Lichtbeugung

Abbildung 1: Christiaan Huygens - der „Vater" der Wellentheorie des Lichts

Inhaltsverzeichnis

1 Sicherheitshinweise

ACHTUNG!

Wir arbeiten mit Laserpointern der Laserklasse II. Obwohl diese frei im Handel erhältlich sind, sind sie nicht völlig ungefährlich!

Beachte unbedingt folgende Sicherheitshinweise:
I. Blicke niemals bewusst in den Laserstrahl!
II. Vermeide Reflexionen!
III. Experimentiere im Stehen, wenn die Laserstrahlen in Bauchhöhe laufen!
IV. Strahle nur Richtung Wand und niemals auf andere Personen!

Merke: Jede Bestrahlung der Augen ist zu vermeiden!

2 Beugung und Interferenz

Wir werden in diesem Experiment zwei Phänomene des Lichts untersuchen und nutzen: **Beugung** und **Interferenz**. Beide Effekte treten bei Wellen auf und sind uns aus dem Alltag bekannt, auch wenn wir sie meistens nicht bewusst wahrnehmen.

2.1 Beugung

Beugung ist das Eindringen einer Welle in einen Bereich, der eigentlich bei geradliniger Verbindung von einem Hindernis abgeschirmt wird. Das kennen wir vom Schall: Zwei Menschen, die auf unterschiedlichen Seiten eines dicken Baumstammes stehen, können sich problemlos miteinander unterhalten, obwohl sie sich nicht sehen können. Schall verhält sich also nicht wie ein zielgerichteter Strahl, sondern er wird um Hindernisse herum *gebeugt*. Würde die eine Person aber statt Schall mit einer Taschenlampe Licht abstrahlen, so stünde die andere Person weiterhin im wahrsten Sinne des Wortes „im Dunkeln". Unter geeigneten Bedingungen tritt jedoch auch bei Licht Beugung auf. Warum dieses im Alltag so selten beobachtet werden kann, werden wir später erklären.

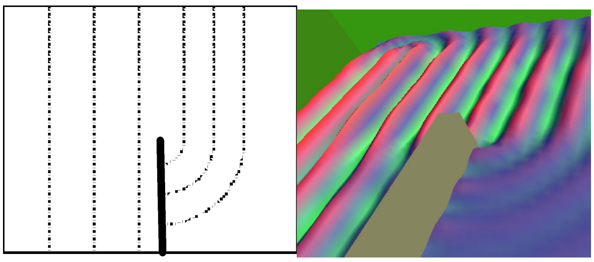

Abbildung 2: Beugung (links: Draufsicht, rechts: Computergrafik)

Beugung kann nicht nur bei Schall-, sondern beispielsweise auch bei Wasserwellen beobachtet werden: Treffen Wasserwellen auf ein Hindernis (z.B. ein Pier am Hafen), werden diese ebenfalls gebeugt (siehe Abb. 2[1]). .

Die Erklärung für die Beugung liefert das Huygenssche Prinzip, welches auf den niederländischen Physiker Christiaan Huygens (1629 – 1695, siehe Abb. 1) zurückgeht. Es geht davon aus, dass jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer sogenannten Elementarwelle ist.

[1] Quelle: http://de.wikipedia.org, Lizenz: gemeinfrei

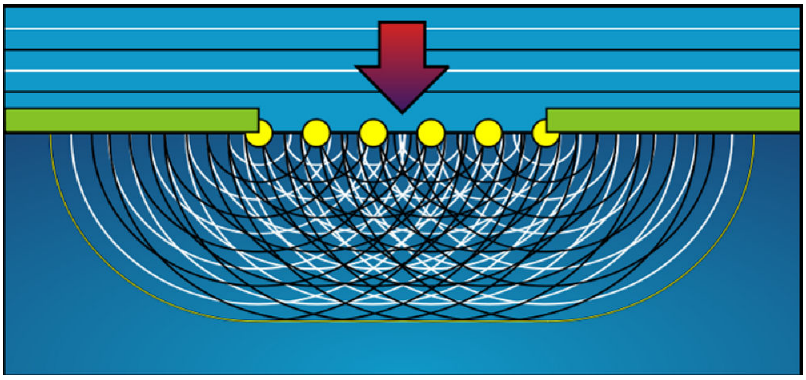

Abbildung 3: Huygenssches Prinzip

Trifft die Welle auf ein Hindernis, dann fehlen neben den Elementarwellen, die das Hindernis gerade noch passieren, die entsprechende „Partner-Elementarwellen" zum Interferieren - die Welle weicht dadurch von ihrer ursprünglichen Ausbreitungsrichtung ab und tritt in den Bereich hinter dem Hindernis ein.

