


## 1. Über die Natur des Lichtes


### Einleitung

- 1  Sie hörten es schon oft: Licht ist ein Wellenphänomen. Diese Feststellung scheint für Sie eine Selbstverständlichkeit zu sein. Oder nicht? Der historische Weg zu dieser Erkenntnis war in der Tat sehr kurvenreich. Warum, wir können das Licht doch sehen? Oder nicht? Sicher können wir sagen: Weil wir sehen, wissen wir vom Licht, und wenn es dunkel ist, fehlt das Licht. Offenbar sehen wir das Licht doch nicht, sonst wüssten wir seit je, wie das Licht ist. Wie kann man aber Eigenschaften von einem Objekt beschreiben, das man nicht sieht (und doch sieht)? ...


Der Weg der Erkenntnis über das Licht soll in diesem Kapitel grob nachgezeichnet werden. Wir gehen folgendermassen vor: Zuerst soll an einige **Phänomene** des Lichtes erinnert werden. Sie sollen (wieder) wissen, wie sich das Licht in besonderen Situationen verhält. Erklärt wird noch nichts. Danach halten wir Ausschau nach theoretischen Modellen, welche diese Phänomene erklären. Wir werden diese Phänomene zuerst gemäss Vorschlag von Descartes und Newton durch eine **Teilchentheorie** erklären. Dieselben Phänomene werden von Huygens aber auch durch eine **Wellentheorie** erklärt.

Die Vorstellungen vom Licht als Teilchenschauer oder als Welle sind jedoch nicht miteinander verträglich? Was stimmt nun? Der Versuch, eine der Modellvorstellungen zu widerlegen, misslingt. Der Versuch, beide Theorien unter einen Hut zu bringen, führt zur **Quantenphysik**.

### Die Phänomene

- 2  Haben Sie sich die **Fragen** im Kasten rechts zum Sehen auch schon gestellt, ohne sie sofort durch eine oberflächliche Antwort wieder vom Tisch gewischt zu haben?

Diese Fragen hängen mit der Frage nach der Natur des Lichtes zusammen. Man könnte also auch etwas grundlegendere Fragen zum Licht stellen.

- 3  Durch alltägliche Erfahrung und genaue Beobachtung findet man die folgenden Zusammenhänge:

- a) Tritt Licht durch eine kleine Blendenöffnung, so entsteht ein **Lichtkegel**. Ist der Lichtkegel genügend schmal, so können wir von einem **Lichtstrahl** sprechen.

Ein **idealisiert**er **Lichtstrahl** hat keine seitliche Ausdehnung.

#### Ziele dieses Kapitels

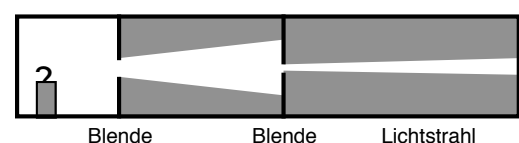
1. Sie sind mit den wichtigsten optischen Eigenschaften des Lichtes wieder vertraut.
2. Sie wissen von den verschiedenen Erklärungsmodellen zur Natur des Lichtes. Insbesondere sind Sie ein erstes Mal vertraut gemacht worden mit der Korpuskular- und Wellenvorstellung des Lichtes.
3. Sie haben einen groben Überblick über die historische Entwicklung der Theorien und Modelle zum Licht erarbeitet.
4. Sie wissen, wie die Kenntnisse über das Frequenzspektrum des Lichtes begründet sind und Sie können grundlegende Probleme dazu mit der Wellentheorie lösen.

#### Fragen zum Sehen:

- Warum können wir Gegenstände sehen?  
 Warum können wir unser Spiegelbild sehen?  
 Warum können viele von uns mit Brille besser sehen?  
 Warum ist die untergehende Sonne rot?

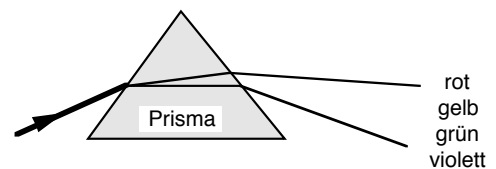
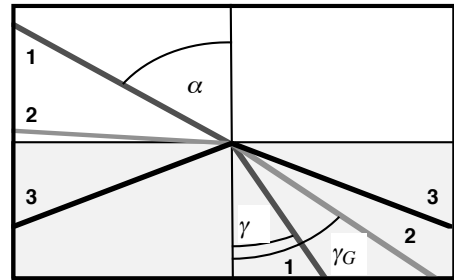
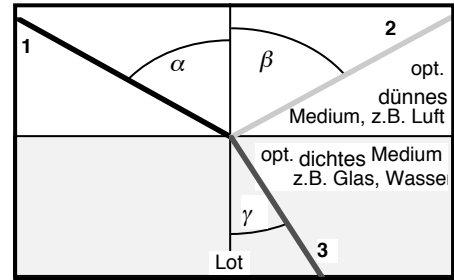
#### Fragen zum Licht

- Wie breitet sich Licht aus?  
 Was ist ein Lichtstrahl?  
 Wie wird Licht reflektiert?  
 Wie wird Licht abgelenkt (gebrochen)?  
 Was ist Licht?



Glühbirne als „punktförmige Lichtquelle“

- b) Lichtstrahlen breiten sich in gleichbleibendem (homogenem) Medium **geradlinig** aus.
- c) Dringt ein Lichtstrahl (1) von einem optisch dünneren (durchsichtigen) Medium in ein optisch dichteres (durchsichtiges) Medium ein, so wird er zum Lot hin gebrochen (3). Ein kleiner Teil des Strahls wird an der Grenzfläche reflektiert (2).
- d) An metallischen Oberflächen wird das Licht vollständig **reflektiert** (Spiegel).
- e) Die Lichtwege sind **umkehrbar**.
- f) Dringt ein Lichtstrahl aus einem optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres Medium aus, so wird er vom Lot weg gebrochen (1). Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn der Winkel zum Lot im dichteren Medium nicht grösser ist als der **Grenzwinkel  $\gamma_G$**  (2). Andernfalls wird der Lichtstrahl an der Grenze zum dünneren Medium vollständig reflektiert (gemäß dem Reflexionsgesetz) (3). Wir sprechen dann von **Totalreflexion**.
- g) Wird ein Lichtstrahl an einem Prisma gebrochen, so entstehen die **Regenbogenfarben**. Dabei werden die Strahlen von violettem Licht am stärksten, die Strahlen von rotem Licht am wenigsten stark gebrochen. Man nennt dieses Phänomen **Dispersion**.



- 4 ⓘ Es gelten die Gesetze im Kasten rechts.  
Die festgehaltenen Gesetze werden ev. im Unterricht mit Lichtstrahlen oder mit Laserstrahlen kurz demonstriert.
- 5 ⓘ Diese Gesetze können aber auch ohne die (künstlich "hergestellten") Lichtstrahlen erforscht werden, nämlich indem Gegenstände (z.B. Stecknadeln) durch speziell geformte Glaskörper hindurch betrachtet werden. Eine Anleitung für solche Versuche erhalten Sie zusätzlich.

#### Reflexionsgesetz:

**Einfallswinkel = Ausfallswinkel**  
 $\alpha = \beta$

#### Brechungsgesetz,

**Gesetz von Snellius (1580-1626):**

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$$

$n$  heisst Brechungsindex oder Brechzahl, ist konstant und von den Materialien abhängig. (Tabellensammlung)

#### Grenzwinkel für Totalreflexion:

$$\sin \gamma_G = \frac{1}{n}$$

#### Dispersion:

Violettes Licht wird am stärksten gebrochen, rotes Licht am wenigsten stark.

