\sin \beta_T} = \frac{1,33}{1}$$

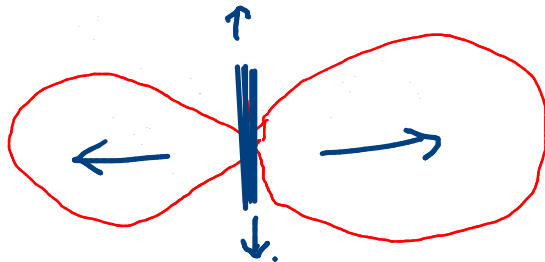
$$\Rightarrow \sin \beta_T = \frac{1}{1,33} = \frac{3}{4} \Rightarrow \underline{\underline{\beta_T = 48,6^\circ}}$$

Grenzwinkel der Totalreflexion.

# Polarisation durch Reflexion

Der Brewsterwinkel gibt den Einfallswinkel an, bei dem einfallender und reflektierter Strahl unter einem Winkel von  $90^\circ$  liegen (siehe "Skizze").

Das reflektierte Licht ist dann linear polarisiert.



Skizze einer Erklärung, dass bei Erfüllung des  $90^\circ$ -Kriteriums das reflektierte Licht linear polarisiert ist:

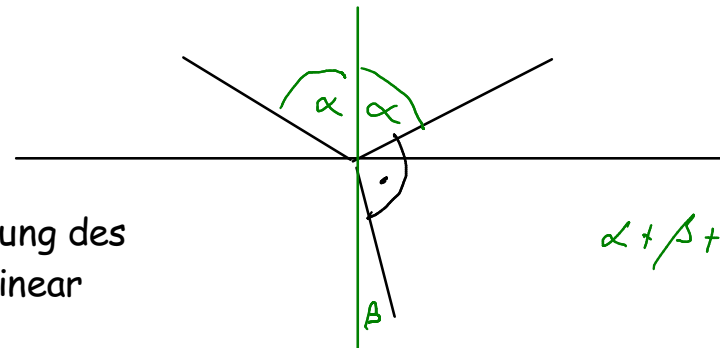
Licht = Transversalwelle

=> Modell: Atome sind wie Hertzsche Dipole

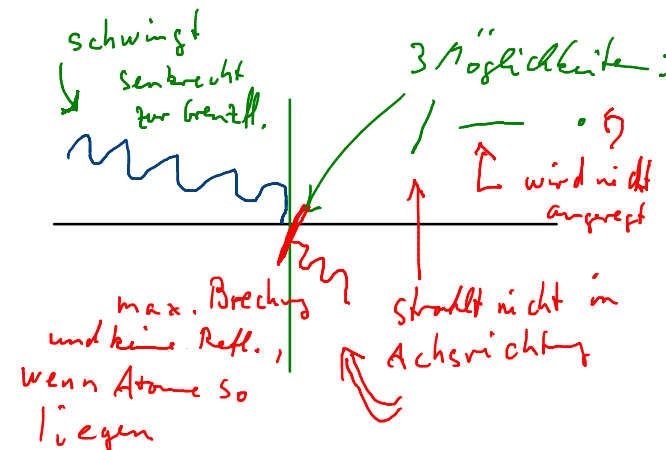
Strahlungscharakteristik eines Dipols  
(keine Intensität in Richtung der Dipolachse;  
vgl. Mobilfunkmast auf Kindergarten)

Zus.-Fass: Licht, das so schwingt und Atome die so liegen => keine Reflexion

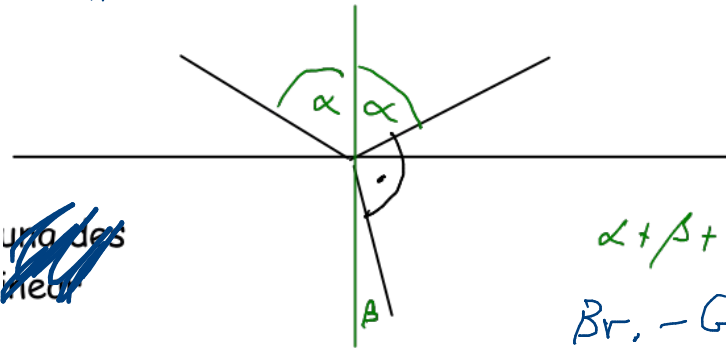
Der refl. Strahl enthält also nur die andere Schw.-Richtg.



