Optikversuche

Alfons Reichert

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
1. Einleitung 3
2. Grundlagen 4
2.1 Lichtwellen 4
2.2 Reflexion 4
2.3 Beugung 7
2.4 Brechung 11
3. LED-Lampen 13
3.1 Aufbau 13
3.2 Bauteile 13
3.3 Bau 14
4. Versuche 16
4.1 Spiegel 16
4.2 Dünne Schichten 18
4.3 Spalt/Steg 24
4.4 Gitter 27
4.5 CD/DVD/Schallplatte 29
4.6 Lochblende 35
4.7 Wassertropfen 40
4.8 Prisma 42
4.9 Lichtleiter 44
4.10 Regenbogen 45
5. Literaturverzeichnis 48

1. Einleitung

Beugung, Interferenz, Brechung, Reflexion und Totalreflexion des Lichtes gehören zu den absoluten Pflichtthemen in der Schulphysik. Es lassen sich eine Reihe interessanter Effekte zeigen und viele Anwendungsbeispiele finden. Als monochromatische Lichtquelle haben sich für Versuche zu diesen Themen Laser oder Laserpointer bestens bewährt. Möchte man die mit diesen Phänomenen verbundenen Farberscheinungen untersuchen, so war man bisher auf herkömmliche Glühlampen angewiesen. Dabei ist der experimentelle Aufwand erheblich, da sie ausgedehnte Lichtquellen sind und kein kohärentes Licht aussenden. Man muss mit einem Spalt ein schmales, möglichst helles Lichtbündel ausblenden. Moderne Leuchtdioden sind dagegen von Natur aus lichtstarke, nahezu punktförmige, kohärente Lichtquellen. Man benötigt für die Versuche zu den oben genannten Themen nur eine LED-Lampe mit 15° Abstrahlwinkel und einer speziellen Optik, so wie eine Linse mit f = 15 cm Brennweite. Auch zahlreiche Versuche zu den Themen Schatten und Farben werden erheblich vereinfacht, wie ich in meinem Skript Licht und Schatten auf dieser Internetseite gezeigt habe. Mit LEDs kann man zudem sehr einfach das Plancksche Wirkungsquantum bestimmen und sich den klassischen, recht aufwendigen Versuch zum Fotoeffekt sparen, wie ich in meinem Skript Optoelektronik dargelegt habe. In der Beleuchtungs- und Fernsehtechnik sind sie inzwischen mit riesigen Schritten auf dem Vormarsch, teilweise schon auf der Überholspur im Vergleich zu den herkömmlichen Leuchtmitteln. Man kann sie in allen Farben herstellen, ihre Lichtausbeute übersteigt die der Energiesparlampen um das Doppelte und ihre Lebensdauer ist 5 bis 10mal höher. Sie sind allerdings sehr wärmeempfindlich, was bei High-Power-LEDs eine besondere Kühlung erforderlich macht. Außerdem müssen sie an einer Konstantstromquelle betrieben werden. Aber auch in dieser Hinsicht wurden in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. LEDs sind meiner Meinung nach die Leuchtmittel der Zukunft, auch für die Schulphysik. Die Entwicklung der letzten Jahre bestätigt diese Vermutung sehr überzeugend. Heute kann man kaum noch Glühbirnen oder Energiesparlampen kaufen.

Stolberg, im Juli 2011 und im Februar 2021

2. Grundlagen

2.1 Lichtwellen

Licht hat nach Huygens Wellencharakter. Als Beweis führte er Interferenzphänomene an. Er erklärte sie mit der Vorstellung der Elementarwellen und formulierte dazu zwei Prinzipien, die ihm zur Ehre nachträglich als Huygensche Prinzipien bezeichnet wurden. Nach diesen Überlegungen ist jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer kreis- bzw. kugelförmigen Elementarwelle. Überlagern sich diese Elementarwellen, so ergeben sie die neue Wellenfront. Sie ist die Einhüllende der Elementarwellen. Bei der Interferenz können sich die Elementarwellen je nach Phasenverschiebung verstärken oder auslöschen. Man erhält Minima oder Maxima. Newton vertrat dagegen die Meinung, Licht bestehe aus kleinen Teilchen. Er konnte mit dieser Vorstellung die Reflexion und Brechung erklären, jedoch nicht die Interferenzerscheinungen.
Der Streit ist bis heute nicht wirklich beigelegt. Licht besteht nach heutiger Lehrmeinung einerseits aus kleinen Energieportionen, den Photonen, andererseits zeigt es Wellencharakter. Man umschreibt dieses Paradoxon mit dem nichts erklärenden Begriff Dualismus Welle-Teichen. Versucht man mit den Photonen die Interferenzerscheinungen zu deuten, so muss man ihnen sehr seltsame Eigenschaften zuschreiben. Sie gehen bei der Beugung am Doppelspalt gleichzeitig durch beide Spalte, um anschließend mit sich selbst zu interferieren. Dafür liefern sie eine überzeugende Erklärung des Fotoeffektes, bei dem durch Photonen aus Metallen Elektronen frei gesetzt werden. Sie spielen quasi mit den Elektronen Billard. Mit der Wellenvorstellung kann man dagegen den Fotoeffekt nur schwer erklären, dafür aber umso einfacher die Interferenzphänomene. Eine meiner Meinung nach schlüssigere Deutung habe ich in meinem Skript zum Thema Fotoeffekt auf dieser Webseite vorgestellt. Es bleibt abzuwarten, wie weit sie Anklang findet und sich als richtig erweist. Die Schüler empfinden dieses Kapitel der modernen Physik immer als unbefriedigend, da sie von ihren Lehrern sozusagen endgültige Antworten erwarten, die ihnen aber zurzeit niemand wirklich geben kann. Ein Weg aus dem Dilemma sind die unanschaulichen Wahrscheinlichkeitswellen, wie sie in der modernen Quantenphysik benutzt werden, möglicherweise auch die Wirkungswellen, wie ich sie in meinem Skript „Den Quanten auf der Spur...“ auf dieser Internetseite vorgestellt habe.

2.2 Reflexion

Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zweier Medien, so wird ein Teil des Strahles reflektiert, ein Teil dringt ins Medium ein und wird beim Übergang gebrochen. Für die Reflexion gilt das so genannte Reflexionsgesetz. Nach ihm liegen einfallender, reflektierter Strahl und Lot in einer Ebene. Außerdem sind der Winkel zwischen dem einfallenden Strahl und dem Lot, auch Einfallswinkel α genannt, und der Winkel zwischen dem reflektierten Strahl und dem Lot, auch Reflexionswinkel β genannt, gleich groß. Kurz formuliert gilt: Einfallswinkel α gleich Reflexionswinkel β. Dieses Gesetz lässt sich auch mit den Huygenschen Elementarwellen herleiten, wie in jedem Oberstufenphysikbuch[1)] mit einfachen geometrischen Überlegungen gezeigt wird. Besitzt die reflektierende Schicht eine Struktur in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes, so werden die Elementarwellen unter verschiedenen Winkeln gestreut, da jede auf ein etwas anders gerichtetes Oberflächenelement trifft. Die Elementarwellen interferieren miteinander und es können sich Maxima und Minima ausbilden, wie in Kapitel 2.3 genauer ausgeführt wird.

Fällt ein Lichtstrahl auf eine dünne Schicht aus durchsichtigem Material, wie eine Glasscheibe oder einen feinen Wasserfilm, so wird er zwei Mal reflektiert, an der Vorder- und an der Rückseite. Zwischen den reflektierten Wellen tritt eine Phasenverschiebung auf, die zu Interferenzen führt. Der optische Gangunterschied der beiden reflektierten Wellen 1' und 2' soll jetzt berechnet werden. Der geometrische Gangunterschied Δw beträgt, wie man aus der Abb. 1 entnehmen kann:

$$\Delta w = 2 * x - z,$$

der optische Δs

$$\Delta s = 2 * n * x - z, (1)$$

da der Weg x in der Folie mit dem Brechungsindex n verläuft.

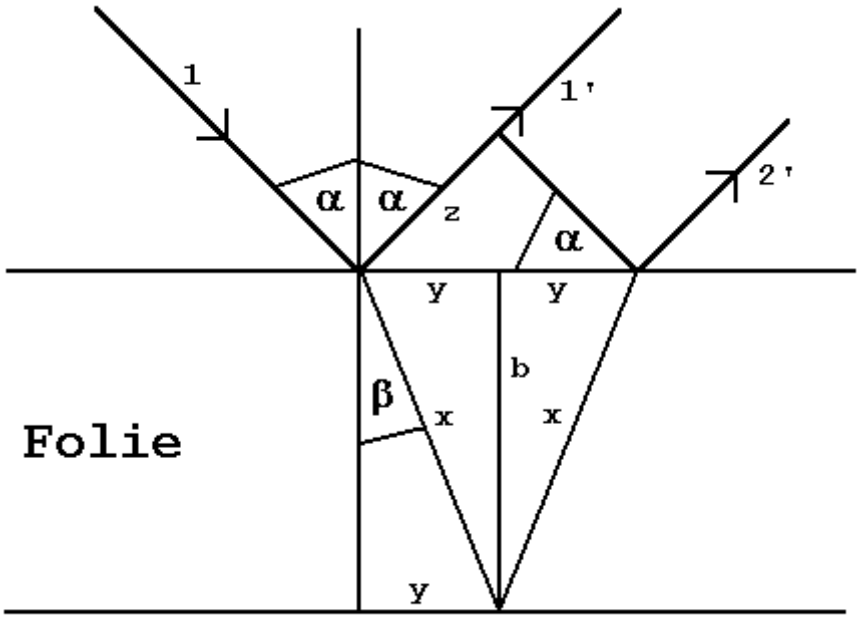

Abb.1: doppelte Reflexion an der Seifenlamelle

Aus Abb. 1 liest man ferner ab mit α als Einfallswinkel, β als Brechungswinkel und b als Dicke der Folie:

$$sin\beta = \frac{y}{x},$$

$$sin\alpha = \frac{z}{2y}$$

und

$$cos\beta = \frac{b}{x}.$$

Daraus folgt

$$x = \frac{b}{cos\beta}$$

$$\begin{aligned} z &= 2 * y * sin\alpha \\ &= 2 * x * sin\beta * sin\alpha \\ &= 2 * b * sin\beta * \frac{sin\alpha}{cos\beta}. \end{aligned}$$

Setzt man diese Ergebnisse in (1) ein, so erhält man:

$$\begin{aligned} \Delta s &= 2 * n * \frac{b}{cos\beta} - 2 * b * sin\beta * \frac{sin\alpha}{cos\beta} \\ &= 2 * b * \left(\frac{n}{cos\beta} - sin\beta * \frac{sin\alpha}{cos\beta}\right) \ (2). \end{aligned}$$

Aus dem Brechungsgesetz folgt:

$$sin\alpha = n * sin\beta.$$

Damit geht (2) über in

$$\begin{aligned} \Delta s &= 2 * b * \left(\frac{n}{cos\beta} - n * sin\beta * \frac{sin\beta}{cos\beta}\right) \\ &= 2 * b * \frac{n}{cos\beta} * (1 - sin^2\beta) \ (3). \end{aligned}$$

Mit der Beziehung

$$cos\beta = \sqrt{1 - sin^2\beta}$$

folgt

$$\Delta s = 2 * b * n * \sqrt{1 - sin^2\beta}\,.$$

Berücksichtigt man erneut das Brechungsgesetz, so gilt

$$\Delta s = 2 * b * n * \sqrt{1 - \frac{sin^2\alpha}{n^2}}\ .$$

Nimmt man n mit unter die Wurzel, so ergibt sich letztendlich ein optischer Gangunterschied von:

$$\Delta s = 2 * b * \sqrt{n^2 - sin^2\alpha}\ (4).$$

Eine Farbe wird an einer Stelle verstärkt, wenn sich insgesamt ein Gangunterschied von

$$\Delta s' = k * \lambda$$

zwischen den an der Vorder- und Rückseite reflektierten Strahlen ergibt. Da an der Vorderseite zusätzlich ein Phasensprung von $\lambda/2$ auftritt, muss für Δs' insgesamt gelten:

$$\Delta s' = \Delta s + \lambda/2.$$

Daraus folgt:

$$\Delta s = k * \lambda - \lambda/2 = (2k - 1) * \lambda/2\ ,$$

mit

$$k = 1,2,3\ \ldots$$

Eine Farbe wird an einer Stelle ausgelöscht, wenn sich insgesamt ein Gangunterschied von

$$\Delta s' = (2k - 1) * \lambda/2$$

ergibt und damit für Δs

$$\Delta s = k * \lambda.$$

2.3 Beugung

Stellt man in einen monochromatischen Lichtstrahl, der als ebene Welle angesehen werden kann, eine schmale Spaltblende, deren Breite im Bereich der Wellenlänge des Lichtes liegt, so beobachtet man hinter der Blende einen auf geweiteten Lichtstrahl. Auf einem Schirm erscheint ein zentraler Lichtfleck, der einen größeren Durchmesser hat als der ursprüngliche Lichtstrahl. Er ist rechts und links von hellen und dunklen Lichtpunkten umgeben. Man sagt, dass Licht wurde beim Durchgang durch die Blende gebeugt. Nach Huygens ist jeder Punkt der Blende Ausgangspunkt einer Elementarwelle, die sich überlagern und ein Interferenzmuster ergeben, das sich durch Maxima und Minima auszeichnet. Diese Muster lassen sich berechnen, wenn man die Intensität der einzelnen Elementarwellen unter Berücksichtigung

ihrer Phasenverschiebung addiert. Die Herleitung der Formel findet man in vielen Hochschullehrbüchern[2)]. Das Ergebnis lautet:

$$I = I_0 * \left(\frac{sin\left(\pi b sin\frac{\alpha}{\lambda}\right) * sin\left(n\pi g sin\frac{\alpha}{\lambda}\right)}{\pi b * sin\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right) * sin\left(\pi g sin\frac{\alpha}{\lambda}\right)} \right)^2 .$$

Darin bedeuten:
I: Intensität in Abhängigkeit vom Beugungswinkel α
I_0: Intensität bei α = 0°
b: Breite eines Spaltes in m
g: Abstand zweier Spalte in m
λ: Wellenlänge in m
n: Anzahl der Spalte.

Auswerten lässt sich die sehr komplizierte Formel nur mit Computerprogrammen, etwa Excel. Man kann für verschiedene Spaltanzahlen, Spaltbreiten, Spaltabstände und Wellenlängen die Intensitätsverteilung berechnen und graphisch darstellen, bei Bedarf auch für mehrere Wellenlängen gleichzeitig, etwa bei weißen Lichtquellen. Mit einfachen geometrischen Überlegungen, wie man sie in jedem Physikoberstufenbuch[1)] findet, lassen sich Formeln herleiten für die Winkel, unter denen man Maxima und Minima beim Spalt, Doppelspalt und Gitter beobachtet. Sie werden in der Schule meist benutzt, um die Wellenlänge verschiedener Farben des weißen Lichtes zu bestimmen. Die Überlegungen lassen sich am einfachsten am Beispiel des Doppelspaltes erläutern. Betrachten Sie dazu Abb. 1. Die Ziffern 1 und 2 bezeichnen die Wellennormalen der Elementarwellen, die von den beiden Spalten ausgehen. Man liest ab:

$$sin\,\alpha = \frac{s}{g}$$

$$tan\,\alpha = \frac{z}{l}.$$

Damit sich die beiden Elementarwellen im Punkt P verstärken, muss für ihren Gangunterschied s

$$s = k * \lambda$$

gelten mit

$$k = 0,1,2,3 \ldots$$

Damit sie sich auslöschen, muss

$$s = \frac{(2k-1) * \lambda}{2}$$

sein mit

$$k = 1,2,3 \ldots$$

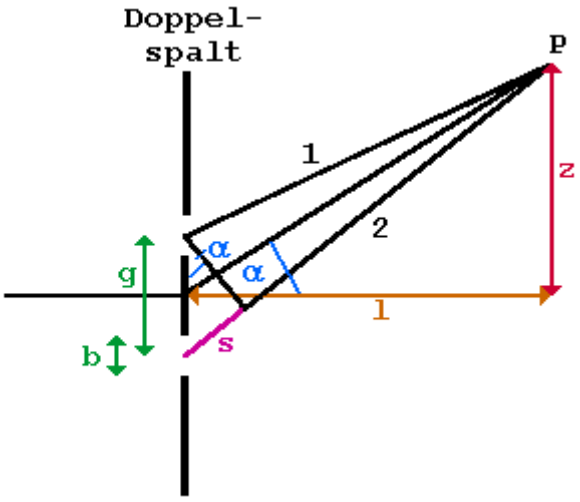

Abb.1: Beugung am Doppelspalt

Damit beobachtet man Maxima unter Winkeln, für die gilt:

$$sin\,\alpha_k = k * \frac{\lambda}{g}$$

$$\tan\alpha_k = \frac{z_k}{l}$$

und Minima unter Winkeln, für die gilt:

$$sin\alpha_k = \frac{(2k-1) * \lambda_k}{2 * g}$$

$$tan\alpha_k = \frac{z_k}{l}.$$

Darin bedeuten:
α_k: Winkel des Nebenmaximums/Nebenminimums k.Ordnung
k: Ordnung des Nebenmaximums/Nebenminimums
λ: Wellenlänge
g: Gitterkonstante
z_k: Abstand des k. Nebenmaximums/Nebenminimums vom Hauptmaximum
l: Entfernung Gitter-Schirm.