## Die Teilchentheorie des Lichtes

- 6 ⓘ Das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz beschreiben zwar die Fortpflanzungsrichtung des reflektierten und gebrochenen Strahles, sie geben aber keine Auskunft, *warum* das Licht an der Körperoberfläche gerade so reflektiert und gebrochen wird. Die Beantwortung dieser Frage ist nur an Hand einer konkreten Theorie über die Natur des Lichtes möglich. Einer der ersten, der Theorien zur Natur des Lichtes entwickelte, war **René Descartes**:
- 7 ? Aus seinem Werk *La Dioptrique* (Leiden 1637) stammen die folgenden Zitate. Welche Modelle macht sich Descartes zur Erklärung
- ... der **Lichtausbreitung**,
  - ... der **Farben**,
  - ... des **Sehvorganges**,
  - ... des **Reflexionsgesetzes**,
  - ... der **diffusen Reflexion**?

[1] Da ich nun hier keine andere Veranlassung habe, vom Lichte zu sprechen, als nur die, zu erklären, wie seine Strahlen in das Auge eintreten und wie sie durch die verschiedenen Körper, denen sie begegnen, abgelenkt werden, brauche ich nicht auf die wahre Natur des Lichtes einzugehen, und ich glaube, dass es genügt, wenn ich mich zweier oder dreier Vergleiche bediene, die dazu verhelfen, sie so zu verstehen, wie es mir am bequemsten erscheint, um von allen Eigenschaften des Lichtes die zu erklären, die uns das Experiment erkennen lässt. Daraus sollen dann alle die anderen Eigenschaften abgeleitet werden, die nicht so leicht zu beobachten sind.

[2] Es ist Ihnen sicher schon einmal vorgekommen, dass Sie nachts ohne Licht durch ein schwieriges Gelände gingen und sich dabei eines Stockes zur Führung bedienten. Sie konnten dann bemerken, dass Sie durch die Vermittlung des Stockes die einzelnen Gegenstände ihrer Umgebung fühlen konnten. Sie waren sogar imstande, zu unterscheiden, ob Sie Baum oder Stein, Sand oder Wasser, Gras oder Schmutz oder sonst etwas Ähnliches vor sich hatten. ...

[3] Hier wollen wir nun einen Vergleich ziehen. Denken Sie Sich, das Licht eines leuchtenden Körpers sei nichts anderes als eine gewissen Bewegung oder eine sehr schnelle und lebhaftete Regung, die unser Auge durch die Vermittlung der Luft und anderer durchsichtiger Körper ebenso erreicht, wie Bewegung oder Verharren der Körper dem Blinden durch die Vermittlung des Stockes bekannt werden. Dadurch wird es Ihnen sofort nicht mehr merkwürdig erscheinen, dass das Licht seine Strahlen in einem Augenblick von der Sonne zur Erde ausbreiten kann. Denn Sie wissen, dass die Bewegung, in die man das eine Ende des Stockes versetzt, in einem Augenblick auf das andere Ende übertragen wird, selbst wenn ein so grosser Abstand wie der von der Erde zum Himmel dazwischen ist.

[4] Es wird Ihnen ebenfalls nicht mehr seltsam erscheinen,

dass wir hierdurch alle Arten von Farben sehen können. Sie können es sich vielleicht vorstellen, dass die Farben der bunten Körper nichts anderes sind als die verschiedenen Arten, auf die die Körper das Licht empfangen und in unser Auge zurückstrahlen. Wenn Sie erwägen, dass dem Blinden die Unterschiede, die er zwischen Baum, Stein, Wasser und ähnlichen Dingen mittels seines Stockes bemerkt, nicht geringer erscheinen als uns die Unterschiede zwischen rot, gelb, grün und allen anderen Farben. In jedem Falle bestehen diese Unterschiede bei sämtlichen Körpern in nichts anderem als den verschiedenen Arten der Bewegung oder des Widerstandes gegen die Bewegung des Stockes.

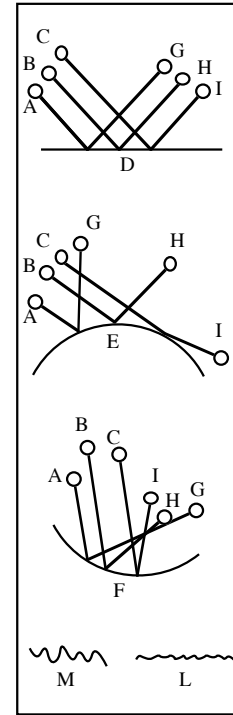
[5] Daraus lässt sich schliessen, dass es nicht nötig ist anzunehmen, dass irgend etwas Materielles von den Gegenständen in unser Auge kommt, um uns Farbe und Licht sehen zu lassen. Ja es braucht an den Gegenständen nichts zu geben, was unseren Vorstellungen oder Wahrnehmungen, die wir von ihnen haben, ähnlich ist. ...


[6] Unser Blinder fühlt die Körper, die ihn umgeben, nicht nur durch die Bewegung der Körper selbst, wenn sie sich vor dem Stock bewegen, sondern auch durch die Bewegung der Hand, wenn die Körper dem Stock widerstehen. So muss man annehmen, dass die vom Auge wahrgenommenen Gegenstände nicht nur durch ihre eigene Bewegung zum Auge hin, sondern auch durch die von den Augen ausgehende und sich auf sie richtende Bewegung wahrgenommen werden können. Auch diese ist nichts anderes als das Licht, jedoch muss man dazu bemerken, dass sie nur bei solchen Augen existieren, die während der Dunkelheit sehen können, wie die der Katzen. Der Mensch dagegen ist für gewöhnlich nur fähig, durch die Bewegung zu sehen, die von den Gegenständen ausgeht, denn die Erfahrung zeigt uns, dass die Gegenstände und nicht unsere Augen leuchtend oder beleuchtet sein müssen, um von uns gesehen zu werden. Da aber doch ein zu grosser Unterschied zwischen dem Stock des Blinden und der Luft oder anderen durchsichtigen Körpern besteht, durch deren Vermittlung wir sehen, muss ich mich jetzt eines anderen Vergleiches bedienen.

[7] Die Lichtstrahlen muss man sich immer so lange genau geradlinig denken, wie sie durch einen einzigen durchsichtigen Körper hindurchgehen, der in sich völlig homogen ist. Wenn sie jedoch einem anderen Körper begegnen, werden sie abgelenkt oder absorbiert, genau so wie die Bewegung eines Balles oder Steines, wenn er in die Luft geworfen wird, von den Körpern beeinflusst wird, denen er begegnet. Denn es liegt nahe

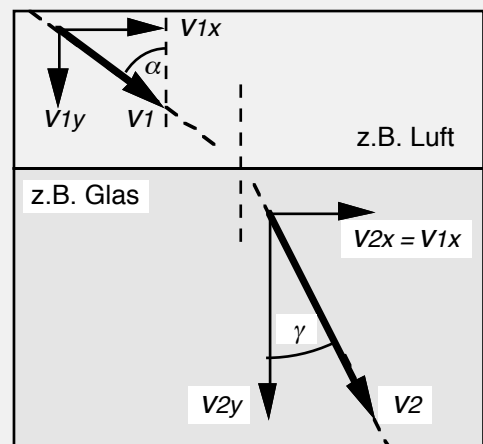
anzunehmen, dass die Regung oder Neigung zur Bewegung, von der ich sagte, dass man sich unter ihr das Licht zu denken habe, hierbei denselben Gesetzen folgen muss wie die Bewegung selbst. Bevor ich diesen dritten Vergleich näher erläutere, bedenken Sie: Die Körper, denen ein Ball begegnen kann, wenn er durch die Luft fliegt, sind entweder hart oder weich oder flüssig. Sind die Körper weich, so halten sie seine Bewegung an oder vernichten sie ganz. Das ist der Fall, wenn man ihn gegen ein Tuch, in den Sand oder Schlamm wirft. Sind die Körper dagegen hart, so werfen sie den Ball nach einer anderen Richtung zurück, ohne ihn anzuhalten.