$$\alpha + \beta + 90^\circ = 180^\circ$$



$$n_1 = 1$$



~~una des~~  
~~hier~~

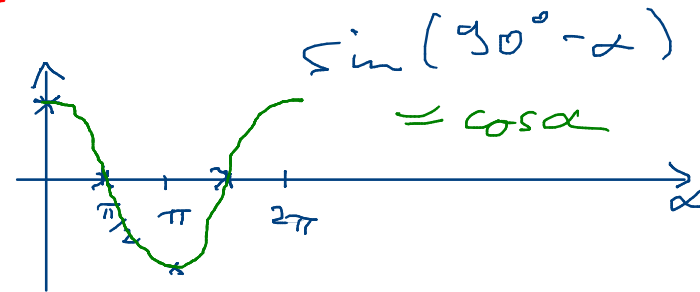
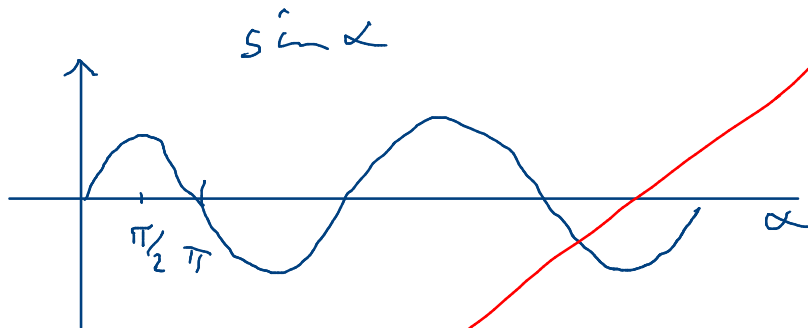
$$n_2 = 1,33$$

(Wasser)

$$\alpha + \beta + 90^\circ = 180^\circ \Leftrightarrow \beta = 90^\circ - \alpha$$

$$\text{Br., -Ges.: } \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\Rightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = 1,33$$



$$\Rightarrow \tan \alpha = 1,33 \Rightarrow \alpha = 53^\circ = \text{Brewster} \\ \text{f. Luft/Wasser}$$

---

$$\text{Brewster w. f. Luft/Glas: } \tan \alpha = 1,5 \Rightarrow \alpha = 56^\circ$$



Okt ->

Wie groß ist die (Quer-) Verschiebung  $q$  eines schräg durch eine Glasscheibe von der Dicke  $d$  laufenden Lichtstrahls?

a) Geben Sie eine allgemeine Formel an.  $\frac{d}{e} = \cos \beta$   
 ( $q = f(d, \alpha, \beta)$ )

b) Berechnen Sie  $q$  für  $d = 6\text{mm}$ ,  $\alpha = 40^\circ$  und  $n = 1,5$ .

a)  $\gamma = \alpha - \beta$   
 $\Rightarrow q = \sin \gamma \cdot e$   
 $= \sin \gamma \cdot \frac{d}{\cos \beta}$   
 $= \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} \cdot d$