Die Winkel, unter denen Maxima und Minima auftreten, hängen von der Wellenlänge des Lichtes ab, wie die obigen Formeln zeigen. Daher wird weißes Licht bei Beugung und Interferenz am Doppelspalt in seine Farben auf gespalten. Nur das Hauptmaximum erscheint weiß, da sich dort alle Farben überlagern. Rotes Licht wird stärker gebeugt als blaues, weil seine Wellenlänge größer ist. Die gleichen Formeln ergeben sich für die Beugung an einem Gitter aus einer Vielzahl von Spalten.
Beugung tritt auch auf, wenn ein Lichtstrahl an einem Gegenstand mit schmalen Stegen, die wie bei einer CD nahe beieinander liegen, reflektiert wird. Es gelten die gleichen mathematischen Gesetze wie bei der Beugung an einem Transparenzgitter. Nach Huygens breiten sich die Elementarwellen in alle Richtungen aus, also auch rückwärts in Richtung des einfallenden Strahles. Daher beobachtet man bei einem durchscheinenden Gitter aus Glas ein Transparenz- und ein Reflexionsspektrum.

Für die Beugung an einem Spalt oder einem Steg erhält man in ähnlicher Weise folgende Bedingungen für die Nebenmaxima

$$sin\,\alpha_k = (2k+1) * \frac{\lambda}{2 * g}$$

$$\tan\alpha_k = \frac{z_k}{l}.$$

und für die Minima:

$$sin\,\alpha_k = k * \frac{\lambda}{g}$$

$$\tan\alpha_k = \frac{z_k}{l}$$

mit

$$k = 1{,}2{,}3\ldots$$

Nebenmaxima und Minima treten auf, weil jeder Punkt des Spaltes Elementarwellen aussendet, die im Punkt P einen Gangunterschied aufweisen und sich daher verstärken oder auslöschen können. Zusätzlich beobachtet man unter 0° das Hauptmaximum, da der Gangunterschied bei diesem Winkel für alle Elementarwellen null beträgt.
Bei kreisrunden Blendenöffnungen beobachtet man Beugungs- und Interferenzphänomene in Form von Ringen, weil das Loch rotationssymmetrisch ist. Ein heller weißer Fleck in der Mitte bildet das Hauptmaximum, das für alle Wellenlängen an der gleichen Stelle liegt. Die einzelnen Farben überlagern sich zu weiß. Für alle Nebenmaxima und Nebenminima sind die Winkel α_k, unter denen sie auftreten, von der Wellenlänge abhängig. Für die ersten drei Minima gilt mit r als Durchmesser der kreisförmigen Öffnung und λ als Wellenlänge [3)]:

$$sin\alpha_1 = 0{,}61 * \frac{\lambda}{r}$$
$$sin\alpha_2 = 1{,}116 * \frac{\lambda}{r}$$
$$sin\alpha_3 = 1{,}619 * \frac{\lambda}{r} .$$

Die Maxima liegen dazwischen bei Winkeln, für die gilt:

$$sin\alpha_1 = 0{,}819 * \frac{\lambda}{r}$$
$$sin\alpha_2 = 1{,}346 * \frac{\lambda}{r}$$
$$sin\alpha_3 = 1{,}85 * \frac{\lambda}{r} .$$

Die Beugungsordnung ist keine ganze Zahl mehr. Die Beugungswinkel für eine kreisrunde Öffnung sind etwas größer als die für einen Spalt. Die Formeln erhält man, wenn man über alle Elementarwellen der Kreisscheibe integriert. Die Rechnung ist sehr aufwändig und mathematisch anspruchsvoll.

2.4 Brechung

Geht ein Lichtstrahl von einem Medium in ein anderes über, so ändert sich seine Ausbreitungsgeschwindigkeit. Das hat zur Folge, dass er aus seiner Richtung abgelenkt wird. Mit Hilfe der Huygenschen Prinzipien lässt sich ein Gesetz herleiten, das den Vorgang quantitativ beschreibt, das Brechungsgesetz. Die Herleitung findet man in jedem Physikoberstufenbuch[1)]. Es lautet:

$$\frac{sin\,\alpha}{sin\,\beta} = \frac{c_1}{c_2} = n .$$

Darin bedeuten:
α: Einfallswinkel, Winkel zwischen einfallendem Strahl und Lot
β: Brechungswinkel, Winkel zwischen gebrochenem Strahl und Lot
c_1: Lichtgeschwindigkeit im 1. Medium
C_2: Lichtgeschwindigkeit im 2. Medium
n: Brechungsindex.

Da die Geschwindigkeit des Lichtes in vielen Stoffen auch von der Wellenlänge abhängt, wird weißes Licht bei der Brechung in seine Farben auf gespalten. Diese Erscheinung nennt man Dispersion. Sie lässt sich experimentell am einfachsten mit einem Prisma zeigen. Ist die Geschwindigkeit im zweiten Medium größer als im Medium, aus dem der Lichtstrahl auf die Grenzfläche trifft, so übersteigt der Brechungswinkel den Einfallswinkel. Der Strahl wird vom Lot weg gebrochen und nicht wie beim umgekehrten Vorgang zum Lot hin. Ab einem bestimmten Einfallswinkel müsste der Brechungswinkel größer als 90° sein, der Lichtstrahl tritt nicht mehr ins zweite Medium ein, sondern verbleibt im ersten. Er wird an der Grenzfläche

nach dem Reflexionsgesetz reflektiert. Da ein Teil des Lichtes auch schon bei kleineren Winkeln an der Grenzfläche reflektiert wurde, spricht man ab dem Grenzwinkel von Totalreflexion. Sie wird z.B. in Lichtleitern ausgenutzt. Für den Grenzwinkel der Totalreflexion gilt nach dem Brechungsgesetz mit α = 90°

$$\sin \beta_g = \frac{1}{n} ,$$

denn der Lichtweg ist umkehrbar. Für den Übergang Glas-Luft gilt das gleiche Gesetz wie für den Übergang Luft-Glas. Es sind nur die Winkel vertauscht. β wird zum Einfallswinkel, α zum Brechungswinkel.

3. LED-Lampen

3.1 Aufbau

Die im nächsten Kapitel beschriebenen Versuche kann man im Prinzip mit einer LED-Taschenlampe durchführen. Manchmal lässt man die Versuche während des Unterrichtes aber längere Zeit laufen, damit die Schüler die Vorgänge ausführlich diskutieren und ein Versuchsprotokoll anfertigen können. Dann wäre der Batterieverbrauch auf Dauer sehr hoch. Effektiver ist es, eine Lampe zu bauen, die man an der Steckdose betreiben kann. Dazu bietet die Firma Conrad-Electronic eine Vorschaltplatine für das Wechselstromnetz an, die an ihrem Ausgang einen Gleichstrom von 18 - 20 mA zum Betrieb einer LED liefert. Ihre genaue Funktion habe ich im Skript Optoelektronik auf dieser Webseite beschrieben. Sie muss berührungssicher in ein Plastikgehäuse eingebaut werden, um Unfälle zu vermeiden. Als Leuchtmittel dient eine kaltweiße, superhelle LED mit einer Lichtstärke von 30000 mcd und einem Abstrahlwinkel von 15°. Man kann auch eine warmweiße, superhelle LED mit 21000 mcd Lichtstärke und einem Abstrahlwinkel von 15° verwenden. Durch eine LED-Fassung mit Linse lässt sich das Licht weiter bündeln. Weiße LEDs werden in den Farbtönen kaltweiß, warmweiß und normalweiß angeboten. Sie unterscheiden sich in ihrer so genannten Farbtemperatur. Je höher sie ist, umso greller erscheint das Licht. Für eine kaltweiße beträgt sie 6000 K, für eine warmweiße 3300 K. Ein Körper, der auf diese Temperatur erhitzt wird, strahlt Licht mit diesem Farbton ab. Das weiße Licht wird bei allen LEDs durch Überlagerung der vier Farben rot mit der Wellenlänge $\lambda = 623nm$, gelb mit $\lambda = 592nm$, grün mit $\lambda = 525nm$ und blau mit $\lambda = 470nm$ erzeugt. Bei kaltweißen überwiegt die Intensität der blauen und grünen Farbtöne, bei warmweißen die der roten und gelben. Warmweiße LEDs sind für Wohnräume besser geeignet, kaltweiße für Arbeitsräume und Versuche. Mit etwas Bastelerfahrung kann man die Lampe selbst herstellen. Sie ist einerseits lichtstark genug, um bei verdunkeltem Raum die Effekte für alle sehr gut sichtbar zu machen, andererseits aber nicht so hell, dass man geblendet wird. Allerdings sollte man nie direkt ohne Filter in die Lampe schauen. Man sollte ferner darauf achten, dass sie bei den Experimenten nie direkt in die Richtung der Schüler zeigt. Aber das ist bei herkömmlichen Halogenlampen auch nicht anders. Einige Versuche zur Brechung und Reflexion sind beeindruckender, wenn man ein 1W-LED-Modul mit einer Lichtausbeute von 60-100 lm verwendet. Es ist wesentlich heller. Gute Ergebnisse habe ich mit einer High-Power-LED der Firma Alustar mit einem Abstrahlwinkel von 3° erzielt. Bündelt man ihr Licht zusätzlich mit einer Linse der Brennweite f = 15 cm, so erhält man ein breites Lichtbündel, ähnlich einer Scheinwerferlampe. Für die Versuche zur Beugung und Brechung muss man dann aus dem sehr hellen und breiten Lichtstrahl mit einer Spalt- oder Lochblende ein schmales Bündel ausblenden.

3.2 Bauteile

Für die Standard-LED-Lampe mit einer herkömmlichen LED benötigt man folgende Teile. Sie sind allesamt etwa bei Conrad-Electronic oder einem anderen Elektronikversand erhältlich.

1 Kunststoffgehäuse 85x50x29mm
1 zweiadriges Netzkabel mit Stecker
1 Zugentlastung
1 LED-Fassung evtl. mit Optik für 5mm LED
1 Mikroschalter 1x ein/aus

1 LED, kaltweiß, 20mA, 15°, 30000mcd
1 Vorschaltplatine Eingang:230V~, Ausgang: 18-20mA=
1 Schraube 20x3mm
2 Muttern M3
2 Unterlegscheiben M3
Schaltlitze
Lötmaterial

Für eine High-Power-LED-Lampe braucht man folgende Teile. Sie sind ebenfalls bei Conrad-Electronic oder einem anderen Elektronikversand erhältlich.
1 Kunststoffgehäuse 115x60x35mm
1 zweiadriges Netzkabel mit Stecker
1 Zugentlastung
1 Mikroschalter 1x ein/aus
1 1W-LED-Modul, kaltweiß, 350mA, 3°
1 LED-Konverter Einngang:230V~, Ausgang: 350mA=
4 Schraube 25x4mm
1 Stück Doppelklebefolie 30x20mm
Lötmaterial

3.3 Bau

Für die Standard-LED-Lampe bohrt man mit einem Holzbohrer in beide Kopfseiten des Gehäusedeckels ein Loch mit 8 mm Durchmesser. Das eine Loch wird mit einer Feile so erweitert, dass die Zugentlastung samt Netzkabel hineinpasst. Ins zweite Loch schraubt man die LED-Fassung. In die Oberseite des Deckels bohrt man 2,5 cm von der Kopfseite entfernt, in der sich die LED befindet, mittig ein Loch der Größe 6 mm. Es ist für den Mikroschalter bestimmt. 1,5 cm oberhalb der anderen Kopfseite wird 1,5 cm vom linken Rand ein Loch mit 3 mm Durchmesser gebohrt. Es dient dazu, die Vorschaltplatine am Gehäuse zu befestigen. Man setzt die LED in die Fassung ein und verschraubt den Mikroschalter am Gehäusedeckel. Die Platine befestigt man mit der Schraube, den beiden Muttern und den Unterlegscheiben ebenfalls am Gehäusedeckel. Eine Mutter dient als Abstandshalter zwischen dem Gehäusedeckel und der Platine, da die Lötstellen auf der Unterseite der Platine verhindern, dass sie fest am Gehäusedeckel anliegt. Am Netzkabel wird die Außenisolierung auf einer Länge von 2 cm entfernt. Danach werden die beiden Adern 0,5 cm weit abisoliert. Die einzelnen Litzen jeder Ader werden verlötet oder mit einer entsprechenden Hülse zusammengefasst. Das Netzkabel wird über die Zugentlastung in die dafür vorgesehene Bohrung gepresst und mit dem Eingang der Platine verschraubt. Die Kathode K des Ausganges der Vorschaltplatine verbindet man mit etwas Schaltlitze mit der Kathode, dem kurzen Beinchen, der LED, den Anodenausgang mit einer Lötöse des Schalters und die andere Lötöse des Schalters mit der Anode, dem langen Beinchen, der LED. Zum Schluss verschraubt man den Boden des Gehäuses mit dem Deckel.

Für die High-Power-LED-Lampe bohrt man im oberen Teil des Gehäusedeckels vier 5 mm-Löcher. Die in der Aluplatte der LED vor gebohrten Löcher verwendet man dabei als Bohrschablone und überträgt ihre Anordnung mit einem Filzstift auf den Gehäusedeckel. Die LED wird mit den vier Schrauben am Deckel befestigt. Der Schalter wird an einer Längsseite

des Deckels verschraubt und zwar im oberen Teil. Dazu bohrt man ein 6 mm-Loch etwa 4 cm vom oberen Rand entfernt. Die Zugentlastung wird an der Kopfseite des Deckels befestigt, die der Lampe gegenüber liegt. Für sie braucht man ein 8 mm-Loch, das man mit einer Feile so erweitert, dass die Zugentlastung samt Kabel hineinpasst. Den Konverter klebt man mit einem Stück Doppelklebefolie an die Innenseite des Deckels und verbindet seinen Wechselstromeingang mit den Polen des Netzkabels, nachdem man die Adern des Kabels wie oben beschrieben abisoliert und gefasst hat. Das schwarze Kabel der LED verbindet man mit dem Minuspolausgang des Konverters, das rote Kabel mit einer Lötöse des Schalters und die andere Lötöse des Schalters mit dem Pluspolausgang des Konverters. Zum Schluss verschraubt man den Boden des Gehäuses mit dem Deckel. Die fertige Standard-LED-Lampe zeigt Abb. 1, die High-Power-LED-Lampe Abb. 2.

Abb.1: Standard-LED-Lampe

Abb.2: High-Power-LED-Lampe

4. Versuche

4.1 Spiegel

Versuch:
Aufbau:
Abb. 1 zeigt den Aufbau des Versuches. Man benötigt eine High-Power-LED-Lampe, eine Linse mit der Brennweite f = 15 cm, einen drehbaren ebenen Spiegel, einen Wölb- und einen Hohlspiegel mit großer Brennweite und zwei Mattscheiben als Schirme.

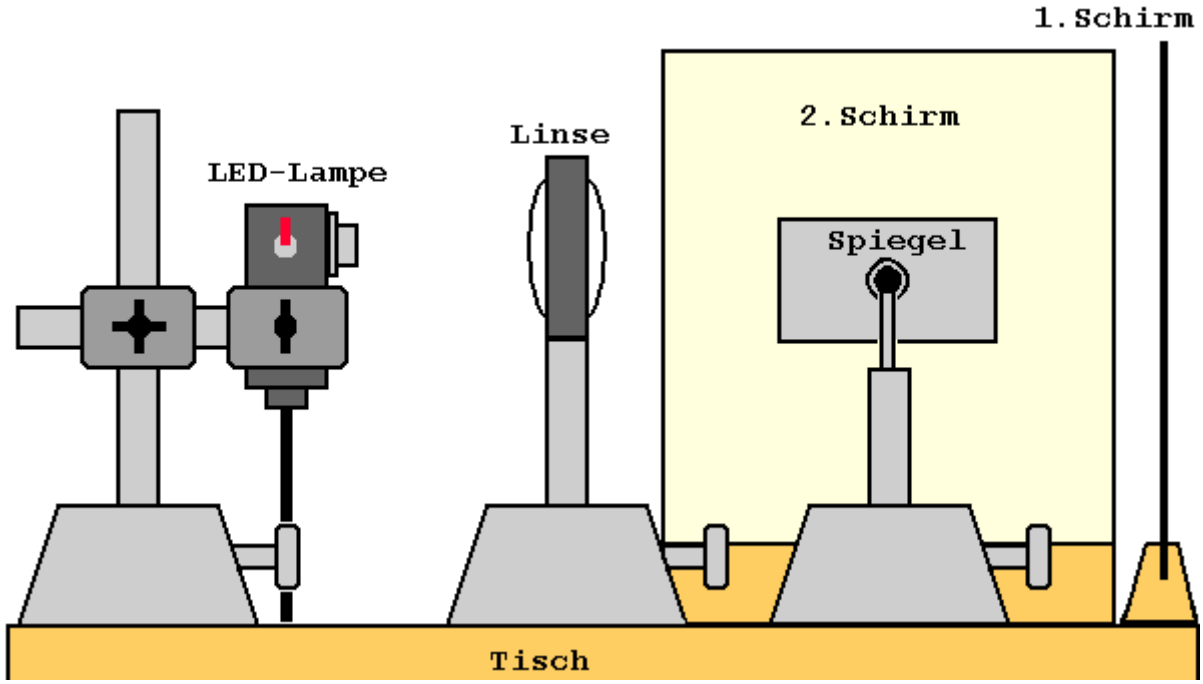

Abb.1: Versuchsaufbau

Durchführung:
Man stellt die beiden Schirme senkrecht zueinander vor der Lampe so auf, dass der Weg des Lichtkegels zu beiden etwa gleich ist. Der erste Spiegel steht senkrecht zum Lichtkegel, der zweite parallel. Man bildet die LED der Lampe mit der Linse auf dem ersten Schirm als weißen Fleck scharf ab. Dann stellt man in den Lichtstrahl den ebenen Spiegel unter einem Winkel von 45° zur Lichtrichtung. Anschließend ersetzt man den ebenen Spiegel durch den Hohl- bzw. Wölbspiegel und dann durch die weiße Metallscheibe. Eventuell sprüht man in den Lichtweg Nebel aus einer Nebelmaschine. Man muss unbedingt darauf achten, dass der Lichtkegel nie in Schülerrichtung zeigt, denn die LED-Lampe blendet sehr stark und könnte zu Verletzungen der Netzhaut führen.
Beobachtung:
Der Lichtfleck erscheint beim ebenen Spiegel auf dem zweiten Schirm als gleich großer Fleck wie auf dem ersten Schirm. Mit dem Wölbspiegel wird der Lichtfleck auf dem zweiten Schirm größer, mit dem Hohlspiegel je nach Entfernung zum Schirm und je nach Brennweite des Spiegels größer oder kleiner. Mit der weißen Platte beobachtet man einen Lichtschein auf

dem zweiten Schirm ohne genau abgegrenzten Rand. Man sieht im abgedunkelten Raum den genauen Lichtweg im Nebel der Nebelmaschine.

