# <u>Thema:</u> Wellentheorie des Lichts

***Versuch 1:***

Auf der Vorderseite eines zunächst leeren Glasbeckens ist ein Gitter mit 570 Strichen pro mm befestigt. Außen, auf der Rückseite des Beckens, befindet sich ein Schirm zum Auffangen der Lichterscheinungen (aufgeklebtes durchscheinendes mm-Papier). Ein LASER-Strahl mit der Wellenlänge $\lambda = 632{,}8\,nm$ (das bekannte rote LASER-Licht) trifft senkrecht auf das Gitter.

***Versuch 2:***

Das Becken wird mit einer unbekannten Flüssigkeit (Medium) gefüllt. Der LASER-Strahl trifft weiterhin senkrecht auf das Gitter.

*Die Dicke der Glaswände wird zunächst vernachlässigt (Materialien Abb.1).*

1. Erläutere die wesentlichen physikalischen Vorgänge, die zu den in den beiden Versuchen beobachteten Effekten führen und vergleiche sie!
2. Für die Auswertung beider Versuche wird die Beziehung $\lambda = \frac{d}{k} \cdot \frac{a_k}{\sqrt{e^2 + a_k^{\,2}}}$ benötigt. Leite diese Beziehung begründet mit Hilfe von Zeichnungen her! Erläutere die dabei auftretenden physikalischen Größen! Bestimme anschließend aus dem beigefügten Schirmbild (*Materialien Abb.2*) die Wellenlängen $\lambda_{Luft}$ und $\lambda_{Medium}$!
3. Begründe, weshalb sich für die Wellenlänge in der unbekannten Flüssigkeit ein anderer Wert ergibt als in Luft! Begründe, warum sich beim Eintritt des Lichts von Luft in die unbekannte Flüssigkeit seine Frequenz $f$ nicht ändert! Bestimme aus den Messdaten die Lichtgeschwindigkeit in der unbekannten Flüssigkeit und ihren Brechungsindex!
4. Die Dicke der Glaswände wird nun nicht mehr vernachlässigt (s.o.). Beim Aufbau des Versuchs muss man entscheiden, ob das Gitter innen oder außen auf der $5\,mm$ - dicken Glasscheibe angebracht wird. Der Schirm kann sich nur außen befinden. Erläutere mit Hilfe von Skizzen die Auswirkung der Glaswände und der Position des Gitters auf den Lichtweg!
5. Überprüfe, wie viele Ordnungen bei leerem und bei gefülltem Glasbecken auf dem Schirm beobachtbar sein können! Benutze deine Ergebnisse aus Aufgabe 2 !
6. *„Licht ist eine elektromagnetische Welle."* Erläutere, wie elektromagnetische Wellen bzw. Schwingungen erzeugt werden können und welche Bedeutung dabei die Kapazität $C$ und die Induktivität $L$ des Schwingkreises für die abgestrahlte Frequenz $f$ dabei besitzen! Bestimme „rein hypothetisch" eine Kombination für $L$ und $C$, um die Frequenz des benutzten LASERs zu erzeugen!