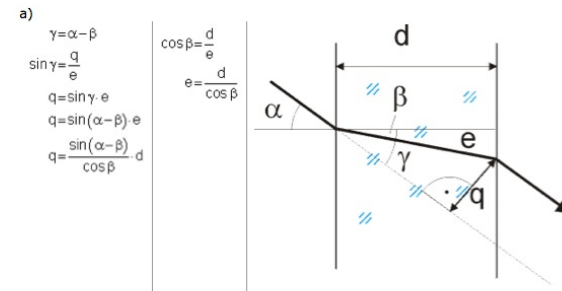
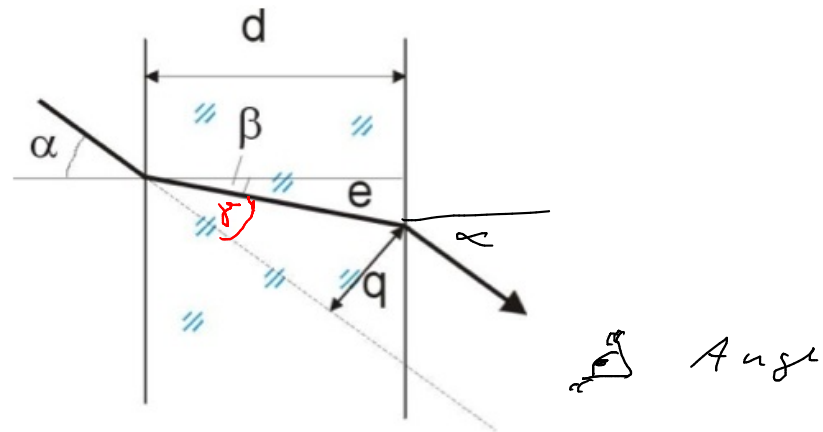
b)  $d = 6\text{mm}$ ,  $\alpha = 40^\circ$ ,  $n = 1,5$

ges  $q$   
 $\beta = ?$

hier:  
 $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = 1,5$

$\Rightarrow \sin \beta = \frac{\sin \alpha}{1,5} \Rightarrow \beta = 25,4^\circ$

$\Rightarrow q = \frac{\sin(40^\circ - 25,4^\circ)}{\cos(25,4^\circ)} \cdot 6\text{mm} = 1,67\text{mm} \approx 1,7\text{mm}$



b)

geg.:	$d = 6\text{mm}$ $\alpha = 40^\circ$ $n = 1,5$	ges.:	$q$
Lösung:	$q = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} \cdot d$ $q = \frac{\sin(40^\circ - 25,4^\circ)}{\cos 25,4^\circ} \cdot 6\text{mm}$ $q = 1,7\text{mm}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ $\beta = 25,4^\circ$	
Antwort:	Der Strahl wird um 1,7 mm verschoben.		

$$c = \lambda \cdot f$$

Beugung / Interferenz

Doppelspalt, Gitter

$$\left( \frac{n\lambda}{d} = \frac{a_n}{e} \right)$$

$$\frac{n\lambda}{d} = \frac{a_n}{\sqrt{e^2 + a_n^2}}$$

Extremal- / Fermatsches Prinzip

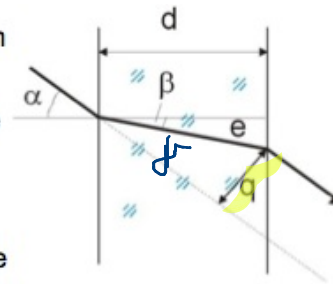
$\implies$  Snelliuss Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1} \left( = \frac{c_1}{c_2} \right)$$

Totalreflexion, Grenzwinkel

Polarisation durch Reflexion: Brewsterwinkel

1.1. Beim Durchgang durch eine planparallele Platte unter einem Eintrittswinkel von  $\alpha \neq 0$  erfährt das Licht eine Querverschiebung (s. Abb.).



a) Geben Sie eine allgemein gültige Formel für die Querverschiebung  $q$  an, die nur von den Variablen  $d$  und  $\alpha$  abhängt:  $q = f(d, \alpha)$

b) Berechnen Sie  $q$  für  $d = 10 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 45^\circ$  und  $n = 1,5$ .

c) Was ließe sich beobachten, wenn bei gleicher Versuchsanordnung die Platte aus Diamant bestünde?