Erklärung:

Trifft ein Lichtstrahl auf einen ebenen Spiegel, so wird er nach dem Reflexionsgesetz als Strahl reflektiert (s. Abb. 2). Ein Hohlspiegel bündelt den Strahl in einem Punkt, dem Brennpunkt, da die spiegelnde Fläche auf einem inneren Kreisbogen liegt (s. Abb. 3). Ein Wölbspiegel zerstreut das Licht, weil die Spiegelfläche einen äußeren Kreisbogen bildet (s. Abb. 4). Die Strahlenverläufe lassen sich bei beiden Spiegeln mit dem Reflexionsgesetz konstruieren, wobei das Lot dem Radius an der Stelle entspricht, an dem das Licht auf den Spiegel trifft. Eine weiße, nicht sehr glatte Metalloberfläche kann man sich aus vielen kleinen Spiegelelementen zusammengesetzt denken, die nach dem Zufallsprinzip ausgerichtet sind. An ihnen wird jeweils ein kleiner Teil des Lichtstrahles nach dem Reflexionsgesetz in unterschiedliche Richtungen reflektiert. Dadurch wird der einfallende Lichtstrahl in alle Richtungen zerstreut. Man spricht von diffuser Reflexion (s. Abb. 5).

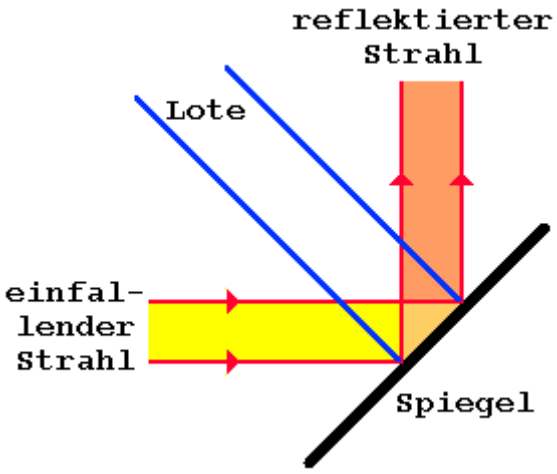

Abb.2: Reflexion am ebenen Spiegel

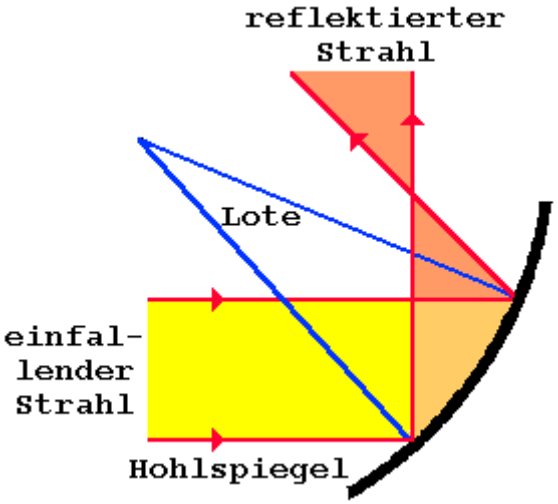

Abb.3: Reflexion am Hohlspiegel

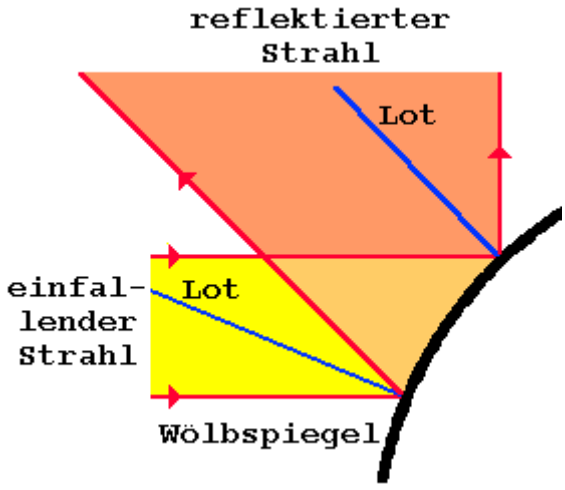

Abb.4: Reflexion am Wölbspiegel

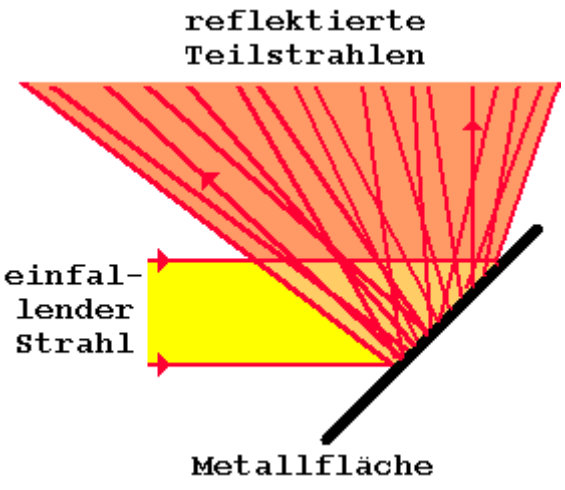

Abb.5: Reflexion an einem Metall

4.2 Dünne Schichten

Besonders beeindruckende, schillernde Farben kann man bei der Reflexion an dünnen Schichten beobachten, z.B. an Insektenflügeln, Seifenlamellen oder Ölflecken auf Wasser. Sie faszinieren die Schülerinnen und Schüler immer wieder. Sie haben aber auch eine ganz praktische Bedeutung, wie ich mit den folgenden Versuchen zeigen werde.

Versuch 1:

Aufbau:

Abb. 1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Versuches mit einer Seifenlamelle aus der Vogelperspektive. Man benötigt eine Drahtschleife mit einem Durchmesser von ca. 5 cm, eine Standard-LED-Lampe mit Optik, eine Kondensorlinse mit f = 15 cm, eine Abbildungslinse mit f = 20cm und großer Linsenöffnung, eine weiße Wand oder Leinwand als Schirm und entsprechendes Stativmaterial. Die Seifenlösung stellt man sich wie folgt her: Man mischt in einem Becherglas V = 250 ml Wasser, einen Strang Flüssigseife aus einem Seifenspender von ca. l = 2 cm Länge und V = 20 ml Glykol. Die Flüssigkeit muss im Glas so hoch stehen, dass die Drahtschleife ganz in die Lösung eintauchen kann.

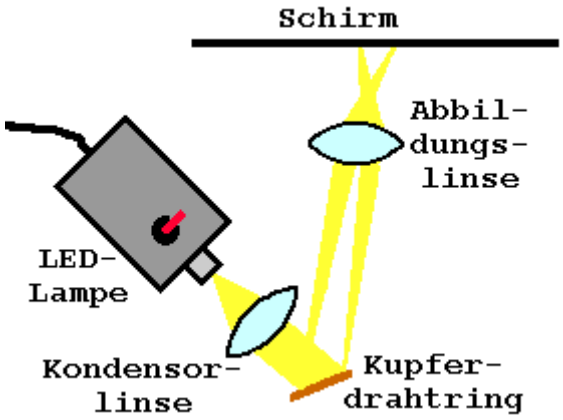

Abb.1: Versuchsaufbau

Durchführung:

Man hängt die Drahtschleife an einer Stativstange auf und richtet die Kondensorlinse mit f = 15 cm so aus, dass die Drahtschleife unter einem Winkel von 40-50° von der Seite voll ausgeleuchtet wird. Dann bildet man mit der Abbildungslinse den Drahtring auf dem Schirm scharf ab. Notfalls muss man die Drahtschlinge und die Lampe etwas drehen, damit das Bild der Lamelle auf den Schirm fällt. Man taucht die Drahtschleife ganz in die Flüssigkeit ein und zieht das Becherglas langsam unter der Schleife weg, so dass sich eine stabile Lamelle bildet.

Beobachtung:

Zunächst erscheint die Drahtschleife als weißer Lichtfleck auf der Leinwand. Nach kurzer Zeit bilden sich am oberen Rand der Lamelle, im Bild der Schleife am unteren Rand, farbige Streifenmuster aus den Farben der LED rot, gelb, grün und blau aus, die über die Lamelle nach unten wandern. Bei leichten Erschütterungen verwirbeln sie. Nach einiger Zeit wird der obere Rand der Lamelle dunkel, bevor kurz darauf die Lamelle zerplatzt. Sollte sich die Lamelle nicht so lange halten, muss man den Durchmesser des Ringes verkleinern.

Erklärung:

Das einfallende Licht der LED wird an der Vorder- und Rückseite der Lamelle zum Teil reflektiert. Die Strahlen weisen einen Gangunterschied auf, da der Strahl, der an der Rückseite

reflektiert wird, einen längeren optischen Weg zurücklegen muss. Außerdem tritt an der Vorderseite ein Phasensprung von λ/2 auf. Am Anfang ist die Lamelle so dick, dass die Kohärenz des LED-Lichtes nicht ausreicht, um Interferenzen zu erzeugen, weil der Lichtweg des zweiten Strahles 2' sehr viel länger ist als der des ersten 1' (s. Abb. 2). Durch die Gewichtskraft sinkt ihre Dicke bis in den Bereich der Wellenlängen des Lichtes und die beiden Strahlen können sich gegenseitig verstärken oder auslöschen. Da für verschiedene Wellenlängen des weißen Lichtes die Phasenverschiebung bei gleichem optischen Gangunterschied unterschiedlich ausfällt, bilden sich Stellen auf der Lamelle aus, an denen sich einzelne Farben verstärken oder auslöschen. Im letzten Fall erstrahlt die Lamelle in der Komplementärfarbe. Nach einiger Zeit ist die Lamelle im oberen Teil so dünn, dass ihre Dicke unter einer Viertelwellenlänge liegt. Die beiden Wellen besitzen für alle Farben einen fast konstanten Gangunterschied von λ/2 wegen des Phasensprunges an der Vorderseite der Lamelle. Sie löschen sich daher ständig aus. Die Lamelle erscheint dunkel.

Die Interferenzen an dünnen Plättchen kann man ausnutzen, um die Dicke einer Overheadprojektorfolie zu bestimmen. Bestrahlt man ein Glimmerblättchen mit einer Quecksilber- oder Natriumdampflampe, so beobachtet man im reflektierten Licht rote und grüne bzw. gelbe Interferenzringe. Diese Erscheinung wurde zuerst von Pohl beschrieben und erklärt. Durch Zufall habe ich entdeckt, dass man die Ringe auch erhält, wenn man eine Overheadprojektorfolie bestrahlt. Sie sind zwar lichtschwächer als bei einem Glimmerblatt, erlauben es aber dennoch, die Dicke der OH-Folie zu ermitteln. Wie gut die Ringe ausgebildet sind, hängt allerdings stark von der verwendeten Folie ab. Hier hilft nur probieren.

Versuch 2:

Aufbau:

Man benötigt eine Quecksilberdampflampe, eine OH-Folie und zwei Gewichte und entsprechendes Stativmaterial.

Durchführung:

Man löchert die OH-Folie aus Polyethylen mit einem Locher an beiden schmalen Seiten etwa in der Mitte. An einer Seite hängt man sie an den beiden Löchern auf und spannt sie an den beiden gegenüberliegenden Löchern durch Anhängen zweier kleiner Massestücke (z.B. 100 g). Dann bestrahlt man sie mit einer Quecksilberdampflampe, deren Rückseite geschwärzt ist. Man markiert sich die Mitten zweier benachbarter grüner bzw. roter Interferenzstreifen an gegenüberliegenden Seiten der Ringe. Mit einem Lineal misst man den Durchmesser d der Ringe und die Entfernungen A Folie-Lampe und B Folie-Wand.

Beobachtung:

Im reflektierten Licht beobachtet man an der Wand rote und grüne Interferenzringe. Bei einem Versuch erhält man für zwei benachbarte grüne Ringe z.B. folgende Werte:

$d_1 = 130\ cm$

$d_2 = 136{,}5\ cm$

$A = 0{,}1m$

$B = 2\ m$

$n = 1{,}51$

$\lambda = 546\,nm.$

Auswertung:

Bei zwei benachbarten Ringen unterscheiden sich die Werte für k um 1, so dass mit Gleichung (4) aus Kapitel 2.2 gilt:

$$\lambda = \Delta s_1 - \Delta s_2$$
$$= 2 * b * \left(\sqrt{n^2 - sin^2\alpha_1} - \sqrt{n^2 - sin^2\alpha_2}\right).$$

Dabei muss man beachten, dass der innere Ring die höhere Ordnung k aufweist, der Gangunterschied bei ihm also größer ist. Löst man diese Gleichung nach b auf, so erhält man:

$$b = \frac{\lambda}{2 * \left(\sqrt{n^2 - sin^2\alpha_1} - \sqrt{n^2 - sin^2\alpha_2}\right)}$$

Es gilt noch, α_1 und α_2 zu bestimmen, um b ausrechnen zu können. Aus Abb. 2 liest man ab:

$$tan\alpha = \frac{r}{A + B} = \frac{d}{2 * (A + B)}.$$

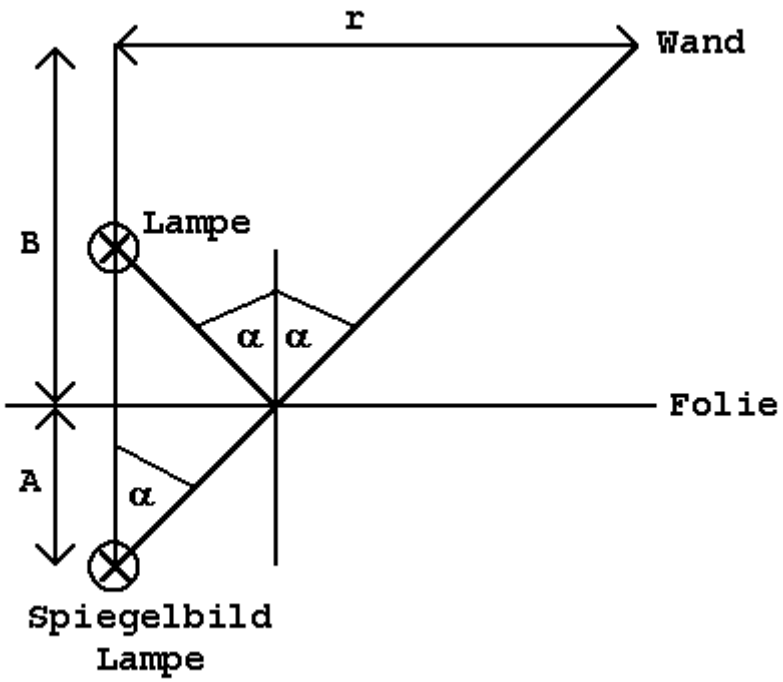

Abb.2: Geometrie der Versuchsanordnung

Mit den Versuchsergebnissen folgt:

$\alpha_1 = 17{,}2°;\ \alpha_2 = 18{,}0°.$

Damit errechnet sich b zu:

$$b = 0{,}1\ mm.$$

Dieser Wert stimmt sehr gut mit der auf einigen Packungen angegebenen Dicke überein. Man kann die Dicke aber auch mit einer Mikrometerschraube oder mit der Messuhr des Dilatometers überprüfen. Dazu drückt man die Messspitze der Uhr gegen einen schweren Gegenstand, z.B. einen Trafo, stellt sie auf Null und klemmt die Folie zwischen Messuhr und Trafo.

Als dünne Reflexionsschicht kann auch eine Luftschicht dienen. Newton hat zum ersten Mal einen entsprechenden Versuch beschrieben. Eine Linse mit sehr großem Krümmungsradius wird auf eine planparallele Glasplatte gepresst. Zwischen den beiden bildet sich eine keilförmige Luftschicht. Bestrahlt man die Anordnung mit einem parallelen weißen Lichtbündel, so wird das Licht einerseits an der Unterseite der Linse und andererseits an der Oberseite der Platte reflektiert. Die beiden Wellen weisen einen Gangunterschied auf und interferieren miteinander. Es treten farbige Ringe auf, die sich mit einer Linse auf einem Schirm abbilden lassen. Die benötigte Anordnung aus Linse und Glasplatte wird von der Fa. Leybold für die Schule angeboten. Zusätzlich ist auf der Glasplatte eine Skala angebracht, die es erlaubt, den Radius der Ringe zu ermitteln. Mit ihr führt man den folgenden Versuch durch.

