Lichtbeugung und Interferenz

1 Einleitung

1.1 Zeitgeschichtliche Betrachtung

Abbildung 1: Isaac Newton (1643–1727) und Christiaan Huygens (1629–1695)

Schon vor über 300 Jahren versuchten Physiker, das Phänomen des Lichtes zu erforschen. Der Engländer Isaac Newton stellte zwar die treffende Hypothese auf, dass sich weißes Licht aus Komponenten aller Farben zusammensetzt, jedoch war er sich nicht sicher, ob man sich Licht als Strom einzelner Teilchen oder als Welle vorstellen muss. Da er keine Lichtbeugung und Interferenz beobachten konnte, tendierte er zu der Annahme, dass es sich um Korpuskeln handeln müsse. Zur gleichen Zeit vertrat der Niederländer Christiaan Huygens die Wellennatur des Lichtes, da er damit u.a. das Reflexions– und Brechungsgesetz erklären konnte. Diese konträren Annahmen gingen als **Welle–Teilchen–Dualismus** in die Geschichte der Physik ein. Über 100 Jahre später konnte der englische Physiker Thomas Young (1773–1829) mit einem Spaltexperiment Beugungs– und Interferenzerscheinungen des Lichtes nachweisen, welche die Welleneigenschaften des Lichtes bestätigten (vgl. Abbildung 2). Es folgten weitere Experimente, die wiederum nur über die Teilchennatur des Lichtes zu deuten waren, u.a. der Photoeffekt, der 1905 von Albert Einstein über die Teilchentheorie des Lichtes richtig beschrieben und vorhergesagt wurde.

Spaltexperimente werden heutzutage eingesetzt, um beispielsweise die Wellenlänge von monochromatischem Licht zu bestimmen, oder in der Produktionskontrolle, zur Vermessung von

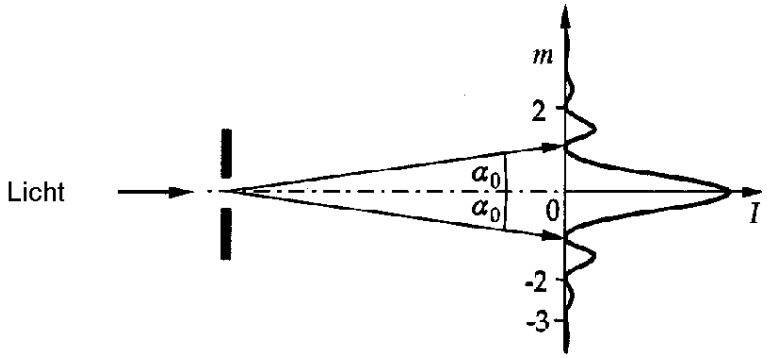

Abbildung 2: Beugung am Einfachspalt

Spaltmaßen bzw. Dicken.

1.2 Ziel des Experiments

Im vorliegenden Versuch werden Geometriebestimmungen, wie Messung von Spaltbreiten oder Materialdicken mit Hilfe eines Beugungsexperiments nachvollzogen. Dazu wird zunächst die zu Grunde liegende Theorie der Beugung am Einfachspalt zusammengefasst. Anschließend wird erklärt, warum die Interferenzfigur eines Einfachspalts mit der Interferenzfigur eines Einfachhindernisses identisch ist:
Bringt man anstelle eines Einfachspaltes der Breite b beispielsweise einen Draht vom Durchmesser b in den Strahlengang eines Laserstrahls ein, so ändert sich dabei die Lage der Intensitätsminima und –maxima der Interferenzfigur nicht. So ist es möglich, die Gültigkeit des Kriteriums für Minima und Maxima beim Einfachspalt auf das Einfachhindernis zu übertragen. Als Anwendungsbeispiel soll in diesem Experiment der Elektrodenabstand einer KFZ–Zündkerze, sowie die Dicke eines Haares oder eines Drahtes vermessen werden.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Monochromasie und Kohärenz

Heutzutage ist bekannt, dass Licht als elektromagnetische Welle aufgefasst werden kann. Elementare Grundlage bei Beugungsexperimenten wie dem Spaltversuch ist die Verwendung von Licht, welches geeignete Eigenschaften besitzt: Ein Lichtstrahl sollte dazu aus zueinander parallelen Wellenzügen bestehen, die an einem beliebigem Raumpunkt paarweise eine zeitlich konstante Phasenbeziehung zueinander haben (Kohärenz). Dies setzt voraus, dass es sich um Wellenzüge einheitlicher Frequenz (Monochromasie) handelt.

Kommt es zur Superposition von kohärenten Wellenzügen, so zeigen sich charakteristische Überlagerungserscheinungen, welche man als Interferenz bezeichnet. Abbildung 3 verdeutlicht den Unterschied zwischen weißem Licht (z.B. Glühlampe), parallelem monochroma-

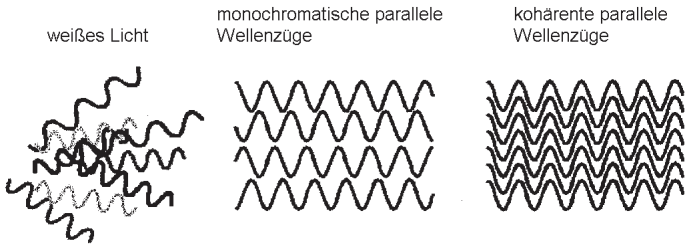

Abbildung 3: Schematische Darstellung von weißem Licht, sowie parallelem monochromatischem und parallelem kohärentem Licht

tischem und parallelem kohärentem Licht: Natürliche Lichtquellen senden im Allgemeinen weder kohärentes noch monochromatisches Licht aus und die elementaren Wellenzüge sind zueinander nicht parallel. Da Newton seinerzeit aber nur auf diese zurückgreifen konnte, war er auch nicht in der Lage, mit einfachen Apparaturen Interferenzfiguren zu erzeugen.

2.2 Das Huygenssche Prinzip

Entsprechend der Aussage von Huygens kann jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer elementaren Kugelwelle betrachtet werden, die sich in den gesamten Raum ausbreitet. Diese Elementarwellen breiten sich im gleichen Medium mit der gleichen Geschwindigkeit aus, wie die ursprüngliche Welle.

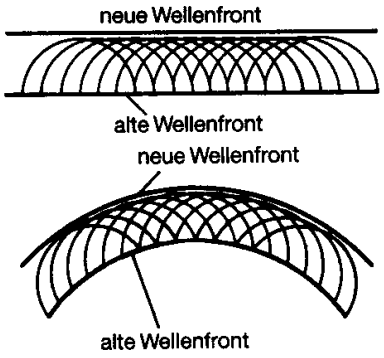

Abbildung 4: Huygenssches Prinzip

Die durch Interferenz dieser Elementarwellen entstehende resultierende Welle ist identisch mit der sich ausbreitenden eigentlichen Welle. Insbesondere im Falle eines Laserstrahls kann man sich dessen Ausbreitung wie in Abbildung 4 vorstellen.

2.3 Beugung am Einfachspalt

Im vorliegenden Versuch bestrahlt man einen Einfachspalt der Breite b mit kohärentem Laserlicht der Wellenlänge λ. Nach dem Huygensschen Prinzip ist jeder Punkt im Spalt der Ausgangspunkt einer elementaren Kugelwelle, die sich in den gesamten Halbraum hinter dem Einfachspalt ausbreitet.

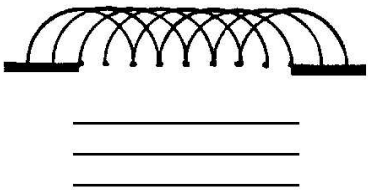

Abbildung 5: Beugung am Einfachspalt

Die Interferenz dieser Kugelwellen in einem beliebigen Punkt P in diesem Halbraum ergibt dann die resultierende Welle. Im Abstand a wird parallel zur Spaltebene ein Schirm aufgestellt. Betrachtet wird die Intensität der sich ergebenden Welle in einem Punkt P in der Position d auf dem Schirm (vgl. Abbildung 6, links).