$$a) \quad \frac{q}{e} = \sin \gamma \quad \gamma = \alpha - \beta$$

$$\cos \beta = \frac{d}{e}$$

$$\Rightarrow q = e \cdot \sin \gamma = \frac{d}{\cos \beta} \sin(\alpha - \beta)$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad \Rightarrow \quad \beta = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \alpha}{n} \right)$$

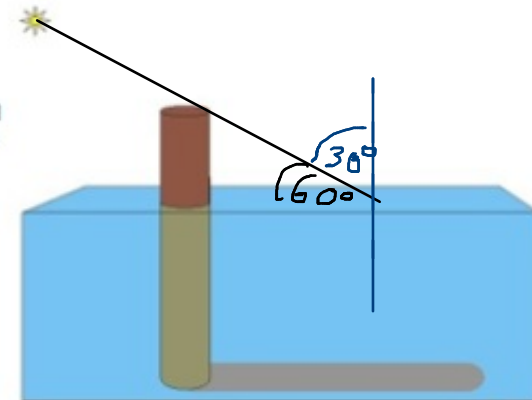
$$\text{mit } n = 1,5 \quad , \quad \alpha = 45^\circ$$

$$b) \quad \beta = 28,13^\circ \quad \Rightarrow \quad q = 3,3 \text{ mm}$$

$$c) \quad q = 5 \text{ mm} \quad (\text{wg. } n = 2,5 \Rightarrow \beta \text{ kleiner})$$

aus Diamant besteht:

- 1.2. In ein Wasserbecken von 2 m Tiefe wird ein Pfahl gerammt, der 50 cm aus dem Wasser herausragt. Wie lang ist der Schatten des Pfahls auf dem Grund des Wasserbeckens, wenn die Sonnenstrahlen unter einem Winkel von  $60^\circ$  zur Wasseroberfläche einfallen?



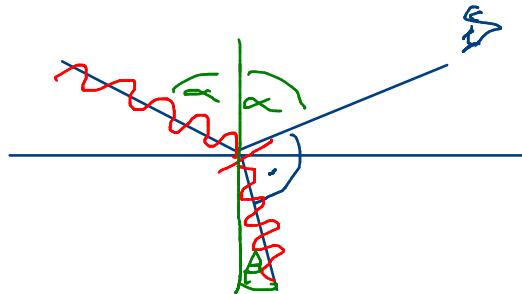
~~Die Sonne mit einem Winkel von  $60^\circ$  zur Wasseroberfläche einfallen.~~

- 1.3. Sie sehen unten zwei Fotos, die nahezu zeitgleich gemacht wurden.  
Bei der Aufnahme des rechten Fotos wurde ein Polarisationsfilter verwendet.

- a) Erklären Sie kurz und physikalisch ergiebig das zugrundeliegende physikalische Phänomen.
- b) Berechnen Sie mit Hilfe der Überlegungen aus a), unter welchem Winkel die Wasseroberfläche am dunkelsten erscheint. (  $n_{\text{Wasser}} = 1,33$  )



a) Polarisation durch Reflexion



b)

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = \frac{\sin \alpha}{\sin (90 - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha$$