## Material zur Aufgabe

**Abb.1:** **Der Versuchsaufbau**

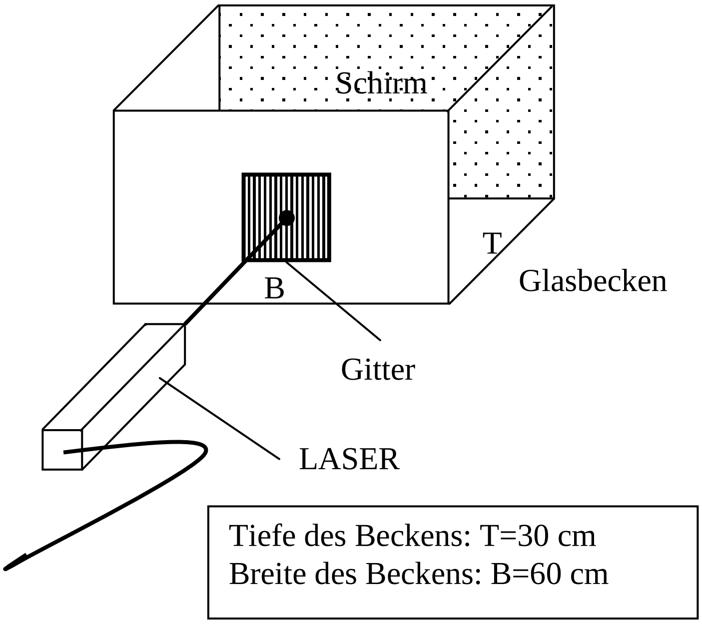
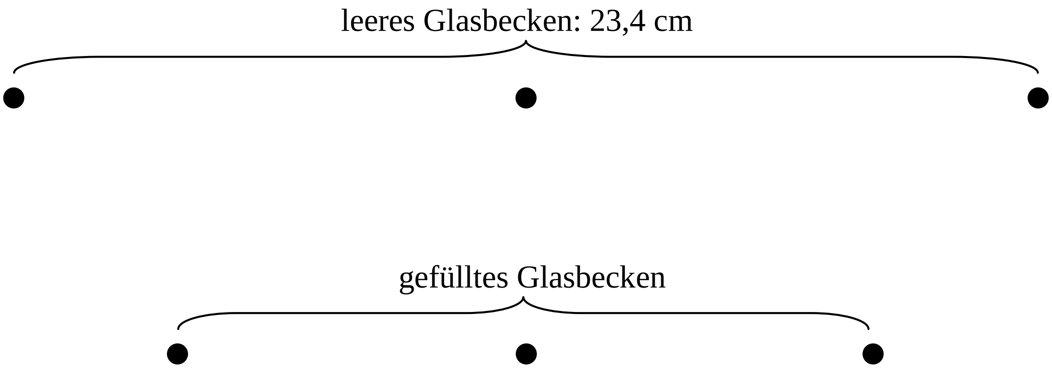



**Abb.2** **Die Beugungsbilder erster Ordnung**

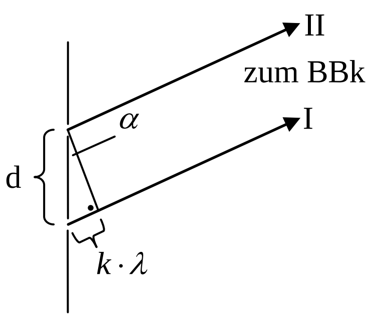


## Lösungen

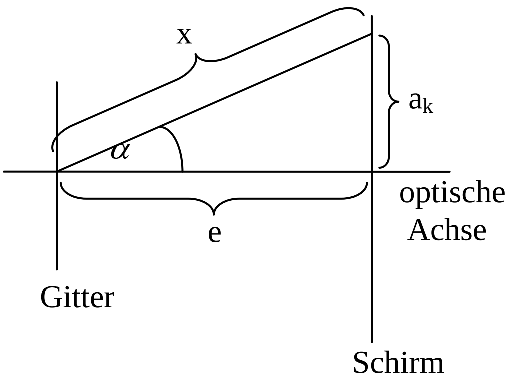
1. Erläutere die wesentlichen physikalischen Vorgänge, die zu den in den beiden Versuchen beobachteten Effekten führen und vergleiche sie!

Das monochromatische Licht des LASERS wird am Gitter gebeugt. Auf dem Schirm sind die Beugungsbilder in Form von einzelnen elliptischen roten Punkten zu beobachten, die symmetrisch zu einem Punkt in der Mitte, dem so genannten Beugungsbild nullter Ordnung, liegen. Die roten Punkte stellen Orte optimaler konstruktiver Interferenz dar, dazwischen liegen Bereiche destruktiver Interferenz. Betrachtet man die einzelnen Gitteröffnungen als Zentren Huygensscher Elementarwellen, so interferieren diese im Bereich zwischen Gitter und Schirm. Auf dem Schirm überlagern sich die einzelnen Wellen konstruktiv (Amplitudenverdopplung), falls ihr Phasenunterschied $0$ oder ein ganzzahlig Vielfaches von $2\pi$ beträgt, sie löschen sich aus, falls ihr Phasenunterschied ein ungerades Vielfaches von $\pi$ erreicht. Bei anderen Phasenunterschieden treten Zwischenwerte der Amplitude auf.
Wird das Becken mit der unbekannten Flüssigkeit gefüllt, liegen die einzelnen elliptischen roten Punkte dichter beieinander. Das Licht wird beim Übergang von Luft in das dichtere Medium zum Einfallslot hin gebrochen; dies gilt für alle durch die Beugung am Gitter entstehenden „Strahlenbündel" bzw. Wellennormalen. Im dichteren Medium verkürzt sich die Wellenlänge des benutzten Lichts, so dass die konstruktive bzw. destruktive Interferenz unter kleineren Winkeln auf dem Schirm zu beobachten sind – die Beugungsbilder rücken dichter zusammen.

