

Versuchsauswertung:

Laser-Optik Teil A

(P2-16,17,18)

Christian Buntin, Jingfan Ye

Gruppe Mo-11

Karlsruhe, 3. Mai 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Brewsterwinkel	2
1.1	Betrachtung am Laser	2
1.2	Messung des Brewsterwinkels	2
2	Beugung an Spalt, Steg, Kreisloch, Kreisblende und Kante	2
2.1	Bestimmung der Spaltbreite mit Hilfe von Beugung	2
2.2	Beugungsfigur eines Stegs	4
2.3	Beugungsbild einer Kreisöffnung, einer gleichgroßen Kreisscheibe und einer Kante	5
2.4	Beugungsfigur eines Haares	7
3	Beugung an Mehrfachspalten und Gittern	8
3.1	Bestimmung der Spaltbreite und des Spaltabstands eines Doppelspalts	8
3.2	Anderer Doppelspalt, Dreifachspalt	10
3.3	Gitterkonstante eines Strichgitters	10
3.4	Beugungsbilder von Kreuz- und Wabengittern	12
4	Abbildung nichtselbstleuchtender Gegenstände	13
5	Holographie	13

1 Brewsterwinkel

1.1 Betrachtung am Laser

Da der Experimentier-Laser für diesen Versuch nicht justiert war, zündete dieser nicht. Eine Justierung durch den Betreuer während des Praktikums blieb leider erfolglos. Dies macht die Empfindlichkeit des Lasers gegenüber geringfügigen Änderungen deutlich. Beim Einbringen der Glasplatte wäre der Laser auch sofort ausgegangen und hätte erst bei der Neigung des Glasplättchens im Brewsterwinkel eventuell gezündet.

1.2 Messung des Brewsterwinkels

Da der Laser ja nicht funktionierte, nehmen wir einen gemessenen Brewsterwinkel von $\alpha_B = 55^\circ$ an.

Damit folgt für den Brechungsindex n_{Glas} des Glases:

$$n_{\text{Glas}} = n_{\text{Luft}} \tan \alpha_B = 1 \cdot \tan(55^\circ) = 1,428$$

Dies liegt etwas unterhalb der Brechzahl von Glas von 1,523 (für mikroskopische Deckgläser).

2 Beugung an Spalt, Steg, Kreisloch, Kreisblende und Kante

2.1 Bestimmung der Spaltbreite mit Hilfe von Beugung

Wir haben mittels eines Einzelspaltes Beugungsmuster auf einem Schirm erzeugt (Abbildung 1).

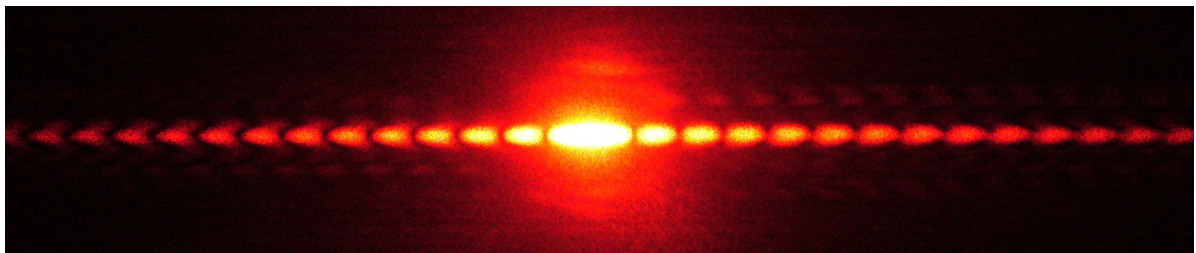


Abbildung 1: Beugungsmuster eines Einzelspalts

Nach der Vorbereitung gilt für die Spaltbreite s (Gleichung 2.3):

$$s = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda L}{x_k} \quad (2.1)$$

mit der Wellenlänge $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, der Entfernung Spalt-Schirm $L = 240 \text{ cm}$ und der Position x_k des Maximums k -ter Ordnung.

Die Messwerte (Tabelle 1) haben wir in Abbildung 2 dargestellt, indem wir $(k + \frac{1}{2}) \lambda L$ über x_k aufgetragen haben. Die Steigung der Regressionsgeraden entspricht dann genau der Spaltbreite s . Diese Beziehung wird durch die Umformung von Gleichung (2.1) auf der vorherigen Seite zu $x_k \cdot s = (k + \frac{1}{2}) \lambda L$ ersichtlich. Damit erhalten wir für s mit statistischem Fehler:

$$s = (0,1846 \pm 0,0003) \text{ mm}$$

k :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
x_k :	12	20	28	37	44	55	61	70	78	86	95	102	111	119	128	135
k :	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17
x_k :	-12	-21	-28	-37	-46	-53	-62	-70	-78	-86	-94	-103	-111	-119	-128	-136

Tabelle 1: Maxima bei einem Einzelspalt (x_k in mm)