Dass wir die Beugung von Lichtwellen im Alltag meist nicht wahrnehmen, liegt daran, dass Beugung erst bei Hindernissen merkbar ist, deren Größe etwa der Wellenlänge entspricht oder kleiner ist. Sind die Hindernisse deutlich größer als die Wellenlänge, spielt Beugung kaum eine Rolle.

Für Wasserwellen (Wellenlänge einige Meter) tritt Beugung also z.B. schon an Kaimauern auf. Lichtwellen hingegen (mit einer Wellenlänge von ca. $\frac{1}{2}$ Millionstel Meter = 0,5 μm) werden erst an mikroskopisch kleinen Objekten gebeugt.

2.2 Interferenz

Der zweite angesprochene Effekt, der hier von Interesse ist, ist die *Interferenz*.

Interferenz beschreibt die Überlagerung zweier (oder mehrerer) Wellen, was eine Abschwächung oder Verstärkung der Wellen zur Folge haben kann.

Zwei Beispiele aus der Akustik:

1. Steht ein Lautsprecher in einer Raumecke, führt dies zu einer dröhnenden, überstarken Basswiedergabe, da sich der nach vorne abgestrahlte Schall mit den von den Wänden reflektierten Schallanteilen überlagert und so verstärkt. (Bei sehr kleinen Lautsprechern ist dieser Effekt manchmal sogar gewünscht, um die Basswiedergabe etwas „aufzupeppen".)
2. Jeder Gitarrenspieler kennt das Phänomen, dass der Ton schnell an- und abschwillt, also lauter oder leiser wird, wenn er zwei Saiten mit einem sehr ähnlichen Ton anzupft. Dies passiert durch die Interferenz der von den Saiten ausgesandten Schallwellen. (Dieser Effekt wird beim Stimmen der Gitarre ausgenutzt.)

Die Elongationen der beiden Wellen addieren sich für jeden Raumpunkt. Die Wellen können sich im Extremfall so überlagern, dass sie sich maximal verstärken. Dies tritt auf, wenn Wellenberg auf Wellenberg bzw. Wellental auf Wellental fällt (konstruktive Interferenz, s. Abb. 4, links).

Der andere Extremfall ist, dass sich die Wellen sich maximal abschwächen bzw. (bei gleicher Amplitude) sogar auslöschen. Dies tritt auf, wenn Wellenberg auf Wellental trifft (destruktive Interferenz, s. Abb. 4, rechts).

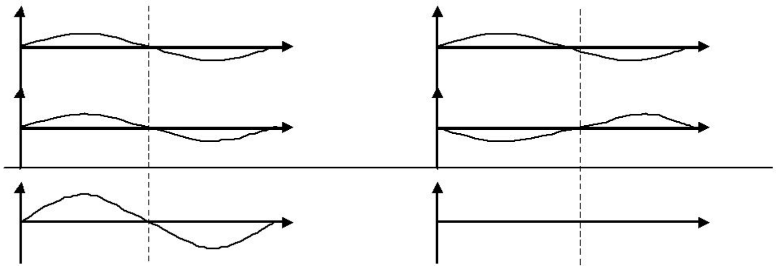

Abbildung 4: Konstruktive und destruktive Interferenz

Neben diesen beiden Extremfällen gibt es natürlich auch beliebig viele Zwischenstadien, in denen sich die Wellen nur teilweise verstärken oder abschwächen. An unterscheidlichen Orten im Raum wird es unterschiedliche Interferenzerscheinungen geben - an manchen Orten konstruktive Interferenz, an anderen destruktive Interferenz und an den meisten Orten ein solches Zwischenstadium.