2. Für die Auswertung beider Versuche wird die Beziehung $\lambda = \frac{d}{k} \cdot \frac{a_k}{\sqrt{e^2 + a_k^{\,2}}}$ benötigt. Leite diese Beziehung begründet mit Hilfe von Zeichnungen her! Erläutere die dabei auftretenden physikalischen Größen! Bestimme anschließend aus dem beigefügten Schirmbild (*Materialien Abb.2*) die Wellenlängen $\lambda_{Luft}$ und $\lambda_{Medium}$!




$d$ ist der Abstand zweier benachbarter Gitteröffnungen. Bei 570 Strichen pro mm ist $d$ sehr klein im Vergleich zur Entfernung des Schirms vom Gitter. Die Wellennormalen I und II verlaufen also nahezu parallel zueinander zum Beugungsbild k. Ordnung (BBk). Ihr Wegunterschied lässt sich konstruieren, indem man das Lot aus der oberen Öffnung auf die Normale I fällt, es entsteht ein rechtwinkliges Dreieck mit der Hypotenuse $d$. Zu einem Ort konstruktiver Interferenz gehört ein Wegunterschied von $k \cdot \lambda$, wobei $k$ eine natürliche Zahl sein muss. In dem kleinen Dreieck gilt die Beziehung:
$\sin(\alpha) = \frac{k \cdot \lambda}{d} \Leftrightarrow \lambda = \frac{d}{k} \cdot \sin(\alpha)$. Da der Winkel $\alpha$ nicht gemessen werden kann, muss die Geometrie des Versuchsaufbaus noch in einer anderen Ansicht betrachtet werden. Die




Wellennormale, die zum Beugungsbild nullter Ordnung führt, liegt auf der optischen Achse. Die Wellennormalen zum BBk schließen mit der opt. Achse den Winkel $\alpha$ ein, da das Lot senkrecht auf der Normalen steht und diese daher mit dem Gitter den Winkel $90° - \alpha$ einschließt. Der Winkel zwischen der Normalen und der opt. A. muss also wieder $\alpha$ betragen. Es gilt in dem rechtwinkligen Dreieck mit der Hypotenuse $x$ (Winkelfunktion, Pythagoras): $\sin(\alpha) = \frac{a_k}{x} = \frac{a_k}{\sqrt{e^2 + a_k^{\,2}}}$. Ersetzt man in der oberen Formel $\sin(\alpha)$, so erhält man:

$$\lambda = \frac{d}{k} \cdot \frac{a_k}{\sqrt{e^2 + a_k^{\,2}}}.$$

Für Luft gilt: $2 \cdot a_1 = 0{,}234m;\ k = 1;\ d = \frac{10^{-3}m}{570};\ e = T = 0{,}30m$. $\Rightarrow \lambda_{Luft} \approx 637{,}4nm$.

Für das Medium gilt unter Berücksichtigung des Maßstabes der Abb.2:

$$2\cdot a_1 = \frac{0{,}234\cdot 0{,}092}{0{,}135}m;\ k=1;\ d=\frac{10^{-3}m}{570};\ e=T=0{,}30m \Rightarrow \lambda_{Medium}\approx 450{,}6nm.$$

3. Begründe, weshalb sich für die Wellenlänge in der unbekannten Flüssigkeit ein anderer Wert ergibt als in Luft! Begründe, warum sich beim Eintritt des Lichts von Luft in die unbekannte Flüssigkeit seine Frequenz $f$ nicht ändert! Bestimme aus den Messdaten die Lichtgeschwindigkeit in der unbekannten Flüssigkeit und ihren Brechungsindex!