[8] Treffen nun mehrere Bälle von der gleichen Seite auf einen Körper mit völlig ebener und gleichmässiger Oberfläche, so werden sie auch gleichmässig in derselben Anordnung zurückgeworfen und behalten nach dem Rückstoss den gleichen Abstand voneinander, den sie vorher hatten. Ist die Fläche jedoch nach innen oder aussen gekrümmt, so nähern oder entfernen sich die Bälle voneinander in der Anordnung, die der Grösse der Krümmung entspricht. Sie sehen hier die Bälle ABC die Oberflächen der Körper DEF treffen. Sie werden nach GHI zurückgeworfen. Treffen die Bälle auf eine ungleichmässige Oberfläche wie L oder M, so werden sie nach verschiedenen Seiten zurückgeworfen, je nach der Lage der Stelle der Oberfläche, die sie gerade treffen. Und ihre Bewegungen ändern sich nur in dieser Weise, solange die Unebenheit der Oberfläche nur darin besteht, dass einzelne Teile verschieden gekrümmt sind. ...



- 8  **Sir Isaac Newton** entwickelte um 1672 ebenfalls Theorien zur Erklärung der optischen Phänomene. Er greift das Teilchenmodell von Descartes auf und verbessert dieses. Demnach sendet eine Lichtquelle eine grosse Menge winziger Lichtteilchen aus, die mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig durch den Raum fliegen und beim Auftreffen auf die Netzhaut des Auges eine Helligkeitsempfindung hervorrufen. Fällt ein Strahl solcher Lichtteilchen auf die glatte Oberfläche eines durchsichtigen Körpers, so werden die Lichtteilchen teils reflektiert, teils dringen sie in den Körper ein und bewegen sich im Inneren des Körpers weiter fort. Auf jene Lichtteilchen, die in den Körper eindringen, wirken anziehende Kräfte, welche von den Atomen des Körpers ausgehen und von kurzer Reichweite sind.

Tritt ein Lichtteilchen in den Körper über, so wird es an der Körperoberfläche von diesen Kräften erfasst und in den Körper hineingezogen (beschleunigt). Die senkrechte Geschwindigkeitskomponente wird vergrössert, während die parallele Geschwindigkeitskomponente unverändert bleibt. Befindet sich das Teilchen im Körper, so wirken die anziehenden Kräfte von allen Seiten ein und heben einander gegenseitig auf. Das Lichtteilchen bewegt sich daher im Körper unbeschleunigt weiter.



Newtons Theorie ermöglicht die Berechnung der Brechzahl:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_{1x}/v_1}{v_{2x}/v_2} ,$$

da beim Übertritt vom dünnen ins dichte Medium nur die  $y$ -Komponente beeinflusst wird, gilt

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_{1x}/v_1}{v_{1x}/v_2} = \frac{v_2}{v_1} ,$$

d.h. es gilt

$$n = \frac{v_2}{v_1} .$$

- 9 ? Die Newtonsche Theorie lässt sich auch gut auf das **Reflexionsgesetz** und die **Totalreflexion** ausdehnen. Überprüfen Sie, ob Sie die Theorie verstanden haben, indem Sie nun versuchen, das Reflexionsgesetz zu begründen.

Erklären Sie ebenfalls die Totalreflexion mit dieser Teilchentheorie.

Wo erkennen Sie **Mängel** an Newtons Theorie?

## Die Regenbogenfarben

- 10 ⓘ Newton untersucht das Brechverhalten des Lichtes in einer Versuchsserie sehr genau. Ein erstes Experiment beschreibt er (in seinem Werk *Opticks*, 1672) folgendermassen:

[1] In einem dunklen Zimmer legte ich ein Glasprisma vor eine runde, etwa  $1/3$  Zoll (1 Zoll  $\approx 2.5$  cm) breite Öffnung die ich in den Fensterladen gemacht hatte. Die brechende Kante dieses Prismas stand senkrecht zu den einfallenden Strahlen. Um diese Kante drehte ich das Prisma langsam in ein und derselben Richtung und sah dabei an der Wand das farbige Sonnenbild auf- und absteigen.

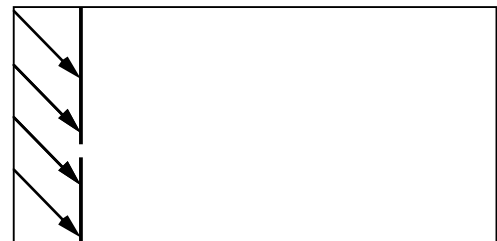
[2] Als das Bild zwischen dem Auf- und Absteigen stillzustehen schien, hielt ich an und befestigte das Prisma in dieser Stellung so, dass es sich nicht mehr bewegen konnte. Da aber das Bild, wie das Experiment zeigte, nicht rund sondern fünfmal so lang als breit war, müssen die nach dem oberen Ende des Bildes fallenden Strahlen stärker gebrochen werden als die, welche zum unteren Ende gelangen.

[3] Das Bild war nun farbig, und zwar an dem weniger gebrochenen Ende rot, am stärker gebrochenen Ende violett, dazwischen aber gelb, grün und blau. Es sieht daher so aus, als ob Licht verschiedener Farbe verschieden stark gebrochen wird.



- 11 ? Skizzieren Sie die beschriebene newtonsche Versuchsanordnung.

- 12 ? Entstehen die beobachteten farbigen Lichter erst bei der Brechung im Prisma oder sind sie schon vorher im weissen Licht vorhanden? Erweitern Sie Newtons Experiment zur Beantwortung dieser Frage.



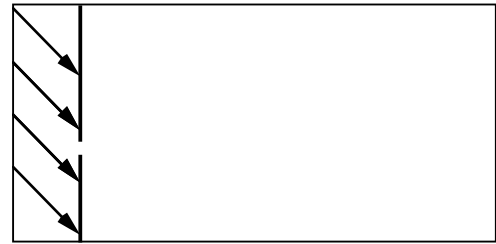
- 13 ? Newton untersucht anschliessend auch die Umkehrung: Was wird beobachtet, wenn die farbigen Lichter zusammengefügt werden? Skizzieren Sie auch diese Versuche.

[4] Das Spektrum des Sonnenlichtes falle jetzt auf eine grosse Linse, welche das farbige vom Prisma her divergierende Licht konvergent macht und in der Nähe des Brennpunktes vereinigt. Dort falle das Licht senkrecht auf ein weisses Papier.