$$\Rightarrow \alpha = 53^\circ$$

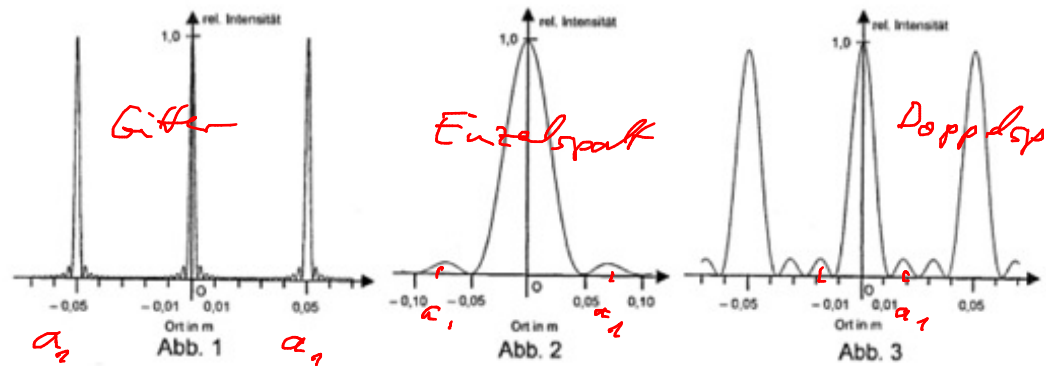
## Beugung und Interferenz

Das Licht eines He-Ne-Lasers hat die Wellenlänge 633 nm. In den Strahlengang werden folgende Beugungsobjekte senkrecht zur Strahlrichtung gestellt:

- ein Einzelspalt
- ein Doppelspalt
- ein Gitter.

In einer Entfernung von 8,0 m hinter dem jeweiligen Beugungsobjekt registriert man in der Ebene

senkrecht zur Strahlrichtung die drei abgebildeten Intensitätsverteilungen.



2.1. Ordnen Sie die Abbildungen den drei Beugungsobjekten zu und begründen Sie Ihre Zuordnung.

2.2. Bestimmen Sie mit Hilfe der Schaubilder den Abstand benachbarter Spaltmitten  $d$  des Doppelspaltess sowie die Gitterkonstante  $g$ .

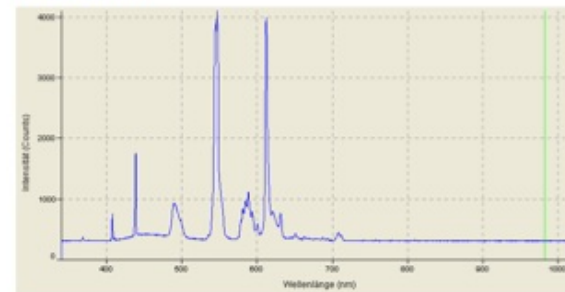
$$\frac{n \cdot \lambda}{d} = \frac{a_n}{e} \Rightarrow d = 0,1 \text{ mm}$$

$$\left( \text{Gitter } g = \frac{1}{d} \right) \\ = \frac{10}{\text{mm}}$$

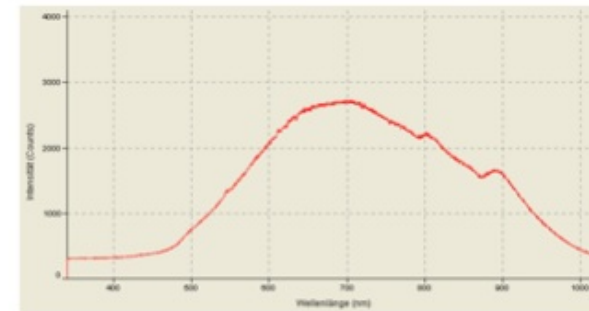
# Spektroskopie

Ein Spektrum ist die Intensität als Funktion der Wellenlänge, der Frequenz, der Energie oder - im Falle von Elementarteilchen, Atomen oder Ionen - der Masse.

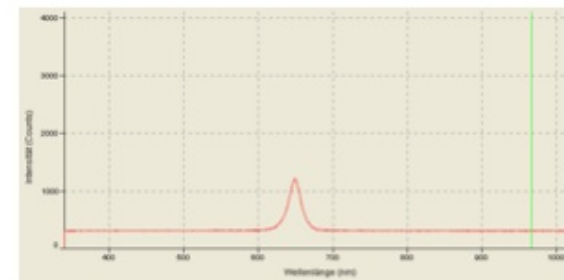
Leuchtstoffröhre



Flamme



LED





# Quantenphysik

## Experimente mit Licht und Zinkplatte

Beschreibe detailliert die Beobachtungen, die man bei dem Experiment machen konnte.

Versuche die Beobachtungen physikalisch zu erklären!

Inwiefern widersprechen die Ergebnisse den "klassischen" Vorstellungen vom Licht?

Hg-Lampe = Quecksilberdampf Lampe

<-- 9.11.11