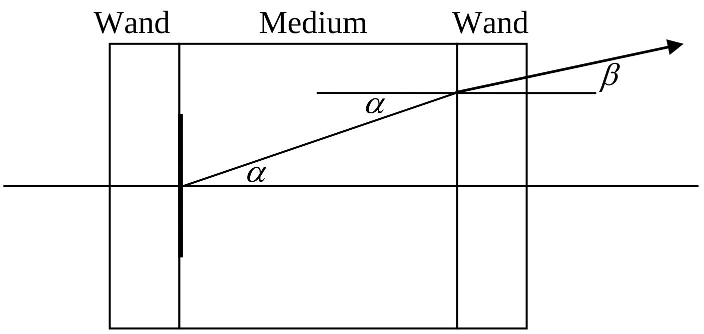
Es gilt in allen Medien $c=\lambda\cdot f$. Da die Vakuumlichtgeschwindigkeit die größte Geschwindigkeit ist, die das Licht besitzen kann, ist die Lichtgeschwindigkeit in anderen Medien immer kleiner. Da die Frequenz das unveränderliche Merkmal einer Welle ist, muss demnach auch die Wellenlänge im Medium kleiner sein. Beim Übergang der Welle von Luft in das dichtere Medium verkürzt sich die Wellenlänge, es kommen aber weder Wellenfronten hinzu noch verschwinden welche. Die Anzahl der Wellenfronten, die einen festen Punkt oberhalb der Grenzfläche pro Zeiteinheit passieren, stimmt mit der überein, die einen festen Punkt unterhalb der Grenzfläche pro Zeiteinheit passieren; die Frequenz bleibt also konstant. Dies folgt auch aus dem Huygensschen Prinzip (Konstruktion für die Brechung).

Es gilt das Brechungsgesetz $\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)}=\frac{c_{Vakuum}}{c_{Medium}}=n_{Medium}\approx\frac{\lambda_{Luft}\cdot\cancel{f}}{\lambda_{Medium}\cdot\cancel{f}}$. Hierbei ist $\alpha$ der Einfalls- und $\beta$ der Brechungswinkel. Es folgen: $c_{Medium}\approx\frac{c_{Vakuum}\cdot\lambda_{Medium}}{\lambda_{Luft}}\approx 211933608\frac{m}{s}\approx 0{,}71\cdot c$ und

$n_{Medium}\approx\frac{\lambda_{Luft}}{\lambda_{Medium}}\approx 1{,}41$ (siehe auch Teil 2).

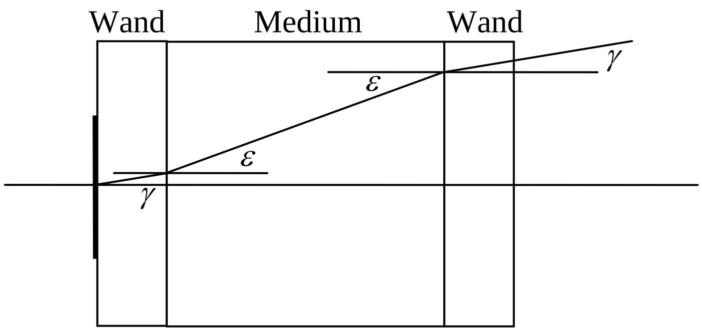
4. Die Dicke der Glaswände wird nun nicht mehr vernachlässigt (s.o.). Beim Aufbau des Versuchs muss man entscheiden, ob das Gitter innen oder außen auf der $5mm$ - dicken Glasscheibe angebracht wird. Der Schirm kann sich nur außen befinden. Erläutere mit Hilfe von Skizzen die Auswirkung der Glaswände und der Position des Gitters auf den Lichtweg!

*a) Gitter wird innen befestigt:*




Der Laserstrahl trifft links senkrecht auf die Glaswand und wird nicht gebrochen. Vom Gitter auf der Innenseite wird das Licht gebeugt – eingezeichnet ist eine Wellennormale, die unter dem Beugungswinkel $\alpha$ zum Beugungsbild 1. Ordnung führt. An der rechten Wand wird das Licht nochmals gebrochen. Falls das Medium optisch dünner als Glas ist, erfolgt die Brechung zum Lot hin, und damit liegt der beobachtete Beugungspunkt auf dem an der Außenwand aufgeklebten Schirm zu weit unten, also zu nah an BB0. Für die Beugung gilt: $\sin(\alpha)=\frac{\lambda_{Med}}{d}$.