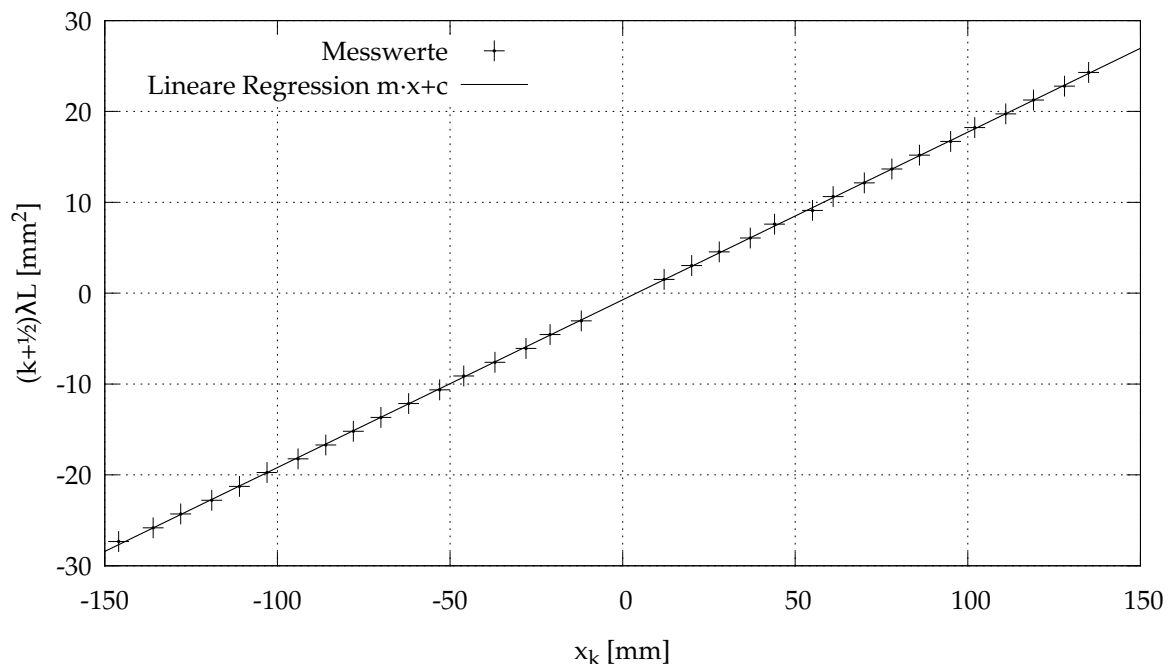


Abbildung 2: Bestimmung der Spaltbreite

Werte der Regression: $m = (0,1846 \pm 0,0003) \text{ mm}$, $c = (-0,73 \pm 0,03) \text{ mm}^2$

Da wir die Maxima eindeutig den jeweiligen Beugungsordnungen n zuordnen konnten, gehen wir davon aus, dass $\Delta k = 0$ ist.

Für die Wellenlänge des Lasers sind $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ angegeben, weshalb wir eine Abweichung von $\Delta \lambda = 0,05 \text{ nm}$ annehmen.

Für Δx_k wählen wir $1,5 \text{ mm}$, da einerseits beim Auftragen der Maxima Fehler entstehen konnten (Genauigkeit $\pm 1 \text{ mm}$) und andererseits beim Abmessen auf dem Papier ein Lineal mit einer Genauigkeit von 1 mm verwendet wurde (halbe Strichbreite $0,5 \text{ mm}$).

Die Ungenauigkeit der Entfernung Spalt-Schirm begründet sich durch das Fehlen von Markierungen zum genauen Ablesen der Positionen an der Zeißscheine. Daher nehmen wir hierfür einen Fehler von $\Delta L = 1 \text{ cm}$ an.

Wir führen eine Größtfehlerabschätzung durch:

$$\Delta s = \left| \frac{\partial s}{\partial \lambda} \right| \Delta \lambda + \left| \frac{\partial s}{\partial L} \right| \Delta L + \left| \frac{\partial s}{\partial x_k} \right| \Delta x_k = \frac{2k+1}{2x_k} \lambda \cdot \Delta L + \frac{2k+1}{2x_k} L \cdot \Delta \lambda + \left| \frac{2k+1}{2x_k^2} L \lambda \right| \cdot \Delta x_k$$

Folgende Größtfehler ergeben sich für das k -te Maximum:

k :	1	2	3	4	5	6	7	8	
s :	0,1898	0,1898	0,1898	0,1847	0,1898	0,1795	0,1867	0,1844	
Δs :	0,0246	0,0151	0,0110	0,0083	0,0073	0,0057	0,0054	0,0048	
k :	9	10	11	12	13	14	15	16	
s :	0,1850	0,1854	0,1838	0,1861	0,1847	0,1851	0,1839	0,1856	
Δs :	0,0044	0,0041	0,0037	0,0036	0,0033	0,0032	0,0030	0,0029	
k :	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
s :	0,1898	0,1808	0,1898	0,1847	0,1816	0,1863	0,1837	0,1844	0,1850
Δs :	0,0246	0,0137	0,0110	0,0083	0,0070	0,0061	0,0053	0,0048	0,0044
k :	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	
s :	0,1854	0,1858	0,1843	0,1847	0,1851	0,1839	0,1843	0,1820	
Δs :	0,0041	0,0038	0,0035	0,0033	0,0032	0,0030	0,0029	0,0027	

Tabelle 2: Messwert für die Spaltbreite bei jedem Maximum sowie der zugehörige systematische Fehler (s und Δs in mm).

Wir geben nun für den Messwert der Spaltbreite an:

$$s = 0,1846 \quad \underbrace{\pm 0,0003}_{\text{statistischer Fehler}} \quad \underbrace{\pm 0,0007}_{\text{systematischer Fehler}} \quad \text{mm}$$

Beim systematischen Fehler mittelten wir die der Einzelmessungen.

Die in der Versuchsanweisung angegebene Spaltbreite $s = 0,2$ mm liegt somit etwas außerhalb des Fehlertoleranzbereiches. Trotzdem ist in Anbetracht der wirklich geringen Breite des Spaltes und der ungenauen Angabe der Breite unsere Messung relativ genau gewesen.