2.2.1 Interferenz beim Doppelspalt und Gitter

Um zu verstehen, was mit Wellen am Doppelspalt geschieht, brauchen wir sowohl das Phänomen der Beugung als auch das der Interferenz. Fallen gerade, parallele Wellenzüge auf einen Doppelspalt, bilden sich hinter dem Doppelspalt gemäß des Huygensschen Prinzips an beiden Spalten Kreiswellen. Diese Kreiswellen überlagern sich (siehe Abbildung 5[2]). Diese Überlagerung ist an einigen Orten konstruktiv (Verstärkung), an anderen destruktiv (Abschwächung). Stellt man einen Schirm hinter den Doppelspalt, sehen wir in der Mitte ein sehr helles Maximum, das so genannte Hauptmaximum. Rechts und links daneben entstehen die schwächeren Nebenmaxima. Die Maxima werden durch dunkle Bereiche, die Minima, voneinander getrennt.

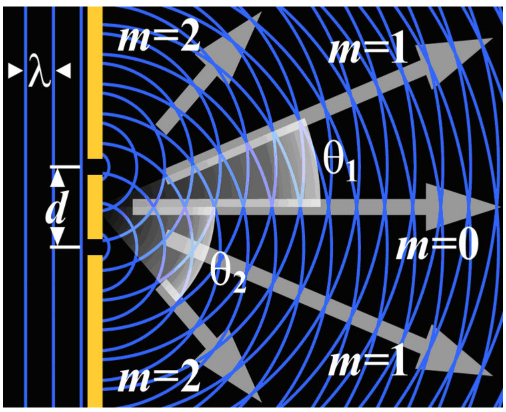

Abbildung 5: Doppelspalt

[2] Quelle: http://de.wikipedia.org, Lizenz: GNU-Lizenz für freie Dokumentation, Author: Peo

Deutung:

Am Ort des Hauptmaximums haben beide Wellenzüge dieselbe Weglänge bis zum Schirm zurückzulegen, dementsprechend sind sie phasengleich (Wellenberg trifft also auf Wellenberg bzw. Wellental auf Wellental). Daher überlagern sie sich konstruktiv, es entsteht ein Maximum. Gehen wir ein kleines Stück zu Seite, ist die Überlagerung nicht mehr exakt phasengleich, aber es tritt immer noch Verstärkung auf. Gehen wir noch weiter zu Seite, wird die Verstärkung immer geringer und geht schließlich in eine Abschwächung über, bis sich im Falle einer Phasenverschiebung von 180° (entsprechend einem Gangunterschied einer halben Wellenlänge) ein Minimum ergibt.

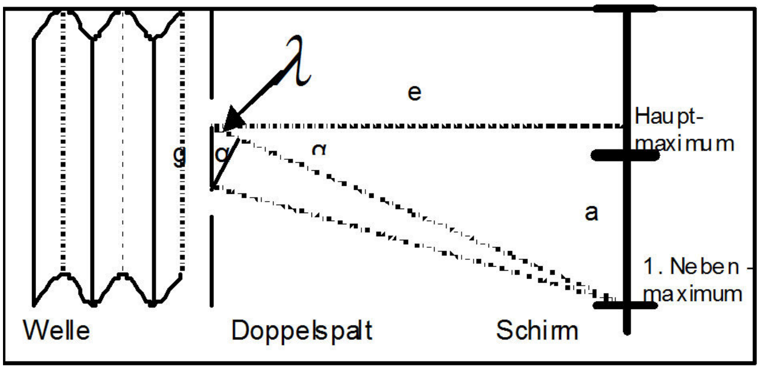

Abbildung 6: Doppelspalt 2

Geht man noch weiter zur Seite, vergrößert sich der Gangunterschied weiter. Immer, wenn er ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge beträgt, tritt konstruktive Interferenz auf und es ergibt sich ein (Neben-)Maximum. Beträgt er ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge, liegt ein Minimum vor.

Die Orte der Maxima lassen sich wie folgt bestimmen:

Es seien:
e: Entfernung Gitter - Schirm (bzw. Wand)
a_n: Abstand zwischen Hauptmaximum und n-ten Nebenmaximum
λ: Wellenlänge
g: Abstand zweier benachbarter Spalte (Beim Beugungsgitter heißt dieser Abstand „Gitterkonstante", daher wurde auch der Buchstabe „g" als gewählt.)
n: Beugungsordnung ($n \in I\!N_0$, 0. Ordnung = Hauptmaximum, 1. Ordung = 1. Nebenmaximum usw.)