Versuch 3:

Aufbau:
Abb. 3 zeigt den benötigten Versuchsaufbau. Man benötigt eine Standard-LED-Lampe, die Anordnung aus Linse und Glasplatte und eine Sammellinse mit der Brennweite f = 15 cm.

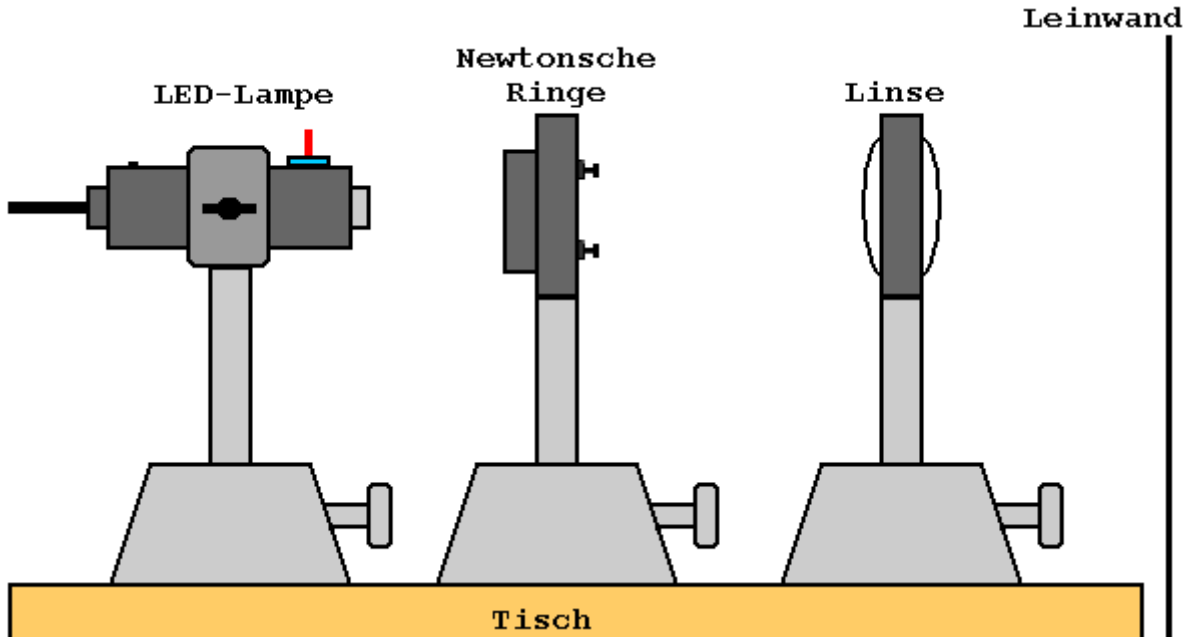

Abb.3: Versuchsaufbau

Durchführung:

Man beleuchtet die Linse samt Glasplatte mit der LED-Lampe und bildet die Anordnung mit der Sammellinse auf dem Schirm scharf ab.

Beobachtung:

Man sieht konzentrische Kreise in den Farben blau, grün, gelb und rot mit wenigen Millimetern Durchmesser.

Auswertung:

Da der Krümmungsradius R der Linse sehr groß ist, verlaufen die Unterkante der Linse und die Oberkante der Glasplatte fast parallel zueinander (s. Abb. 4). Der Luftspalt ist daher zumindest abschnittsweise gleich dick. In Kapitel 2.2 wurde gezeigt, dass für den optischen Wegunterschied zwischen der Linse und der planparallelen Platte in diesem Fall gilt:

$$\Delta s = 2 * b * \sqrt{n^2 - sin^2\alpha}\ .$$

Da das Licht nahezu senkrecht auf die Glasplatte einfällt und der Brechungsindex der Luft n = 1 ist, vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$\Delta s = 2 * b\ (1).$$

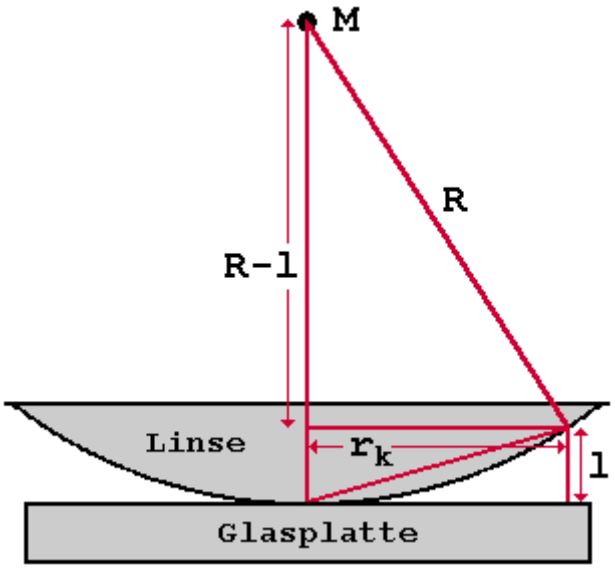

Abb.4: Anordnung Newtonsche Ringe

Bei der Reflexion an der Oberkante der Glasplatte tritt ein Phasensprung von λ/2 auf. Damit sich die beiden reflektierten Wellen für eine gegebene Wellenlänge gegenseitig verstärken, muss somit gelten:

$$\Delta s = k * \lambda - \lambda/2 = (2k - 1) * \lambda/2\ \ (2),$$

mit

$$k = 1,2,3 \ldots$$

Gleichsetzen von (1) und (2) liefert:

$$2 * b = (2k - 1) * \lambda/2 \ (3).$$

Da der Abstand b der beiden Glaskörper nach außen hin zunimmt, verstärken sich die Wellen der einzelnen Wellenlängen in verschiedenen Entfernungen r vom Berührungspunkt der Glaskörper. Aus Abb. 4 kann man einen Zusammenhang zwischen dem Radius r_k des k. Ringes einer Farbe und der Dicke des Spaltes b herleiten. Nach dem Satz des Pythagoras gilt:

$$R^2 + r_k^2 = (R - b)^2.$$

Löst man die Klammer auf und vernachlässigt den Faktor mit b^2, da b sehr klein ist, so folgt:

$$b = \frac{r_k^2}{2R}.$$

Setzt man dieses Ergebnis in (3) ein, so ergibt sich für die Radien der Kreise in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ:

$$r_k = \sqrt{R * (2k - 1) * \lambda/2}.$$

Für das rote Licht ist λ_r = 623 nm und für blaue λ_b = 470 nm. Nimmt man für den Krümmungsradius R = 4 m an, so erhält man für die Radien r_{3r} und r_{3b} der 3. Ringe mit k = 3:

$$r_{3r} = 2{,}5\ mm;\ r_{4b} = 2{,}2\ mm.$$

Ein quantitativer Vergleich mit den Versuchsergebnissen ist nicht möglich, da der Krümmungsradius nicht genau bekannt ist und sich beim fertigen Versuch der Firma Leybold mit Einstellschrauben verändern lässt.

Die Reflexionen an dünnen Schichten werden eingesetzt, um Gläser zu entspiegeln. Dazu bedampft man das Glas mit einer dünnen Schicht aus Kryolith, einem durchsichtigen Mineral mit einem kleineren Brechungsindex n als Glas. Hat sie eine Dicke d = λ/4, so löschen sich die an der Vorder- und Rückseite reflektierten Wellen gegenseitig aus, da ihr Gangunterschied

$$\Delta s = 2 * \lambda/4 = \lambda/2$$

beträgt. In diesem Fall tritt an beiden Grenzflächen ein Phasensprung von λ/2 auf, so dass er nicht berücksichtigt werden muss. Weil die Schicht für verschiedene Wellenlänge unterschiedlich dick sein müsste, kann man die Entspiegelung nur für eine Wellenlänge optimieren. Man bezieht sich auf gelbes Licht mit der Wellenlänge λ = 600 nm. Alle anderen Farben werden im reflektierten Licht zwar auch geschwächt, aber nicht völlig gelöscht. Der Gelbanteil wird dagegen komplett durchgelassen. Das Glas schimmert in der Reflexion bläulich. Dampft man mehrere unterschiedlich dicke Schichten auf, so können die Reflexe für einen größeren Spektralbereich gesenkt werden. Man erreicht einen Reflexionsgrad von über 99,9%.

4.3 Spalt/Steg

In der Schule werden die Beugungs- und Interferenzphänomene am Einzel- bzw. Doppelspalt häufig benutzt, um die Wellenlänge eines Lasers oder Laserpointers zu bestimmen. Es lassen sich viele weitere interessante Anwendungen finden, wie ich in den folgenden Versuchen zeigen werde. Zuerst sollen jedoch die in Kapitel 2.3 hergeleiteten Formeln überprüft werden.

Versuch 1:

Aufbau:

Abb.1 zeigt den Aufbau des Versuches. Man benötigt einen Laser oder Laserpointer, einen Diahalter, verschiedene Spalte und Stege, etwa die Anordnungen LH46993 und LH46997 der Firma Leybold und eine weiße Wand oder Leinwand als Schirm.

Durchführung:

Man befestigt den Laserpointer mit einer Klemme und einer Muffe an einem Stativ. Dreht man ihn so, dass der Einschaltknopf mit eingeklemmt wird, so leuchtet der Laserpointer dauerhaft und man kann mit einem Filzstift die Maxima und Minima auf dem Schirm markieren. Dann misst man die Entfernungen z der Nebenextrema zum Hauptmaximum und mit einem Maßband den Abstand Spalt-Leinwand.

Beobachtung:

Man erhält für verschiedene Anordnungen folgende Messwerte bei einem Abstand der Spalte/Stege zum Schirm von l = 3,2 m. Bei einem Einzelspalt mit der Breite b = 0,12 mm beobachtet man die ersten drei Minima bei

$$z_1 = 14\,mm;\ z_2 = 28\,mm;\ z_3 = 42\,mm.$$

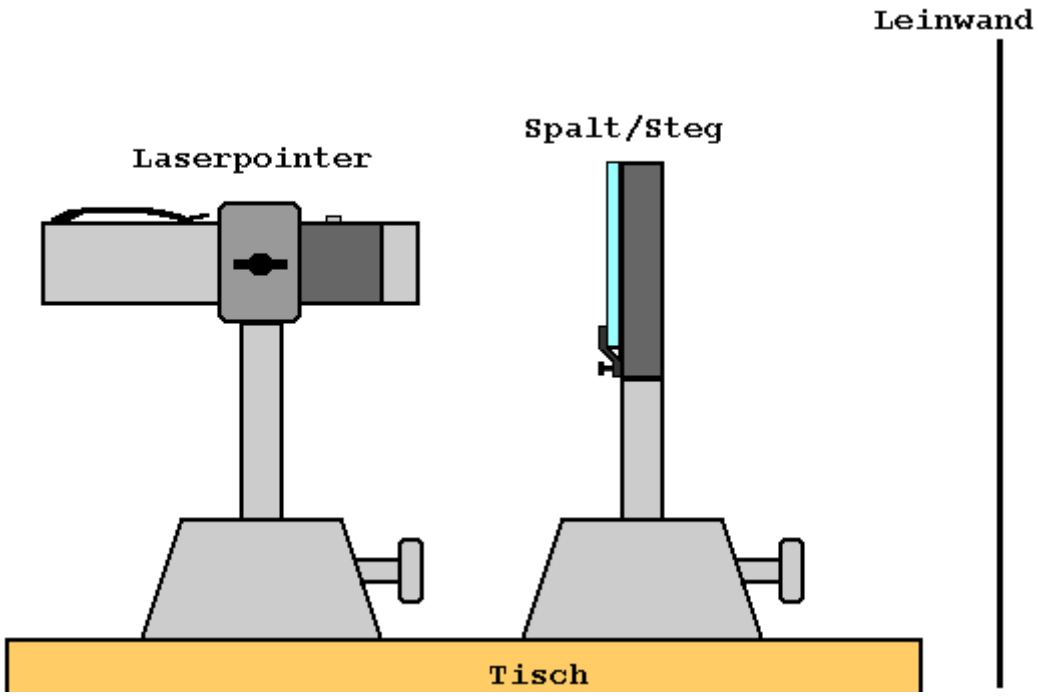

Abb.1: Versuchsaufbau

Bei einem Steg mit der Breite b = 0,2 mm liegen die ersten drei Minima bei

$$z_1 = 8{,}5\ mm;\ z_2 = 17\ mm;\ z_3 = 26\ mm.$$

Für einen Doppelspalt mit dem Spaltabstand g = 0,6 mm und der Spaltbreite b = 0,12 mm misst man für die ersten drei Maxima

$$z_1 = 3\ mm;\ z_2 = 6\ mm;\ z_3 = 9\ mm.$$

Außerdem fehlt jedes fünfte Maximum. Der Laserpointer hat eine Wellenlänge λ = 532 nm, wie man der Bedienungsanleitung entnehmen kann. Sie wird in Kapitel 4.4 nachgemessen.

Auswertung:

Anhand der Versuchsergebnisse überprüft man die in Kapitel 2.3 vorgestellten Formeln für die Beugung an Spalt, Steg und Doppelspalt. Für Nebenminima am Einzelspalt gilt:

$$sin\alpha_1 = \frac{k * \lambda}{g} = \frac{1 * 5{,}32 * 10^{-7} m}{1{,}2 * 10^{-4} m} = 4{,}43 * 10^{-3}$$

und damit

$$\alpha_1 = 0{,}254°$$

Für z_1 erhält man:

$$z_1 = l * tan\alpha = 14{,}2\ mm.$$

In gleicher Weise ergeben sich für z_2 und z_3:

$$z_2 = 28{,}4\ mm;\ z_3 = 42{,}6\ mm.$$

Für die ersten drei Nebenminima beim Steg erhält man analog:

$$z_1 = 8{,}5\ mm;\ z_2 = 17{,}0\ mm;\ z_3 = 25{,}5\ mm.$$

Für den Doppelspalt berechnet man mit der Formel aus Kapitel 2.3 die ersten drei Nebenmaxima zu:

$$z_1 = 2{,}8\ mm;\ z_2 = 5{,}6\ mm;\ z_3 = 8{,}4\ mm.$$

Beim Beugungsmuster für den Doppelspalt fällt auf, dass das 5., 10., 15. usw. Nebenmaximum fehlt. Es fällt mit dem 1. Nebenminimum jedes der beiden Einzelspalte zusammen. Da sich so die Elementarwellen jedes Einzelspaltes gegenseitig auslöschen, können sie zusammen kein Maximum mehr ergeben. Allgemein fehlen beim Doppelspalt die Maxima mit der Ordnungsnummer k, für die gilt:

$$k = n * \frac{g}{b}$$

mit g als Abstand der beiden Spaltmitten, b als Breite eines Einzelspaltes und n als ganze Zahl. Beim verwendeten Doppelspalt mit g = 0,6 mm und b = 0,12 mm fehlen daher die 5., 10., 15., usw. Maxima.
Alle Messwerte stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit sehr gut mit den theoretischen überein.

Häufig werden Beugungsversuche eingesetzt, um die Dicke von dünnen Drähten oder Haaren zu messen.

Versuch 2:
Aufbau:
Man benutzt den gleichen Aufbau wie bei Versuch 1. Nur spannt man zwischen die Klammern des Diahalters einen dünnen Draht oder ein Menschenhaar.
Durchführung:
Man richtet des Laserpointer genau auf den Draht bzw. das Haar. Dann markiert man sich auf dem Schirm das 1. und 2. Nebenminimum.
Beobachtung:
Man erhält für den Draht folgende Werte:

$$z_1 = 1{,}7\ cm;\ z_2 = 3{,}4\ cm;\ l = 320\ cm,$$

und für das menschliche Haar:

$$z_1 = 2{,}7\ cm;\ z_2 = 5{,}4\ cm;\ l = 320\ cm.$$

Auswertung:
Aus den Messergebnissen errechnet man die Dicke des Drahtes bzw. des Haares. Es ergibt sich beim Draht:

$$tan\alpha_1 = \frac{z_1}{l} = \frac{1{,}7\ cm}{320\ cm} = 5{,}31 * 10^{-3}$$

und damit

$$\alpha_1 = 0{,}304°\ .$$

Löst man die Bedingung für die Minima beim Spalt und Steg aus Kapitel 2.3 nach g auf, so erhält man:

$$g = \frac{1 * \lambda}{sin\alpha_1} = \frac{1 * 5{,}32 * 10^{-7} m}{\sin(0{,}304°)} = 1 * 10^{-4} m = 0{,}1\ mm.$$

Dieses Ergebnis stimmt exakt mit der Angabe auf der Drahtrolle überein. Für das menschliche Haar erhält man analog

$$g = 6{,}31 * 10^{-5} m = 63{,}1 \mu m.$$

Laut Wikipedia liegt die Haardicke bei normalem Haar zwischen 50-70 µm und bei sehr feinem Haar zwischen 20-30 µm.

4.4 Gitter

In der Spektralanalyse identifiziert man Stoffe anhand ihrer Absorptionslinien. Um ihre Wellenlänge zu bestimmen, benutzt man allerdings keine Spalte oder Doppelspalte, sondern ein optisches Gitter aus tausenden Spalten. Mit ihm sind die Maxima im Spektrum nahezu punktförmig ausgebildet, was eine exakte Vermessung erheblich erleichtert. Mit Hilfe eines Gitters werden im folgenden Versuch die Wellenlängen der LED-Lampe und des Laserpointers exakt bestimmt.