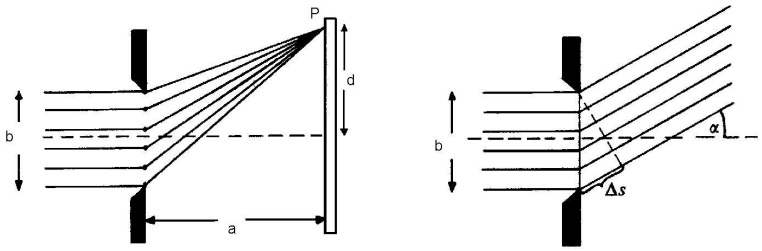

Abbildung 6: Entstehung von Maxima und Minima

Beim tatsächlichen Versuchsaufbau wird der Parameter b in der Größenordnung eines Millimeters liegen, der Parameter l hingegen in der Größenordnung eines Meters (oder mehr). Im Gegensatz zu Abbildung 6 (links) kann in der Praxis $a \gg b$ angenommen werden. Deshalb kann man annähern, dass alle Elementarstrahlen vom Spalt zum Punkt P parallel verlaufen (vgl. Abbildung 6, rechts). Da diese Elementarstrahlen jedoch einen Gangunterschied zueinander haben, ist die resultierende Intensität abhängig von der Frequenz des kohärenten Lichtes, sowie von der Spaltbreite b und dem Winkel α, unter dem der Punkt P gegen die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung des Lichtes liegt.

Der Strahlenverlauf vom Spalt zum Punkt P schließt einen Winkel α gegen den ursprünglichen Strahlenverlauf ein. Dieser ist in der Praxis sehr klein ($< 5\,°$), so dass näherungsweise $\sin\alpha \approx \tan\alpha = \frac{d}{a}$ gilt. Mit Δs wird der Gangunterschied der Randstrahlen bezeichnet und

es gilt $\Delta s = b \cdot \sin\alpha = \frac{b \cdot d}{a}$.

Je nach Lage des Punktes P (Parameter d), dem Wert der geometrischen Größen der Anordnung (Parameter a und b) und der Wellenlänge λ des Lasers, kann sich in P ein **Intensitätsmaximum** (hell leuchtender Fleck) oder **Intensitätsminimum** (nicht leuchtende Stelle) ausbilden. Dies ist jeweils genau dann der Fall, wenn die entsprechende mathematische Gleichung erfüllt ist:

Intensitätsmaximum	$\lvert\frac{b \cdot d}{a}\rvert = \lvert\Delta s\rvert = (k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda \quad$ k = 1, 2, 3, ... $\lvert\frac{b \cdot d}{a}\rvert = \lvert\Delta s\rvert = 0$
Intensitätsminimum	$\lvert\frac{b \cdot d}{a}\rvert = \lvert\Delta s\rvert = k \cdot \lambda \quad$ k = 1, 2, 3, ...

Bemerkung: Das Maximum mit $\lvert\frac{b \cdot d}{a}\rvert = \lvert\Delta s\rvert = 0$ ist das so genannte Hauptmaximum, oder Maximum 0–ter Ordnung. Beim Beugungsbild des Einfachspalts kann es von den anderen Maxima durch seine ausgedehnte Breite unterschieden werden. Die Kriterien für das Auftreten von Maxima und Minima beim Einfachspalt sind nicht mit den Kriterien für Maxima und Minima des Doppelspalts identisch! Anschauliche Plausibilitätsbegründungen zur Ermittlung dieser Gesetzmäßigkeiten finden sich in entsprechenden Physikbüchern der Kollegstufe. Eine präzise mathematische Herleitung dieser Kriterien findet sich im Anhang unter 4.1. Das Verständnis dieser Ausführungen ist für die Durchführung des Versuches jedoch nicht erforderlich, daher müssen sie zur Vorbereitung des Versuches nicht gelesen werden.

2.4 Beugung am Hindernis (Babinetsches Theorem)

Babinet bewies auf sehr einfache Weise den folgenden Satz:

Eine Aussparung beliebiger Form in einer undurchsichtigen Wand erzeugt im parallelen Licht genau die gleiche Beugungsfigur, wie ein Hindernis, das dieselbe Form hat, wie das Loch.

Unter *Beugungsfigur* sei hier der Teil des Interferenzbildes zu verstehen, der im geometrischen Schattenraum des Spaltes liegt, also jene Stellen, die vom Licht ausschließlich aufgrund der Beugung erreicht werden. Das Babinetsche Theorem besagt beispielsweise, dass die Intensitätsextrema eines Einfachspalts der Breite b im Strahlengang eines Laserstrahls unter den gleichen Winkeln zu beobachten sind, wie die Intensitätsextrema eines Drahtes vom Durchmesser b. Dieses Babinetsche Theorem kann man sich wie folgt erklären:

In Abbildung 7 ist das Auftreffen eines kohärenten Lichtstrahles auf

- (Bild A) einen Einfachspalt
- (Bild B) auf kein Hindernis

- (Bild C) auf ein Einfachhindernis, dessen Breite mit den Abmessungen des Einfachspaltes identisch ist

und die dazugehörigen Interferenzfiguren dargestellt.

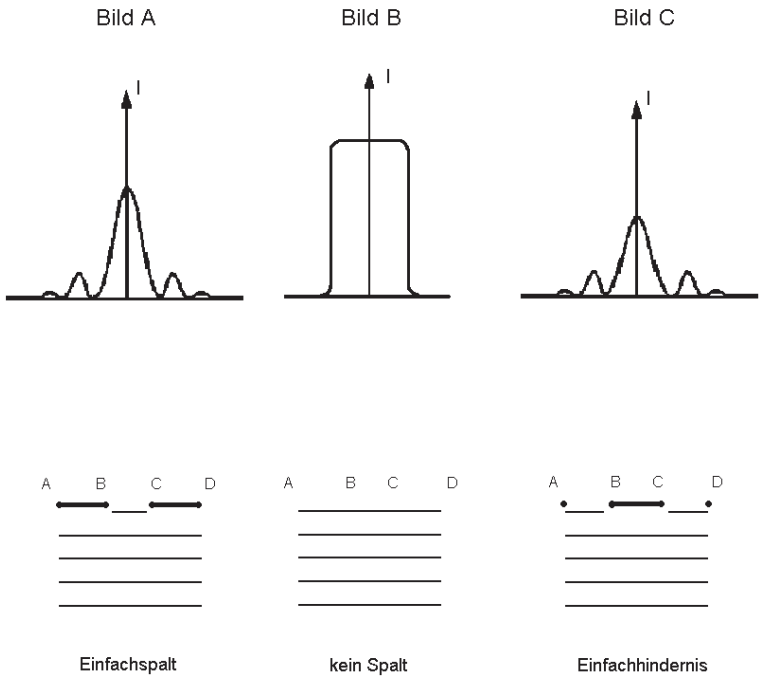

Abbildung 7: Babinetsches Theorem

Grundlage dieses Theorems ist das Fortpflanzungsprinzip einer elektromagnetischen Welle nach der Theorie von Huygens (vgl. Abbildung 7):

Bild A zeigt die bekannte Interferenzfigur des Einfachspalts. Beim Auftreffen einer Wellenfront auf der Spaltebene werden zwar auf der gesamten Strecke [AD] Elementarwellen ausgelöst, jedoch auf den Teilstrecken [AB] und [CD] vom spaltbildenden Medium nicht in den dahinterliegenden Halbraum gelassen. Also erzeugt nur die Superposition der auf der Strecke [BC] ausgelösten Elementarwellen das skizzierte Beugungsbild.

In Bild B kann der Laserstrahl völlig ungehindert die Strecke [AD] passieren. Das bedeutet, dass alle Elementarwellen, die auf der Strecke [AD] ausgelöst werden, in den dahinterliegenden Halbraum gelangen und dort das zu erwartende einzige Intensitätsmaximum erzeugen.

Aus diesen beiden Situationen folgt nun Bild C: Dazu muss man die Situation ohne Hindernis (vgl. Abbildung 7 Mitte: Elementarwellen auf [AD]) als Überlagerung der Situation 1 (Elementarwellen nur auf [BC]) und Situation 3 (Elementarwellen nur auf [AB] und [CD])

verstehen.

Extrema der Ordnung 1, 2, 3, ... : Die Elementarwellen, die von [BC] kommen, erzeugen unter bestimmten Winkeln ein Extremum. Überlagert man zusätzlich die Elementarwellen von [AB] und [BC], so verschwinden diese Extrema, da dann offensichtlich die Situation von Bild B vorliegt. Also müssen diese Elementarwellen die von [BC] ausgehenden Wellen auslöschen. Dazu muss deren Überlagerung unter diesen Winkeln genau die gleiche Intensität ergeben, wie die Superposition der Wellen von [BC], allerdings bezüglich derer um π phasenverschoben. Also sind diese Extrema bei Einfachspalt und Einfachhindernis jeweils identisch.