Das „kleine Dreieck" (direkt am Gitter) und das „große Dreieck" (zwischen Gitter und Schirm) sind beides rechtwinklige Dreiecke mit einem gleich großen Winkel α . Daher stimmt auch der dritte Winkel überein (die Winkelsumme im Dreieck beträgt 180°) und die beiden Dreiecke sind *ähnlich*[3].

Im „kleinen Dreick" gilt: $\sin\alpha = \frac{n\lambda}{g}$.

Im „großen Dreieck" gilt: $\tan\alpha = \frac{a_n}{e}$.

Für kleine Winkel α gilt[4]: $\sin\alpha \approx \tan\alpha$.

Also ergibt sich:

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

[3]„Ähnlich" heißt: Die beiden Dreiecke haben die gleiche Gestalt, sind aber unterschiedlich groß. Anders gesagt: Die Verhältnisse einander entsprechender Seiten stimmen überein

[4]Man kann diese Näherung vermeiden, wenn man auch im großen Dreieck mit $\sin\alpha$ rechnet. Die fehlende Seite erhält man mit Hilfe des Satzes des Pythagoras. Unsere Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Messfehler bei diesem Experiment so groß sind, dass der kleine Fehler, den man durch die Näherung $\sin\alpha \approx \tan\alpha$ macht, völlig unerheblich ist.

bzw. im Falle des ersten Nebenmaximums (n=1):

$$\frac{\lambda}{g} = \frac{a_1}{e}$$

Diese Gleichung verknüpft die makroskopischen und leicht messbaren Größen a_1 und e mit den mikroskopischen Größen λ und g. Kennt man die Wellenlänge λ, so kann man durch Messung von a_1 und e die Gitterkonstante g bestimmten. Und umgekehrt: Kennt man die Gitterkonstante g, kann man λ bestimmen.

Die Beugungsmaxima und -minima liegen sowohl für den Doppeltspalt als auch beim Gitter an den gleichen Orten - die obigen Gleichung gilt für beide! Trotzdem sieht ein Beugungsbild eines Doppelspaltes im Regelfall etwas anders aus als beim Gitter, und zwar aus den folgenden Gründen:

Erstens gibt es sehr viele Spalte, dadurch sind die Maxima sehr scharf, da bereits ein kleines Stück neben dem Maximum destruktive Interferenz auftritt. (Die konstruktive Interferenz schlägt in destruktive Interferenz um, da jedes Lichtbündel „sehr leicht" ein anderes findet, mit dem es sich auslöscht.) Nur wenn alle Bündel konstruktiv interferieren - das ist an den Orten der Maxima der Fall - bleibt überhaupt Licht übrig. Also: Beim Gitter sind die Maxima sehr schmal und „scharf" und durch breite Minima getrennt.

Zweitens kann man beim Gitter die einzelnen Spalte sehr schmal machen und somit dicht nebeneinander setzen (g ist sehr klein!), da sich die Helligkeit des hindurchfallenden Lichtes für alle Spalte addiert - das Bild bleibt sehr hell, auch wenn die Spalte schmal sind. Somit sind die Beugungseffekte viel stärker ausgeprägt als beim Doppelspalt, bei dem die Spalte realtiv breit bleiben müssen, damit man überhaupt noch genügend Helligkeit hat, um etwas zu erkennen.

Exkurs: Spektren

Durch *Spektroskopie* bestimmt man das Energiespektrum einer Probe. Für elektromagnetische Strahlung (z.B. sichtbares Licht) entspricht dies einem Wellenlängen- bzw. Frequenzspektrum. Im Falle von Teilchenstrahlung unterscheidet man auch oft nach der Masse der Teilchen (→ Massenspektroskopie).

Mit einem Beugungsgitter kann man untersuchen, aus welchen Wellenlängen sich das Licht verschiedener Lichtquellen zusammensetzt. Es gilt: $\frac{\lambda}{g} = \frac{a_1}{e} \Leftrightarrow a_1 = e \cdot \frac{\lambda}{g}$. d.h. der Ort der Nebenmaxima hängt von der Wellenlänge λ ab. Das erste Nebenmaximum liegt für Licht großer Wellenlänge weiter außen als für Licht kleiner Wellenlänge. Weißes Licht wird somit in seine Farben spektral zerlegt - das erste Begungsmaximum ist für rotes Licht weiter außen als für grünes und für grünes wiederum weiter außen als für blaues. Das Hauptmaximum hingegen ist für alle Farben am selben Ort - direkt gegenüber vom Gitter. Daher ist dort auch keine farbliche Aufspaltung zu erkennen.