Versuch:

Aufbau:

Abb.1 zeigt den Aufbau des Versuches. Man benötigt eine Standard-LED-Lampe, einen Laserpointer, eine Linse mit der Brennweite f = 15 cm, ein optisches Gitter mit 570 Strichen pro mm und einen Schirm, etwa eine weiße Wand oder eine Leinwand.

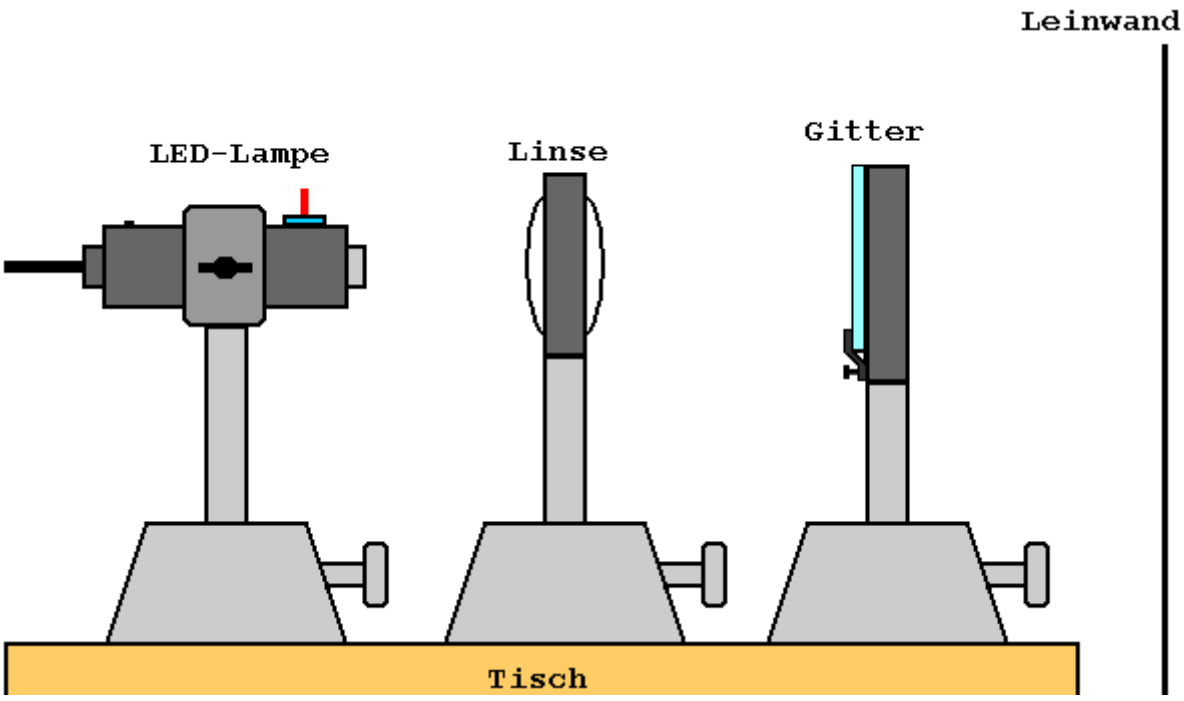

Abb.1: Versuchsaufbau

Durchführung:

Man bildet mit der Linse die LED der Lampe auf dem Schirm scharf ab und stellt dann zwischen Linse und Schirm das Gitter. Benutzt man den Laserpointer, so kann die Linse entfallen.

Beobachtung:

Auf dem Schirm sieht man das weiße Hauptmaximum und rechts und links die Nebenmaxima der 1. und 2. Ordnung in den Farben rot, gelb, grün und blau. Misst man das Spektrum aus, so erhält man für das 1. Nebenmaximum folgende Messwerte:

$l = 72\ cm$
$g = 1{,}754\ \mu m$
$z_b = 20\ cm$
$z_{gr} = 22{,}5\ cm$
$z_{ge} = 25{,}5\ cm$
$z_r = 27{,}5\ cm.$

Mit dem Laserpointer misst man folgenden z-Wert:

$z = 23\ cm.$

Die Bedeutung der einzelnen Größen entspricht der in Kapitel 2.3 verwendeten. Die Indizes an den z-Werten beziehen sich auf die Farben, b für blau, gr für grün, ge für gelb und r für rot. Die Gitterkonstante g steht auf dem Gitter.

Auswertung:

Mit den in Kapitel 2.3 vorgestellten Gesetzen kann man die Wellenlängen der einzelnen Farben ermitteln. Es gilt:

$$tan\alpha_r = \frac{z_r}{l} = \frac{27{,}5\ cm}{72\ cm} = 0{,}382\ .$$

Daraus folgt:

$\alpha_r = 20{,}9°.$

Setzt man diesen Wert in die Gleichung für die Wellenlänge

$sin\alpha_r = 1 * \lambda_r / g$

ein, so ergibt sich mit k = 1:

$\lambda_r = g * sin\alpha_{1r} = 626\ nm.$

Für die anderen Farben berechnet man analog folgende Winkel:

$\alpha_{ge} = 19{,}5°$
$\alpha_{gr} = 17{,}5°$
$\alpha_b = 15{,}5°$

und somit folgende Wellenlängen:

$\lambda_{ge} = 586\ nm$
$\lambda_{gr} = 523\ nm$
$\lambda_b = 470\ nm.$

Sie stimmen gut mit den Angaben des Herstellers überein.

Berechnet man das Spektrum mit der in Kapitel 2.3 vorgestellten Excel-Anwendung, so erhält man das Spektrum in Abb. 2 für die vier Farben der LED. Daraus erkennt man, dass die Winkelwerte den gemessenen gut entsprechen.

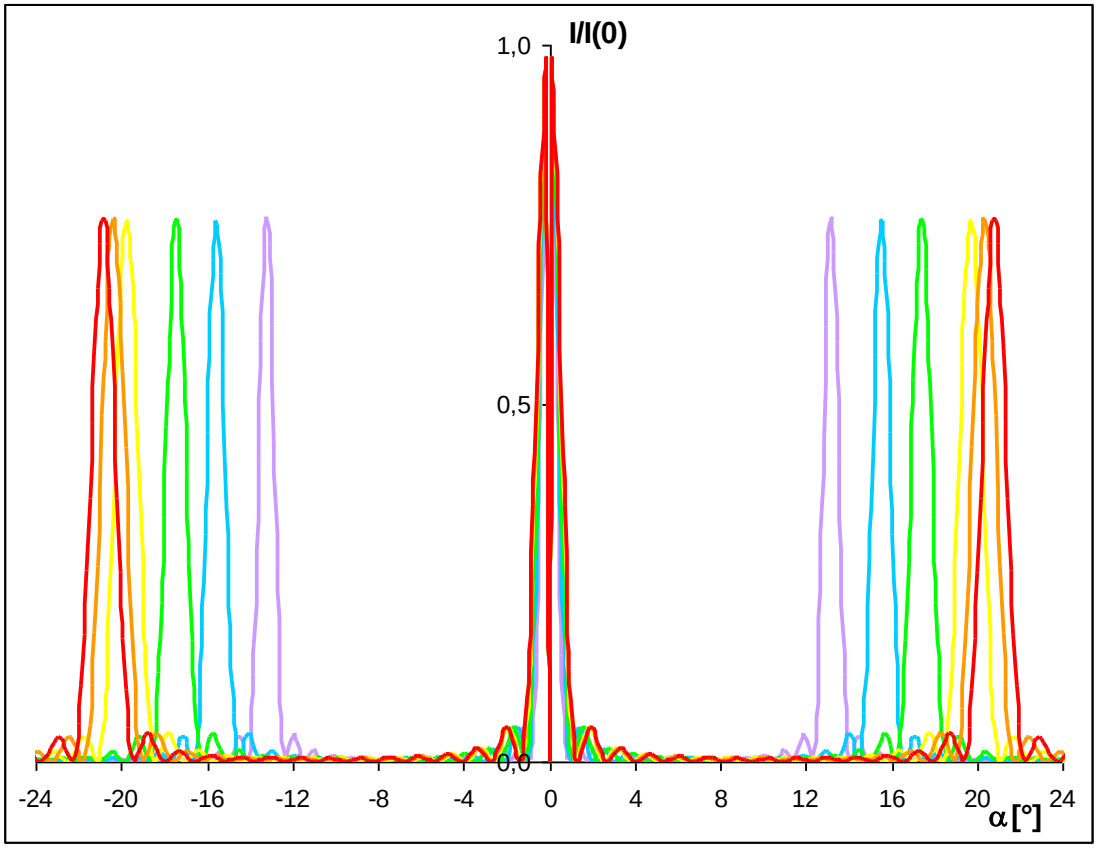

Abb.2: Spektrum der sechs Regenbogenfarben mit einem Gitter

Für die Wellenlänge des Laserpointers ergibt sich folgender Wert:

$$\lambda = 534\ nm.$$

In der Bedienungsanleitung des Pointers wird sie mit

$$\lambda = 532\ nm$$

angegeben, in sehr guter Übereinstimmung mit dem Messwert.

4.5 CD/DVD/Schallplatte

Eine CD oder DVD schillert im Sonnenlicht in allen erdenklichen Farben. Sie entstehen durch Beugung und Reflexion an den Peaks der CD/DVD. Die gleiche Erscheinung kann man bei einer Schallplatte beobachten. Wertet man das Spektrum aus, so kann man den Rillenabstand der CD, DVD bzw. Schallplatte errechnen. Dazu dienen die folgenden Versuche.

Abb.1:
Farbenspiel auf einer CD/DVD im Blitzlicht

Versuch 1:

Aufbau:

Abb. 2 zeigt den Aufbau des Versuches. Man benötigt eine Standard-LED-Lampe oder einen Laserpointer, eine Linse mit der Brennweite f = 15 cm, eine CD, einen Spiegel und einen Schirm, etwa eine weiße Wand oder eine Leinwand.

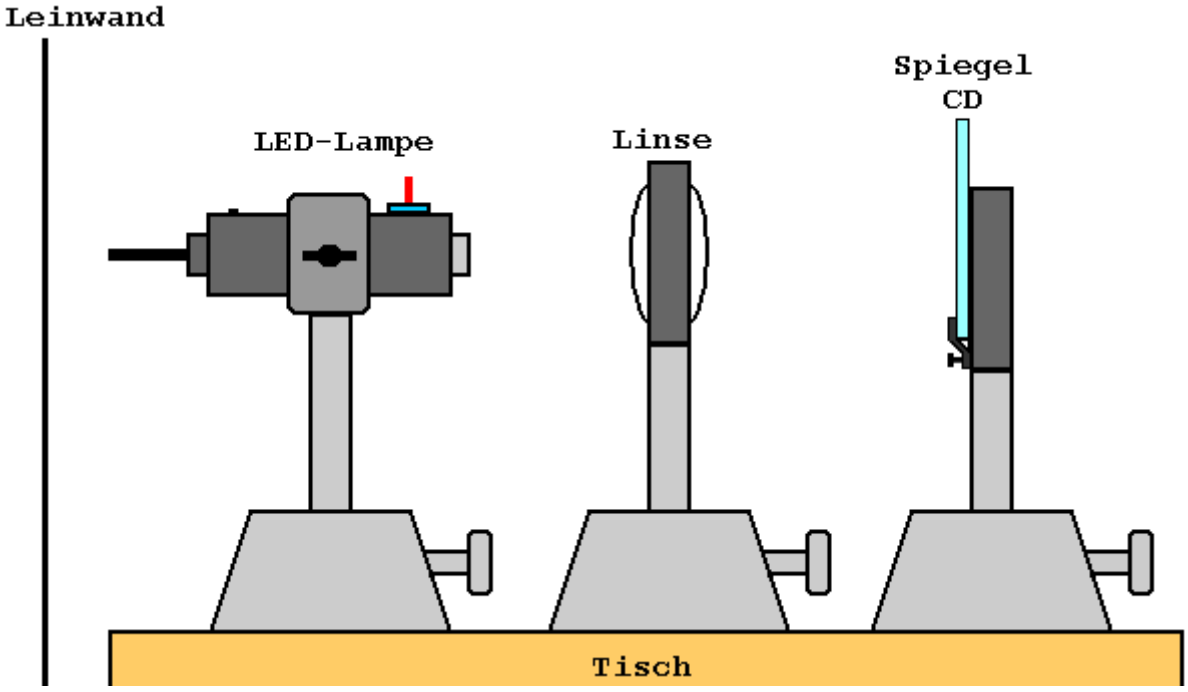

Abb.2: Versuchsaufbau

Durchführung:

Man benutzt zunächst den Spiegel und bildet mit der Linse die LED der Lampe über den Spiegel auf dem Schirm scharf ab. Dann ersetzt man den Spiegel durch die CD. Ist der Lichtkegel der Lampe so groß, dass er einen größeren Bereich der CD ausleuchten kann, so stellt man die CD so auf, dass sie um das Zentrum herum kreisförmig angestrahlt wird. Benutzt man den Laserpointer, so entfällt die Linse.

Beobachtung:
Auf dem Schirm sieht man ein Beugungsmuster mit einem weißen Fleck als Hauptmaximum und zu beiden Seiten jeweils zwei Nebenmaxima. Ist die CD zentriert aufgestellt, so kann man erreichen, dass die Nebenmaxima kreisförmig um das Hauptmaximum verlaufen. Das ist für die Schülerinnen und Schüler immer wieder sehr beeindruckend. Man misst für die blaue Farbe die Größen aus Kapitel 2.3 aus und erhält:

$$l = 1{,}29\ m$$

$$z_b = 41\ cm$$

$$\lambda_b = 470\ nm.$$

Benutzt man den Laserpointer, so ergibt sich folgender z-Wert:

$$z = 46\ cm.$$

Auswertung:
Aus den Messergebnissen berechnet man den Winkel und den Rillenabstand der CD. Es ergibt sich mit der blauen Farbe der LED-Lampe:

$$tan\alpha_b = \frac{z_b}{l} = \frac{41\ cm}{129\ cm} = 0{,}318.$$

Daraus folgt:

$$\alpha_b = 17{,}63°$$

und damit für den Rillenabstand mit k = 1:

$$g = \frac{1 * \lambda_b}{sin\alpha_b} = 1{,}55\ \mu m.$$

Aus den Messwerten mit dem Laserpointer erhält man:

$$g = 1{,}58\ \mu m.$$

In der Literatur wird er mit

$$g = 1{,}6\ \mu m.$$

angegeben.[5)]

In der Nähe des Loches sind auf der CD einige Zusatzinformationen gespeichert. Für sie findet man einen Spurabstand von 3,2 μm. Wiederholt man den Versuch mit einer DVD, so erhält man einen Spurabstand von 0,74 μm. Eine CD besitzt also ca. 630 Rillen pro mm, eine

DVD 1350 Rillen pro mm. Da außerdem die einzelnen Peaks in den Rillen bei einer DVD entsprechend dichter gepackt sind, kann sie erheblich mehr Informationen speichern als eine CD. Moderne CD's fassen ca. 800 MByte, DVD's 4,7 GByte.
Der Rillenabstand auf einer Schallplatte wird im folgenden Versuch bestimmt. Sie war das Speichermedium zu einer Zeit als es noch keine CD's, DVD's, Blu-ray's und USB-Sticks gab.

Versuch 2:

Aufbau:

Man benötigt den gleichen Aufbau wie bei Versuch 1. Nur ersetzt man die CD durch eine Schallplatte.

Durchführung:

Versuch 1 wird mit dem Laserpointer wiederholt. Dabei bestrahlt man die Schallplatte zunächst senkrecht, dann unter einem großen Einfallswinkel, also sehr flach. Mit einem Filzstift markiert man das Hauptmaximum und des 1. Nebenmaximum und misst die Abstände.

Beobachtung:

Bei senkrechtem Einfall des Lichtes entsteht ein körniges Beugungsmuster, bei dem die einzelnen Maxima nahe beieinander liegen und außerdem nur schwer eindeutig identifiziert werden können. Bei flachem Einfall steigt ihr Abstand stark an. Man erhält folgende Messwerte:

$k = 1$
$z = 0{,}011\ m$
$l = 3{,}40\ m.$

Bei schrägem Lichteinfall misst man:

$x_1 = 0{,}41\ m$

$x_2 = 0{,}56\ m$

$\lambda = 532\ nm$

$l = 3{,}40\ m$

$k = 1.$

x_1 ist der Abstand des Hauptmaximums zum Laserpunkt auf dem Schirm, wenn der Laserstrahl nicht an der Schallplatte reflektiert wird, x_2 der des 1. Nebenmaximums zu diesem Bezugspunkt (s. Abb. 4).