Maximum der Ordnung 0: Die Elementarwellen, die von [BC] unter $0\,^\circ$ auf den Schirm treffen, erzeugen ein Maximum, das weniger intensiv ist, als das Maximum in Bild B, wenn zusätzlich die von [AB] und [CD] ausgehenden Wellen überlagert werden. Also können sich letztere unter dem $0\,^\circ$–Winkel nicht gegenseitig auslöschen, sondern müssen eine Intensität I([AB],[CD]) ergeben, die die Intensität I([BC]) der Wellen von [BC] zur Gesamtintensität I([AD]) des Laserstrahls ergänzt. Also hat auch das Beugungsbild eines Einfachhindernisses unter $0\,^\circ$ ein Maximum 0–ter Ordnung.

3 Die Versuchsdurchführung

3.1 Zur Verfügung stehende Materialien

Für den Aufbau des Versuchs werden folgende Materialien bereitgestellt:

- Ein He–Ne–Laser der Wellenlänge $\lambda = 632,8\,\mathrm{nm}$
- Ein Einfachspalt der Breite b
- Eine Zündkerze
- Material zum befestigen des Spaltes, der Zündkerze bzw. des Haares
- Ein kleiner höhenverstellbarer Experimentiertisch
- Ein Transparentschirm
- Ein Maßband
- Eine Rolle Tesafilm

Achtung: *Es ist bei der Durchführung des Versuchs unbedingt darauf zu achten, dass das Laserlicht nicht direkt ins Auge fällt, da dies zu Schäden der Netzhaut führen kann.*

3.2 Aufgaben

1. Erzeugen Sie das Beugungsbild eines Einfachspaltes. Bauen Sie dazu eine geeignete Versuchsanordnung auf.

2. Erzeugen Sie das Beugungsbild eines Haares. Hierfür wird das Haar in einem Rahmen leicht gespannt fixiert, so dass es in den Strahlengang des Lasers gebracht werden kann. Hinweis: Auf dem eigenen Pullover findet sich meistens ein Haar.

   Wählen Sie nun zwei der folgenden drei Aufgaben aus und bearbeiten Sie diese. Überlegen Sie sich jeweils vorher, wodurch die Genauigkeit der Messung beeinflusst wird und versuchen Sie ein möglichst präzises Ergebnis zu erzielen. Messen Sie jeweils die notwendigen geometrischen Größen des Versuchsaufbaus mit Maßband und Lineal aus.

3. Bestimmen Sie mit Hilfe des Einfachspaltes die Wellenlänge des Lasers. Überprüfen Sie anschließend Ihr Ergebnis mit der Angabe auf dem Laser. Diskutieren Sie bei Abweichungen über 5 % vom Realwert mit Ihrem Versuchsbetreuer über mögliche Fehlerquellen.

4. Bringen Sie die Elektroden der Zündkerze als Einfachspalt der Breite b in den Strahlengang des Lasers und bestimmen Sie mit Hilfe der Versuchsanordnung den Abstand b der Elektroden.

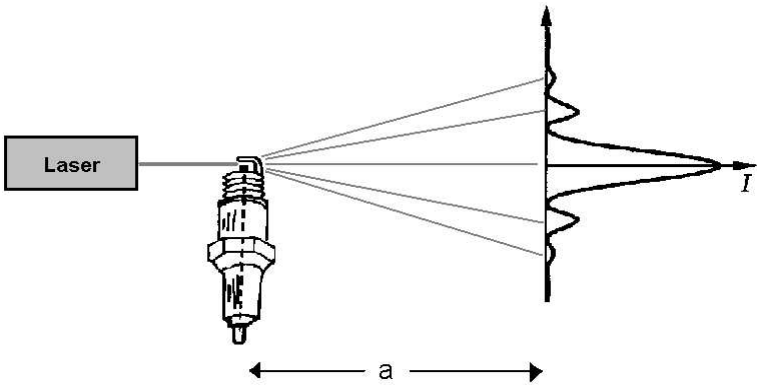

Abbildung 8: Beugung am Zündkerzenspalt

   Bemerkung:(Bedeutung des Elektrodenabstands) Damit ein Benzinmotor richtig funktionieren kann, ist bei der Zündkerze ein Elektrodenabstand b einzustellen, der den Vorgaben des Motorenherstellers entspricht. Typische Werte liegen hier etwa bei 0,6 – 0,8 mm.

5. Bringen Sie das Haar als Einfachhindernis in den Strahlengang des Lasers und bestimmen Sie dessen Durchmesser b.

Hinweis: Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen, empfiehlt es sich, den Abstand vom Maximum erster Ordnung zu einem Maximum höherer Ordnung zu bestimmen, um so auf den mittleren Abstand benachbarter Maxima zu schließen.

4 Anhang: Mathematische Beschreibung der Intensitätsverteilung am Einfachspalt

Bemerkung: Dieser Abschnitt 4 umfasst eine präzise mathematische Beschreibung der Beugung am Einfachspalt. Mithilfe dieser Beschreibung können die Kriterien für das Auftreten der Intensitätsminima und –maxima auf mathematischer Basis bewiesen werden. Das Verständnis der folgenden Darstellungen ist jedoch für die Durchführung des Experiments nicht von Bedeutung. Daher sollten diese Ausführungen nur bei tiefergehendem Interesse gelesen werden.

4.1 Herleitung

$A(d)$ bezeichne die Amplitude der resultierenden Welle in einem Punkt P am Schirm, welcher sich in Position d befindet (vgl. Abbildung 9).

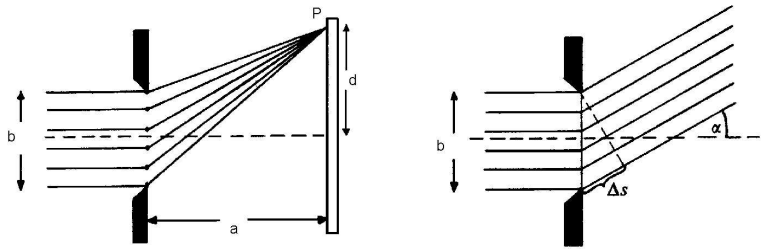

Abbildung 9: Entstehung von Maxima und Minima

Zunächst wird ein mathematischer Ausdruck berechnet, der proportional zu $A(d)$ ist. Anschließend werden die Nullstellen und Extrema dieses Ausdrucks berechnet, womit man die genannten Kriterien von Minima und Maxima für die Amplitude $A(d)$ erhält. Zur Vereinfachung betrachtet man ein zweidimensionales Modell. Desweiteren werden folgende Annahmen getroffen: Der Laser sendet kohärentes Licht der Wellenläge λ und der Gesamtamplitude A_0 aus, der Laserstrahl hat die „Breite“ B und setzt sich aus unendlich vielen Elementarwellen zusammen. Die Amplitude einer solchen Elementarwelle beträgt dann $\frac{A_0}{B}$. Der Laserstrahl trifft nun entsprechend Abbildung 10 senkrecht auf die Spaltebene und löst in jedem Punkt innerhalb des Spalts eine Elementarwelle aus, die sich in den gesamten Halbraum hinter dem Spalt ausbreitet.

Die Amplitude $\frac{A_0}{B}$ dieser elementaren Kugelwellen nimmt mit fortschreitender Ausbreitung (Radius r der Wellenfront) proportional zu $\frac{1}{r^2}$ ab. Weiter betrachtet man deren Überlagerung unter einem Winkel α gegenüber der ursprünglichen Strahlrichtung. Abbildung 9 ist zu entnehmen, dass alle Elementarstrahlen einen individuellen Gangunterschied zu einem Randstrahl haben. Dieser wird wie folgt berechnet:

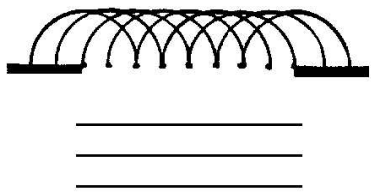

Abbildung 10: Einfallende Welle der Amplitude A_0 löst Elementarwellen der Amplitude $\frac{A_0}{B}$ aus.

Man definiert sich eine x–Achse entlang des Spalts, wählt sich den Nullpunkt am Anfang des Spalts und betrachtet die Superposition der Elementarstrahlen unter dem Winkel $\alpha \neq 0$ (vgl. Abbildung 11).