Vergleicht man nun z.B. die Spektren einer Glühlampe und einer Energiesparlampe, so erkennt man, dass diese völlig unterschiedlich aussehen, obwohl beide Lampen für das Auge nahezu gleich aussehendes „weißes Licht" abgeben. Im Falle der Glühlampe gehen alle Farben fließend ineinander über (kontinuierliches Spektrum). Im Falle der Energiesparlampe gibt es einige wenige, scharf getrennte Farben (diskretes Spektrum oder Linienspektrum). Die Erklärung für diese unterschiedlichen Spektren liegt in der Entstehung des Lichts in den leuchtenden Körpern:

Bei der Glühlampe wird ein Wolframdraht durch einen elektrischen Stromfluss bis zur Weißglut erhitzt, so dass er elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Bereich aussendet. Ähnliche Prozesse laufen in einer Kerzenflamme, der Sonne oder bei einem beliebigen anderen glühenden Körper ab.

Bei der Energiesparlampe werden die Atome eines Gases ebenfalls durch einen Stromfluss angeregt. Freie Elektronen durchlaufen das Gas und stoßen mit einzelnen Gasatomen zusammen. Die Außenelektronen der Gasatome wechseln hierbei von einem niedrigen in ein höheres Energieniveau. Dieser Zustand ist jedoch nicht stabil, weshalb sie nach sehr kurzer Zeit wieder in ihren Ausgangszustand zurückfallen. Dabei strahlen sie die Energie in Form von elektromagnetischen Wellen ab. Je nach Energiedifferenz zwischen Ausgangs- und Endzustand ergibt sich jeweils eine bestimmte Farbe bzw. gemäß der Formel $E = h \cdot f$ eine bestimmte Frequenz, welche man ihrerseits gemäß der Beziehung $c = f \cdot \lambda$ (c: Lichtgeschwindigkeit) in eine entsprechende Wellenlänge umrechnen kann.

2.2.2 Interferenz beim Einzelspalt

Um zu verstehen, warum auch beim Einzelspalt ein Beugungsmuster entsteht, überlegen wir, am welchem Ort das erste Minimum liegt. Die Überlegungen sind ähnlich wie beim Doppelspalt, aber wir können die hindurchtretenden Wellenzüge nicht mehr idealisiert als Licht*strahlen* betrachten, sondern müssen berücksichtigen, dass es sich um Licht*bündel* handelt (die jeweils wiederum aus vielen eng benachbarten Lichtstrahlen bestehen[5]). Wir teilen das durchtretenden Lichtbündel gedanklich in zwei Teilbündel (vgl. Abbildung 7[6]). An der Stelle, wo sich diese beiden Bündel gegenseitig auslöschen, liegt das erste Minimum. Wann ist dies der Fall? Wenn der Gangunterschied „d" zwischen dem Randstrahl und dem mittleren Strahl genau eine halbe Wellenlänge beträgt - denn dann löschen sich beide Strahlen gegenseitig aus (destruktive Interferenz). Der Strahl, der „neben" dem Randstrahl läuft, löscht sich dann mit dem Strahl „neben" dem mittleren Strahl aus usw. - jeder Strahl des einen Bündels findet einen Strahl im anderen Bündel, mit dem er sich auslöscht. Somit löschen sich beide Teilbündel gegenseitig aus, an dieser Stelle herrscht Dunkelheit. Zwischen den beiden äußeren Randstrahlen beträgt der Gangunterschied in diesem Fall $2d = 2 \cdot \frac{\lambda}{2} = \lambda$.

[5] Alle Betrachtungen, die wir hier über Licht anstellen, sind letztendlich mehr oder weniger grobe Modelle, die uns helfen, die hier auftretenden Phänomene zu verstehen. Aber sie sind kein exaktes Abbild der Wirklichkeit! Ein Lichtstrahl wird als ein unendlich dünnes Lichtbündel betrachtet. Dies ist jedoch eine Idealisierung - streng genommen gibt es keine „unendlich dünnen Lichtbündel".