Auswertung:

Aus den Messwerten bei senkrechtem Einfall errechnet man g wie folgt:

$$tan\alpha = \frac{z}{l} = \frac{0{,}011\ m}{3{,}40\ m} = 0{,}00324$$

und damit

$$\alpha = 0{,}185°$$

und

$$g = \frac{k * \lambda}{sin\alpha} = \frac{1 * 532\,nm}{\sin(0{,}185°)} = 0{,}165\,mm.$$

Bei nicht senkrechtem Einfall des Laserstrahles auf die Schallplatte besitzen die sich überlagernden Elementarwellen bereits vor dem Auftreffen auf das Gitter einen Gangunterschied, so dass für die Maxima insgesamt gilt (s. Abb. 3):

$$\Delta s = g * \left(\pm sin\alpha - (\pm sin\beta)\right) = k * \lambda.$$

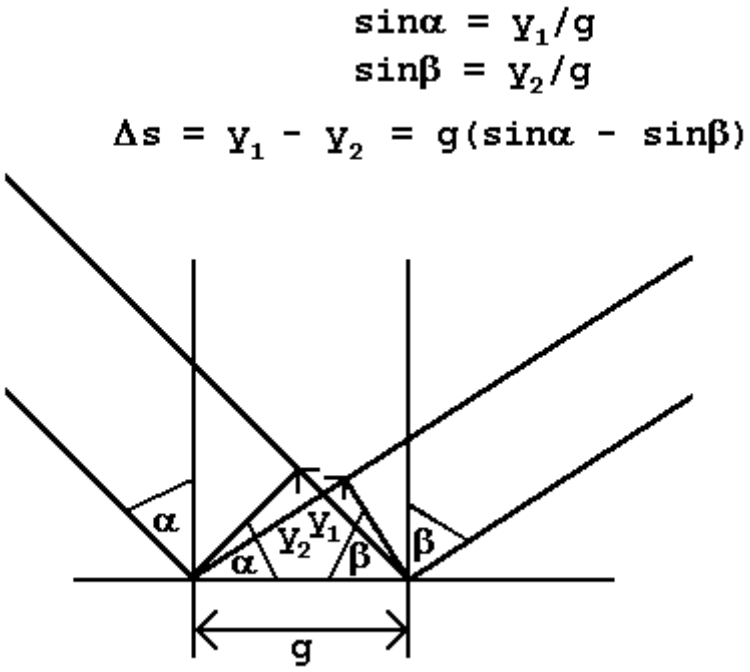

Abb.3: Beugung bei schrägem Lichteinfall

Darin ist α der Einfallswinkel, β der Beobachtungswinkel im reflektierten Licht, g die Gitterkonstante, k die Beugungsordnung und λ die Wellenlänge des Lichtes. Die unterschiedlichen Vorzeichen gelten für die Beobachtungsrichtung rechts und links vom Hauptmaximum. Die Bedingungen für die Maxima entsprechen damit den Formeln für Fresnelsche Beugung im durchgehenden Licht. Für $\alpha = 0^o$ gehen sie in die Formeln für Fraunhofersche Beugung über. Aufgrund des flachen Verlaufs der Sinusfunktion in der Nähe von 90^o wird der Gangunterschied pro Grad Winkeldifferenz hier sehr klein, so dass die Nebenmaxima bei Einfallswinkeln um 90^o wesentlich stärker auseinanderrücken als in der Nähe von 0^o. Die Auflösung des Spektrums ist bei Einfallswinkeln um 90^o erheblich besser als bei Winkeln um 0^o.
Da die Gitterkonstante einer CD sehr klein ist, erhält man dennoch auch bei 0^o ein sehr gut aufgelöstes Spektrum. Aber bei der wesentlich größeren Gitterkonstanten der Schallplatte

reicht die Auflösung bei 0^o Einfallswinkel nur beim Einsatz eines monochromatischen Lasers gerade noch aus, um g zu bestimmen. Eine Aufspaltung des weißen Lichtes in seine Spektralfarben kann man aber nicht mehr beobachten. Daher schimmert eine CD praktisch bei beliebigen Einfallswinkeln in allen Farben, eine Schallplatte nur bei fast streifendem Einfall von kohärentem Licht. In diesem Falle kann man g wie folgt bestimmen (s. Abb. 4). Es gilt:

$$180° = 2\alpha + \gamma_1$$

und damit:

$$\alpha = 90° - \gamma_1/2.$$

Außerdem ist:

$$180° = \alpha + \beta + \gamma_2$$

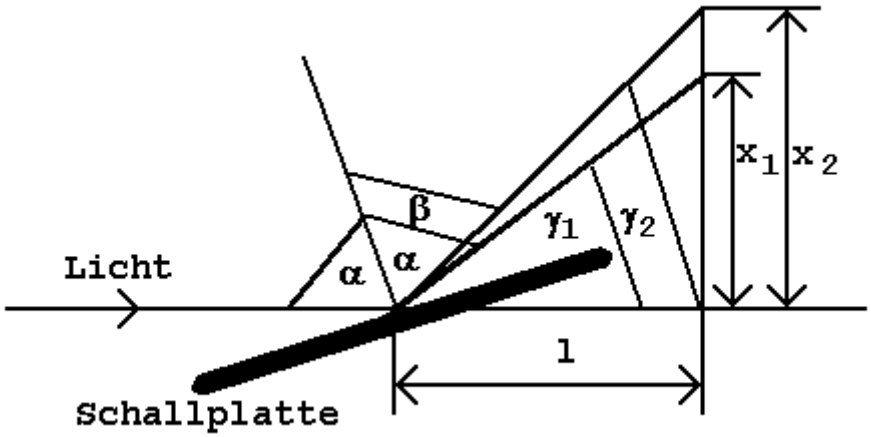

Abb.4: Rillenabstand bei schrägem Lichteinfall

und damit:

$$\beta = 180° - \alpha - \gamma_2.$$

Ferner liest man ab:

$$\gamma_1 = \arctan\left(\frac{x_1}{l}\right)$$

$$\gamma_2 = \arctan\left(\frac{x_2}{l}\right).$$

Setzt man die konkreten Messwerte ein, so kann man mit diesen Überlegungen den Rillenabstand g wie folgt errechnen. Zunächst ist:

$$\gamma_1 = 6{,}88°$$

$$\gamma_2 = 9{,}35°.$$

Damit gilt:

$\alpha = 86{,}56°$

$\beta = 84{,}09°.$

Somit erhält man für g letztendlich:

$$g = \frac{\lambda}{sin\alpha - sin\beta} = \frac{532\ nm}{\sin(86{,}56°) - \sin(84{,}09°)} = 0{,}151\ mm.$$

Ein Literaturwert existiert für die Schallplatte nicht, da der Abstand wegen der Füllschrift schwankt und zwar zwischen etwa 0,1 mm und 0,2 mm. Die Ergebnisse aus der Messung liegen voll in diesem Bereich.

Dieser Versuch macht die technische Entwicklung der letzten Jahre deutlich. Bis vor 40 Jahren galten Strukturen im Millimeterbereich als technische Meisterleitung. Als die CD und die DVD ihren Siegeszug antraten, verfeinerten sich die Strukturen um drei Zehnerpotenzen in den Mikrometerbereich. Heute ist die Nanotechnologie auf dem Vormarsch. Die Dimension der beherrschbaren Strukturen sinkt dadurch erneut um den Faktor 1000 in den Nanometerbereich. Ganz neue technische Entwicklungen werden dadurch möglich, vor allem in der Speichertechnologie. Gelänge es, die Informationseinheit 1 Bit in einem Atom zu speichern, so wären unvorstellbare Speicherdichten möglich. Das Wissen aller Bibliotheken der Welt würde in einen Kristall von der Größe eines Fingernagels passen. In dieser Hinsicht ist uns die Natur noch weit voraus. Sie sichert und verwaltet die riesigen Datenmengen der Erbinformation bereits in kleinsten Strukturen, den Chromosomen.

4.6 Lochblende

Kleine ringförmige Strukturen spielen in Natur und Technik eine große Rolle, etwa in der Pupille des Auges, bei der Blende eines Fotoapparates oder auch in der Pflanzenwelt. Johanniskraut erkennt man an vielen kleinen punktförmigen Öffnungen in seinen Blättern. Wie man den Durchmesser solcher Strukturen bestimmen kann, zeigen beispielhaft die folgenden Versuche. Da die Winkelgesetze bei Beugung an einer Lochblende nach Kapitel 2.3 etwas anders lauten als beim Einzelspalt oder Steg, sollen sie zunächst experimentell überprüft werden.

Versuch 1:

Aufbau:

Abb.1 zeigt den benötigten Versuchsaufbau. Man benötigt einen Laserpointer, die Lochblendenanordnung LH46996 der Firma Leybold und eine weiße Wand oder Leinwand als Schirm.

Durchführung:

Man befestigt den Laserpointer mit einer Klemme und einer Muffe an einem Stativ. Dreht man ihn so, dass dabei der Einschaltknopf mit eingeklemmt wird, so leuchtet der Laserpointer dauerhaft und man kann mit einem Filzstift die Maxima und Minima auf dem Schirm

markieren. Dann misst man die Entfernungen z der Nebenextrema zum Hauptmaximum und mit einem Maßband den Abstand Spalt-Leinwand.

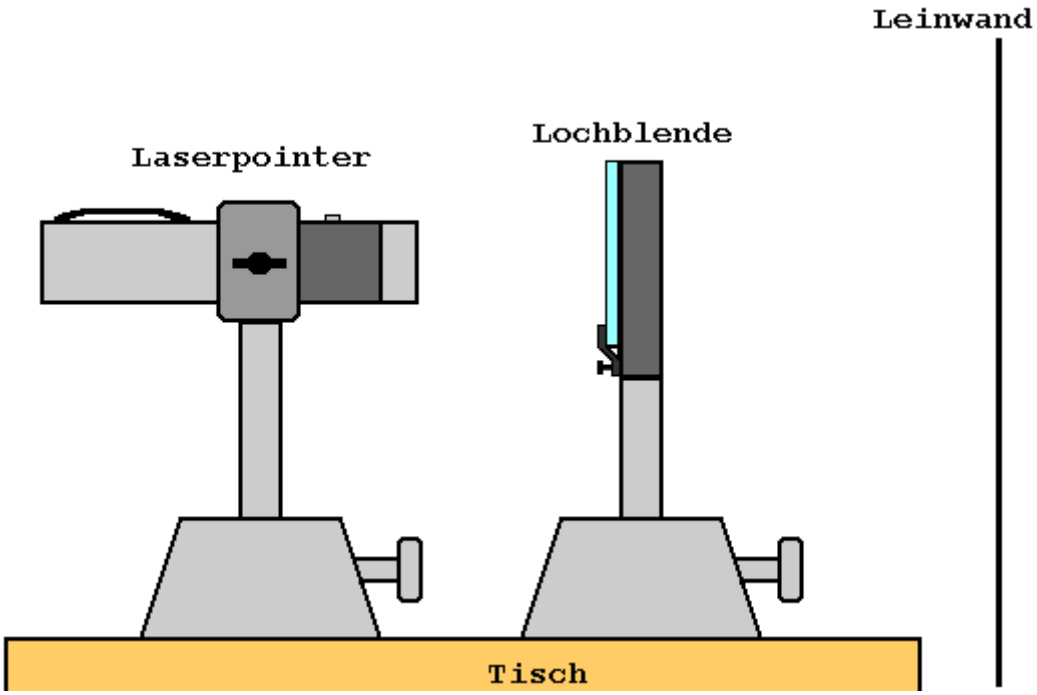

Abb.1: Versuchsaufbau

Beobachtung:
Man sieht auf dem Schirm ein kreisrundes Muster aus grünen und dunklen Ringen und einem grünen Fleck in der Mitte. Die ersten drei dunklen Ringe haben einen Radius von

$z_1 = 15\ mm$

$z_2 = 28\ mm$

$z_3 = 43\ mm.$

Der Abstand Lochblende-Schirm beträgt

$l = 3{,}20\ m.$

Auswertung:
Mit den in Kapitel 2.3 vorgestellten Formeln für die Beugung an einer Lochblende kann man den Radius des Loches bestimmen. Es gilt:

$$tan\alpha_1 = \frac{z_1}{l} = \frac{1{,}5\ cm}{320\ cm} = 4{,}69 * 10^{-3}$$

und damit

$\alpha = 0{,}269°.$

Für r_1 folgt mit den Gesetzen aus Kapitel 2.3:

$$r_1 = \frac{0{,}61 * \lambda}{sin\alpha} = \frac{0{,}61 * 532\ nm}{\sin(0{,}269°)} = 0{,}069\ mm.$$

Aus dem 2. und 3. Minimum ergibt sich analog:

$$r_2 = 0{,}068\ mm$$

$$r_3 = 0{,}064\ mm.$$

Der Mittelwert von r beträgt

$$r = 0{,}0675\ mm.$$

Vom Hersteller wird der Radius mit r = 0,06 mm angegeben. Dieser Wert liegt etwas unter den Messwerten. Eine Erklärung für diese Abweichung konnte ich nicht finden, zumal man für die anderen Durchmesser auf der Lochanordnung ähnliche prozentuale Abweichungen feststellt.

Hat man die Blendenanordnung der Firma Leybold nicht zur Verfügung, so kann man sich eine Lochblende selbst herstellen. Dazu erwärmt man mit einem Feuerzeug die Spitze einer Stecknadel und sticht sie glühend heiß in ein schwarzes Kartonplättchen der Größe 5x5 cm. Die Nadel sollte heiß sein, da sonst die Kanten des Loches ausfransen. Man beobachtet dann kein sauberes ringförmiges Beugungsmuster. Mit einer solchen Blende erhält man bei Versuch 1 folgende Messwerte:

$$z_1 = 5\ mm$$

$$z_2 = 9{,}5\ mm$$

$$z_3 = 14\ mm.$$

Daraus ergeben sich für den Radius des Loches folgende Werte:

$$r_1 = 0{,}208\ mm$$

$$r_2 = 0{,}2\ mm$$

$$r_3 = 0{,}197\ mm$$

und für den Mittelwert

$$r = 0{,}202\ mm.$$

Beugungs- und Interferenzerscheinungen an Lochblenden spielen bei optischen Geräten wie Fotoapparat oder Auge eine große Rolle. Sie begrenzen das Auflösungsvermögen der Geräte, wie im folgenden Versuch gezeigt wird.

Versuch 2:

Aufbau:

Abb. 2 zeigt den Versuchsaufbau. Man benötigt eine Standard-LED-Lampe, eine Linse mit f = 15 cm, eine Irisblende und als Schirm eine weiße Leinwand oder Wand. Die Lochblende sollte nahe an der Lampe stehen, damit sie optimal ausgeleuchtet wird.

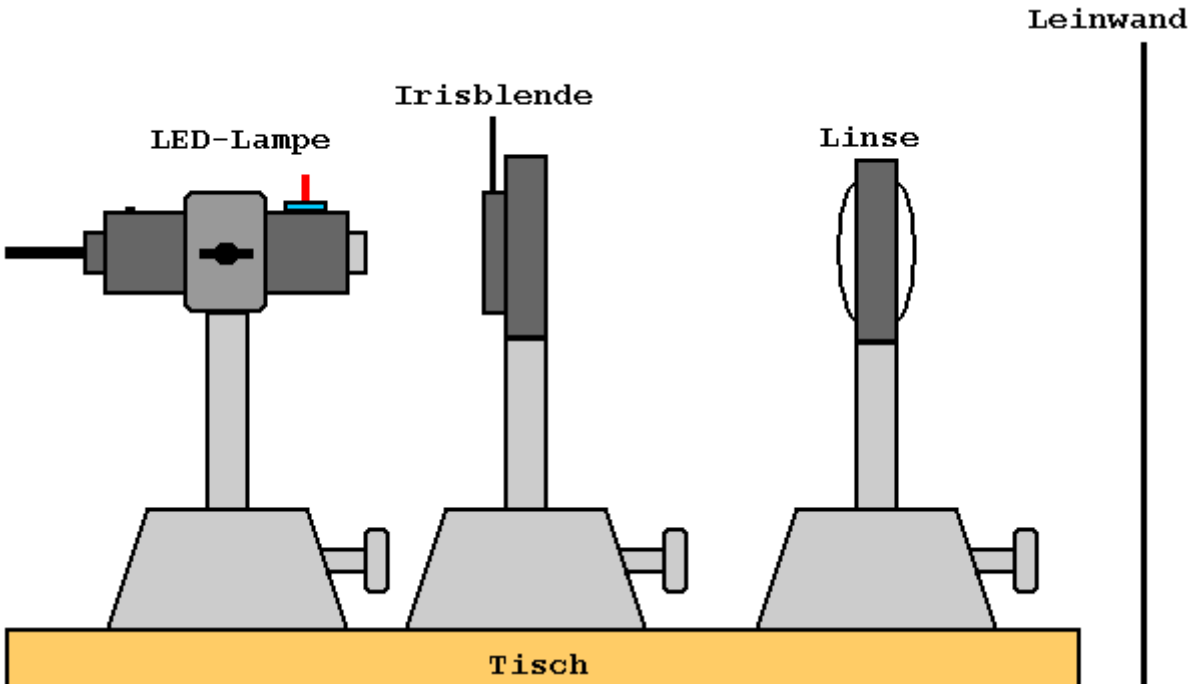

Abb.2: Versuchsaufbau

Durchführung:

Zunächst bildet man die LED-Lampe bei ganz geöffneter Blende mit der Linse auf dem Schirm scharf ab. Man schließt die Öffnung der Blende immer mehr.

Beobachtung:

Ist die Blende weit geöffnet, so erscheint die Lampe als heller weißer Fleck auf dem Schirm. Schließt man sie nach und nach, so wird der helle Fleck zuerst kleiner, bleibt aber scharf. Die Helligkeit nimmt ab. Ab einer bestimmten, sehr kleinen Öffnung der Blende bildet sich um den weißen Fleck ein farbiges Ringsystem. Der innere Farbring ist blau, es folgen nach außen hin die Farben grün, gelb und rot. Zwischen dem weißen inneren Fleck und dem Farbringsystem liegt ein dunkler Streifen.