*b) Gitter wird außen befestigt:*




Der Laserstrahl fällt senkrecht auf das Gitter und wird gebeugt. In der Glaswand gilt: $\sin(\gamma)=\frac{\lambda_{Glas}}{d}$. Außerdem gilt das Brechungsgesetz: $\frac{\sin(\gamma)}{\sin(\varepsilon)}=\frac{\lambda_{Glas}}{\lambda_{Med}}$. Hieraus folgt:

$\sin(\varepsilon)=\frac{\lambda_{Med}}{\lambda_{Glas}}\cdot\sin(\gamma)=\frac{\lambda_{Med}}{\lambda_{Glas}}\cdot\frac{\lambda_{Glas}}{d}$. Da

$\frac{\lambda_{Med}}{d} = \sin(\alpha)$, folgt $\sin(\varepsilon) = \sin(\alpha) \Leftrightarrow \varepsilon = \alpha$. Der Beugungswinkel, unter dem die Wellennormale im Medium zum BB1 läuft, ist also unabhängig davon, ob das Gitter außen oder innen befestigt wird. Da $\varepsilon = \alpha$, gilt ebenfalls $\gamma = \beta$. Wird das Gitter außen befestigt, so wird durch die linke Glaswand der Austrittspunkt der Wellennormale aus der Wand um das gleiche Stück nach oben verschoben wie bei der rechten Glaswand wieder nach unten. Das Beugungsbild liegt an der richtigen Stelle.

5. Überprüfe, wie viele Ordnungen bei leerem und bei gefülltem Glasbecken auf dem Schirm beobachtbar sein können! Benutze deine Ergebnisse aus Aufgabe 2 !

Die Formel aus Aufgabe 2 ist nach $k$ umzuformen: $\lambda = \frac{d}{k} \cdot \frac{a_k}{\sqrt{e^2 + a_k^{\ 2}}} \Leftrightarrow k = \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{a_k}{\sqrt{e^2 + a_k^{\ 2}}}$. Da der Schirm maximal die Breite des Beckens haben kann, gilt $a_k \leq 0{,}30m$. Mit der Wellenlänge $\lambda_{Luft} \approx 637{,}4nm$ folgt $k_{Luft} < 1{,}95$. Mit der Wellenlänge $\lambda_{Medium} \approx 450{,}6nm$ folgt $k_{Medium} < 2{,}75$. Bei leerem Becken lassen sich die Beugungsbilder nullter und erster Ordnung, bei gefülltem Becken auch noch die Beugungsbilder zweiter Ordnung beobachten.

6. *„Licht ist eine elektromagnetische Welle."* Erläutere, wie elektromagnetische Wellen bzw. Schwingungen erzeugt werden können und welche Bedeutung dabei die Kapazität $C$ und die Induktivität $L$ des Schwingkreises für die abgestrahlte Frequenz $f$ dabei besitzen! Bestimme „rein hypothetisch" eine Kombination für $L$ und $C$, um die Frequenz des benutzten LASERs zu erzeugen!

Zur Erzeugung benötigt man einen elektrischen Schwingkreis. Er besteht aus einer Parallelschaltung von Spule (L) und Kondensator (C). Periodisch wechselt die maximale elektrische Energie des Kondensators zu maximaler magnetischer Energie der Spule. Motor dieser Umwandlung ist die Selbstinduktion der Spule, die der Lenzschen Regel folgt. Soll diese Schwingung ungedämpft erfolgen, so muss ihr die verloren gegangene Energie durch eine Rückkopplung wieder zugeführt werden. Der Hertzsche Dipol ist die Realisierung eines Schwingkreises mit sehr kleiner Kapazität und Induktivität – ein gerader Leiter.

Es gilt die Thomsonsche Schwingungsgleichung für die Eigenfrequenz $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$. Mit sinkendem Produkt $L \cdot C$ wird die Frequenz immer höher. Die Frequenz des benutzen LASERs beträgt $f = \frac{c}{\lambda} \approx 4{,}74 \cdot 10^{14} Hz$. Angenommen, die Kapazität eines Hertzschen Dipols beträgt $C = 0{,}1 \cdot 10^{-12} F$. Dann müsste die Induktivität $L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 \cdot C} \approx 1{,}13 \cdot 10^{-18} H$ betragen. Der Dipol müsste extrem kurz sein, um diese Werte zu erreichen. Eine Realisierung ist nicht möglich.