[6] Quelle: http://de.wikipedia.org, Lizenz: gemeinfrei

Im „kleinen Dreick” gilt (mit s: Spaltbreite): $\sin\varphi = \frac{\lambda}{s}$.

Im „großen Dreieck” (s. Abb. 6) gilt: $\tan\varphi = \frac{a_n}{e}$.

Für kleine Winkel φ gilt: $\sin\varphi \approx \tan\varphi$.

Also ergibt sich:

$$\frac{\lambda}{s} = \frac{a_1}{e} \Leftrightarrow a_1 = e \cdot \frac{\lambda}{s}$$

Diese Gleichung ähnelt sehr der entsprechenden Beziehung beim Doppelspalt (statt Spaltabstand g steht hier die Spaltbreite s), aber mit einem ganz wesentlichen Unterschied:

Wir haben hier den Ort des ersten Minimums berechnet!

(Beim Doppelspalt beschrieb diese Gleichung der Ort des ersten Nebenmaximums. Im Beugungsbild äußert sich dieser Umstand darin, dass das Hauptmaximum im Einzelspaltbeugungsbild doppelt so breit ist wie das im Doppelspaltbeugungsbild.)

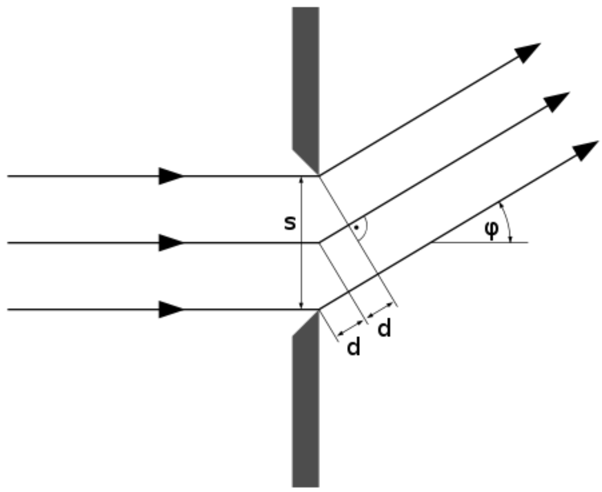

Abbildung 7: Beugung am Einzelspalt

Die Orte der anderen Minima ergeben sich dementsprechend aus der Beziehung:

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

Zwischen diesen liegen dann wieder die Nebenmaxima, welche die gleiche Breite wie beim Doppelspaltbeugungsbild haben.

Anmerkungen zum Zusammenhang zwischen Einzelspalt und Gitter

Da auch Doppelspalt und Gitter letztendlich aus einzelnen Spalten bestehen, ist ihren Beugungsbildern immer auch ein Einzelspaltbeugungsbild überlagert. Das ist unvermeidlich! Nimm dir einen Laserpointer und ein Beugungsgitter und betrachte das Beugungsbild! Sieh genau hin: An einigen Stellen scheinen einzelne Maxima zu fehlen oder sie sind zumindest sehr dunkel. Dies ist an den Orten der Fall, wo ein Maximum des Gitters auf ein Minimum des Einzelspaltbeugungsbildes fällt.

3 Experimente

3.1 Beugung im Alltag

1. Betrachte Lichtquellen (Kerze, Glühlampe und Energiesparlampe) durch einen engen Spalt, den du mit deinen Fingern, zwei Bleistiften oder den LEGO™-Steinen bildest! Was siehst du? Beschreibe und erkläre!
2. Betrachte die Lichtquellen durch die bereitliegenden Gitter und durch das Handspektroskop. Was siehst du? Beschreibe und erkläre! Wie sehen die Spektren aus?
3. Untersuche Beugungsphänomene an den Beugungsgittern bzw. einer CD oder DVD! Wie verhalten sich die Beugungsmaxima bei unterschiedlichen Wellenlängen bzw. Gitterabständen?

ACHTUNG!!!

VORSICHT VOR REFLEXIONEN!

Strahle weder dir noch anderen ins Auge!