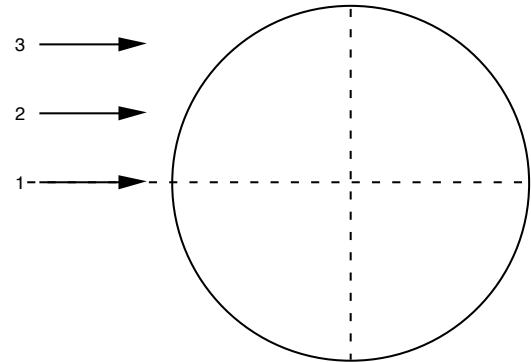
[5] Bewegt man nun dieses Papier vor- und rückwärts, so wird man bemerken, dass näher an der Linse das ganze

Spektrum intensiv gefärbt auf dem Papier erscheint, dass aber bei grösserer Entfernung von der Linse die Farben einander immer näher kommen und durch Vermischung kontinuierlich undeutlich werden, bis sie schliesslich ganz verschwinden und das gesamte Licht auf dem Papier in der Nähe des Brennpunktes als kleiner, weisser Kreis erscheint.

[6] Nachher, wenn das Papier noch weiter von der Linse entfernt wird, werden sich die vorher konvergenten Strahlen kreuzen und von da aus divergieren und die Farben wieder erscheinen lassen, aber in umgekehrter Folge.



- 14 Die am Prisma sichtbaren Spektralfarben erkennen wir auch im **Regenbogen**. Dieser ist offenbar ein Brechungsphänomen. Der Regenbogen wird dann wahrgenommen, wenn die Sonne im Rücken des Beobachters steht und ihr Licht gegen Regentropfen strahlt. Auf welchem Weg die Lichtstrahlen ins Auge des Beobachters gelangen, sollte die folgende Konstruktion klar machen.



- 15 ? Bei guten Wetterbedingungen kann auch ausserhalb des eigentlichen **Hauptregenbogens** ein schwächerer **Nebenregenbogen** wahrgenommen werden, dessen Farbverlauf umgekehrt ist. Haben Sie auch dafür eine Erklärung?

- 16 Newton erntete mit seinen Arbeiten nicht nur Lob. Ein berühmter Kritiker ist **Goethe**; die folgenden Aphorismen stammen aus seinen *Schriften zur Naturwissenschaft*.

[1] Newton, als Mathematiker, steht in so hohem Ruf, dass der ungeschickteste Irrtum: nämlich das klare, reine, ewig ungetrübte Licht sei aus dunklen Lichtern zusammengesetzt, bis auf den heutigen Tag sich erhalten hat; und sind es nicht Mathematiker, die dieses Absurde noch immer verteidigen und gleich dem gemeinsten Hörer in Worten wiederholen, bei denen man nichts denken kann?

[2] Der Newtonsche Versuch, auf dem die herkömmliche Farbenlehre beruht, ist von der vielfachsten Komplikation, er verknüpft folgende Bedingungen.

Damit das Gespenst erscheine, ist nötig:

Erstens - Ein gläsernes Prisma;

Zweitens - Dreiseitig;

Drittens - Klein;

Viertens - Ein Fensterladen;

Fünftens - Eine Öffnung darin;

Sechstens - Diese sehr klein;

Siebtens - Sonnenbild, das hereinfällt;

Achtens - Aus einer gewissen Entfernung;

Neuntens - In einer gewissen Richtung aufs Prisma fällt;

Zehntens - Sich auf einer Tafel abbildet; Elftens - Die in einer gewissen Entfernung hinter das Prisma gestellt ist.

Nehme man von diesen Bedingungen drei, sechs und elf weg, man mache die Öffnung gross, man nehme ein grosses Prisma, man stelle die Tafel nah heran, und das beliebte Spektrum kann und wird nicht zum Vorschein kommen.

[3] Wissenschaften entfernen sich im Ganzen immer vom Leben und kehren nur durch einen Umweg wieder dahin zurück.

[4] Und gehört die Farbe nicht ganz eigentlich dem Gesicht an?

[5] Ich habe nichts dagegen, wenn man die Farbe sogar zu fühlen glaubt; ihr eigenes Eigenschaftliche würde nur dadurch noch mehr betätigt.

[6] Durch eine sonderbare Verknüpfung von Umständen ist die Farbenlehre in das Reich, vor den Gerichtsstuhl des Mathematikers gezogen worden, wohin sie nicht gehört. Dies geschah wegen ihrer Verwandtschaft mit den übrigen Gesetzen des Sehens, welche der Mathematiker zu behandeln eigentlich berufen war. Es geschah ferner dadurch, dass ein grosser Mathematiker die Farbenlehre bearbeitete, und da er sich als Physiker geirrt hatte, die ganze Kraft seines Talents aufbot, um diesem Irrtum Konsistenz zu verschaffen.

- 17 ? Versuchen Sie, in wenigen Sätzen und mit Ihren Worten, Goethes Kritik (ohne die Polemik) zusammen zu fassen.

## Die Lichtgeschwindigkeit

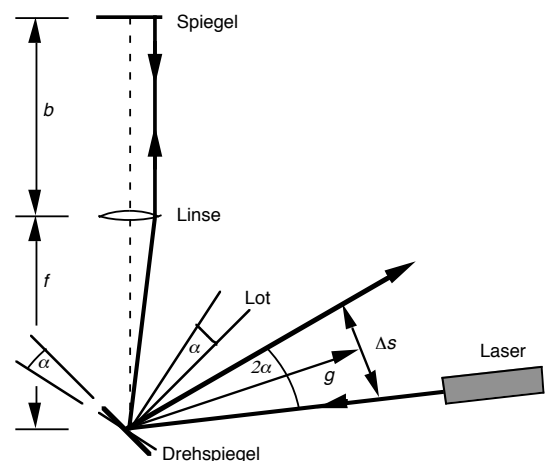
**18** ⓘ Durch präzise Beobachtungen der Jupitermonde entdeckte **Ole Römer** im Jahre 1675 die Tatsache, dass sich das Licht mit einer bestimmten endlichen Geschwindigkeit ausbreitet. Aufgrund seiner Beobachtungen schätzte er die Lichtgeschwindigkeit auf  $300'000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Lesen Sie dazu den Text in Sexl, Raab, Streeruwitz: *Der Weg zur modernen Physik*, Seite 64, und notieren Sie die wichtigsten Punkte der Überlegung.

**19** ⓘ Wie sich erst anfangs dieses Jahrhunderts herausstellte, ist die Lichtgeschwindigkeit, die grösste Geschwindigkeit, die es überhaupt geben kann. Trotz ihrer Grösse ist es uns möglich, diese Geschwindigkeit in einem Laborversuch zu bestimmen:

Ein Laserstrahl wird auf einen schnell rotierenden Spiegel gerichtet. Die Drehachse des Spiegels ist genau im Brennpunkt einer Sammellinse platziert. Steht der Spiegel so, dass der Laserstrahl auf die Linse fällt, so verläuft der Strahl nach der Linse parallel zur optischen Achse bis zu einem ebenen Spiegel, der genau senkrecht zur optischen Achse steht. Dieser Spiegel wirft den Strahl auf dem gleichen Weg wie er "gekommen" ist zum Drehspiegel zurück. Hätte sich der Spiegel in der Zwischenzeit nicht gedreht, würde der Strahl wieder in den Laser zurückfallen.