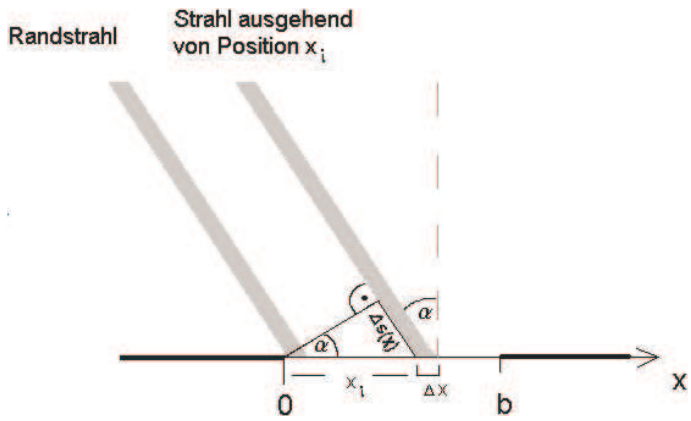

Abbildung 11: Gangunterschied der Elementarstrahlen

Der Randstrahl, der vom Nullpunkt ausgeht, wird als Bezugsstrahl gewählt, d.h., die Gangunterschiede aller Elementarstrahlen werden auf diesen Randstrahl bezogen. Weiter nimmt man zunächst an, dass die Gesamtzahl der Elementarstrahlen $n < \infty$ beträgt, von denen jeder die Breite $\Delta x = \frac{b}{n}$ hat. Ein Elementarstrahl, der von der Position $x_i = i\frac{b}{n}, i = 0, 1, \ldots (n-1)$ ausgeht und sich mit dem Randstrahl überlagert, hat zu diesem die Gangdifferenz $\Delta s(x_i) = x_i \cdot \sin(\alpha)$. Für die entsprechende Phasendifferenz gilt:

$$\frac{\Delta\varphi(x_i)}{2\pi} = \frac{\Delta s(x_i)}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \Delta\varphi(x_i) = 2\pi\frac{\Delta s(x_i)}{\lambda} = 2\pi\frac{x_i \cdot \sin(\alpha)}{\lambda}$$

Da sich die Elementarstrahlen in einer Entfernung $l \gg b$ am Schirm überlagern, haben alle näherungsweise die gleiche Amplitude, diese ist dann proportional zu $\frac{A_0}{B} \cdot \Delta x$. Der Randstrahl werde durch die Gleichung beschrieben:

$$A(t) = \frac{A_0}{B} \cdot \Delta x \cdot \sin(\omega t) \qquad \text{mit } \omega = 2\pi f = 2\pi \cdot \frac{c}{\lambda} \text{ und } \Delta x = \frac{b}{n}$$

Ein Elementarstrahl, der von der Position x_i ausgeht und sich mit dem Randstrahl überlagert, wird folglich durch die Gleichung erfasst:

$$A_\alpha(t) = \frac{A_0}{B} \cdot \Delta x \cdot \sin(\omega t + \Delta\varphi(x_i)) \qquad \text{mit } \Delta x = \frac{b}{n}$$

An jeder Stelle $x_i = i \cdot \frac{B}{n}, \quad i = 0, 1, \ldots (n-1)$ geht eine Elementarwelle aus, die Superposition all dieser Elementarwellen ergibt die resultierende Gesamtwelle. Für deren Amplitude A_{res} gilt:

$$A_\alpha(t)_{res} \sim \sum_{i=0}^{n-1} \frac{A_0}{B} \sin(\omega t + \varphi(x_i)\,) \cdot \Delta x \qquad \text{mit } \Delta x = \frac{b}{n}$$

Hierbei handelt es sich um eine sog. Riemannsche Summe. Da nach dem Huygensschen Prinzip an jedem Punkt im Spalt eine Elementarwelle ausgeht, folgt der Übergang $n \to \infty$:

$$A_\alpha(t)_{res} \sim \lim_{n\to\infty} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{A_0}{B} \sin(\omega t + \varphi(x_i)\,) \cdot \Delta x \qquad \text{mit } \Delta x = \frac{b}{n}$$

Dieser Grenzwert wird weiter durch die entsprechende Integraldarstellung ersetzt (vgl. Grenzwertbildung bei Ober– bzw. Untersumme im Mathematikunterricht):

$$A_\alpha(t)_{res} \sim \int_0^b \frac{A_0}{B} \sin(\omega t + \Delta\varphi(x)\,)\, dx = \qquad \text{mit } \Delta\varphi(x) = 2\pi \frac{x \cdot \sin(\alpha)}{\lambda}$$

Da $\frac{A_0}{B}$ eine Konstante ist, kann dieser Faktor weggelassen werden, da die Gültigkeit der Proportionalität dadurch nicht verletzt wird:

$$A_\alpha(t)_{res} \sim \int_0^b \sin(\omega t + 2\pi \frac{\sin(\alpha)}{\lambda} x)\, dx$$

Da nach x integriert wird, werden alle übrigen Größen bei der Integration als Konstanten angesehen, die Stammfunktion von $\sin(x)$ ist $-\cos(x)$. Nach Ausführung der Integration ergibt sich:

$$A_\alpha(t)_{res} \sim \left[\frac{\lambda}{2\pi \sin(\alpha)} \cos(\omega t + 2\pi \frac{x \sin(\alpha)}{\lambda}) \right]_0^b =$$

Es wird ausgeklammert und die Integrationsgrenzen werden eingesetzt:

$$A_\alpha(t)_{res} \sim \frac{\lambda}{2\pi \sin(\alpha)} \left[\cos(\omega t + 2\pi \frac{\sin(\alpha)}{\lambda} \cdot b) - \cos(\omega t) \right] =$$

Anschließend wird die Gültigkeit $\cos(\beta) - \cos(\delta) = -2\sin(\frac{\beta+\delta}{2})\sin(\frac{\beta-\delta}{2})$ zur weiteren Umformung herangezogen:

$$A_\alpha(t)_{res} \sim \underbrace{-\frac{\lambda}{\pi \sin(\alpha)} \cdot \sin(\frac{\pi \sin(\alpha)}{\lambda} \cdot b)}_{\sim \mathrm{A}_\alpha} \sin(\omega t + \pi \frac{\sin(\alpha)}{\lambda} \cdot b)$$

A_α ist die resultierende Amplitude der sich unter dem Winkel α ergebenden elektromagnetischen Welle. Da in der Praxis $a \gg d$ vorliegt (vgl. Abbildung 6), gilt die Näherung $\sin(\alpha) \approx \frac{d}{a}$. Eingesetzt ergibt sich der gesuchte Ausdruck:

$$\boxed{A(d) \sim \frac{\lambda a}{\pi d} \sin(\frac{\pi b}{\lambda a} \cdot d)}$$

4.2 Auswertung

Zur Veranschaulichung des hergeleiteten Ausdrucks eignet sich eine graphische Auftragung gegen den Parameter d:

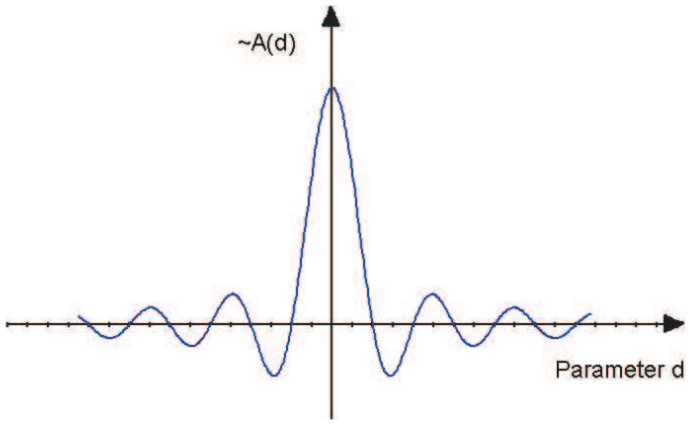

Abbildung 12: Schematische Darstellung von $A(d)$ gegen d

Die Intensität $I(d)$ ist proportional zu $A(d)^2$ und daher stets positiv. Man erhält somit folgende Ergebnisse:

- An den Nullstellen von $A(d)$ ist auch $I(d) = 0$. Da $I(d)$ nie negativ sein kann, ergibt sich dort ein **Intensitätsminimum**. Dies ist genau dann der Fall wenn gilt: $|\frac{\pi b}{\lambda a} \cdot d| = k \cdot \pi$ mit $k = 1, 2, 3, \ldots$, nicht jedoch für $k = 0$. Es folgt das bekannte Kriterium: $|\frac{b \cdot d}{a}| = |\Delta s| = k \cdot \lambda$ mit $k = 1, 2, 3, \ldots$.