Erklärung:

Ist die Blendenöffnung klein, so treten Beugungs- und Interferenzphänomene auf. Nach den Herleitungen in Kapitel 2.3 wird rotes Licht stärker gebeugt als blaues. Daher wird das weiße Licht beim Durchgang durch die Lochblende in seine Farben auf gespalten. Die Farbringe sind das 1. Nebenmaximum. Das Hauptmaximum erscheint weiß, da sich in ihm alle Farben überlagern. Der dunkle Ring ist das erste Minimum.

Welchen Einfluss diese Erscheinungen auf das Auflösungsvermögen optischer Geräte haben, soll am Beispiel des Auges näher untersucht werden. Das Auge kann zwei Punkte dann noch getrennt wahrnehmen, wenn das Hauptmaximum des 1. Punktes ins 1. Nebenminimum des 2. Punktes fällt und umgekehrt. Der minimale Sehwinkel des Auges entspricht somit dem Winkel α_1 des 1. Nebenminimums (s. Abb. 3). Der Augapfel ist mit Wasser mit dem Brechungsindex n = 1,33 gefüllt. Die wirksame Wellenlänge im Auge beträgt somit

$$\lambda' = \lambda/n.$$

Die Pupille hat bei hellem Tageslicht etwa einen Durchmesser von d = 3 mm.[1)] Legt man die mittlere Wellenlänge des sichtbaren Lichtes λ = 600 nm zugrunde, so folgt für den gerade noch aufgelösten Sehwinkel β (s. Abb. 3):

$$\begin{aligned}\beta &= \alpha_1 \\ &= \arcsin\left(\frac{0{,}61 * k * \lambda'}{d/2}\right) \\ &= arcsin\left(\frac{2 * 0{,}61 * 1 * 6 * 10^{-7}m}{1{,}33 * 3 * 10^{-3}m}\right) \\ &= 0{,}0105° \\ &= 0{,}63'\end{aligned}$$

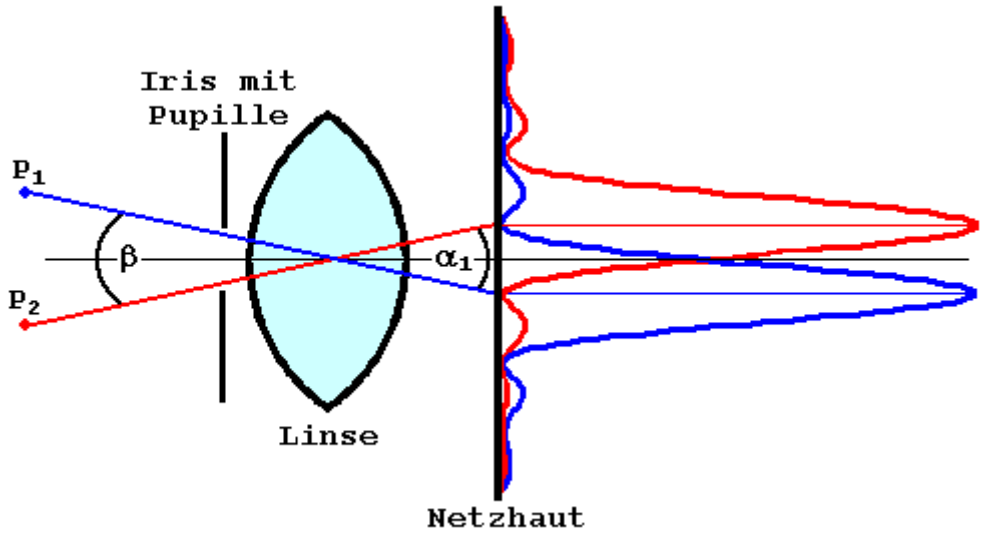

Abb.3: Beugung beim Sehvorgang

Das Auge kann also zwei Punkte noch getrennt wahrnehmen, die unter einem Winkel von etwa einer Bogenminute erscheinen. Die Sehschärfe des Auges wird andererseits durch die Struktur der Netzhaut begrenzt. Zwei benachbarte helle Stellen können dann noch aufgelöst werden, wenn ein Zäpfchen zwischen ihren Bildern liegt, das eine andere Helligkeit oder eine andere Farbe wahrnimmt. Die einzelnen Zäpfchen haben auf der Netzhaut einen mittleren Abstand a = 1,5 μm.[1)] Das Bild eines weit entfernten Gegenstandes liegt in der Brennebene

des Auges. Es besitzt bei Ferneinstellung eine Brechkraft von D = 62 Dioptrien, also eine Brennweite

$$f = \frac{1}{D} = \frac{1}{62 * 1/m} = 0{,}0161\, m.$$

Damit gilt für den Winkel, unter dem zwei Zäpfchen erscheinen, auf denen die beiden Punkte noch getrennt abgebildet werden können (s. Abb. 4):

$$\gamma = \delta$$
$$= 2 * arctan\left(\frac{a}{f}\right)$$
$$= 2 * arctan\left(\frac{1{,}5\ \mu m}{16{,}1\ mm}\right)$$
$$= 0{,}0107°$$
$$= 0{,}64'.$$

Er ist genauso groß wie der minimale Sehwinkel, der sich aus der Beugung ergibt. Das Raster der Zapfen auf der Netzhaut ist so fein eingeteilt, dass es die von der Beugung gesetzte Grenze voll ausnutzt.

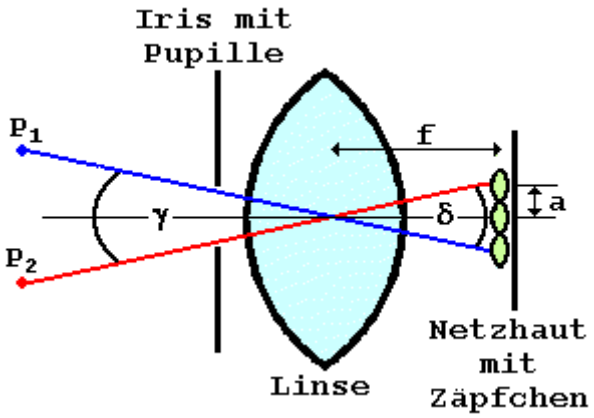

Abb.4: Empfindlichkeit der Netzhaut

4.7 Wassertropfen

Bei diesigem Wetter beobachtet man um den Mond, die Sonne oder Straßenlaternen farbige Ringe. Sie werden durch Wassertröpfchen in der Atmosphäre verursacht, wie der folgende Versuch deutlich macht.

Versuch 1:

Aufbau:
Abb. 1 zeigt den Aufbau des Versuches. Man benötigt eine Standard-LED-Lampe, einen Laserpointer, eine neue, unzerkratzte CD-Hülle, eine Sammellinse mit einer Brennweite f = 15 cm, einen Diahalter und als Schirm eine weiße Wand oder Leinwand.
Durchführung:
Man bildet die LED-Lampe mit der Linse auf dem Schirm möglichst punktförmig ab oder richtet den Laserpointer ohne Linse direkt auf den Schirm. Dann steckt man den Deckel der CD-Hülle auf den Diahalter, haucht sie mehrfach kräftig an und stellt sie zwischen Schirm und Lichtquelle. Der Versuch gelingt eindrucksvoller, wenn man die CD-Hülle vorher eine Stunde in den Kühlschrank legt.

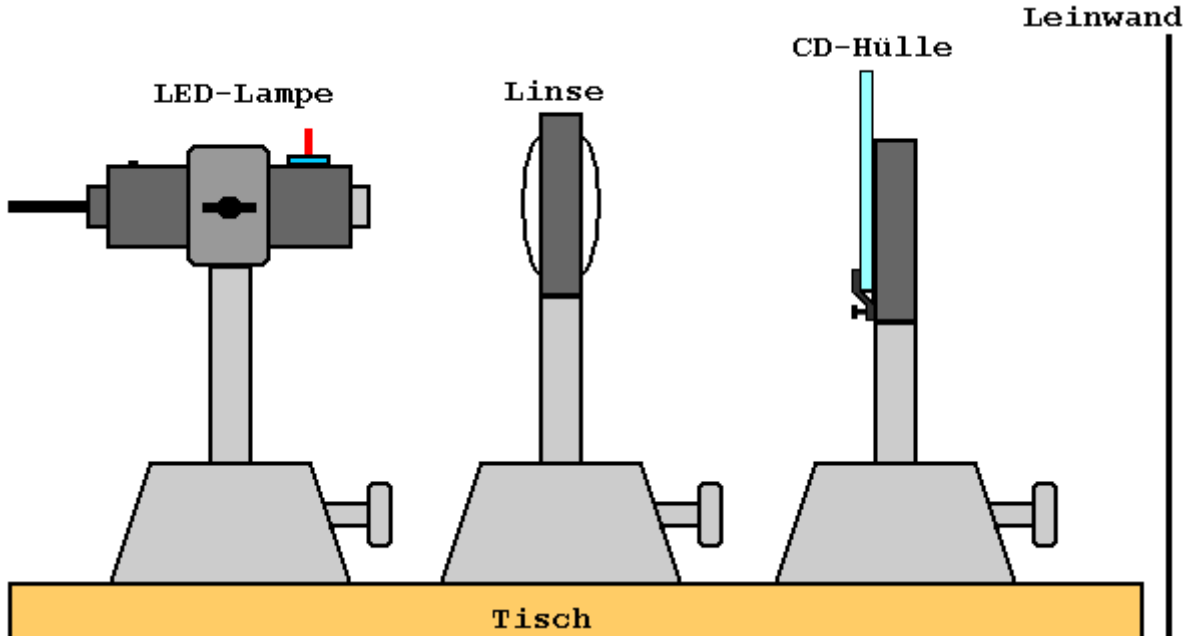

Abb.1: Versuchsaufbau

Beobachtung:
Der Lichtpunkt der Lampe erscheint als weiße Scheibe, umgeben von einem dunklen Ring, Hof genannt. An ihn schließen sich konzentrische Farbringe an, der so genannte Kranz. Er ist innen bläulich und außen rötlich. Mit dem Laserpointer als Lichtquelle beobachtet man helle und dunkle konzentrische Ringe um den Lichtpunkt des Laserpointers. Ist der Atem verdunstet, so verschwinden die konzentrischen Kreise wieder und man sieht nur noch die Lichtpunkte des Lasers bzw. der LED-Lampe.
Erklärung:
Hof und Kranz werden durch Beugung an kleinen Wassertröpfchen verursacht, die sich aus der Feuchtigkeit des Atems als Tau auf dem Deckel niederschlagen. Die weiße Scheibe ist das Hauptmaximum. Im ihm überlagern sich alle Farben und ergeben weiß. Es schließt sich als 1. Nebenminimum der Hof an. Die Winkel, unter denen man die Nebenmaxima k. Ordnung beobachten kann, sind umso größer, je größer die Wellenlänge des Lichtes und je kleiner der Durchmesser der Tröpfchen ist. Das weiße Licht wird somit in seine Farben auf gespalten. Da es in der Vielzahl der Tröpfchen in jeder Richtung welche von der gleichen Größe gibt, beobachtet man konzentrische Farbringe. Allerdings ist die Farbreihenfolge und Farbzuordnung nicht immer eindeutig zu erkennen, weil Tröpfchen unterschiedlicher Größe an der Beugungsfigur beteiligt sind und sich die Farbringe daher teilweise überlagern. Dass die Ringe

durch Beugung und nicht durch Brechung an den Wassertröpfchen hervorgerufen werden, erkennt man einerseits an der Farbreihenfolge der Ringe. Rotes Licht wird schwächer gebrochen, aber wegen seiner größeren Wellenlänge stärker gebeugt. Deshalb sind die Ringe außen rot und innen blau. Andererseits würde man beim Versuch mit dem Laserpointer keine hellen und dunklen Ringe erhalten, wenn die Farbringe durch Lichtbrechung verursacht würden. Aufgrund der Beugung an den einzelnen Tropfen überlagern sich die Huygensschen Elementarwellen zu den Maxima und Minima. Die Vorgänge lassen sich vergleichen mit denen bei einer Debeye-Scherer-Aufnahme einer polykristallinen Graphitfolie mit Elektronenstrahlen oder Röntgenstrahlen. Auch dabei beobachtet man eine ringförmige Beugungsfigur. Nur entsteht sie im reflektierten Licht.

Hof und Kranz kann man auch in der Natur beobachten. Sie erscheinen um den Mond, die Sonne, helle Sterne, Autoscheinwerfer oder Straßenlaternen bei diesigem Wetter.

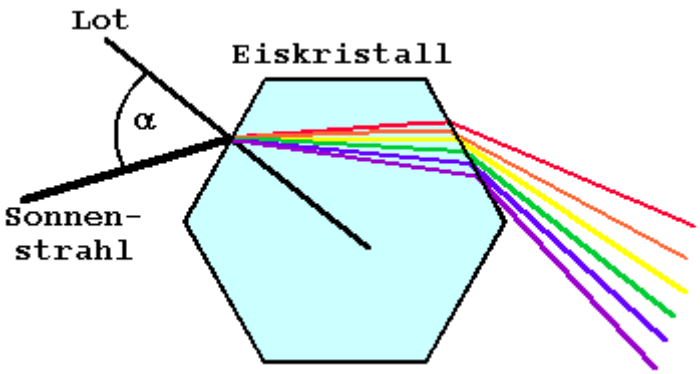

Abb.2: Lichtbrechung beim Halo

Durch dünne, hohe Schleierwolken kann man um die Sonne manchmal einen hellen Ring, den so genannten Halo, beobachten. Er ist oft farbig mit der umgekehrten Reihenfolge wie beim Regenbogen, also innen rötlich und außen bläulich. Halos werden durch Brechung des Sonnenlichtes an säulenförmigen, hexagonalen Eiskristallen verursacht (s. Abb. 2). Beim Eintritt in die Kristalle wird das Licht zum Lot hin gebrochen, beim Austritt vom Lot weg. Da rotes Licht schwächer gebrochen wird als violettes, erscheint es unter einem kleineren Sehwinkel und bildet deshalb den Innenradius des Halos.

4.8 Prisma

Newton konnte als erster nachweisen, dass weißes Licht sich aus verschiedenen Farben zusammensetzt. Er zerlegte es mit kleinen Prismen in seine Farben[6)]. Die Versuche hat er in seinem zweiten großen Meisterwerk, der Optik, beschrieben. Ich kann dieses Buch nur jedem zur Lektüre empfehlen. Es macht deutlich, dass Newton nicht nur ein glänzender Mathematiker, sondern auch ein hervorragender Experimentator war. Aufgrund dieser Vielseitigkeit gilt er nach wie vor als größter Physiker aller Zeiten. Er musste für seine Versuche aus dem Sonnenlicht einen feinen Strahl ausblenden. Und die verwendeten Linsen und Prismen hatten bei weitem nicht die Qualität der heute üblichen. Mit einer modernen LED-Lampe gelingt der Versuch ohne großen Aufwand.

Versuch:
Aufbau:

Abb.1 zeigt den Aufbau des Versuches. Man benötigt eine Standard-LED-Lampe, eine Linse mit der Brennweite f = 15cm, ein Geradsichtprisma und einen Schirm, etwa eine weiße Wand oder Leinwand.

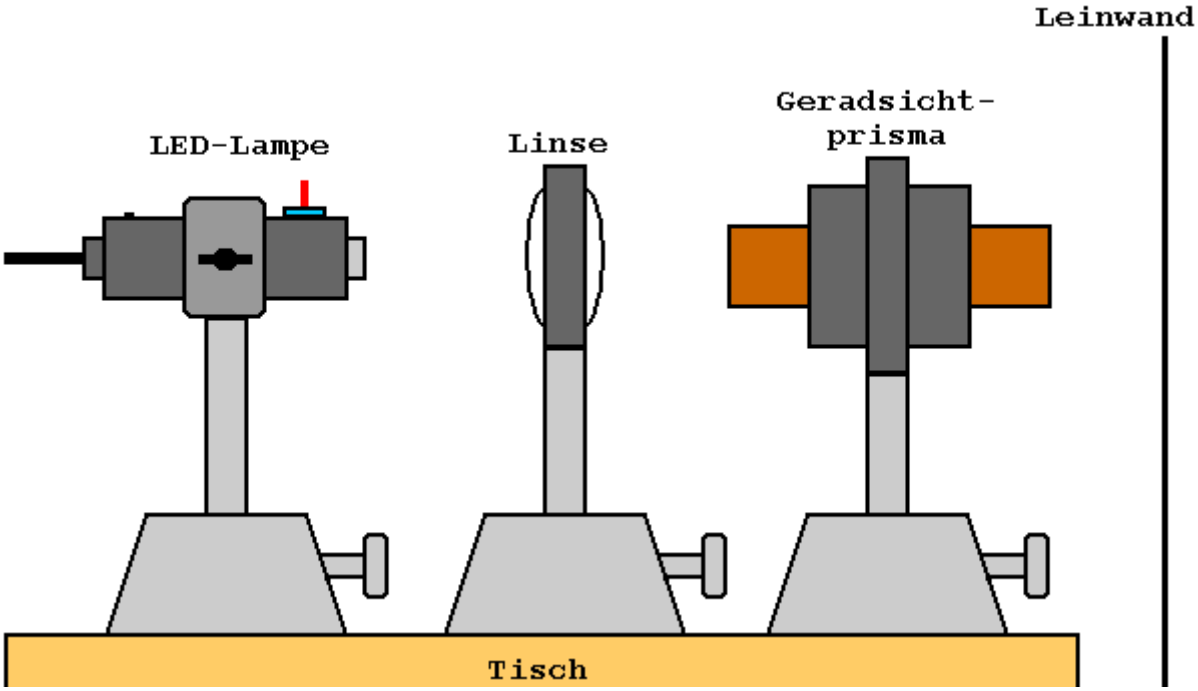

Abb.1: Versuchsaufbau

Durchführung:
Die LED der Lampe wird mit einer Linse auf dem Schirm abgebildet. Dann stellt man zwischen den Schirm und die Linse ein Geradsichtprisma.