Nun hat sich der Spiegel aber in der Zwischenzeit etwas gedreht und wirft den Lichtstrahl somit neben den Laser. Diese Abweichung wird besser sichtbar gemacht, indem ein ebenes Glas (in der unteren Skizze nicht dargestellt) derart schräg in den Laserstrahl gestellt wird, dass der zurückfallende Strahl seitlich auf einen Schirm gelenkt wird. Je schneller der Spiegel nun dreht, umso grösser ist die auf dem Schirm erkennbare Verschiebung.

Diese Verschiebung  $\Delta s$  wird gemessen, ebenso die Distanz zwischen Drehspiegel und Schirm  $g$ . Daraus kann nun der Drehwinkel  $\alpha$  des Spiegels bestimmt werden. Aus dem Drehwinkel und der gemessenen Drehfrequenz  $f_s$  des Spiegels wird nun die Laufzeit des Lichtes für die Strecke von Drehspiegel zum ebenen Spiegel und zurück bestimmt. Wenn diese Distanz  $f + b$  gemessen ist, kann damit die Lichtgeschwindigkeit berechnet werden.



**20** 👁 Wenn möglich führen Sie diesen Versuch in einem Halbklassenpraktikum durch. Sie berechnen darin aufgrund der Messwerte für die Drehfrequenz des Spiegels  $f_s$  und die Strecken  $\Delta s$ ,  $r$ ,  $b + f$  die Lichtgeschwindigkeit  $c$  und schätzen die Messgenauigkeit ab.

## Die Wellentheorie des Lichtes

**21 ?** Die folgenden Textabschnitte stammen aus dem Werk von **Christiaan Huygens: *Abhandlung über das Licht (Traité de la Lumière)***, 1678. In den Abschnitten [1] bis [8] stellt Huygens dar, wie er zur Wellentheorie kommt und welches die notwendigen Voraussetzungen für diese Theorie sein müssen.

Zählen Sie die aufgeführten Gründe für die Wellentheorie auf.

[1] Ich möchte daher glauben, dass diejenigen, welche die Ursachen kennen zu lernen bestrebt sind, und die Pracht der Lichterscheinungen zu bewundern verstehen, einige Befriedigung finden werden in diesen verschiedenen auf das Licht bezüglichen Betrachtungen und in der neuen Erklärung seiner vorzüglichsten Eigenschaften, welche die Hauptgrundlage für den Bau unserer Augen und jene grossen Erfindungen bildet, die den Gebrauch derselben so sehr erweitern. Ich hoffe auch, dass spätere Forscher, indem sie diese Anfänge weiter verfolgen, in diesen Gegenstand tiefer, als ich es vermochte, eindringen werden, da derselbe hiermit noch lange nicht erschöpft ist.

[2] Die Beweisführungen in der Optik gründen sich, wie in allen Wissenschaften, in welchen die Geometrie auf die Materie angewandt wird, auf Wahrheiten, welche aus der Erfahrung abgeleitet sind: wie zum Beispiel, dass die Lichtstrahlen sich geradlinig ausbreiten, dass Reflexions- und Einfallswinkel gleich sind, und dass bei der Brechung der Strahl nach der Sinusregel gebrochen wird, die jetzt so bekannt und nicht weniger sicher ist als die vorhergehenden. Die Mehrzahl derjenigen, welche über die verschiedenen Teile der Optik geschrieben haben, haben sich damit begnügt, diese Wahrheiten vorauszusetzen. ...

[3] ... (Es) hat ja doch meines Wissens noch niemand auch nur die ersten und wichtigsten Erscheinungen des Lichtes annehmbar erklärt, nämlich warum es sich nur in geraden Linien fortpflanzt und wie die Lichtstrahlen, welche aus unendlich vielen verschiedenen Richtungen herkommen, sich kreuzen, ohne sich gegenseitig irgendwie zu hindern. ...

[4] Wenn man ferner die ausserordentliche Geschwindigkeit, mit welcher das Licht sich nach allen Richtungen ausbreitet, beachtet und erwägt, dass wenn es von verschiedenen, ja selbst von entgegengesetzten Stellen herkommt, die Strahlen sich einander durchdringen, ohne sich zu hindern, so begreift man wohl, dass, wenn wir einen leuchtenden Gegenstand sehen, dies nicht durch die Übertragung einer Materie geschehen kann, welche von diesem Objekte bis zu uns gelangt, wie etwa ein Geschoss oder ein Pfeil die Luft durchfliegt: denn dies widerspricht doch zu sehr diesen beiden Eigenschaften des Lichtes und besonders der letzteren. Es muss sich demnach auf eine andere Weise ausbreiten, und gerade die Kenntnis, welche wir von der Fortpflanzung des Schalles in der Luft besitzen, kann uns dazu führen, sie zu verstehen.

[5] Wir wissen, dass vermittelt der Luft, die ein unsichtbarer und ungreifbarer Körper ist, der Schall sich im ganzen

Umkreis des Ortes, wo er erzeugt wurde, durch eine Bewegung ausbreitet, welche allmählich von einem Luftteilchen zum anderen fortschreitet, und dass, da die Ausbreitung dieser Bewegung nach allen Seiten gleich schnell erfolgt, sich gleichsam Kugelflächen bilden müssen, welche sich immer mehr erweitern und schliesslich unser Ohr treffen. Es ist nun zweifellos, dass auch das Licht von den leuchtenden Körpern bis zu uns durch irgend eine Bewegung gelangt, welche der dazwischen befindlichen Materie mitgeteilt wird: denn wir haben ja bereits gesehen, dass dies durch die Fortführung eines Körpers, der etwa von dort hierher gelangt, nicht geschehen kann. Wenn nun, wie wir alsbald untersuchen werden, das Licht zu seinem Wege Zeit gebraucht, so folgt daraus, dass diese dem Stoffe mitgeteilte Bewegung eine allmähliche ist, und darum sich ebenso wie diejenige des Schalles in kugelförmigen Flächen oder Wellen ausbreitet; ich nenne sie nämlich Wellen wegen der Ähnlichkeit mit jenen, welche man im Wasser beim Hineinwerfen eines Steines sich bilden sieht, weil diese eine ebensolche allmähliche Ausbreitung in die Runde wahrnehmen lassen, obschon sie aus einer anderen Ursache entspringen und nur in einer ebenen Fläche sich bilden. ...

[6] Die Ursache für die Ausbreitung der Schallwellen ist hiernach das den sich untereinander stossenden Körperchen innewohnende Bestreben, sich wieder von einander zu entfernen, sobald sie im Umfang dieser Wellen ein wenig mehr als anderswo zusammengedrängt sind. Die ausserordentliche Geschwindigkeit und die übrigen Eigenschaften des Lichtes würden dagegen eine solche Fortpflanzung der Bewegung nicht zulassen; und ich will nun zunächst darlegen, von welcher Art dieselbe nach meiner Ansicht sein muss. Ich muss zu diesem Zwecke erklären, auf welche Weise die harten Körper ihre Bewegung einander mitteilen.

[7] Nimmt man eine Anzahl gleich grosser Kugeln aus sehr hartem Material und ordnet sie in gerader Linie so, dass sie sich berühren, so wird, wenn eine gleiche Kugel gegen die erste derselben stösst, die Bewegung wie in einem Augenblicke bis zur letzten gelangen, welche sich von der Reihe trennt, ohne dass man bemerkt, dass die übrigen sich bewegt hätten; und diejenige, welche den Stoss ausgeübt hat, bleibt sogar unbeweglich mit ihnen vereinigt. Es offenbart sich also hierin ein Bewegungsübergang von ausserordentlicher Geschwindigkeit, welche um so grösser ist, je grössere Härte die Substanz der Kugeln besitzt.