- Die Extrema von $A(d)$ liegen in guter Näherung immer in der Mitte zweier Nullstellen. Folglich ist dort auch $I(d)$ stets maximal und es ergibt sich ein **Intensitätsmaximum**, wenn gilt: $|\frac{\pi b}{\lambda a} \cdot d| = (k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ mit $k = 1, 2, 3, \ldots$ oder $|\frac{\pi b}{\lambda a} \cdot d| = 0$. Es folgt das bekannte Kriterium: $|\frac{b \cdot d}{a}| = |\Delta s| = (k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ mit $k = 1, 2, 3, \ldots$ oder $|\frac{b \cdot d}{a}| = |\Delta s| = 0$

- Das Intensitätsmaximum mit $|\frac{b \cdot d}{a}| = |\Delta s| = 0$ ist das **Hauptmaximum**, es ist an seiner besonders großen Breite zu erkennen. Es dehnt sich über jene Stellen mit $|\frac{b \cdot d}{a}| = |\Delta s| =$

$(k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ und $k = 0$ aus, an denen man entsprechend der Periodizität der Maxima eigentlich ebenfalls ein Maximum erwartet hätte.

- Die Extrema von $A(d)$ werden mit zunehmendem d schwächer, die Intensität der Maxima nimmt daher mit zunehmendem Abstand zum Hauptmaximum ab. Aus diesem Grund sind meist nicht alle Maxima mit bloßem Auge zu erkennen.

Reflexion an der CD/DVD

1 Einleitung

1.1 Motivation

Unter einer Information versteht man jegliche Art einer Auskunft oder Nachricht, desweiteren auch Steuersignale für die Regelung von Prozessen (z.B. Computerprogramme). Informationen und deren Speicherung haben in der heutigen Zeit eine große Bedeutung erlangt, man denke beispielsweise an die Wissenschaften, die auf Informationen basieren, die Wirtschaft oder die Informatik. Daher wurden Informationsspeichermedien für verschiedenste Zwecke entwickelt, wie Mikrofilme, Magnetbänder, Festplatten usw. In den 1970er Jahren experimentierten verschiedene Firmen (u.a. Sony, Philips) mit optischen Speichermedien für digitale Informationen, d.h. für jene Informationen, die durch eine Abfolge von Nullen und Einsen repräsentiert werden können (Binärcode), wie z.B. geschriebener Text. Es sollte insbesondere ein Speichermedium für Audiosignale geschaffen werden, das der Schallplatte qualitativ überlegen ist und diese auf lange Zeit ablöst. Bis zum Jahr 1982 konnten die Entwicklungen abgeschlossen werden, es kam zur Markteinführung der Compact Disc (CD). Da die CD als Speichermedium grundsätzlich für alle Daten im Binärcode geeignet ist, versuchte man das zu Grunde liegende Prinzip auch in anderen Bereichen einzusetzen. Seit Anfang der 1990er Jahre setzt man die CD unter der Bezeichnung CD–ROM auch als Datenträger im PC–Bereich ein. Mit einem PC und geeigneter Hardware kann mittlerweile jedermann digitale Daten auf einem sog. CD–Rohling (CD–R) speichern, beispielsweise Software, Computerdateien, Musik, Filme usw. Aufwendigere Software und die Ausweitung der Einsatzgebiete der CD im PC–Bereich ließen die Kapazitätsgrenze der CD bald deutlich werden, oftmals mussten Daten auf mehreren CDs verteilt gespeichert werden, insbesondere bei der Verwendung einer CD als Speichermedium für Filme im digitalen mpeg–Format. Mitte der 1990er Jahre beschlossen daher einige Konzerne, u.a. Sony, Philips und Toshiba, ein neues Speichermedium für digitale Daten zu entwickeln, das auf dem Prinzip der CD basieren sollte, jedoch über eine wesentlich größere Kapazität verfügt, bei sonst vergleichbaren Abmessungen. Dieses neue Speichermedium sollte für verschiedenste Zwecke eingesetzt werden (u.a. Filme, PC–Dateien) und bekam deshalb den Namen DVD — Digital Versatile Disc (versatile bedeutet: vielseitig verwendbar). Ende der 1990er Jahre wurde die DVD offiziell vorgestellt, ähnlich wie bei der CD–R ist heute auch eine entsprechende PC–Hardware verfügbar, um auf DVD–Rohlinge selbst Daten aufzubringen.

Die häufigste Variante der DVD ist derzeit (Stand 2003) die 1–Schicht–DVD, d.h. dass die

Daten wie bei der CD nur auf einer Ebene aufgebracht sind und DVD–Laufwerke diese von der Unterseite der DVD auslesen. Es wurden auch DVDs entwickelt, bei denen die Daten innerhalb der Scheibe auf zwei Ebenen aufgebracht werden können, um so eine höhere Kapazität gegenüber der 1–Schicht–DVD zu erreichen (ca. Faktor 2). Desweiteren gibt es auch DVDs, die auf beiden Seiten über je ein oder zwei Datenebenen verfügen, so dass sich ein gesamter Kapazitätszuwachs von bis zu Faktor 4 ergibt und die Daten auf insgesamt 4 Ebenen gespeichert sind. Vergleicht man die DVD mit der CD, so erkennt man mit bloßem Auge keinen Unterschied, so dass der enorme Kapazitätszuwachs der DVD gegenüber der CD (über Faktor 6) zu erklären wäre:
Beide Scheiben haben einen Durchmesser von 12 cm, sind 1,2 mm dick und die Unterseite schillert jeweils in allen Farben. So liegt die Frage nahe, wo der Unterschied von CD und DVD zu finden ist, d.h. wie werden jeweils die digitalen Daten in Form von Nullen und Einsen auf den beiden Medien gespeichert, so dass sich die differenten Kapazitäten ergeben? Genauso könnte man auch die Frage stellen, warum die Unterseiten von beiden Datenträgern in bunten Farben schillern, denn der Grund dafür lässt besagten Unterschied vermuten und legt desweiteren nahe, wie man mit Physikkenntnissen der Kollegstufe ein Experiment realisieren kann, mit dem man einen wesentlichen Unterschied von CD und DVD quantitativ messen kann und mit diesem Ergebnis die jeweiligen Kapazitäten berechnen kann.

1.2 Ziel des Experiments

Im Folgenden soll ein geeigneter Versuch realisiert werden, mit dessen Hilfe ein wesentlicher Unterschied von CD und DVD quantitativ gemessen werden kann. Dazu wird zunächst das notwendige Grundwissen über das gemeinsame Speicherprinzip von CD und 1–Schicht–DVD erklärt, so dass auf Basis des Physikwissens der Kollegstufe verstanden werden kann, warum beide Medien in bunten Farben schillern und wie man mit dieser Kenntnis ein entsprechendes Experiment umsetzen kann. Anschließend wird die CD als einfaches Spektrometer eingesetzt, um das emittierte Licht einer Quecksilber–Dampflampe zu untersuchen.

Bemerkung: Unter der Bezeichnung DVD wird im Folgenden stets die 1–Schicht–DVD verstanden.

2 Physikalisch–technische Informationen zu CD und DVD

2.1 Wie werden die binären Daten auf der CD bzw. DVD bei industrieller Fertigung gespeichert?

Bemerkung: Nachstehend wird das grundlegende Funktionsprinzip der CD bzw. DVD erläutert. Bei tiefergehendem Interesse kann man im Internet mit Hilfe einer Suchmaschine detailliertere Informationen zum Funktionsprinzip der CD bzw. DVD finden.