3.2 Bestimmung der Gitterkonstanten eines Beugungsgitters

Bestimmt mit Hilfe des grünen Laserpointers (Wellenlänge 532 nm) den Gitterabstand des unbekannten Gitters (Versuchsaufbau s. Abb. 8).

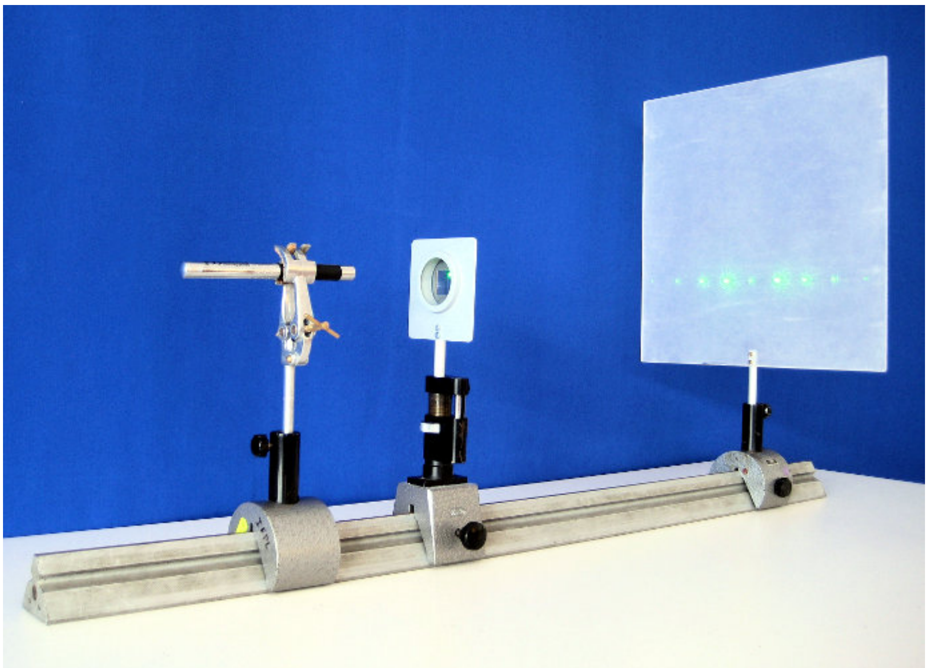

Abbildung 8: Versuchsaufbau

3.3 Bestimmung der Wellenlänge von Laserlicht

Bestimmt mit Hilfe des nun bekannten Gitterabstandes die Wellenlänge des roten Laserpointers!

3.4 Bestimmung der Dicke eines Haares

Bestimme die Dicke eines deiner Haare mit Hilfe der Beugung am Einzelspalt!
Für kleine Winkel gilt die Beziehung: $n \cdot \frac{\lambda}{d} = \frac{a_n}{e}$

Hinweis:

Da die Beugungsmaxima sehr dicht aneinander liegen, ist es sinnvoll, einen großen Abstand (>2m) zum Schirm (z.B. der Wand) zu wählen. Die Maxima sind nicht scharf, sondern ziehen sich in die Länge. Deshalb sollte die größtmögliche (noch sichtbare) Beugungsordnung n gewählt werden und genau im Mittelpunkt des Maximums gemessen werden. Hierbei kann es auch sinnvoll sein, den Raum zu verdunkeln.

Name				
Beugungsordnung n				
Abstand a_n in m				
Haardicke d in μm				

Tabelle 1: Beugung an einem Haar

4 Quellen

- Abbildungen:
  - Abb. 1: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Christiaan-huygens4.jpg, Autor/Maler: Bernard Vaillant (1632-1698), Lizenz: gemeinfrei
  - Abb. 2 (rechts): erstellt von Philipp Straube mit dem Programm „Wellenwanne 3D" von Martin Papst
  - Abb. 2 (links), Abb. 4, Abb. 6 und Abb. 8: erstellt von Philipp Straube
  - Abb. 3 : http://en.wikipedia.org/wiki/Image:HuygensDiffraction.jpg, Lizenz: gemeinfrei
  - Abb. 5 : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/01/Two-Slit_Diffraction.png, Lizenz: GNU-Lizenz für freie Dokumentation, Author: Peo
  - Abb. 7: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/34/Beugungsspalt.svg, Lizenz: gemeinfrei