Beobachtung:
Auf dem Schirm beobachtet man ein Farbspektrum aus den Farben rot, gelb, grün und dunkelblau. Von den Regenbogenfarben fehlen orange und violett.

Erklärung:
Licht wird beim Durchgang durch ein Prisma gebrochen, weil die Geschwindigkeit in Glas kleiner ist als in Luft. Da die Geschwindigkeit in Glas außerdem von der Frequenz, also Farbe des Lichtes abhängt, wird weißes Licht in seine Farben aufgespalten. Das weiße Licht einer LED setzt sich aus den Farben rot, gelb, grün und dunkelblau zusammen. Daher beobachtet man ein Spektrum aus diesen Farben.

Die Zerlegung des Lichtes in seine Farben mit einem Prisma oder einem Gitter spielt in der Chemie in der Stoffanalytik eine sehr große Rolle. Jedes Element sendet beim Erhitzen ein charakteristisches Linienspektrum aus. Andererseits absorbiert es gerade diese Linien, wenn man das Element mit weißem Licht bestrahlt. Zerlegt man das abgestrahlte bzw. eingestrahlte Licht durch ein Prisma oder ein Gitter in seine Frequenzbestandteile, so kann man daraus die Zusammensetzung des Stoffes ermitteln, je nach Intensität der auftretenden Spektrallinien auch die prozentualen Anteile der einzelnen Elemente. Die Spektralanalyse wurde zum ersten Mal von G. R. Kirchhoff und R. W. Bunsen angewendet. Sie ist heute ein standardisiertes Verfahren der Chemie. J. von Fraunhofer entdeckte 1814 im kontinuierlichen Spektrum der Sonne eine große Zahl dunkler Linien. Sie entstehen dadurch, dass die Gase der Sonnen-

oberfläche bestimmte Wellenlängen des Lichtes aus dem Innern der Sonne absorbieren. Mit ihrer Hilfe konnte man verschiedene Elemente in der Gashülle der Sonne nachweisen. Heute lässt sich so der chemische Aufbau eines Gestirnes ermitteln.

4.9 Lichtleiter

Lichtleiter gewinnen immer mehr an Bedeutung. Der folgende Versuch zeigt, warum das so ist.

Versuch:

Aufbau:

Abb.1 zeigt den Aufbau des Versuches. Man benötigt eine Standard-LED-Lampe oder eine High-Power-LED-Lampe, eine Linse mit der Brennweite f = 15 cm, einen Lichtleiter und zwei Transparentschirme.

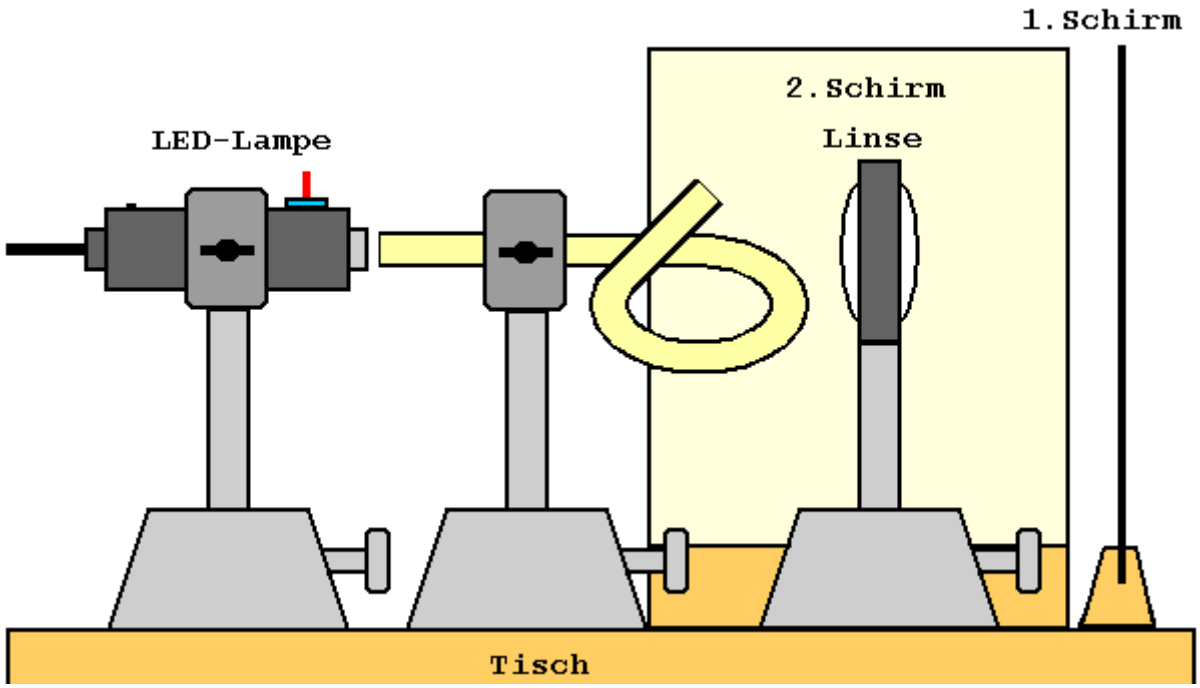

Abb.1: Versuchsaufbau

Durchführung:

Man stellt die Schirme so auf, dass der erste senkrecht zum Lichtkegel der Lampe und der zweite parallel dazu steht. Dann bildet man die Lampe mit der Linse auf dem 1. Schirm scharf ab. Man bringt den Lichtleiter in den Strahlengang und dreht ihn so, dass sein Ausgang in Richtung des zweiten Schirmes zeigt. Man bildet mit der Linse den Ausgang auf dem 2. Schirm scharf ab.

Beobachtung:

Auf beiden Schirmen beobachtet man einen scharfen, hellen Lichtfleck, wobei die Helligkeit auf dem zweiten Schirm geringer ist. Wird der Raum verdunkelt, so kann man den Lichtverlauf entlang des Lichtleiters sehen. Er ist hell erleuchtet.

Erklärung:

Beim Durchgang des Lichtes durch den Leiter wird es an den Wänden ständig total reflek-

tiert, da der Einfallswinkel stets über 42°, dem Grenzwinkel der Totalreflexion in Glas, liegt. Das Licht läuft den Lichtleiter entlang und tritt am Ende aus, senkrecht zur ursprünglichen Ausbreitungsrichtung. Dabei wird es allerdings geschwächt, da der Lichtleiter einen Teil absorbiert und streut.

Nachrichten werden heute immer häufiger mit Infrarotlicht durch Glasfasern übertragen, z.B. in Computernetzwerken, beim Kabelfernsehen oder bei Telefonaten. Dazu moduliert man das Licht mit der Frequenz der zu übertragenden Information. Pro Übertragungskanal benötigt man ein Frequenzband, dessen Breite vom Informationsgehalt der Nachricht abhängig ist. Da Licht eine sehr viel höhere Frequenz hat als die bisher meist verwendeten Funk- oder Fernsehwellen, lassen sich einem Strahl sehr viele Kanäle, z.B. Ferngespräche, Fernsehsendungen oder Computerdaten gleichzeitig aufbürden, ohne dass sich die einzelnen Kanäle gegenseitig stören. Die Länge der Leitung ist allerdings begrenzt wegen der Absorptions- und Streuverluste. Bei längeren Leitungen muss das Signal in regelmäßigen Abständen verstärkt werden. Aber auch in Optokopplern wird Energie oder Information von einem Schaltkreis auf einen anderen mit kurzen Lichtleitern übertragen. Man kann so die Stromkreise galvanisch von einander trennen. In der Medizin werden Operationen immer öfter endoskopisch ausgeführt. Der Patient verschluckt ein Lichtleiterkabel oder es wird durch eine Ader in seinen Körper eingeführt. Durch eine Faser wird Licht an den Ort der Operation geleitet, eine zweite liefert über eine kleine Kamera ein Bild des Inneren des menschlichen Körpers.

4.10 Regenbogen

Der Regenbogen gehört zu den imposantesten Naturerscheinungen. Er begeistert die Menschen immer wieder. Man kann ihn nur beobachten, wenn Sonne, Regenwand und Beobachter sich in einer bestimmten Position zueinander befinden. Im folgenden Versuch soll geklärt werden, wie er zustande kommt.

Versuch 1:

Aufbau:

Abb.1 zeigt den Aufbau des Versuches. Man benötigt eine Standard-LED-Lampe, einen mit Wasser gefüllten Rundkolben mit V = 50 ml oder eine Glaskugel und einen Schirm, etwa eine weiße Wand oder Leinwand.

Durchführung:

Der Rundkolben wird mit Wasser gefüllt an einem Stativ befestigt und so vor der LED aufgestellt, dass das Licht schräg auf einen seitlichen Rand des Rundkolbens fällt. Der Schirm muss sich hinter der Lampe befinden.

Beobachtung:

Bei richtiger Anordnung der Teile beobachtet man auf dem Schirm den kreisbogenförmigen Ausschnitt eines Regenbogens, wenn auch nicht sehr lichtstark. Der Bogen ist von innen nach außen blau, grün, gelb und rot.

Erklärung:

Das Licht, das auf die mit Wasser gefüllte Glaskugel fällt, wird beim Eintritt in die Kugel zum Lot hin gebrochen, an der gegenüberliegenden Seite total reflektiert und beim Austritt vom Lot weg gebrochen (s. Abb. 2). Dabei wird es in seine Farben auf gespalten, da rotes Licht weniger stark gebrochen wird als violettes Licht. Jede Farbe erscheint auf dem Schirm unter einem anderen Winkel, das rote unter einem größeren als das violette.

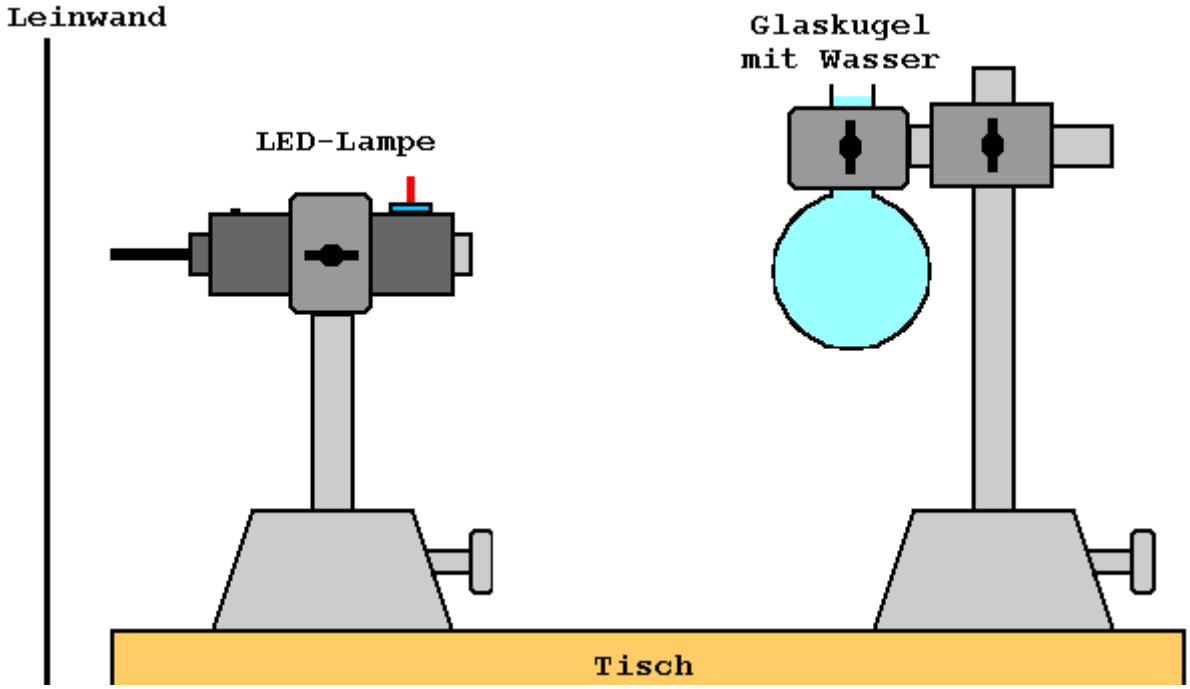

Abb.1: Versuchsaufbau

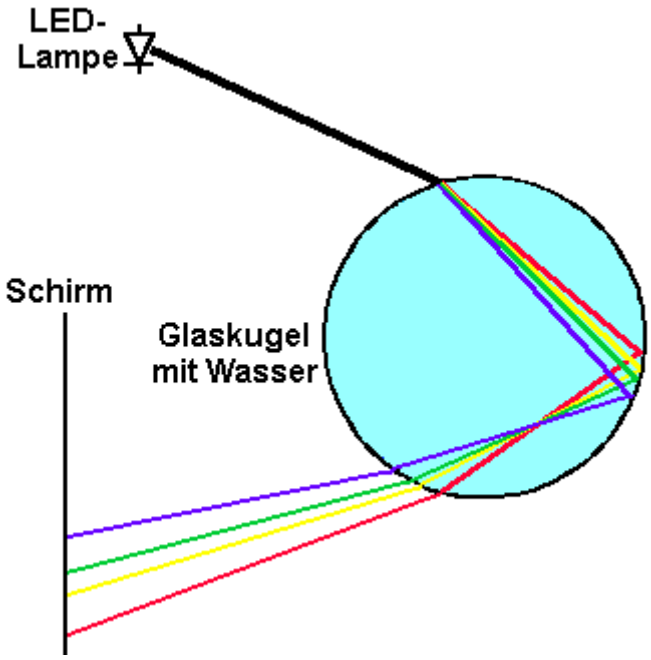

Abb.2: Strahlenverlauf in der Kugel

Die Vorgänge lassen sich in der Natur bei Regen und gleichzeitigem Sonnenschein beobachten. Dabei müssen die Regenwand vor dem Beobachter und die Sonne in seinem Rücken stehen. Beim Hauptregenbogen verlaufen die Strahlen in den Wassertropfen wie in Abb. 2 dargestellt, wobei man zusätzlich die Farben orange und violett beobachtet. Somit besitzt der Hauptregenbogen von außen nach innen die Farbreihenfolge rot, orange, gelb, grün, blau und violett. Da das Sonnenlicht außerdem auf eine flächenhafte Regenwand trifft, sind die Regentropfen, deren Licht gerade ins Auge reflektiert wird, rotationssymmetrisch um die

Blickrichtung angeordnet. Man sieht unter ca. 42° einen halbkreisförmigen Bogen mit violett innen und rot außen. Der zweite Halbkreis liegt unterhalb des Horizontes und ist daher nicht sichtbar. Man kann ihn nur von einem Flugzeug aus beobachten. Der Regenbogen dann erscheint kreisrund.

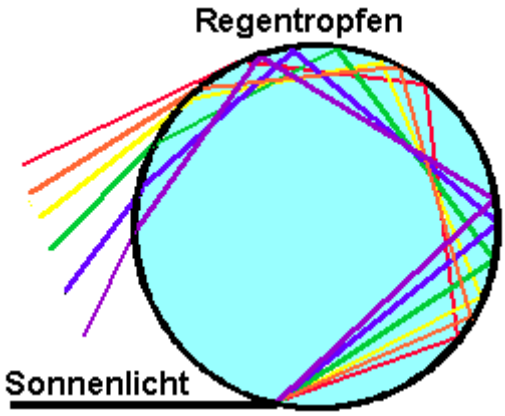

Abb.3: Strahlenverlauf beim Nebenregenbogen

Scheint die Sonne sehr hell und regnet es sehr stark, so beobachtet man zusätzlich einen Nebenregenbogen, bei dem die Farben vertauscht sind, also innen rot und außen violett. Dabei verläuft das Licht in den Regentropfen wie in Abb. 3. Nun treffen die violetten Strahlen unter einem größeren Winkel ins Auge als die roten. Der Nebenregenbogen erscheint unter einem Winkel von ca. 51° und verläuft außen um den Hauptregenbogen. Außerdem ist er wesentlich lichtschwächer, da das Licht durch die doppelte Reflexion stark gestreut wird.

Einen Regenbogen kann man mit dem folgenden Versuch leicht selbst erzeugen.

Versuch 2:

Aufbau:

Man benötigt einen Gartenschlauch mit einer Düse, mit der man einen feinen, aufgefächerten Strahl erzeugen kann.

Durchführung:

Man stellt sich mit dem Rücken zur Sonne und erzeugt vor seinen Augen einen Wasserschleier.

Beobachtung:

Im reflektierten Licht sieht man einen kleinen Regenbogen.

5. Literaturverzeichnis

1) Dorn-Bader, Physik, Gesamtband Oberstufe, Hannover 2005
2) Alonso Finn, Fundamental University Physics, II Fields and Waves, Reading Massachussetts 1975
3) Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band Optik 7.Auflage, Berlin 1978
4) Dorn-Bader, Physik Oberstufe Gesamtband, Hannover 2000
5) Hrgb.: Klaus Thome, Wie funktioniert das? Die Technik im Leben von heute, Mannheim 1986
6) Isaac Newton, Optik, Nachdruck, Braunschweig 1983