[8] Um nun diese Bewegungsart auf diejenige anzuwenden, durch welche das Licht erzeugt wird, so hindert uns nichts, die Annahme zu machen, dass die Aetherteilchen aus einer Materie bestehen, welche der vollkommenen Härte sich so sehr nähert und so grosse Elastizität besitzt, als wir wollen. Für den vorliegenden Zweck brauchen wir weder die Ursache für eine solche Härte noch diejenige für die Elastizität zu untersuchen, da diese Betrachtung uns zu weit von unserem Gegenstand abführen würde. ...

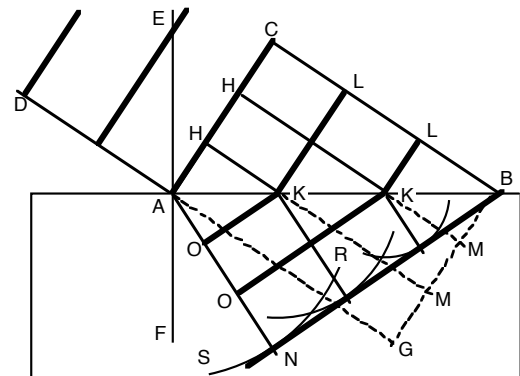
22 ? Später gelangt Huygens in seiner Abhandlung zur Formulierung seines grundlegenden Prinzips, welches schon im Skript 7 in unserer Sprache wiedergegeben wurde.

23 ⓘ Für die Erklärung des **Brechungsgesetzes** soll noch einmal Huygens selbst zu Wort kommen: Er erklärt anhand folgender Zeichnung.

[9] Um nun diese Erscheinungen nach meinen Prinzipien zu erklären, nehme ich an, dass die Gerade AB, welche eine Ebene darstellt, die durchsichtigen Körper begrenzt, welche nach C und N hin sich erstrecken.... Die Linie AC möge einen Teil einer Lichtwelle darstellen, deren Mittelpunkt so entfernt angenommen wird, dass dieser Teil als eine gerade Linie angesehen werden kann. Die Stelle C der Welle AC wird nun in einem gewissen Zeitraume bis zur Ebene AB längs der Geraden CB gelangt sein, welche von dem leuchtenden Zentrum ausgehend zu denken ist und darum AC rechtwinklig schneidet. In derselben Zeit würde nun die Stelle A längs der CB gleichen und parallelen Geraden AB in G angelangt sein, während der ganze Wellenteil AC in GB sein würde, wenn die Materie des durchsichtigen Körpers die Wellenbewegung ebenso schnell übertragen würde, wie diejenige des Äthers. Nehmen wir jedoch an, dass sie diese Bewegung weniger schnell fortpflanze, beispielsweise um einen Drittel. Dann wird sich von dem Punkte A aus in dem Stoffe des durchsichtigen Körpers die Bewegung ausgebreitet haben bis zu einer Erstreckung, welche  $\frac{2}{3}$  ist von CB, indem sie gemäss der früheren Auseinandersetzung ihre kugelförmige Einzelwelle bildet. Diese Welle wird demnach durch den Kreis SNR dargestellt, dessen Mittelpunkt A und dessen Halbmesser gleich  $\frac{2}{3}$  CB ist. Betrachtet man nunmehr die übrigen Stellen H der Welle AC, so ist klar, dass sie in derselben Zeit, in welcher die Stelle C nach B gelangt ist, nicht nur bis zu der Fläche AB durch die mit CB parallelen Geraden HK gelangt sein, sondern auch noch um die Mittelpunkte K Einzelwellen indem durchsichtigen Körper erzeugt haben werden, welche hier durch Kreise dargestellt sind, deren Halbmesser gleich  $\frac{2}{3}$  der Linien KM sind, d.h.

24 R Wie schon im Teilchenmodell, so kann man auch in der Wellentheorie den Brechungsindex mit den Lichtgeschwindigkeiten in den zwei verschiedenen Medien in Beziehung setzen. Führen Sie die nebenan ange-

**Huygensches Prinzip**  
**Jeder Punkt, der von einer Welle getroffen wird, kann als Ausgangspunkt einer Elementarwelle angesehen werden.**  
**Durch das Zusammenwirken vieler Elementarwellen entsteht eine neue Wellenfront, die man geometrisch als Einhüllende der Elementarwellen konstruieren kann.**



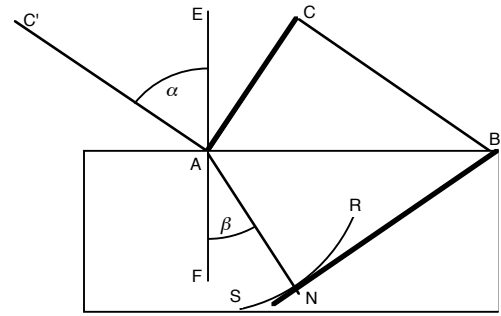
gleich  $\frac{2}{3}$  der Verlängerungen der Geraden HK bis zu der Geraden BG; denn diese Halbmesser werden den ganzen Strecken KM gleich gewesen sein, wenn die beiden durchsichtigen Mittel die nämliche Fortpflanzungsfähigkeit besässen.

[10] Alle diese Kreise haben nun zur gemeinschaftlichen Tangente die Gerade BN, d.h. dieselbe, welche von B aus als Tangente an den zuerst betrachteten Kreis SNR gezogen ist. Denn es ist leicht einzusehen, dass alle übrigen Kreise ebenfalls BN berühren und zwar von B an bis zum Berührungspunkte N, welcher zugleich der Fusspunkt des Lotes AN auf BN ist.

Die Gerade BN also, welche gleichsam von kleinen Bogenteilchen dieser Kreise gebildet wird, begrenzt die Bewegung, welche die Welle AC an den durchsichtigen Körper mitgeteilt hat, und auf ihr ist diese Bewegung in grösserem Betrage vorhanden als überall sonstwo. Und darum ist diese Linie, wie bereits wiederholt dargelegt worden, die Fortsetzung der Welle AC in dem Augenblicke, in welchem ihre Stelle C in B angekommen ist. Denn es gibt unterhalb der Ebene AB keine andere Linie, welche wie BN die gemeinschaftliche Tangente aller jener Einzelwellen wäre. Will man wissen, wie die Welle AC allmählich nach BN gelangt ist, so braucht man in derselben Figur nur die Geraden KO parallel zu BN und alle mit AC parallelen Linien KL zu ziehen. Die Welle CA wird also, wie man sieht, aus der Geraden in alle LKO nacheinander gebrochen und wird in BN wieder gerade.

fangene Herleitung weiter.

Aus Huygens' Argumenten folgt, dass das Licht für die Strecke  $CB = C'A$  die gleiche Zeit benötigt, wie für die Strecke  $AN$ . Diese Strecken kann man mit den Lichtgeschwindigkeiten  $v_1$  (im optisch dünneren Medium) und  $v_2$  in Beziehung setzen. Sie tun dies, nachdem Sie die Sinusfunktionen im Brechungsgesetz durch Streckenverhältnisse dargestellt haben. (Kapitel 7)



$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{C'A}{AB} = \dots$$

- 25 ? Bestimmen Sie die Lichtgeschwindigkeit in Wasser aufgrund der Brechzahl.
- 26 ? Gemäss obigen Ausführungen müsste also auch die Lichtgeschwindigkeit in Luft kleiner sein als in Vakuum. Wie gross ist der relative Unterschied (d.h. die prozentuale Abweichung)?
- 27 ? Was folgern Sie aus den Newtonschen Versuchen zu den Spektralfarben in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Farbe und Lichtgeschwindigkeit?