Digitale Information ist eine Kette von Nullen und Einsen, die in Form einer Kette von Vertiefungen (Pits) und Erhöhungen (Lands) in einem lichtdurchlässigen Trägermaterial repräsentiert werden. Dabei entspricht ein Übergang von Pit zu Land bzw. von Land zu Pit

einer 1, kein Übergang, d.h. zwei Pits oder zwei Lands hintereinander entspricht einer 0. (siehe Abbildung 1)

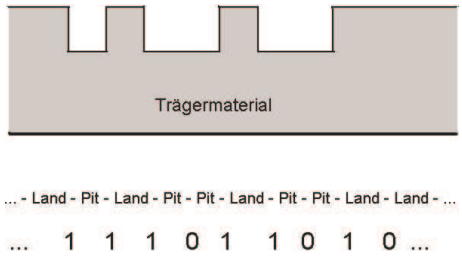

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Repräsentation von Nullen und Einsen durch Pits und Lands

Ein einzelnes Pit hat eine Länge l, eine Breite b und stellt eine Vertiefung t gegenüber den Lands dar, ein Land hat ebenfalls die Länge l. Die Oberfläche des Trägermaterials mit den Pits und Lands wird mit einer lichtreflektierenden Schicht überzogen. Die Abtastung erfolgt durch Analyse des reflektierten Lichtes mittels Photodiode bei senkrechter Bestrahlung mit einem Laser der Wellenlänge λ: Ist der Laserstrahl dabei auf einen Übergang gerichtet, so hat der Anteil des Lichtes, welcher am Pit reflektiert wird gegenüber dem am Land reflektierten Lichtanteil einen Gangunterschied von $\Delta s = 2t$. Die Tiefe t der Pits gegenüber den Lands und die Wellenlänge λ sind derart aufeinander abgestimmt, dass es bei senkrechter Bestrahlung eines Übergangs zu destruktiver Interferenz kommt, so dass am Übergang effektiv kein Licht reflektiert wird. Trifft der Laserstrahl hingegen entweder auf ein Land oder ein Pit, so wird das Licht fast vollständig reflektiert. Die Abtastung erfolgt dabei von unten, d.h. durch das lichtdurchlässige Trägermaterial hindurch. Eine Photodiode misst das reflektierte Licht und gibt bei voller Lichtreflexion einen entsprechenden elektrischen Impuls ab. Die Abfolge dieser Impulse bei Abtastung der Oberfläche wird dann von einer Elektronik bzw. von einem Computer weiterverarbeitet.

Die Kette der Pits und Lands hat eine Breite d und ist etwas breiter als die Pits selbst, $d > b$. Bei der CD und auch bei der DVD ist diese auf der Unterseite in Spiralform von innen nach außen „aufgewickelt“, die Breite d der Kette wird dann als Spurabstand bezeichnet (vgl. Abbildung 2). Zum Auslesen der Daten wird die CD bzw. DVD in Rotation versetzt, der auf die Datenkette gerichtete Laser wird pro Umdrehung gleichmäßig um d nach außen nachgeführt.

Die Gesamtzahl von Nullen und Einsen, die auf einem Medium gespeichert werden kann, wird als dessen Kapazität bezeichnet. Bei den Bemühungen, mit der DVD ein Speichermedium zu schaffen, welches über eine größere Kapazität als die CD verfügt, bei gleichen Außenabmessungen und gleichem Funktionsprinzip, erscheint das verfolgte Konzept nahe liegend: Die Abmessungen der Pits und Lands mussten einfach kleiner werden, ebenso die Spurbreite d, so dass die Kette der Pits und Lands länger werden kann. Die folgende Tabelle zeigt die entsprechenden Werte im Vergleich, eine Illustration liefert nachstehende Abbildung:

Abbildung 2: Spiralform der Abfolge der Pits und Lands

	CD	DVD
Land–Länge	$0,83\,\mu$m	$0,4\,\mu$m
Pit–Länge	$0,83\,\mu$m	$0,4\,\mu$m
Laserwellenlänge λ	780 nm	650/635 nm

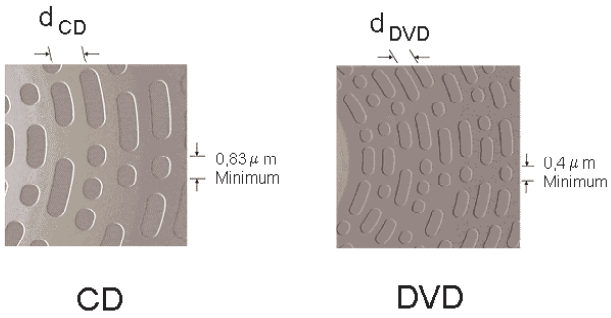

Abbildung 3: Pits und Lands der CD und DVD im Vergleich

Bemerkung: Die elementaren Pits und Lands haben an jeder Stelle einer CD bzw. DVD die gleichen Abmessungen, d.h. weiter innen die gleichen, wie weiter außen.

Mit Hilfe eines geeigneten Experiments soll der Spurabstand der Datenspirale der CD (d_{CD}) und der DVD (d_{DVD}) vermessen werden. Dem bunten Schillern der Unterseiten der beiden Datenträger liegt eine physikalische Gesetzmäßigkeit zu Grunde, die mit dem Spurabstand in Verbindung steht. Das Verständnis dieses Zusammenhangs ermöglicht ein entsprechendes Experiment, so dass zunächst die physikalische Ursache des bunten Schillerns quantitativ erfasst werden muss.

2.2 Warum schillert eine CD bzw. DVD in bunten Farben?

Um zu verstehen, warum die Unterseite einer CD bzw. einer DVD in bunten Farben leuchtet, wird dies zunächst an einem unbeschriebenem CD–Rohling untersucht, da dieser Effekt dort besonders einfach zu verstehen ist.

2.2.1 Analyse am unbeschriebenem CD–Rohling

Eine beschreibbare CD ist ähnlich aufgebaut, wie eine normale CD, jedoch befindet sich zwischen dem Trägermaterial und der Reflexionsschicht eine lichtempfindliche organische Schicht. Mit dem intensiven Laserlicht eines CD–Brenners kann diese Schicht lokal verbrannt werden, so dass sie lichtundurchlässig wird und somit der Laser eines Lesegerätes nicht mehr zur Reflexionsschicht gelangt (vgl. Abbildung 4). Demnach wird er an dieser Stelle nicht mehr reflektiert. Die Daten werden im Falle der beschreibbaren CD primär nicht durch Vertiefungen und Erhöhungen repräsentiert, sondern durch lichtdurchlässige und lichtundurchlässige Stellen mit den gleichen Abmessungen, wie die Pits und Lands der industriell hergestellten CD.

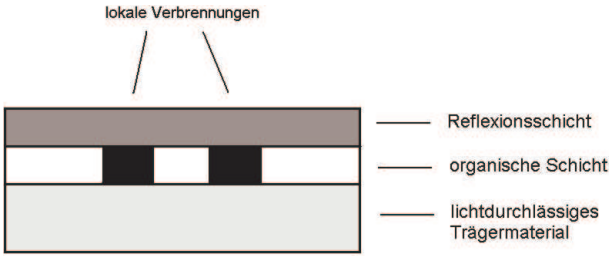

Abbildung 4: Schematischer Querschnitt einer beschreibbaren CD entlang der Datenkette. Lichtdurchlässige und lichtundurchlässige Stellen repräsentieren die Daten

Der Schreiblaser eines CD–Brenners braucht jedoch auf dem CD–Rohling eine Führung, um die Daten in Spiralform einbrennen zu können. Dazu ist in das Trägermaterial eine Spur eingestanzt, der sog. „Groove“ (zu deutsch: Rille), welcher sich spiralförmig vom Mittelloch durchgehend bis zum äußeren Rand zieht. Der Schreiblaser orientiert sich an diesem Groove und brennt die Daten in ihn hinein. Daher ist der Spurabstand d bereits durch den Groove vorgegeben (vgl. Abbildung 5).

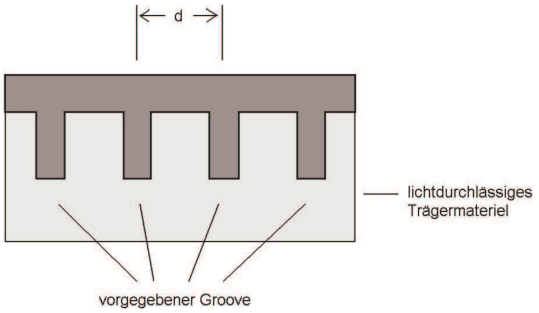

Abbildung 5: Schematischer Querschnitt einer beschreibbaren CD senkrecht zu den vom Groove vorgegebenen Spuren

Richtet man einen kohärenten Lichtstrahl unter dem Winkel δ auf die Unterseite eines unbeschriebenen CD–Rohlings, so dass die Einfallsebene des Lichtes die Spuren des Grooves senkrecht schneidet (dreidimensionale Betrachtung), so fungiert dieser als optisches Reflexionsgitter, d.h. es entsteht in der Einfallsebene des Lichtes ein Interferenzbild (vgl. Abbildung 6; Linie l kreuzt die Spuren jeweils senkrecht).

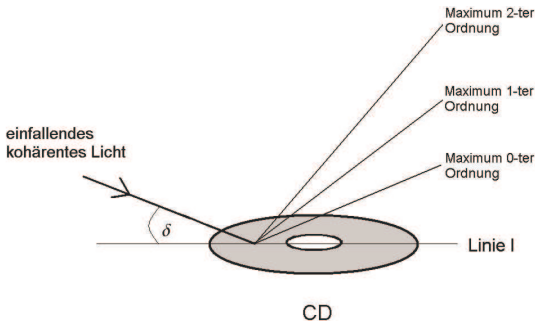

Abbildung 6: Verhalten des unbeschriebenen CD–Rohlings wie ein Reflexionsgitter

Theorie des Reflexionsgitters:
Ein Reflexionsgitter ist eine regelmäßige lineare Anordnung von abwechselnd einer lichtabsorbierenden und einer lichtreflektierenden Schicht, d.h. die Anordnung geht bei Verschiebung um die Gitterkonstante d in sich selbst über (vgl. Abbildung 7).

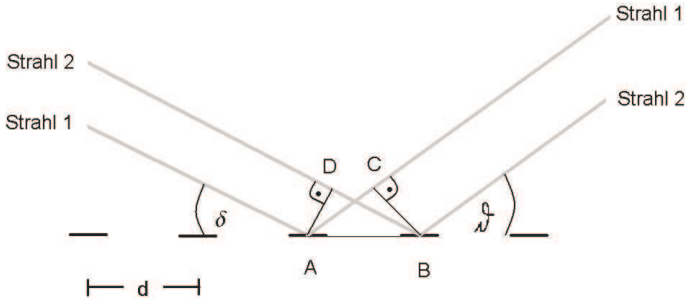

Abbildung 7: Verhalten des unbeschriebenen CD–Rohlings wie ein Reflexionsgitter

Fällt kohärentes Licht der Wellenlänge λ unter dem Winkel δ auf ein Reflexionsgitter, so werden die elementaren Strahlen von den lichtreflektierenden Schichten unter beliebigen Winkeln ϑ gestreut, die Gesamtheit aller gestreuten Strahlen kann aber nur unter diskreten Winkeln ϑ konstruktiv interferieren. Wie aus Abbildung 6 zu entnehmen ist, müssen dazu zwei Strahlen, die auf verschiedene Stellen des Reflexionsgitters treffen, bei ihrer Superposition nach der Reflexion einen Gangunterschied von $|\Delta s| = n \cdot \lambda \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}_0$ aufweisen. Dabei gilt:

$$|\Delta s| = |s_1 - s_2| = |\overline{AC} - \overline{BD}| = |\overline{AB} \cdot \cos\vartheta - \overline{AB} \cdot \cos\delta| = d \cdot |\cos\vartheta - \cos\delta|$$

Es ergeben sich Maxima der Ordnung n, wenn gilt:

$$\boxed{d \cdot |\cos\delta - \cos\vartheta| = n \cdot \lambda \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}_0}$$

Reflexion von weißem Licht am CD–Rohling: Weißes Licht besteht aus elementaren Wellenzügen mit je einer bestimmten Wellenlänge λ, wobei unter anderem alle Wellenlängen des sichtbaren Spektrums (ca. 360 – 780 nm) vertreten sind. Jeder elementare Wellenzug kann als in sich kohärentes Licht mit infinitesimal kleiner Leistung angesehen werden. Bestrahlt man einen unbeschriebenen CD–Rohling mit weißem Licht unter dem Einfallswinkel δ senkrecht zu dessen Spuren (z.B. durch Verwendung einer Blende, so dass die Lichtstrahlen eine Ebene bilden), so überlagern sich die elementaren Wellenzüge der Wellenlänge λ unter den entsprechenden Winkeln $\vartheta(\lambda)$ zu einem Maximum, d.h. unter dem Winkel $\vartheta(\lambda)$ ist nur die zur Wellenlänge λ gehörende Farbe zu sehen. Betrachtet man das bunte Schillern der CD und ändert den Blickwinkel ϑ gegen die CD–Oberfläche, so ändert sich entsprechend auch die gesehene Farbe.

2.2.2 Analyse am beschriebenem CD–Rohling

Beim so genannten Brennen einer CD werden die Daten in Form von lokalen Verbrennungen entlang der vorgegebenen Spirale mit Hilfe eines intensiven Lasers auf dem Rohling aufgebracht. Da das Licht an den lokalen Verbrennungen absorbiert wird, können diese als kleine Störung der regelmäßigen Struktur des unbeschriebenen Rohlings angesehen werden. Da die Störung hinreichend gering ist, nimmt sie keinen Einfluss auf die Lage der Maxima des Rohlings.

2.2.3 Analyse an einer industriell gefertigten CD

Der industrielle Fertigungsprozess einer CD hat nichts mit dem Brennen einer CD mittels Laser zu tun, dementsprechend gibt es auf ihr auch keinen Groove. Hier bilden allein die Spuren der Pits und Lands eine hinreichend regelmäßige Struktur, um die CD als Reflexionsgitter ansehen zu können, jedoch sind die Maxima weniger intensiv, als bei einem unbeschriebenem CD–Rohling (vgl. Abbildung 8).

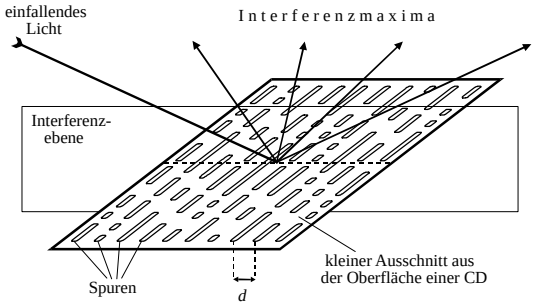

Abbildung 8: Verhalten der industriell gefertigten CD wie ein Refelexionsgitter

2.2.4 Analyse an einer DVD

Da eine industriell gefertigte DVD, ein unbeschriebener DVD–Rohling und ein beschriebener DVD–Rohling mit einer industriell gefertigten CD, einem unbeschriebenem CD–Rohling bzw. einem beschriebenem CD–Rohling vergleichbar ist, können die Überlegungen, die sich auf die CD bezogen haben auf die DVD übertragen werden, so dass auch diese der Theorie des Reflexionsgitters genügt und der Gitterabstand gleich dem Spurabstand d ist.

2.3 Verwendung einer CD als Spektrometer

Einzelne ungebundene Atome können Energie aufnehmen und in einen so genannten angeregten Zustand übergehen. Die möglichen Energieniveaus eines einzelnen Atoms sind jedoch nicht beliebig, sondern diskret und charakteristisch für jedes Element des Periodensystems. Das bedeutet, dass ein Atom nur einen Energiebetrag aufnehmen oder abgeben kann, der das Atom wieder in ein zulässiges Energieniveau überführt. Der Mechanismus der Energiezufuhr basiert meist auf einem inelastischen Stoß mit einem anderen Teilchen (z.B. Elektron, Proton, α–Teilchen, Photon etc.). Die Abgabe eines Energiebetrags E eines angeregten Atoms erfolgt ausschließlich durch Emission eines Photons (elementare elektromagnetische Welle), welches genau den Energiebetrag E hat. Die Wellenlänge λ der elementaren elektromagnetischen Welle und die Energie des Photons hängen über die Beziehung $E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ voneinander ab, dabei ist h die so genannte Planck–Konstante ($h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ Js) und c die Vakuumlichtgeschwindigkeit ($c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$). Da die abgegebene Energie E gequantelt ist, kann auch die Wellenlänge λ, der vom Atom ausgesandten Strahlung, nur diskrete und für das Atom charakteristische Werte annehmen.

Die Hg–Dampflampe: In einer Quecksilberdampflampe ist etwas Quecksilber in einer kleinen geschlossenen Glasküvette eingebracht und wird zum Betrieb der Lampe stark erhitzt. Dadurch verdampfen die Hg–Atome und es entsteht Hg–Dampf. Die einzelnen Atome haben im Dampf sehr hohe Geschwindigkeiten und stoßen gegeneinander, wodurch sie in angeregte Zustände übergehen. Nach kurzer Zeit verlassen die Atome den angeregten Zustand, indem sie elektromagnetische Strahlung diskreter Wellenlänge aussenden. Eine Hg–Dampflampe hat näherungsweise sieben verschiedene Emissionslinien im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Das menschliche Auge kann jedoch nur deren Überlagerung sehen, allerdings nicht die einzelnen Farbanteile.

Da die Unterseite einer CD einfallendes Licht in dessen spektrale Anteile zerlegt, kann die CD als einfaches Spektrometer verwendet werden. Im vorliegenden Versuch soll somit das Licht einer Hg–Dampflampe auf dessen einzelne Farbanteile hin untersucht werden.

Hinweis: Die Hg–Dampflampe hat auch Emissionslinien im kurzwelligen UV–Bereich (nicht sichtbar). Diese Strahlung kann bei längerer Einwirkung für das menschliche Auge schädlich sein! Es ist daher unbedingt darauf zu achten, dass während der Versuchsdurchführung nicht direkt in die Lampe geblickt wird.

3 Die Versuchsdurchführung

3.1 Zur Verfügung stehende Materialien

Zur Umsetzung eines Experiments, welches den unterschiedlichen Spurabstand von CD und DVD zeigen kann, werden folgende Materialien bereitgestellt:

- Ein CD–Rohling mit 650 oder 700 MB Nutzkapazität, sowie ein DVD–Rohling
- Ein He–Ne–Laser der Wellenlänge $\lambda = 632,8\,\mathrm{nm}$
- Eine Rolle Tesafilm
- Ein Winkelmesser oder Geodreieck aus durchsichtigem Kunststoff
- Diverses mechanisches Befestigungsmaterial zur Fixierung des Lasers in geneigten Positionen
- Eine Hg–Dampflampe mit dazugehörigem Betriebsgerät
- Eine optische Bank
- Zwei Blenden

3.2 Aufgaben

1. Realisieren Sie mit Hilfe der bereitgestellten Materialien ein Experiment, zur Bestimmung des Spurabstands der CD und der DVD und messen Sie diesen anschließend bei der CD und bei der DVD. Geben Sie das Ergebnis in der Einheit μm an.

   Hinweis: Es ist zu empfehlen, sich an Abbildung 6 zu orientieren und die CD bzw. die DVD mit Tesafilm auf dem Versuchstisch zu befestigen. Den Strahlengang der Maxima kann man gut verfolgen, wenn man das transparente Geodreieck entsprechend Abbildung 9 auf die CD bzw. DVD hält, so dass das einfallende und das reflektierte Laserlicht durch den Kunststoff verläuft. Somit können auch die jeweiligen Winkel abgelesen werden.

   Achtung: *Es ist unbedingt darauf zu achten, dass das Laserlicht während der Versuchsdurchführung nicht direkt ins Auge fällt, da dies zu einer Schädigung der Netzhaut führen kann!*

2. Bestimmen Sie die Fläche A auf der CD bzw. DVD, die von der Datenspirale bedeckt wird und berechnen Sie damit deren jeweilige Länge $l_{CD-Spur}$ bzw. $l_{DVD-Spur}$.

   Hinweis: Man stelle sich vor, man könne die Datenspirale von der Scheibe „abwickeln“, so würde man ein langgezogenes Rechteck der gesuchten Länge l und der bekannten Breite d erhalten, welches genau die Fläche hat, die von der Datenspirale auf der Scheibe bedeckt wird.

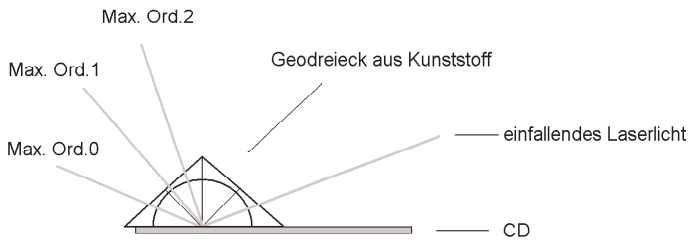

Abbildung 9: Messung von Einfallswinkel δ und Ausfallswinkel ϑ mit einem Geodreieck aus transparentem Kunststoff

3. Berechnen Sie die maximale Kapazität $\mathcal{C}$ der CD bzw. der DVD in MB bzw. in GB.

   Hinweis: Im Binärcode bezeichnet man eine Null oder Eins als Bit, 8 Bit ergeben zusammen ein Byte, welches mit B abgekürzt wird. In der Informatik bedeutet die Vorsilbe k (kilo) Faktor 1024 ($= 2^{10}$) statt Faktor 1000, wie in der Mathematik und Physik. Entsprechend bedeutet auch die Vorsilbe M (Mega) Faktor 1024^2.

   Bemerkung: Auf jedem Datenträger müssen zusätzlich zu den sog. Nutzdaten noch weitere Daten gespeichert werden, die bei einem späteren Lesevorgang gebraucht werden, um die Nutzdaten wieder auslesen und interpretieren zu können (u.a. *„Lead in“*, *„Lead out“*). Dementsprechend unterscheidet man die sog. Nutzkapazität von der maximalen Kapazität. Beim Kauf eines CD– oder DVD–Rohlings ist naheliegenderweise nur die Nutzkapazität angegeben.

4. Führende Unternehmen der Unterhaltungselektronik arbeiten bereits an einem weiterem Speichermedium nach dem Prinzip der CD bzw. der DVD, welches bei sonst gleichen Abmessungen über eine noch höhere Speicherkapazität als die DVD verfügen soll, bei 1–schichtigen Ausführungen etwa 20–30 GB. Bei Verwendung entsprechender Kompressionsverfahren könnten beispielsweise bis zu 25 Stunden Film in guter Qualität auf einer Scheibe gespeichert werden. Die höhere Kapazität wird unter anderem durch eine Verkleinerung der Pits und Lands, sowie schmälere Spuren angestrebt. Die Daten müssen dann mit einem blauen Laser (vermutlich 405 nm) abgetastet werden. Die AOD (Advanced Optical Disc) bzw. die Blue–Ray–Disc sind derzeit entsprechende Prototypen (Stand 2003). Im Falle der Blue–Ray–Disc beträgt der Spurabstand näherungsweise $d \approx 0,3\,\mu$m.

   Kann man mit dem verwendeten Versuchsaufbau auch die Spuren einer Blue–Ray–Disc vermessen? (Falls nicht, wie kann man es dann umsetzen?)

   Überlegen Sie sich die Antwort auf diese Frage und diskutieren Sie anschließend mit Ihrem Versuchsbetreuer darüber.

5. Untersuchen Sie den sichtbaren Teil des Emissionsspektrums einer Hg–Dampflampe,

indem Sie die Unterseite der CD als Spektrometer einsetzen. Mit der CD können fünf Farbkomponenten identifiziert werden, welche sind es?

Die Dampflampe wird dazu mit zwei Blenden auf eine optische Bank gesetzt, die erste Blende soll ca. 1 cm vom Gehäuse der Dampflampe entfernt sein, die andere Blende wird ca. 15 cm weiter aufgestellt. Der Durchmesser der Blendenöffnungen sollte je etwa 1 cm betragen (vgl. Abbildung 10). Somit erreicht man, dass das durchgehende Licht näherungsweise parallel und nicht mehr zu intensiv ist. Die Analyse mit der CD sollte aus einem Abstand von ca. 2 m erfolgen. Der Raum muss dazu vorher vollständig abgedunkelt werden, so dass auf der CD keine Lichtreflexionen mehr zu sehen sind.

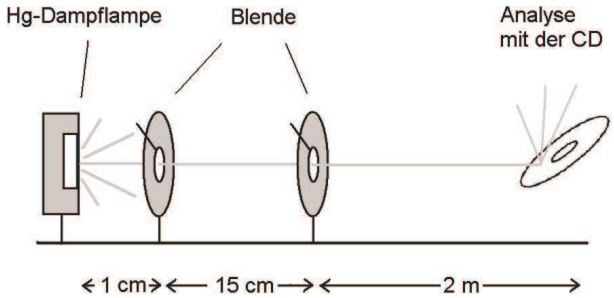

Abbildung 10: Versuchsaufbau zur Analyse des Emissionsspektrums einer Hg–Dampflampe

Achtung: *Die Hg–Dampflampe emittiert UV–Strahlung, die für das Auge bei längerer Bestrahlung schädlich sein kann. Es ist daher unbedingt darauf zu achten, dass nicht direkt in die strahlende Lampe geblickt wird.*