2.2 Beugungsfigur eines Stegs

Beim Vergleich (Abbildung 3 auf der nächsten Seite) der Beugungsmuster eines Stegs und eines Spaltes gleicher Breite zeigt sich, dass diese in guter Näherung übereinstimmen. Abweichungen in den höheren Ordnungen kommen möglicherweise durch kleine Abweichungen der Breite des Spaltes beziehungsweise Stegs zustande.

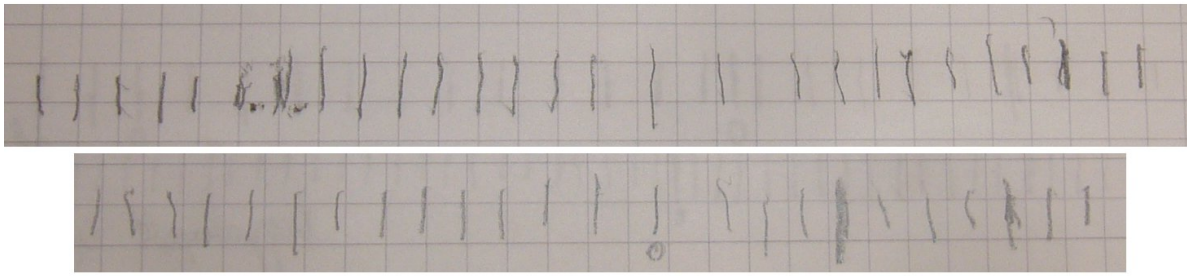


Abbildung 3: Vergleich zwischen Beugungsmuster eines Stegs (oben) und eines Einzelspalts (unten), jeweils der Breite 0,3 mm

2.3 Beugungsbild einer Kreisöffnung, einer gleichgroßen Kreisscheibe und einer Kante

Wir haben das Beugungsbild einer Kreisöffnung (Abbildung 5 auf der nächsten Seite) mit dem einer Kreisblende (Abbildung 4) verglichen. Nach dem Babinet-Theorem sollten diese Beugungsbilder identisch sein, allerdings zeigte sich bei uns, möglicherweise aufgrund von Schmutzteilchen, an der Kreisblende ein total verrauschtes Bild.

Am Beugungsbild einer Kante (Abbildung 6 auf der nächsten Seite) erkennt man deutlich die Fresnelbeugung. Die Kante befand sich rechts, wo die Intensität ohne monoton abfällt. Links davon sieht man einige Maxima und Minima, die aber auch mit größerer Entfernung zum Mittelpunkt verschwimmen, schwächer werden und nicht mehr voneinander unterscheidbar sind. Dieses Beugungsbild kann man nur mit Kugelwellen beschreiben.

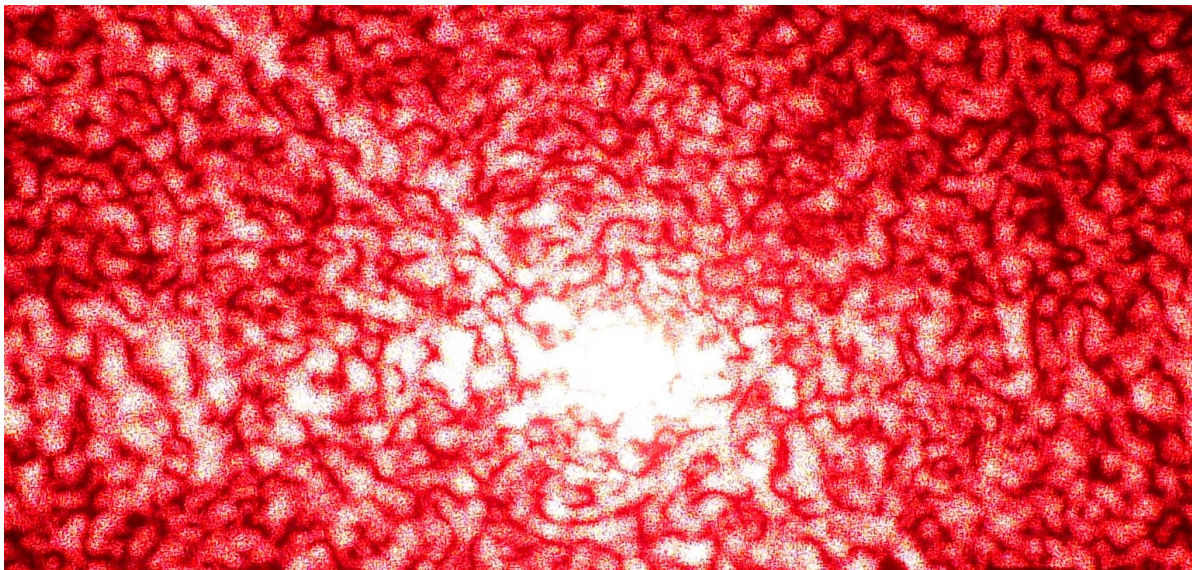


Abbildung 4: Beugungsbild einer Kreisblende (leider verrauscht)



Abbildung 5: Beugungsbild einer Kreisöffnung

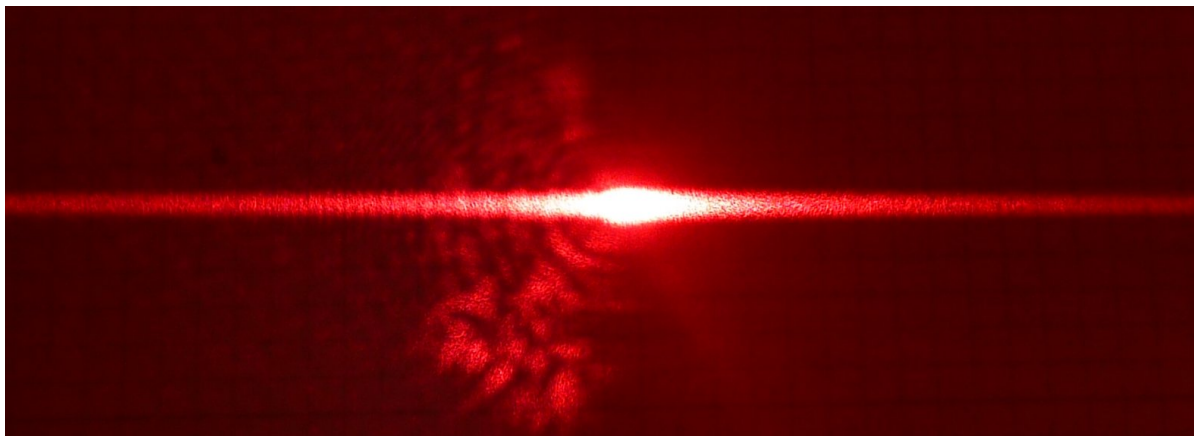


Abbildung 6: Beugungsbild einer Kante

2.4 Beugungsfigur eines Haares

Wir haben ein Haar von Jingfan Ye in den Strahlengang gebracht und das Beugungsmuster (Abbildung 7) beobachtet. Nach dem Theorem von Babinet entspricht dieses Beugungsmuster dem eines Einzelspalts gleicher Breite. Daher haben wir wie in Aufgabe 2.1 verfahren und die Positionen der Maxima (Tabelle 3) entsprechend aufgetragen (Abbildung 8) und die Steigung bestimmt.



Abbildung 7: Beugungsbild eines Haares

n :	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
x_n :	-126	-104	-80	-58	-35	-12	11	35	59	81	104	127

Tabelle 3: Maxima bei Beugung an einem Haar (x_k in mm)

Als Durchmesser des Haares erhalten wir somit $d = 66 \mu\text{m}$.

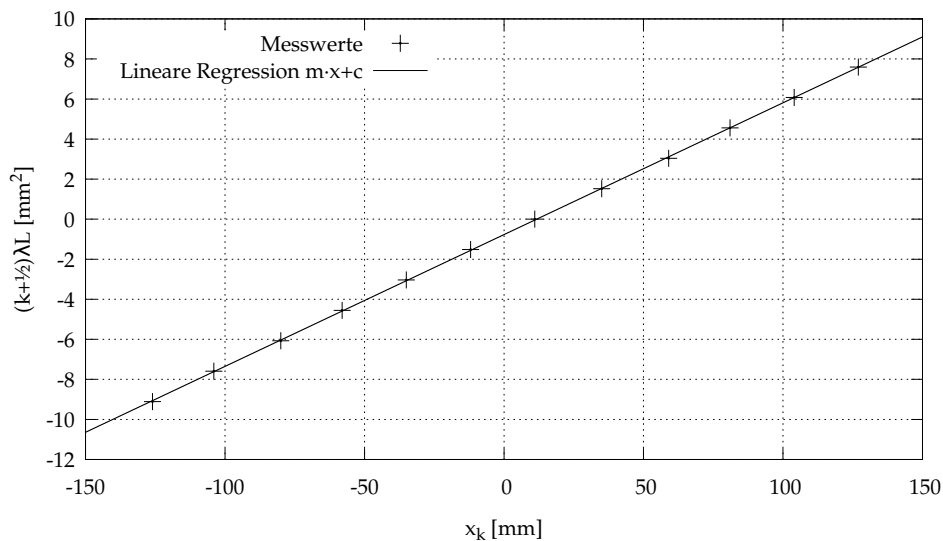


Abbildung 8: Bestimmung der Dicke eines Haares

Werte der Regression: $m = (0,0658 \pm 0,0002) \text{ mm}$, $c = (-0,77 \pm 0,02) \text{ mm}^2$

Hier zeigt sich, dass die Messung mittels Beugung wesentlich genauer als die Bestimmung mittels einer Mikrometerschraube ist. Denn bei der Messung mit einer solchen Mikrometerschraube erhielten wir einen Wert für die Dicke des Haares von $100 \mu\text{m}$. Allerdings ist der Punkt, an dem die Zylinder der Mikrometerschraube genau eine Haarbreite auseinander liegen nur schwer zu bestimmen.

3 Beugung an Mehrfachspalten und Gittern

3.1 Bestimmung der Spaltbreite und des Spaltabstands eines Doppelspalts

Wir haben mittels eines Doppelspalts ein Beugungsmuster auf einem Schirm erzeugt (Abbildung 9) und den Orten x_k der Intensitätsmaxima den jeweiligen Index k_D des Doppelspaltmaximums und k_E des Einzelspaltmaximums zugeordnet. Aus den Daten des Doppelspalts (g doppelt so groß wie s) und aus der Lage des ersten Maximas folgt, dass jedes zweite Doppelspaltmaximum in einem Einzelspaltminimum liegt.



Abbildung 9: Beugungsbild eines Doppelspalts

x_k :	0	4	9	16	22	29	36	42	48	54	62	68	75	80	87	94	101	106	114	119
k_D :	0	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37
k_E :		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
x_k :	-3	-9	-16	-24	-29	-35	-42	-48	-54	-60	-68	-74	-80	-86	-92	-98	-104			
k_D :	-1	-3	-5	-7	-9	-11	-13	-15	-17	-19	-21	-23	-25	-27	-29	-31	-33			
k_E :	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16			

Tabelle 4: Maxima beim Doppelspalt (x_n in mm)

Bestimmung der Spaltbreite

Mit den Daten aus Tabelle 4 lässt sich wie in Aufgabe 2.1 über den Index k_E die Breite eines Spaltes bestimmen. Dazu haben wir diese Messwerte in Abbildung 10 auf der nächsten Seite dargestellt, indem wir $(k_E + \frac{1}{2}) \lambda L$ über x_k aufgetragen haben. Die Steigung der Regressionsgeraden entspricht dann genau der Spaltbreite s . Damit erhalten wir für die Spaltbreite s mit statistischem Fehler:

$$s = (0,2365 \pm 0,0005) \text{ mm}$$

Um den systematischen Fehler zu bestimmen, verwenden wir wieder die Größtfehlerabschätzung wie beim Einzelspalt:

$$\Delta s = \left| \frac{\partial s}{\partial \lambda} \right| \Delta \lambda + \left| \frac{\partial s}{\partial L} \right| \Delta L + \left| \frac{\partial s}{\partial x_k} \right| \Delta x_k = \frac{2k_E + 1}{2x_k} \lambda \cdot \Delta L + \frac{2k_E + 1}{2x_k} L \cdot \Delta \lambda + \left| \frac{2k_E + 1}{2x_k^2} L \lambda \right| \cdot \Delta x_k$$

Wir ließen Excel die systematischen Fehler jeder Einzelmessung mit obiger Gleichung berechnen. Wie in Aufgabe 2.1 mittelten wir anschließend den Fehler und erhielten dafür $\Delta s = 0,02 \text{ mm}$.

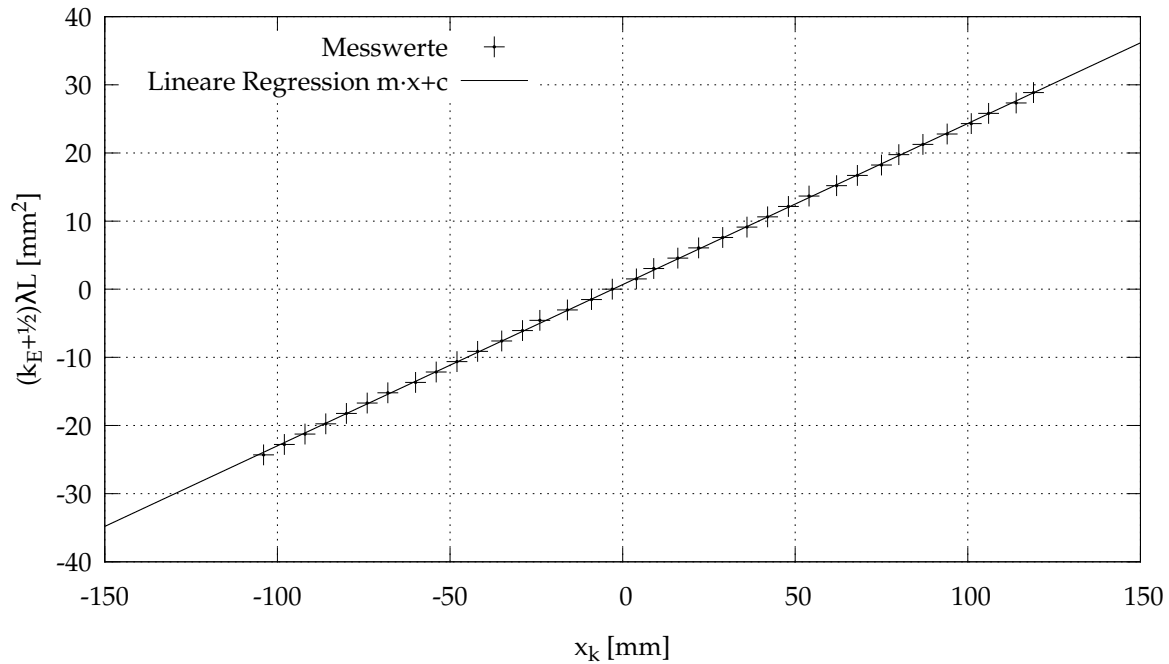


Abbildung 10: Bestimmung der Spaltbreite eines Doppelspalts
 Werte der Regression: $m = (0,2365 \pm 0,0005) \text{ mm}$, $c = (0,67 \pm 0,03) \text{ mm}^2$

Somit haben wir eine Spaltbreite von

$$s = (0,2365 \pm 0,0005 \pm 0,02) \text{ mm}$$

vorliegen. Dies liegt etwas unter der angegebenen Breite von 0,25 mm, aber dieser Wert liegt im Fehlertoleranzbereich. Wir stimmt also mit den Angaben überein.

Bestimmung des Spaltabstandes

Aus Tabelle 4 auf der vorherigen Seite lässt sich über den Index k_D auch der Abstand g der Spalte bestimmen. Da für den Ort x_k der Maxima beim Doppelspalt gilt:

$$x_k = k_D \frac{\lambda L}{g},$$

haben wir $k_D \lambda L$ über x_k aufgetragen und die Steigung der Regressionsgeraden bestimmt (Abbildung 11 auf der nächsten Seite). Diese Steigung entspricht dann dem Spaltabstand g . Für diesen erhalten wir somit mit statistischem Fehler:

$$g = (0,473 \pm 0,001) \text{ mm}$$

Um den systematischen Fehler zu bestimmen, verwenden wir wieder die Größtfehlerabschätzung:

$$\Delta g = \left| \frac{\partial g}{\partial \lambda} \right| \Delta \lambda + \left| \frac{\partial g}{\partial L} \right| \Delta L + \left| \frac{\partial g}{\partial x_k} \right| \Delta x_k = \left| \frac{k_D}{x_k} \lambda \right| \Delta L + \left| \frac{k_D}{x_k} L \right| \Delta \lambda + \left| \frac{k_D}{x_k^2} L \lambda \right| \Delta x_k$$

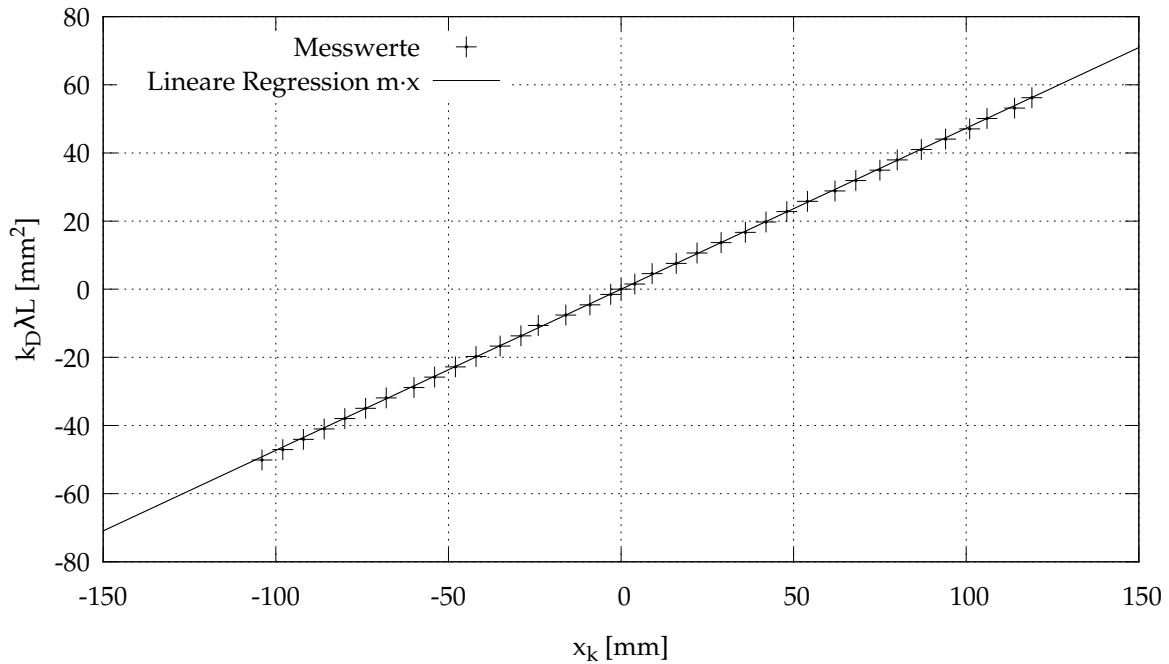


Abbildung 11: Bestimmung des Spaltabstandes eines Doppelspalts
 Werte der Regression: $m = (0,473 \pm 0,001) \text{ mm}$

Hier wurde ebenfalls der Übersichtlichkeit wegen auf die Wertangaben der systematischen Fehler der Einzelmessungen verzichtet. Wir errechneten diesen Wert mit Excel und erhalten wir für den mittleren systematischen Fehler $\Delta g = 0,031 \text{ mm}$

Somit haben wir einen Spaltabstand von

$$g = (0,473 \pm 0,0001 \pm 0,031) \text{ mm}$$

vorliegen. Damit entspricht unser Messergebnis dem angegebenen Abstand von $0,5 \text{ mm}$, da dieser im Fehlertoranzbereich liegt.

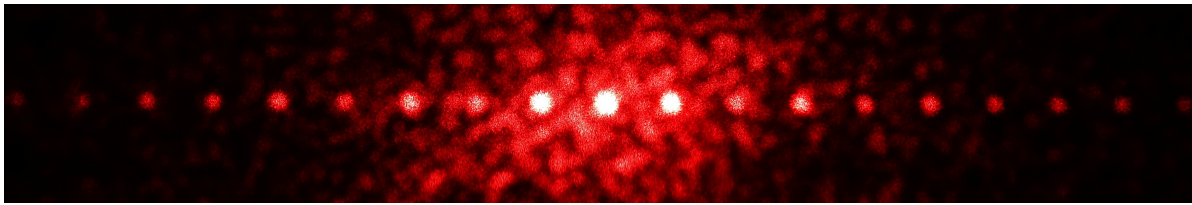
3.2 Anderer Doppelspalt, Dreifachspalt

Wie erwartet zeigte sich, dass bei der Verwendung eines Doppelspaltes mit geringerem Spaltabstand die Maxima weiter auseinander wanderten.

Im Beugungsmuster des Dreifachspaltes waren die Maxima auch wie erwartet deutlicher ausgeprägt als beim Doppelspalt. Zudem waren Zwischenmaxima zu sehen, die nur schwach leuchteten.

3.3 Gitterkonstante eines Strichgitters

Wir haben das Beugungsmuster eines optischen Gitters erzeugt (Abbildung 12 auf der nächsten Seite) und die Positionen der Maxima bestimmt (Tabelle 5 auf der nächsten Seite).

**Abbildung 12:** Beugungsbild eines Gitters

$k:$	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9		
$x_k:$	-15	-29	-43	-57	-72	-87	-101	-116	-130		
$k:$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_k:$	0	15	29	43	58	73	87	101	117	131	145

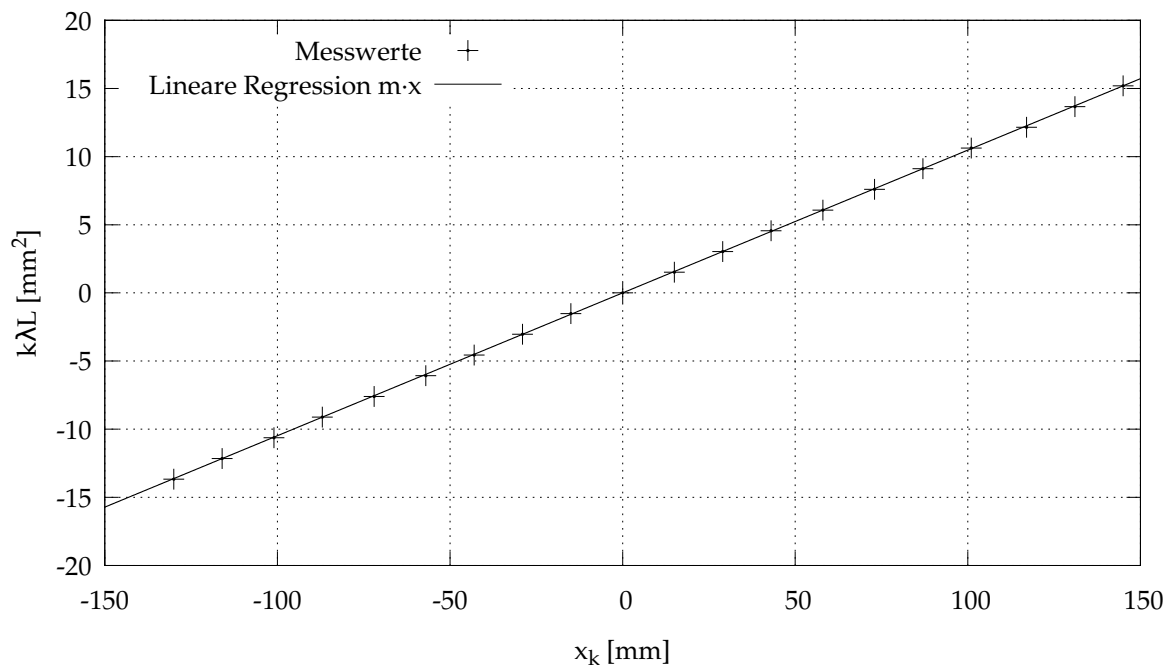
Tabelle 5: Maxima bei Beugung an einem Gitter (x_n in mm)

Da beim Gitter, wie auch beim Doppelspalt, für den Gitterabstand g gilt:

$$g = \frac{k\lambda L}{x_{\max}},$$

haben wir $k\lambda L$ über $x_{\max}$ aufgetragen und die Steigung der Regressionsgeraden bestimmt (Abbildung 13). Diese entspricht dem Spaltabstand g . Damit erhalten wir für den Spaltabstand mit statistischem Fehler:

$$g = (0,1048 \pm 0,0002) \text{ mm}$$

**Abbildung 13:** Bestimmung der Gitterkonstanten eines Gitters

Werte der Regression: $m = (0,1048 \pm 0,0002) \text{ mm}$

Um den systematischen Fehler zu bestimmen, verwenden wir wieder die Größtfehlerabschätzung wie beim Spaltabstand beim Doppelspalt:

$$\Delta g = \left| \frac{\partial g}{\partial \lambda} \right| \Delta \lambda + \left| \frac{\partial g}{\partial L} \right| \Delta L + \left| \frac{\partial g}{\partial x_k} \right| \Delta x_k = \left| \frac{k}{x_k} \lambda \right| \Delta L + \left| \frac{k}{x_k} L \right| \Delta \lambda + \left| \frac{k}{x_k^2} L \lambda \right| \Delta x_k$$

Damit erhalten wir für den gemittelten systematischen Fehler: $\Delta g = 0,004 \text{ mm}$

Somit haben wir einen Spaltabstand von

$$g = (0,1048 \pm 0,0002 \pm 0,004) \text{ mm}$$

vorliegen. Damit entspricht unser Messergebnis gut der angegebenen Gitterkonstanten von $\frac{1}{100} \text{ cm} = 0,1 \text{ mm}$. Zwar liegt dieser Messwert etwas über dem angegebenen Wert, doch ist dies angesichts der kleinen Abstände vertretbar und höchstwahrscheinlich auch im Fehlerbereich der angegebenen Breite.

3.4 Beugungsbilder von Kreuz- und Wabengittern

Wir haben die Beugungsbilder eines Kreuz- (Abbildung 14) und eines Wabengitters (Abbildung 15 auf der nächsten Seite) beobachtet. Beim Kreuzgitter zeigte sich wie erwartet ein zweidimensionales Beugungsmuster eines Gitters.

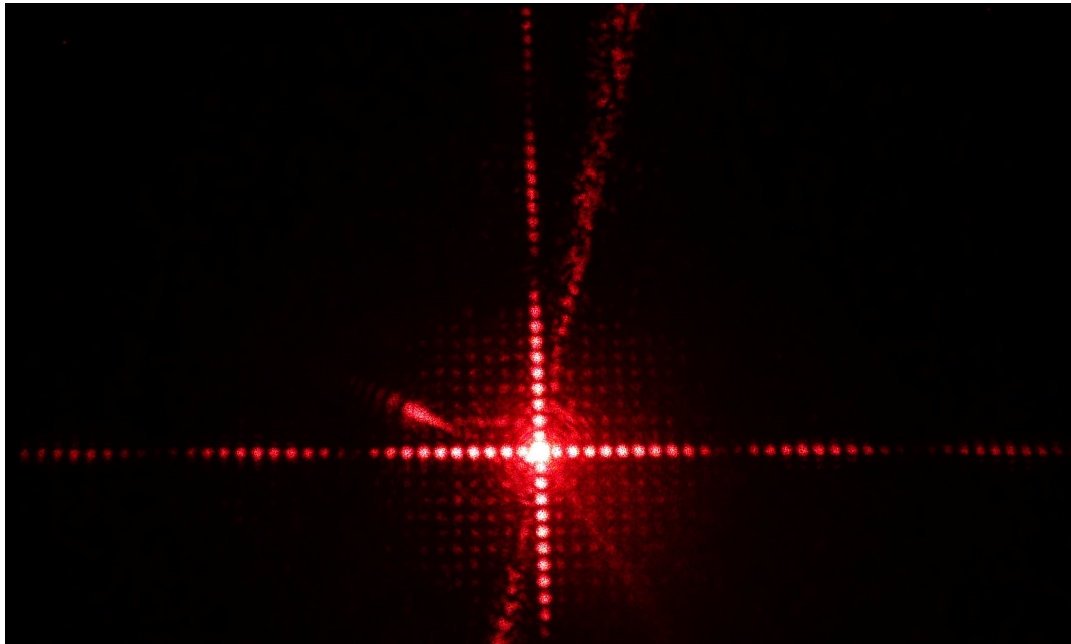


Abbildung 14: Beugungsmuster eines Kreuzgitters

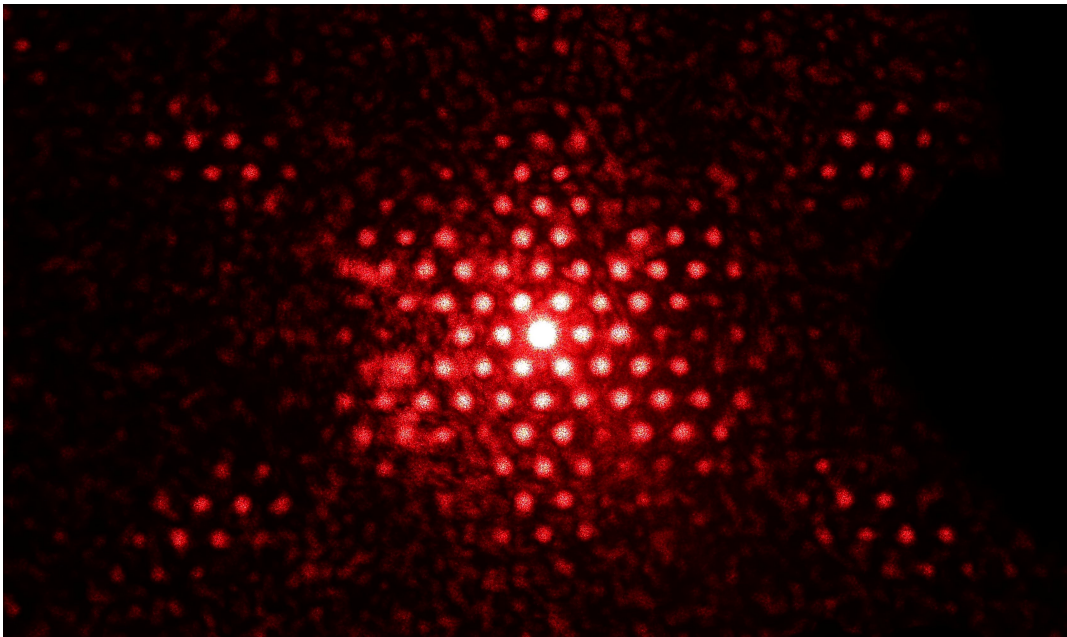


Abbildung 15: Beugungsmuster eines Wabengitters

4 Abbildung nichtselbstleuchtender Gegenstände

Wir haben das Beugungsbild eines Gitters auf die Mattscheibe abgebildet. Wenn nur eine Beugungsordnung durch die Beugungsordnungsblende durchgelassen wurde, so zeigte sich nur ein verwaschener Fleck auf dem Schirm (Abbildung 16a auf der nächsten Seite). Je mehr Beugungsordnungen durchgelassen wurden, desto deutlicher wurde auch das Beugungsmuster sichtbar (Abbildung 16b auf der nächsten Seite).

Bei diesem Versuch konnten wir also sehr deutlich sehen, dass für die Auflösung eines Gegenstands die Beugung von hoher Bedeutung ist. Um ein Objekt aufzulösen, muss man mindestens die erste Beugungsordnung mitnehmen, ansonsten lassen sich die Strukturen nicht mehr voneinander unterscheiden und man erhält einen Lichtfleck.

5 Holographie

Wir haben ein Hologramm mit aufgeweitetem Laserlicht beleuchtet und konnten dadurch auf der anderen Seite das Bild beobachten. Es zeigte deutlich eine räumliche Tiefe und man musste den Kopf hin- und her bewegen, um alle Details erkennen zu können. Damit werden nicht nur die Helligkeiten im Bild abgespeichert, sondern auch die räumlichen Informationen, was wir durch unterschiedliche Bilder bei unterschiedlichen Betrachtungswinkeln sehr deutlich beobachten konnten.

Zusätzlich haben wir ein Weißlicht-Hologramm beobachtet (Abbildung 17 auf der nächsten Seite). Auch hier zeigte sich schön der räumliche Eindruck durch das Bild, welches vom Blickwinkel abhängt.



(a)



(b)

Abbildung 16: Beugungsmuster beim Durchlassen unterschiedlicher Beugungsordnungen:
(a) Nur 0. Beugungsordnung; (b) Mehrere Beugungsordnungen



(a)



(b)

Abbildung 17: Weißlicht-Hologramm aus verschiedenen Blickwinkeln