**Interferenzphänomene des Lichtes**

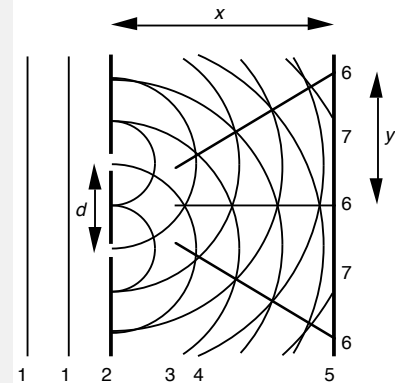
- 28 ⓘ Wenn die Idee von der Wellennatur des Lichtes richtig ist, dann müssten auch Interferenzphänomene beobachtet werden können. Solche Phänomene gibt es tatsächlich, was als Beweis für die Wellennatur gehalten werden kann. Derartige Beobachtungen erlauben auch, die Wellenlängen (und damit auch die Frequenzen) der Lichtwellen zu berechnen!
- 29 👁 Im Schulzimmer steht eine **brennende Kerze**. Was beobachten Sie, wenn Sie die Kerze mit zugekniffenen Augen betrachten?  
Betrachten Sie die Kerzenflamme durch eine **Vogelfeder** hindurch!
- 30 👁 **Interferenz am Doppelspalt:** Ein Laserstrahl (als ebene Lichtwelle zu betrachten) wird auf zwei schmale Spalten von geringem gegenseitigem Abstand gerichtet. Es zeigt sich etwas Eigenartiges ...

Wir erklären die Beobachtung am Modell der Wasserwellen (Skript 7). Es zeigt sich nämlich hier das analoge Bild zur Beugung von Wasserwellen am Doppelspalt: Auf dem Schirm sind etwa nicht nur zwei helle Lichtflecken zu sehen, sondern mehrere, nach aussen schwächer werdende.

Haben wir das Phänomen qualitativ verstanden, so können wir durch quantitative Analyse die Wellenlänge vom roten Laser-Licht bestimmen.

- 31 📐 Wir werden nun also mit Hilfe eines Doppelspalt, die Wellenlänge von rotem Laserlicht durch eine Messung bestimmen. Die Elemente der Rechnung sind:
  - a) Das **Hauptmaximum** ist die hellste Stelle auf dem

**Beugungsbild des Doppelspalt:**



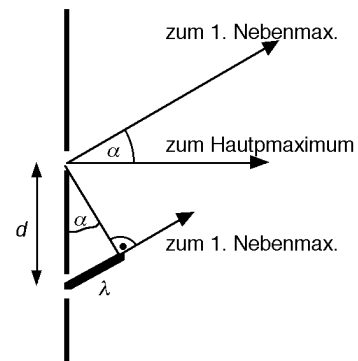
**Zur Interferenz des Lichtes am Doppelspalt.**

**Die Zahlen bedeuten:**

- 1 ebener Wellenberg eines Lichtstrahls
- 2 Blende mit 2 Spalten im Abstand  $d$
- 3 Wellenberg einer vom unteren Spalt ausgehenden Elementarwelle
- 4 Wellenberg einer vom oberen Spalt ausgehenden Elementarwelle
- 5 Schirm
- 6 Helligkeitsmaxima: "Licht + Licht = helles Licht"  
In der Mitte ist das **Hauptmaximum**. Daneben liegt auf beiden Seiten je das **erste Nebenmaximum**.
- 7 dunkle Stelle auf dem Schirm: "Licht + Licht = Dunkelheit"

Schirm. Wellenberge, die gleichzeitig durch die beiden Spalten treten, treffen auch gleichzeitig auf dieser Stelle des Schirmes auf. Dies führt dort zu konstruktiver Interferenz.

- b) Beim **1. Nebenmaximum** treffen ebenfalls gleichzeitig die Wellenberge (resp. die Wellentäler) ein. Deshalb entsteht auch dort konstruktive Interferenz. Der Unterschied zum Hauptmaximum ist aber der, dass jener Wellenberg, der vom entfernteren Spalt her kommt einen etwas weiteren Weg hat. **Dieser Wegunterschied muss genau eine Wellenlänge** betragen.
- c) Dieses Kriterium verwenden Sie nun für die Berechnung der Wellenlänge aus dem **Spaltenabstand  $d$** , der **Distanz  $x$**  zwischen dem Schirm und dem Doppelspalt und aus der **Distanz  $y$**  zwischen dem Haupt- und dem ersten Nebenmaximum.
- d) Aus den Überlegungen geht hervor, dass für  **$\sin \alpha$**  zwei Ausdrücke angegeben werden können. Durch Gleichsetzen und Umformen gewinnen Sie einen Ausdruck für die Wellenlänge.



Die Lichtwege von den beiden Spalten zum 1. Nebenmaximum verlaufen nahezu parallel, da im Experiment  $x \gg d$  ist.

- 32** ⓘ Dieser Interferenz-Effekt kann verstärkt werden, indem das Licht nicht durch zwei, sondern durch viele Spalten (durch ein **Strichgitter**) geschickt wird: Die Lichtpunkte werden dadurch heller und deutlicher voneinander getrennt.
- Wie sieht das Beugungsmuster wohl aus, wenn ein Lichtstrahl durch ein feines Gitter geschickt wird?

- 33** ? Damit durch ein weiteres Experiment **jeder Farbe** des Spektrums eine **Wellenlänge** zugeordnet werden kann, beantworten Sie durch eine Rechnung die folgende Frage:

Wie gross sind für die in der Tabelle rechts vorgegebenen Wellenlängen die Entfernung zwischen dem Hauptmaximum und dem ersten Nebenmaximum, wenn ein Strichgitter mit 13'400 „lines per inch“ 2 Meter weit vom Schirm entfernt aufgestellt wird?

- 34** 👁 Mit der vorherigen Aufgabe haben wir eine Skala konstruiert, welche uns erlaubt, den Spektralfarben direkt die Wellenlängen zuzuordnen. Zeichnen Sie einige Farben an der richtigen Stelle im **Wellenlängenspektrum des Lichtes** ein.

**Berechnung der Wellenlänge**

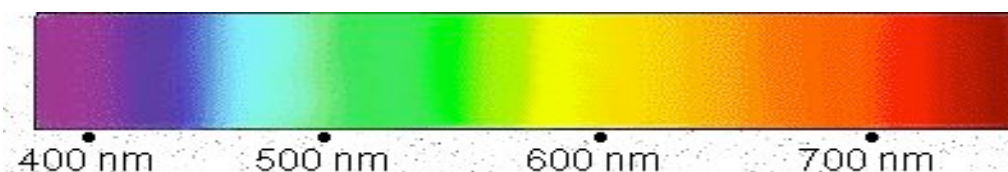
$\lambda =$

**d** Abstand der Spalten des Strichgitters  
**y** Abstand zwischen Haupt- und 1. Nebenmaximum  
**x** Abstand zwischen Strichgitter und Hauptmaximum



Für das **rote Laserlicht** erhalten wir:

$\lambda_{rot} =$


Wellenlänge	y in cm
200 nm	
400 nm	
600 nm	
800 nm	
1000 nm	




**Das Spektrum des Lichtes:** Die Farbe des Lichtes als Funktion der Wellenlänge

- 35**  Es gibt eine ganze Menge von weiteren Interferenzerscheinungen, von denen einige im Unterricht gezeigt werden.
- Newtonsche Ringe**
  - Farben **dünnere Schichten** (Ölfilm, Seifenblasfarben)
  - Beugungserscheinungen am **Draht** oder **Spalt**
  - Beugung und Spektralfarben am **Strichgitter**
- 36**  Wenn die Wellenlängen des Lichtes einmal bekannt sind, können die Interferenzerscheinungen auch dazu benutzt werden, um kleinste Distanzen zu messen: **Interferometer** zur Abstandsmessung, Bestimmung der Atomgrösse und Abstände im **Kristallgitter**
- In einem Halbklassenpraktikum werden Sie mit Hilfe des Beugungsmusters von rotem Laserlicht die Speicherkapazität einer CD abschätzen können.

