Versuchsprotokoll

Martin Opitz, Frank Pilhofer

Dienstag, 06. Juli 1993

Physikalisches Anfängerpraktikum

Laser

Versuch 16/1

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 2

Problemstellung des Versuchs 2

Beschreibung der Meßmethode 2

Physikalische Grundlagen 2

Funktionsweise des Lasers 2

Beugung 4

Am Einzelspalt 4

Am Doppelspalt 5

Am Gitter 5

Auswertung mit Linearer Regression 6

Am Einzelspalt 6

Am Doppelspalt 6

Am Gitter 6

Versuchsdurchführung 7

Der Einzelspalt 7

Meßwerte 7

Ergebnis 7

Der Doppelspalt 8

Meßwerte 8

Ergebnis 8

Das Gitter 9

Problem 9

Meßwerte 9

Ergebnis 9

Überlegung zur Aufweitung 10

Einleitung

Problemstellung des Versuchs

Bei diesem Versuch geht es um die Erforschung der Wellenigenschaften des Lichts. Am Beispiel des Lasers, einer Quelle von monochromatischem, kohärentem Licht wird die Beugung und Interferenz von Licht an einem Einzelspalt, Doppelspalt und einem Gitter überprüft.

Beschreibung der Meßmethode

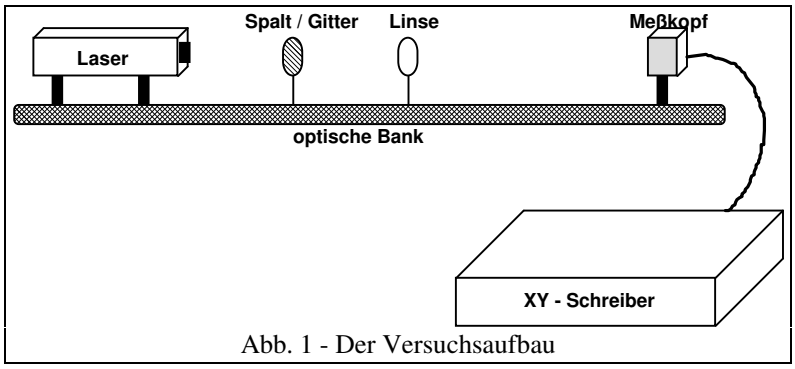

Abb. 1 - Der Versuchsaufbau

Das grundlegende Element des Aufbaus (vgl. Abb. 1) ist die optische Bank, die es erlaubt, Lichtquelle, Beugungsgitter, Linse und Meßkopf in einer genauen Linie aufzustellen. Der hier verwendete Helium-Neon-Laser steht auf zwei Zeiss-Reitern und strahlt sein Licht auf ein Dia, in dem sich je nach Versuch der Einzelspalt, der Doppelspalt oder das Gitter befindet. Dort wird das Licht gebeugt. Idealerweise kann das Interferenzmuster nur im Unendlichen beobachtet werden. Um die Meßapparatur nicht auch im Unendlichen aufstellen zu müssen, wird das Muster mittels einer Sammellinse aus dem Unendlichen herangeholt. In einen Abstand, der der Brennweite der Linse entspricht, wird der Meßkopf gesetzt. Im Meßkopf befindet sich ein Photoelement, welches den Lichteinfall registriert und über einen Verstärker an die Y- Achse eines Schreibers weiterleitet. Mittels einer sehr feinen Drehschraube kann der Meßkopf über das gesamte Interferenzmuster hinweg bewegt werden; diese Bewegung wird ebenfalls über einen Verstärker an die X- Achse des Schreibers gelegt. Über den Verstärker kann die Empfindlichkeit so geregelt werden, daß das gesamte Interferenzmuster gut auf einem Blatt Millimeterpapier aufgezeichnet werden kann.

Von Einzelspalt, Doppelspalt und Gitter werden jeweils eine Meßkurve aufgenommen, die die Verteilung von Minima und Maxima aufzeigt. Anhand der Entfernung der Nebenmaxima (bzw. Nebenminima) vom Hauptmaximum lassen sich der Spaltdurchmesser des Einzelspalts, der Spaltabstand beim Doppelspalt und die Spaltabstände beim Gitter bestimmen.

Physikalische Grundlagen

Funktionsweise des Lasers

Die Elektronen befinden sich innerhalb des Atoms auf diskreten Energiestufen, außerhalb derer sie (aufgrund ihrer Welleneigenschaften) nicht existieren können. Das Prinzip von Pauli

schreibt ihnen weiterhin vor, daß sich innerhalb eines Atoms nur zwei Elektronen auf dem gleichen Energieniveau aufhalten können. Trotzdem ist es den Elektronen unter diesen Bedingungen möglich, spontan zwischen den Niveaustufen zu wechseln. Üblicherweise sind diese Übergänge mit der Absorption bzw. Emission von Photonen, d.h. Licht verbunden. Wird ein Elektron auf einem unteren Niveau von einem Photon (Lichtquant) getroffen, welches genau die Differenzenergie besitzt, die nötig ist um auf ein höheres Niveau innerhalb des Atoms zu wechseln, so wird das Photon absorbiert, das Elektron wechselt das Niveau.

Interessant sind dabei die Auswirkungen der oben aufgeführten Postulate von Bohr bzw. Heisenberg und Pauli. Da die Elektronen nicht außerhalb ihrer diskreten Energieniveaus existieren können, muß die Energie des Photons sehr exakt der gewünschten Energiedifferenz entsprechen, ansonsten kann der Übergang nicht stattfinden. Befinden sich bereits zwei Elektronen auf dem Zielniveau, muß das Elektron ebenfalls dort bleiben wo es ist; das Photon wird nicht Absorbiert.

Der Elektronenübergang ist natürlich auch umkehrbar. Dies ist auch der "natürlichere" Vorgang, denn schließlich sind alle Teilchen bemüht, ihre Eigenenergie zu minimieren. So kann ein Elektron ein Lichtquant emittieren und auf ein niedrigeres Niveau wechseln.

Für diese Emission gibt es zwei Möglichkeiten.

Bei der *spontanen Emission* fällt das Elektron, wie der Name schon sagt, spontan in seinen Grundzustand zurück. Dieser Effekt ist mit dem spontanen Zerfall eines einzelnen radioaktiven Atoms vergleichbar und nicht vorhersagbar.

Der Laser hingegen macht sich die *induzierte Emission* zunutze. Das angeregte Elektron tritt mit einem weiteren Photon in Wechselwirkung und "imitiert den vom vorbeifliegenden Lichtquant vorgeschlagenen Übergang". Dabei wird ein zweites, identisches (kohärentes) Photon emittiert. Hier ist die Verwandtschaft schon etwas ferner, doch ist der Effekt durchaus mit der Spaltung eines Atoms vergleichbar.

Bei einem Laser werden die Atome durch "Pumpen" angeregt, was meistens durch Licht geschieht. Dadurch werden die Elektronen gleichmäßig in einen angeregten Zustand angehoben. Aufgrund einer spontane Emission kommt es nun zu einer lawinenartigen Kettenreaktion, es entsteht ein scharfer Lichtblitz. Durch die vielfache Wiederholung des Vorgangs erhält man einen kontinuierlichen Lichtstrahl (was bei Hochleistungslasern durchaus nicht üblich ist).

Ein kleines Problem bleibt noch zu lösen, denn in den meisten Zwei-Niveau-Systemen ist die Verweildauer der Atome im angeregten Zustand zu kurz, die induzierte Emission tritt hier in den Hintergrund. Das ausgesandte Strahlungsbündel hätte zwar immer noch eine scharfe Abgrenzung hinsichtlich der Frequenz, doch gerade der interessante Effekt der Kohärenz (den andere Lichtquellen, z.B. Na- Licht eben nicht besitzen) würde verlorengehen.

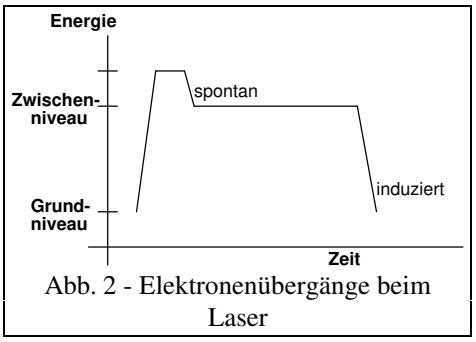

Abb. 2 - Elektronenübergänge beim Laser

Aus diesem Grund werden beim Laser Mehrniveausysteme (Abb. 2) benutzt. Die Elektronen werden zunächst von ihrem Grundzustand in ein recht hohes Niveau "gepumpt". Von dort fallen sie nach sehr kurzer Zeit spontan in eine quasistabiles Zwischenniveau zurück, von dem sie dann mittels induzierter Emission wieder in ihren Grundzustand zurückkehren.

Beugung

Laut Definition ist Beugung die Abweichung der Lichtausbreitung von den Gesetzen der geometrischen Optik. Sie tritt auf, wenn die Ausbreitung des Lichtes durch Hindernisse gestört wird.

Grundlage aller Ansätze zur Erklärung der Beugung ist das *Huygens'sche Prinzip*, nach dem jeder Punkt einer Welle Ausgangspunkt einer elementaren Kreiswelle ist. Überlagert man die erzeugten Elementarwellen, ergibt sich die neue Wellenfront.

Am Einzelspalt

Trifft eine Lichtwelle auf eine Wand mit nur einem Spalt der Breite *d*, so kann jeder Punkt der Welle als Ausgangspunkt einer Elementarwelle aufgefaßt werden (Abb. 3). Diese Elementarwellen werden nun interferieren und sich teils auslöschen und teils konstruktiv verstärken. Zur Vereinfachung kann hier von einer endlichen Anzahl *k* an Elementarwellen ausgegangen werden.

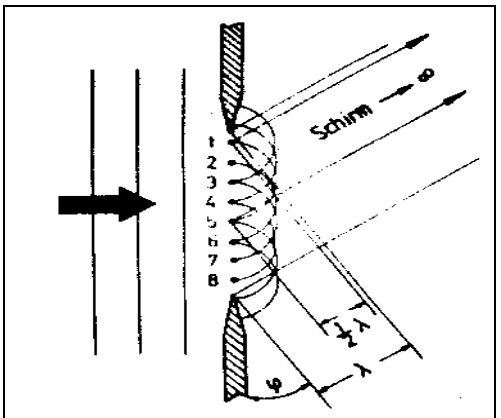

Abb. 3 - Beugung am Einzelspalt

Betrachten wir einen Punkt auf dem Schirm, der unter dem Winkel $\sin^{-1}\frac{\lambda}{d}$ zur optischen Achse verläuft, erkennt man, daß hier destruktive Interferenz aller Elementarwellen vorliegen muß. Die erste Elementarwelle besitzt zu der $\frac{k}{2}+1$. Elementarwelle einen Gangunterschied von genau $\frac{\lambda}{2}$, sie löschen sich also aus. Ebenfalls löschen sich die 2. mit der $\frac{k}{2}+2$. und alle folgenden Wellenpaare aus. Da keine Elementarwelle übrig bleibt, ist dieser Punkt auf dem Schirm dunkel. Allgemeiner erhält man Minima bei Punkten, an denen die Beziehung

$$d \sin \varphi = n\lambda \qquad (1)$$

gilt. Hier läßt sich die Überlegung analog durchführen, der Gangunterschied der einzelnen Wellenpaare genügt dann der Beziehung $\frac{2n-1}{2}\lambda$.

Am Doppelspalt

Beim Doppelspalt fallen die Lichtwellen simultan auf beide Spalte und bilden Elementarwellen aus. Idealerweise werden hier Spalte betrachtet, deren Spaltbreite kleiner ist als die Wellenlänge des verwendeten Lichts; in diesem Fall braucht bei jedem Spalt nur eine Elementarwelle betrachtet zu werden (Abb. 4). An einem Punkt auf dem Schirm werden genau Maxima zu beobachten sein, wenn der Gangunterschied zwischen beiden Elementarwellen ein Vielfaches der Wellenlänge ist.

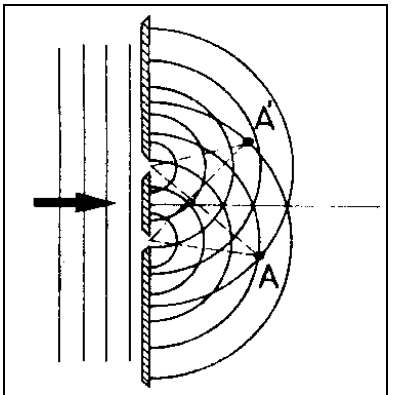

Abb. 4 - Überlagerung zweier Elementarwellen am Doppelspalt

An diesen Stellen gilt die Beziehung

$$g \sin \varphi = n\lambda \ , \qquad (2)$$

mit g als dem Abstand zwischen den Einzelspalten.

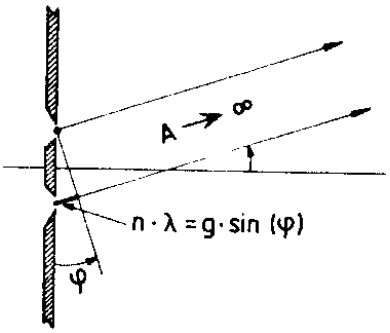

Abb. 5 - Interferenz am Doppelspalt

Genügt der Gangunterschied jedoch der Beziehung $\frac{2n-1}{2}\lambda$, so werden hier Minima zu finden sein, beide Elementarwellen laufen an diesen Punkten gegenphasig und löschen sich aus.

Dies ist genau an den Winkeln mit

$$g \sin \varphi = \tfrac{2n-1}{2}\lambda \qquad (3)$$

der Fall.

Bislang ist immer von dem idealisierten Fall ausgegangen worden, daß sich an jedem der Einzelspalte nur eine Elementarwelle ausbildet. Im realen Fall jedoch entstehen an beiden Spalten Interferenzmuster wie oben berechnet. Das eigentliche Bild entsteht daher durch Überlagerung des idealen Interferenzmusters beider Einzelspalte und dem idealen Interferenzmuster eines Doppelspaltes. Der Unterschied ist allerdings nicht mit bloßem Auge sichtbar. Auf der optischen Achse besitzen beide Effekte ein Maximum. Außerhalb des 0. Maximums stören die überlagerten Bilder der Einzelspalte kaum, da deren weiter außen liegende Maxima eine sehr schwache Intensität besitzen.

Am Gitter

Auch beim Gitter wird wieder ein wenig idealisiert. Wie beim Doppelspalt wird angenommen, daß an jedem Gitterspalt nur eine Elementarwelle entsteht. Als zweite Vereinfachung wird die Anzahl der Gitterspalte mit unendlich angenommen; auf diese Weise erhält man das ideale Interferenzmuster eines Spaltes. Durch die gleiche

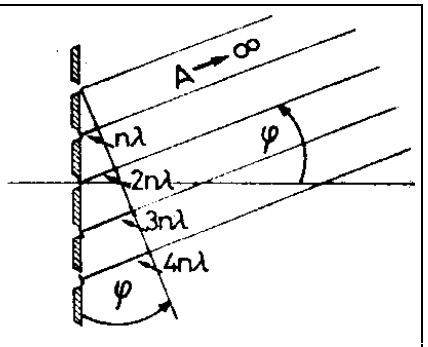

Abb. 6 - Beugung am Gitter

Überlegung wie beim Doppelspalt sind unter den gleichen Winkeln mit

$$g \sin \varphi = n\lambda \qquad (4)$$

Maxima zu erwarten (vgl. Abb. 6), g ist hierbei die "Gitterkonstante", der konstante Abstand zwischen zwei nebeneinanderliegenden Spalten. Weicht man von diesen diskreten Winkeln ab, findet man aufgrund der Annahme, daß unendlich viele Spalte zum Interferenzmuster beitragen, jeweils Paare von Spalten, deren Elementarwellen sich an diesem Punkt auslöschen. Daraus resultieren sehr scharfe Maxima, zwischen denen die Intensität idealerweise 0 beträgt.

Auswertung mit Linearer Regression

Am Einzelspalt

Bei diesem Versuch muß zur Formel (1) noch die verwendete Sammellinse zugerechnet werden; es gilt die Beziehung $\tan \varphi = \frac{x}{f}$. Bei den hier auftretenden kleinen Winkeln kann mit $\sin \varphi \approx \tan \varphi \approx \varphi$ gerechnet werden. Aus (1) wird damit $d \frac{x}{f} = n\lambda$. Für die Auswertung kann n auf der y-Achse und x auf der x-Achse aufgetragen werden. Durch Umstellung ergibt sich

$$n = \frac{d}{\lambda f} x \ . \qquad (5)$$

Der Faktor $\alpha = \frac{d}{\lambda f}$ vor dem x wird als Steigung der Ausgleichsgeraden aufgefaßt und kann somit aus der linearen Regression bestimmt werden. Weiterhin ergibt sich ein y-Achsenabschnitt, der vernachlässigbar klein ist und nicht weiter beachtet wird.

In die LR fließen neben den Minima auch die Maxima ein, für welche $n = \pm\frac{3}{2}; \pm\frac{5}{2} \ldots$ eingesetzt wird.

Am Doppelspalt

Die Auswertung erfolgt hier ähnlich wie beim Einzelspalt. Aus den Formeln (2) und (3) folgt wieder die lineare Regressionsformel (5), wobei nur das d des Spalts durch den Spaltabstand g zu ersetzen ist. Weiterhin gilt die Formel hier für die Maxima, welche hier mit 1..n durchnumeriert werden. Auch hier werden die Minima mit eingerechnet, und zwar als die Ordnungen $n = \pm\frac{1}{2}; \pm\frac{3}{2} \ldots$ usw.

Am Gitter

Formelmäßig ist diese lineare Regression, die aus der Formel (4) folgt, mit der Rechnung am Doppelspalt identisch. Allerdings kann hier nur mit den Maxima gerechnet werden; außerhalb der scharf abgegrenzten Maxima ist die Intensität (zumindest idealisiert) 0, die Orte der Minima lassen sich daher nicht festlegen.

Versuchsdurchführung

Der Versuch wird wie bei der Einleitung beschrieben aufgebaut. Die Entfernung vom Laser zum Meßkopf beträgt gut einen Meter, was für die Messung jedoch nicht relevant ist. Wichtiger ist die Entfernung zwischen der Linse und Meßkopf. Da die verwendete Linse eine Brennweite von 60cm besitzt, muß dieser Abstand genau eingehalten werden.

Die Aufnahme der Meßkurven verläuft bei allen Messungen analog. Der Verstärker und der angeschlossene Schreiber werden so justiert, daß der Schreibstift auch beim 0. Maximum nicht anschlägt und der Meßbereich auf beiden Seiten ausreichend groß ist.

Der Meßkopf wird mittels der Schraube langsam über das Interferenzmuster hinwegbewegt, damit der Stift auch großen Intensitätsänderungen folgen kann. Ist die Kurve aufgenommen, wird der gesamte Meßbereich noch einmal durchlaufen, um auf das Millimeterpapier eine Eichung aufzutragen. Nach jeder Bewegung des Schlittens um 1mm wird eine Markierung auf das Papier aufgetragen, woraus sich hinterher die Winkel zwischen jedem Punkt auf dem "Schirm" und der optischen Achse bestimmen läßt.

Der Einzelspalt

Meßwerte

Ordnung n	Abstand [mm]	Ordnung n	Abstand [mm]
-1	-3,048	1	2,696
-2	-6,007	2	5,802
-3	-9,026	3	9,084
-1,5	-4,308	1,5	4,044
-2,5	-7,326	2,5	7,267

Mit "Ordnung" sind die Ordnungen der Minima gemeint. Die zwischen den Minima liegenden Maxima erhalten halbzahlige Ordnungen. Mit der Ordnung 1,5 ist daher das zwischen dem 1. und 2. Minimum liegende Maximum gemeint.

Ergebnis

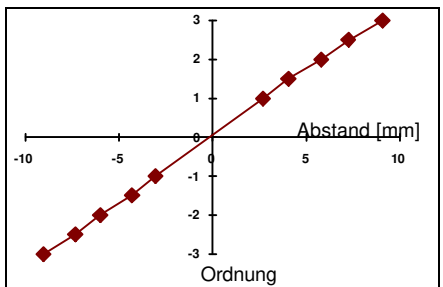

Abb. 7 - Der Einzelspalt

Die lineare Regression (Abb. 7) ergibt einen Wert von $\alpha = 338,86m^{-1} \pm 1\%$. Nach Gleichung 5 gilt $d = \alpha\lambda f$. Wird die Wellenlänge des Lichts als konstant angenommen und ist der Versuchsaufbau ideal, ergibt sich für den Spalt die Breite $128,1\mu m \pm 1\%$. Allerdings sollte noch hinzugerechnet werden, daß die Meßvorrichtung nicht ideal im Brennpunkt der Linse stand. Rechnet man hier noch einen Fehler von $\pm 1cm$ ein, vergrößert sich die Ungenauigkeit der Messung auf $128,1\mu m \pm 2\%$.

Der Doppelspalt

Meßwerte

Ordnung n	Abstand [mm]	Ordnung n	Abstand [mm]
-1	-0,588	1	0,588
-2	-1,235	2	1,206
-3	-1,853	3	1,824
-4	-2,500	4	2,471
-6	-3,765	6	3,765
-7	-4,441	7	4,412
-8	-5,059	8	5,088
-9	-5,706	9	5,756
-0,5	-0,353	0,5	0,265
-1,5	-0,971	1,5	0,882
-2,5	-1,618	2,5	1,500
-3,5	-2,294	3,5	2,176
-6,5	-4,118	6,5	4,059
-7,5	-4,765	7,5	4,765
-8,5	-5,441	8,5	5,441

In dieser Tabelle wiederum besitzen die Maxima ganzzahlige Ordnung, zwischen denen die Minima liegen.

Ergebnis

Beim Einsetzen dieser Werte in die lineare Regressionsgleichung errechnet sich die Steigung der Ausgleichsgeraden als $\alpha = 1573,1 m^{-1} \pm 0,5\%$, woraus ein Spaltabstand von $g = 594,6 \mu m \pm 0,5\%$ folgt.

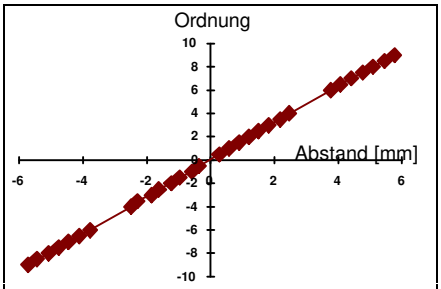

Abb. 8 - Der Doppelspalt

Die beim Doppelspalt aufgenommene Meßkurve (Abb. 8) zeichnet sich durch ihre eng aneinander liegenden Minima und Maxima aus. Auffällig ist, daß die Minima stets oberhalb der "Nullinie" liegen; weiterhin sind die $\pm 5.$ Maxima sowie die $\pm 5.$ und $\pm 6.$ Minima nicht zu erkennen.

Diese Abweichung von der idealen Kurve lassen sich durch die Idealisierungen erklären, die bei der idealen Kurve vorausgesetzt wurden. Im Versuch sind beide Spalte breiter als eine Wellenlänge des verwendeten Lichts, weshalb von den Einzelspalten mehr als eine Elementarwelle ausgehen. Zu der im Heft berechneten Intensitätsverteilung des idealen Doppelspalts sind daher noch 2 Verteilungen mehr oder weniger idealer Einzelspalte zuzurechnen.

Betrachtet man die Minima und verbindet sie durch eine Linie, wird eine neue Kurve sichtbar; dies ist sinnvollerweise die Überlagerung beider Interferenzmuster der Einzelspalte. Der Abstand der beiden einzelnen Spalte ist jedoch gering genug um anzunehmen, das Muster

würde von einem einzelnen Einzelspalt gleicher Größe erzeugt; nur die Intensität wird entsprechend verdoppelt.

Es ist erkennbar, daß das -1. Minimum ungefähr mit dem -5 Maximum des Doppelspaltmusters zusammenfällt, ebenso liegt das 1. Minimum auf dem 5. Maximum. Die Werte sind natürlich schwer abzuschätzen, ich benutze hier die Interpolation zwischen dem 4. und 6. Maximum.

Daraus ergibt sich für das -1. Minimum ein Abstand zum Hauptmaximum von $-3{,}132mm$, für das 1. Minimum $3{,}118mm$, macht einen Durchschnitt von $3{,}125mm$, woraus folgt, daß die Einzelspalte nach Formel (1) eine Breite von $121{,}0\mu m$ haben. Die Positionen auf dem Millimeterpapier sind natürlich nur schwer zu bestimmen. Rechnet man hier mit einer Ungenauigkeit von $\pm 4mm$, so haben die Abstände einen Fehler von $7{,}5\%$, was dann auch der Fehler der Spaltbreite ist.

Das Gitter

Problem

Mit dem Gitter sollten zwei Meßkurven aufgenommen werden, einmal mit einer Aufweitoptik vor dem Laser und einmal ohne. Aufgrund diverser Unstimmigkeiten mit dem Schreiber war die Messung mit aufgeweitetem Strahlenbündel nicht durchführbar. Daher steht an dieser Stelle nur die Auswertung der einen Kurve.

Meßwerte

Ordnung n	Abstand [mm]	Ordnung n	Abstand [mm]
-1	-1,453	1	1,382
-2	-2,870	2	2,823
-3	-4,335		

Ergebnis

Die Ausgleichsgerade (Abb. 9) besitzt eine Steigung von $\alpha = 700{,}5m^{-1} \pm 0{,}7\%$, was zu einer "Gitterkonstanten" $g = 264{,}8\mu m \pm 0{,}7\%$ führt.

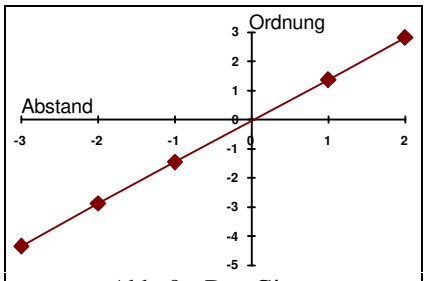

Abb. 9 - Das Gitter

Ähnlich wie beim Doppelspalt ist auch hier eine starke Intensitätsschwankung der einzelnen Maxima zu beobachten. Während das 0. Maximum einmal wieder überdeutlich ist, ist das 2. Maximum kaum noch zu sehen; das 3. ist wiederum etwas stärker. Auch hier liegt das an den störenden Einzelspaltinterferenzen. Man überlegt, daß die ± 1. Minima der Einzelspalte in der Gegend der ± 2. Gittermaxima liegen. Setzt man diese Werte ein, so läßt sich die Breite der einzelnen Spalte durch $132{,}8\mu m$ - mit genügend großer Ungenauigkeit - abschätzen.

Überlegung zur Aufweitung

Der Laser produziert ein sehr enges Lichtbündel. Bei der aufgenommenen Meßkurve wurde es ohne Aufweitung auf das Gitter gestrahlt, wobei nur eine relativ kleine Anzahl Spalte getroffen wurde. Das ideale Bild erhält man jedoch nur, wenn unendlich viele Spalte beleuchtet werden. Durch die Aufweitoptik sollte der Laserstrahl auf eine Breite von ca. 2,5cm aufgeweitet werden, womit diese Idealitätsbedingung sehr viel besser erfüllt gewesen wäre.

Bei dieser Kurve wäre also zu erwarten gewesen, daß sich die Maxima noch schärfer abgrenzen und deren Intensität auch bei höheren Ordnungen konstant bleibt; am eigentlichen Bild und den Abständen zum Hauptmaximum hätte sich jedoch kaum etwas geändert.