## Die Polarisation


- 37**  Sind Lichtwellen Longitudinalwellen oder Transversalwellen? Ein Experiment gibt Aufschluss.
- Was wir in diesem Experiment sehen, kennen wir auch aus alltäglichen Anwendungen: **Polaroidbrille, Flüssigkristallanzeige, Laptopbildschirm.**

## Elektromagnetische Wellen

- 38**  **Michael Faraday** macht im Jahre 1845 in seinem Tagebuch folgende Einträge:

7498. Heute arbeitete ich mit magnetischen Kraftlinien, indem ich sie durch verschiedene Körper (durchsichtig in verschiedenen Richtungen) schickte und gleichzeitig einen polarisierten Lichtstrahl durch sie schickte, und dahinter den Strahl mit einem Nicol-Prisma untersuchte oder auf andere Weise untersuchte. Die Magnete waren Elektromagnete, der eine unser grosser Zylinder-Elektromagnet und der andere ein provisorischer Eisenkern, der in eine Spule auf einen Rahmen gesetzt war – dieser war nicht annähernd so stark wie der vorherige. Der Strom von 5 Zellen einer Grove-Batterie wurde durch beide Spulen gleichzeitig geschickt und die Magnete wurden aktiviert bzw. deaktiviert, indem

man den Strom anschaltete oder ausschaltete. ...  
7504. Ein Stück schweres Glas, das 2 inches mal 1,8 inches und 0,5 inches dick war, ein Blei-Silizium-Borat, poliert an den zwei kleinsten Endflächen, wurde zum Experimentieren verwendet. ..., wenn entgegengesetzte Magnetpole auf der gleichen Seite waren, dann gab es einen Einfluss auf den polarisierten Strahl, und folglich wurde nachgewiesen, dass **magnetische Kraft und Licht eine Beziehung zueinander haben.** ...

- 39**  Obwohl Sie ohne weitere Besprechung diesen Eintrag nur teilweise verstehen, zeigt er doch, dass Licht mit Elektrizität und Magnetismus zusammenhängt. Die Lichtwellen sind nur ein Teil des Spektrums aller möglichen elektromagnetischen Wellen. (Siehe Übersicht auf folgender Seite)

**Lichtwellen sind elektromagnetische Transversalwellen und als solche nur ein kleiner Teil eines Spektrums, das sich über viele Grössenordnungen erstreckt.**

- 40 R** Können Sie die folgenden Fragen beantworten?
- a) Können Sie die einleitend gemachten Beobachtungen an der Kerzenflamme qualitativ erklären?
  - b) Was antworten Sie einer Person ohne Ausbildung in Physik auf die Frage: "Warum weiss man, dass es Lichtwellen gibt?"
  - c) Welche Frequenzen haben blaues, gelbes, rotes Licht etwa?
  - d) Welche Farberscheinungen in der Natur kommen durch Interferenz zustande? Beispiele?
  - e) Warum bezeichnet man das Laserlicht als **monochromatisches Licht**.

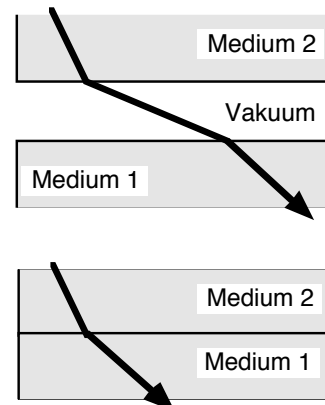
Wellenlänge in m	Bezeichnung
$10^5 - 10^4$	Niederfrequenz (Mikrofon)
$10^4 - 10^0$	LW, MW, KW, UKW
$10^0 - 10^{-3}$	Fernsehen, Richtfunk, Radar-Wellen
$10^{-3} - 10^{-4}$	Mikrowellen
$10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$	Infrarot-Strahlung (Wärmestrahlung)
<b><math>8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}</math></b>	<b>Licht: rot ... blau</b>
$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	Ultraviolett-Strahlung
$10^{-9}$	Röntgenstrahlung
$10^{-10} - \dots$	$\gamma$ -Strahlung

- 41 R** Die Farben eines **Prismas** und die schimmernden Farben einer **CD** entstehen auf unterschiedliche Weise. Beschreiben Sie für beide Fälle jeweils mit höchstens zwei Sätzen das grundlegende Prinzip.

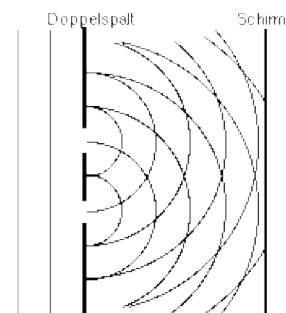
- 42 R** Rotes Licht dringt durch zwei sehr nahe beisammenliegende schmale Oeffnungen in einer Blende. Auf einer weissen Wand in 2 m Entfernung ist das hier im Masstab 1:1 wiedergegebene Muster erkennbar. Welche (quantitativen) Informationen erhalten Sie daraus über die **zwei schmalen Oeffnungen** in der Blende?  
(Wie Sie wissen, sind die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes im Bereich 400 nm bis 800 nm. )



- 43 R** Die dicke Linie stellt jeweils einen Lichtstrahl dar, der verschiedene durchsichtige Medien durchdringt, einmal mit und einmal ohne Zwischenraum
- a) In welchem der beiden Medien ist die Lichtgeschwindigkeit grösser?
  - b) Berechnen Sie nun die **Brechzahl** für den direkten Uebergang **Plexiglas-Diamant**. (Hinweis: Schiebt man die zwei Medien näher zusammen, so wird lediglich der Lichtweg im Vakuum kürzer, an den Winkeln jedoch ändert sich nichts. Berühren sich die beiden Medien 1 und 2, so können wir auch sagen, der Zwischenraum sei unsichtbar dünn.)



- 44 R** Die Zeichnung stelle die Elementarwellen von monochromatischem rotem Licht dar, die von den beiden Öffnungen eines Doppelspalt aus gehen. Durch die Interferenz dieser Elementarwellen werden auf dem Schirm Lichtmaxima und -minima sichtbar.  
Zeichnen Sie auf dem Schirm das Hauptmaximum und die ersten Nebenmaxima ein.  
Wo würden diese Maxima liegen, wenn es blaues Licht wäre? (ebenfalls einzeichnen und beschriften)



**Ergänzungen**

- 45** Unter dieser Nummer halten Sie eventuelle Ergänzungen fest.

- Es gibt keine Ergänzungen!
- Es gibt Ergänzungen: