

**v406**

# **Beugung am Spalt**

Justus Weber

justus.weber@tu-dortmund.de

Guy Lochny

guy.lochny@tu-dortmund.de

Durchführung: 08.04.2025

Abgabe: 15.04.2025

TU Dortmund – Fakultät Physik

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Fehlerrechnung . . . . .	4
<b>3 Durchführung</b>	<b>5</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>6</b>
4.1 Einfachspalt . . . . .	6
4.2 Doppelspalt . . . . .	8
<b>5 Diskussion</b>	<b>11</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>12</b>
<b>Literatur</b>	<b>16</b>

# 1 Zielsetzung

Mithilfe dieses Experiments soll die Spaltbreite  $b$  eines fixierten Einfach-Spalts bestimmt werden. Analog wird die Spaltbreite eines Doppelspalts bestimmt. Zuletzt wird das erzeugte Beugungsbild eines Doppelspalts gemessen und mit den Figuren der Einfachspalte verglichen.

## 2 Theorie

Unter Diffraktion oder Lichtbeugung versteht sich die Ausbreitung von Licht durch Wellen beim Passieren eines Lichtspaltes oder ähnlichen optischen Gegenständen. Zur Erklärung dessen kann das Prinzip von Huygens herangezogen werden, welches besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront dient als Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle durch konstante Aussendung von Kugelwellen. Licht kann diffringen, wenn das zu passierende Hindernis circa in der Größenordnung der Wellenlänge  $\lambda$  des ausgestrahlten Lichtes liegt. Während die Fresnel-Beugung das Nahfeld beschreibt, tritt die Fraunhofer-Beugung im Fernfeld auf. Das Schema der Fraunhofer-Beugung ist in Abbildung 1 dargestellt.

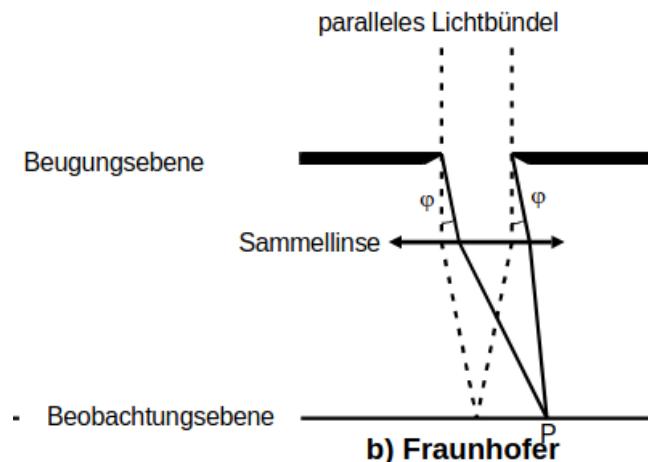


Abbildung 1: Fraunhofer Beugung. [1]

Licht wird als paralleles Lichtbündel zum Spalt geleitet. Hinter dem Spalt überlagern sich die ausgesendeten Kugelwellen. Im Winkel  $\varphi$  interferieren die Wellen und treffen auf die Sammellinse, welche das Fernfeld simulieren soll, indem sie das Licht in einem Punkt  $P$  zusammenführt. Das Beugungsobjekt ist ein Spalt, welcher über eine verhältnismäßig sehr große Länge verfügt. Jenes hat den Zweck, das Experiment auf einer einzigen Dimension durchzuführen. Die Welle, welche sich dem Spalt nähert, kann mit der Feldstärke

$$A(z, t) = A_0 e^{i(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda})} \quad (1)$$

modelliert werden. Den Schwingungszustand eines Punktes kann durch Überlagerung von Elementarwellen, welche gleichzeitig in einem Betrachtungspunkt angelangen, bestimmt werden. Solche zwei sich überlagernden Wellen, welche um das Stück  $x$  versetzt sind, haben durch den Wegunterschied  $s$  folglich die Phasendifferenz

$$\delta = \frac{2\pi s}{\lambda} \quad (2)$$

$$= \frac{2\pi x \sin(\varphi)}{\lambda}. \quad (3)$$

Diese wird in der Summation der Strahlenbündel folgendermaßen integriert:

$$B(z, t, \varphi) = A_0 \int_0^b e^{i(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \delta)} dx \quad (4)$$

Nach der Integration ergibt sich für die Amplitude in  $\varphi$ -Richtung:

$$B(z, t, \varphi) = A_0 e^{i(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda})} \cdot \frac{\lambda}{\pi \sin(\varphi)} e^{\frac{\pi i b \sin(\varphi)}{\lambda}} \cdot \frac{1}{2i} \left( e^{\frac{\pi i b \sin(\varphi)}{\lambda}} - e^{-\frac{\pi i b \sin(\varphi)}{\lambda}} \right) \quad (5)$$

Unter Einbeziehung der eulerschen Formel lässt sich dieser Ausdruck wiederum vereinfachen:

$$B(z, t, \varphi) = A_0 e^{i(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda})} \cdot e^{\frac{\pi i b \sin(\varphi)}{\lambda}} \cdot \frac{\lambda}{\pi \sin(\varphi)} \sin\left(\frac{\pi b \sin(\varphi)}{\lambda}\right) \quad (6)$$

Da das Quadrat der Amplitude proportional zur Intensität ist, ergibt sich:

$$I^2(\varphi) \propto B^2(\varphi) = A_0^2 b^2 \left( \frac{\lambda}{\pi b \sin(\varphi)} \right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi b \sin(\varphi)}{\lambda}\right) \quad (7)$$

Für den Doppelspalt lässt sich die Intensität gleichermaßen berechnen. Dieser soll als Überlagerung zweier Einzelpalte mit Breite  $b$  und Abstand  $s$  installiert sein. Es ergibt sich:

$$I^2(\varphi) \propto B^2(\varphi) = 4 \cos^2\left(\frac{\pi s \sin(\varphi)}{\lambda}\right) \cdot \left( \frac{\lambda}{\pi b \sin(\varphi)} \right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi b \sin(\varphi)}{\lambda}\right) \quad (8)$$

## 2.1 Fehlerrechnung

Die gemessenen Werte unterliegen Messunsicherheiten und werden demnach im Folgenden nicht als fehlerfrei angesehen. Die Fehler entstehen bei der Bildung der Mittelwerte durch den Fehler des Mittelwerts und bei der Regressionsrechnung sowie der Fehlerfortpflanzung durch Python. Der Fehler des Mittelwerts ist gegeben durch

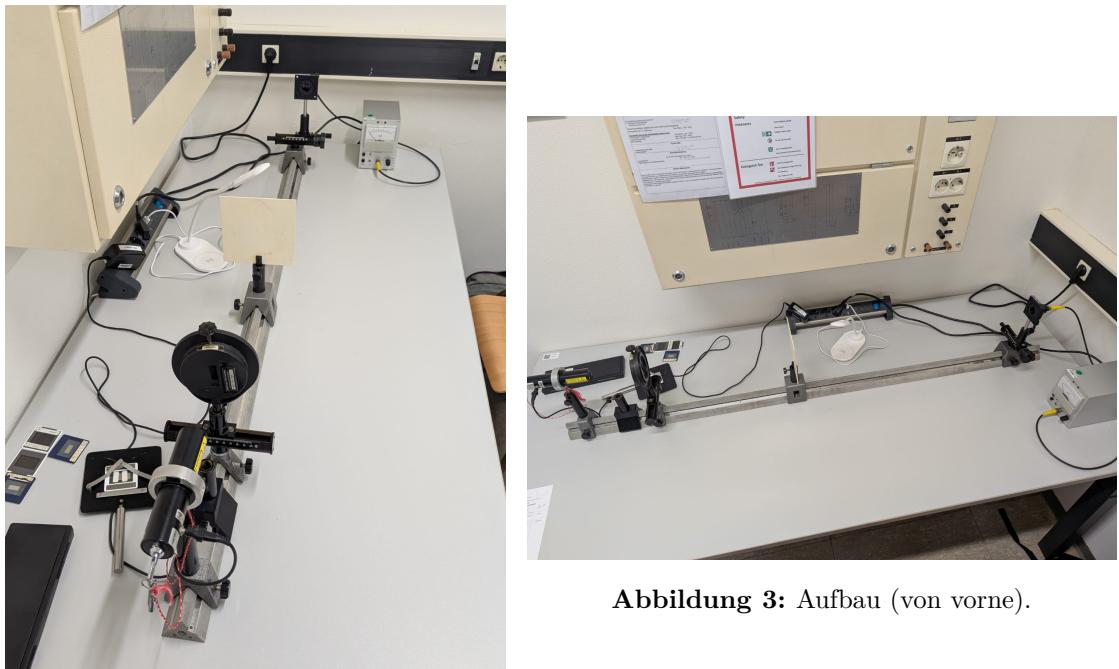
$$\begin{aligned} \Delta \bar{x} &= \sqrt{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{N}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Um Fehler einzubeziehen, wird die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung verwendet:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot (\Delta z)^2} \quad (10)$$

### 3 Durchführung

Der Aufbau des Versuches beinhaltet drei Elemente; einem Laser (hier mit der Wellenlänge von  $\lambda = 633\text{nm}$ ), einem Spalt mit einer Breite im  $\mu\text{m}$ -Bereich und einem Photoelement, welches auf einem Schiebereiter um jeweils 25mm um den Mittelpunkt verschoben werden kann. Angeschlossen an ein Amperemeter, kann damit die Intensität in einem Bereich detektiert werden. Alle drei Elemente befinden sich auf einer Schiene. Der Abstand zwischen Laser und Detektor wird als Länge  $L$  betitelt sowie die Abweichung vom Ursprungsstrahl als Winkel  $\varphi$ .



**Abbildung 3:** Aufbau (von vorne).

**Abbildung 2:** Aufbau (vom Laser aus).

Um Messungsfehler seitens des Amperemeters zu minimieren, wird der Raum abgedunkelt und eine Nullmessung durchgeführt. Diese dient im späteren Verlauf dem Zweck mögliche Anfangsresonanzen/Anfangswerte im Gerät herauszufiltern. Nach den präventativen Vorkehrungen startet das tatsächliche Experiment und der Laser wird aktiviert. Angefangen ganz links des Schiebereiters wird der gemessene Strom am Amperemeter dokumentiert. Der Mittelpunkt sei bei  $\zeta_0$  (siehe Abbildung 4). Messungen im Bereich oberhalb dieses Mittelpunkts seien im Folgenden als negative Länge definiert. Jegliche Werte unterhalb des Mittelpunkts seien regulär positiv.

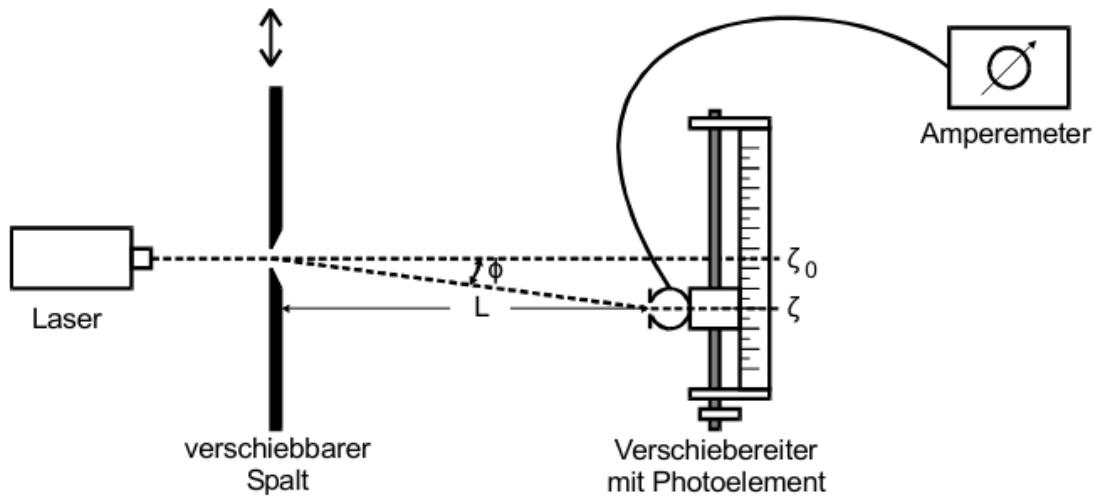


Abbildung 4: Aufbau des Versuches. [1]

Bei  $-25\text{mm}$  bis  $-11\text{mm}$  wird die Intensität am Amperemeter in  $1\text{mm}$ -Abständen gemessen. Im Bereich von  $-10.5\text{mm}$  bis  $10\text{mm}$  wird in  $0.5\text{mm}$ -Schritten gemessen und anschließend bis zum Ende des Reiters wieder in  $1\text{mm}$ -Schritten. In dem mittleren Bereich wird ein anderer Messabstand gewählt, um das Hauptmaximum besser dokumentieren zu können. Bei dem Doppelspalt wird im Bereich von  $-25\text{mm}$  bis  $-10\text{mm}$  und von  $-10\text{mm}$  bis  $25\text{mm}$  bereits in  $0.5\text{mm}$ -Schritten gemessen. Im Bereich dazwischen wird mit  $0.25\text{mm}$ -Schritten gemessen.

## 4 Auswertung

### 4.1 Einfachspalt

Es soll die Spaltbreite ermittelt werden, indem die Aperturfunktion der Blende auf das Beugungsbild zurückgeführt wird. Das Intensitätsmuster des Beugungsbildes wurde punktweise aufgenommen, die Messwerte dazu befinden sich in Tabelle 1. Die Ausgleichsfunktion nach Gleichung 11 ist Abbildung 5 zu entnehmen.

$$I(\Phi) = A^2 \cdot \operatorname{sinc}^2(b \cdot \Phi) \quad (11)$$

Durch die Ausgleichsrechnung ergeben sich folgende Parameter:

$$A = (0,7156 \pm 0,0015) \mu\text{A} \quad (12)$$

$$b = (216,03 \pm 0,94) \mu\text{m} \quad (13)$$

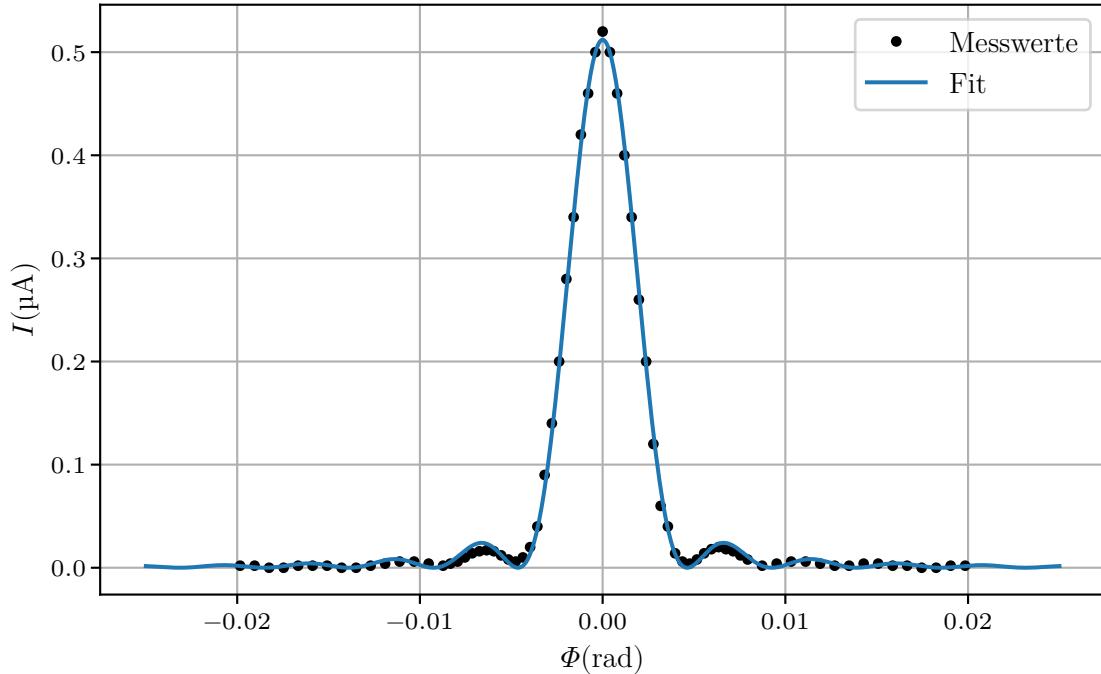
Dabei gibt der Parameter  $b$  die Breite des Spaltes an an dem das Licht gebeugt wurde. Somit beträgt die experimentell ermittelte breite des Spaltes  $(0,2160 \pm 0,0094) \text{ mm}$ .

**Tabelle 1:** Messwerte der Intensitätsverteilung des Einzelspalts.

x/mm	I/ $\mu$ A	x/mm	I/ $\mu$ A	x/mm	I/ $\mu$ A
-25	0,002	-7	0,012	4	0,060
-24	0,002	-6,5	0,008	4,5	0,040
-23	0,000	-6	0,006	5	0,014
-22	0,000	-5,5	0,010	5,5	0,006
-21	0,002	-5	0,020	6	0,004
-20	0,002	-4,5	0,040	6,5	0,008
-19	0,002	-4	0,090	7	0,014
-18	0,000	-3,5	0,140	7,5	0,018
-17	0,000	-3	0,200	8	0,020
-16	0,002	-2,5	0,280	8,5	0,018
-15	0,004	-2	0,340	9	0,016
-14	0,006	-1,5	0,420	9,5	0,012
-13	0,006	-1	0,460	10	0,008
-12	0,004	-0,5	0,500	11	0,002
-11	0,002	0	0,520	12	0,004
-10,5	0,004	0,5	0,500	13	0,006
-10	0,006	1	0,460	14	0,006
-9,5	0,010	1,5	0,400	15	0,004
-9	0,014	2	0,340	16	0,002
-8,5	0,016	2,5	0,260	17	0,002
-8	0,017	3	0,200	18	0,004
-7,5	0,016	3,5	0,120	19	0,004

Jegliche Stromwerte sind mit einem relativen Fehler von  $\pm 0.002 \mu\text{A}$  behaftet.

**Abbildung 5:** Ausgleichsrechnung zur Intensitätsverteilung des Einfachspaltes.



## 4.2 Doppelspalt

Ein ähnliches Vorgehen wird bei der Bestimmung der Breite des Doppelspaltes angewendet. Allerdings wird eine etwas andere Funktion für die Ausgleichsrechnung verwendet. Diese befindet sich in Gleichung 14.

$$I(\Phi) = A^2 \cdot \text{sinc}^2(b \cdot (x - d)) \cdot \cos^2(c \cdot (x - d)) \quad (14)$$

Die Messdaten der Messung am Doppelspalt befinden sich in Tabelle 2. Die dazugehörige Ausgleichsrechnung ist in Abbildung 6 visualisiert. Die Ausgleichsrechnung durch einen curve Fit des python Paketes scipy ergibt die Parameter:

$$A = (0,6249 \pm 0,0078) \mu\text{A} \quad (15)$$

$$b = (121,601 \pm 3,079) \mu\text{m} \quad (16)$$

$$c = (2809 \pm 8) \quad (17)$$

$$d = -0,0002 \text{ mm} \quad (18)$$

Daraus ergibt sich für die experimentellen Spaltbreiten des Doppelspalts:

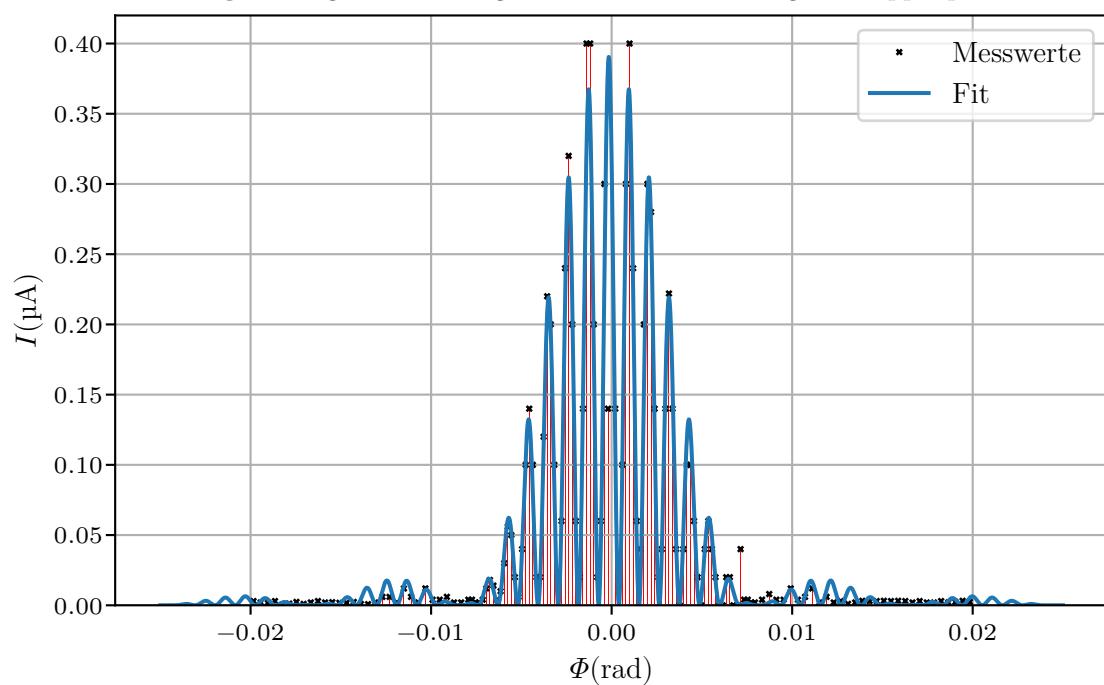
$$b_{\text{Doppelspalt}} = (0,12 \pm 0,30) \text{ mm}. \quad (19)$$

**Tabelle 2:** Messwerte der Intensitätsverteilung des Doppelspalts.

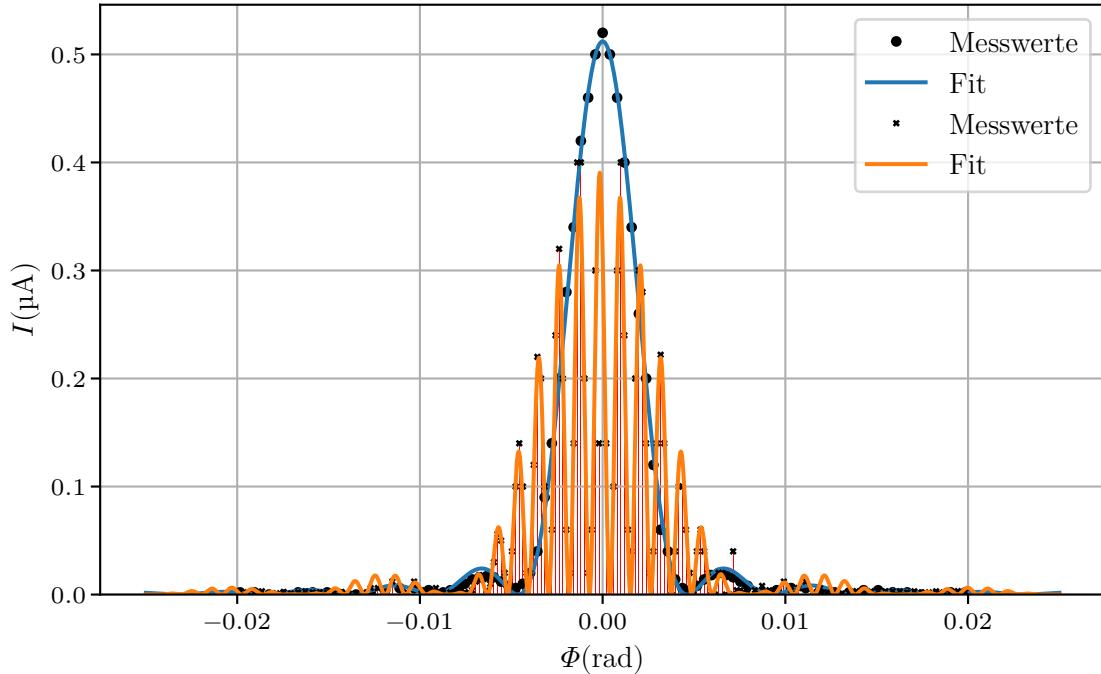
x/mm	I/ $\mu$ A	x/mm	I/ $\mu$ A	x/mm	I/ $\mu$ A		
-25	0,003	-8,5	0,018	0,5	0,020	9.5	0.004
-24,5	0,002	-8,25	0,014	0,75	0,100	9.75	0.002
-24	0,001	-8	0,004	1	0,300	10	0.002
-23,5	0,003	-7,75	0,010	1,25	0,400	10.5	0.004
-23	0,000	-7,5	0,030	1,5	0,240	11	0.008
-22,5	0,001	-7,25	0,056	1,75	0,060	11.5	0.004
-22	0,002	-7	0,050	2	0,040	12	0.004
-21,5	0,001	-6,75	0,020	2,25	0,200	12.5	0.012
-21	0,002	-6,5	0,006	2,5	0,300	13	0.004
-20,5	0,003	-6,25	0,040	2,75	0,280	13.5	0.006
-20	0,002	-6	0,100	3	0,140	14	0.012
-19,5	0,002	-5,75	0,140	3,25	0,020	14.5	0.002
-19	0,001	-5,5	0,100	3,5	0,040	15	0.006
-18,5	0,001	-5,25	0,020	3,75	0,140	15.5	0.002
-18	0,002	-5	0,020	4	0,222	16	0.003
-17,5	0,001	-4,75	0,120	4,25	0,140	16.5	0.001
-17	0,000	-4,5	0,220	4,5	0,040	17	0.002
-16,5	0,002	-4,25	0,200	4,75	0,000	17.5	0.003
-16	0,006	-4	0,100	5	0,040	18	0.003
-15,5	0,006	-3,75	0,020	5,25	0,100	18.5	0.003
-15	0,002	-3,5	0,060	5,5	0,100	19	0.003
-14,5	0,012	-3,25	0,240	5,75	0,060	19.5	0.003
-14	0,006	-3	0,320	6	0,020	20	0.003
-13,5	0,002	-2,75	0,200	6,25	0,000	20.5	0.003
-13	0,012	-2,5	0,060	6,5	0,040	21	0.002
-12,5	0,004	-2,25	0,020	6,75	0,060	21.5	0.003
-12	0,004	-2	0,140	7	0,040	22	0.002
-11,5	0,006	-1,75	0,400	7,25	0,020	22.5	0.002
-11	0,002	-1,5	0,400	7,5	0,000	23	0.003
-10,5	0,002	-1,25	0,200	7,75	0,000	23.5	0.002
-10	0,004	-1	0,020	8	0,020	24	0.002
-9,75	0,004	-0,75	0,060	8,25	0,020	24.5	0.003
-9,5	0,002	-0,5	0,300	8,5	0,000	25	0.002
-9,25	0,002	-0,25	0,140	8,75	0,000		
-9	0,004	0	0,360	9	0,040		
-8,75	0,012	0,25	0,140	9,25	0,004		

Die Stromwerte im Intervall zwischen  $-25 - 6\text{mm}$  unterliegen dem relativen Fehler von  $\pm 0.01\mu\text{A}$ . Jegliche Restwerte im Bereich von  $6 - 25\text{mm}$  hingegen sind mit einem Fehler von  $\pm 0.001\mu\text{A}$  behaftet.

**Abbildung 6:** Ausgleichsrechnung zur Intensitätsverteilung des Doppelspaltes.



**Abbildung 7:** Vergleich der Intensitätsverteilungen Doppelspalt und Einfachspalt.



## 5 Diskussion

Im Folgenden werden die ergebenen Werte für die Breite  $b$  beim Einfach- und Doppelspalt diskutiert und mit den Hersteller Angaben verglichen. Laut Hersteller betragen die Abstände:

$$b_{\text{Hersteller,Einfach}} = 150 \mu\text{m}$$

$$b_{\text{Hersteller,Doppel}} = 100 \mu\text{m}$$

Die experimentell bestimmten Werte belaufen sich auf:

$$b_{\text{Einfach}} = (216,03 \pm 0,94) \mu\text{m}$$

$$b_{\text{Doppel}} = (121 \pm 3) \mu\text{m}$$

Somit beträgt die Abweichung bei dem Einfachspalt 30,556%. Die Abweichung der Breiten beim Doppelspalt hingegen liegt bei 17,764%. Diese Werte sind groß, allerdings war ein derartiger Unterschied zwischen den Werten zu erwarten. Das liegt hauptsächlich an der Justierung des Intensitätsmessers und dem Amperemeter, bei dem es zu zahlreichen Komplikationen kam.

Zunächst ist festzuhalten, dass der Aufbau dem statistischen Fehler unterliegt, da die exakte Ausrichtung des Lasers nicht garantiert ist. Darüber hinaus erfolgt die Einstellung

des Intensitätssmessers auf der Schiebeleiste durch Augenmaß. Das Luxmeter wird auf der Schiene so positioniert, dass die Extrema des gebeugten Lichts von maximaler Größe und Schärfe sind. Jenes geschieht nicht ohne Ausschluss von Unsicherheiten, welche sich schlussendlich auf die Messwerte auswirken.

Ein weiteres wesentlich größeres Problem ist die Detektion und Dokumentation von Lichtmessgerät und Amperemeter. Intensitätsänderungen wurden durch das Luxmeter unmittelbar nach Kontakt mit der Vorrichtung erfasst und zeigten sich in entsprechenden Stromänderungen am Amperemeter. In Anbetracht dieser Tatsache, sind größere Messunsicherheiten nicht abzuschlagen.

Trotz den großen prozentualen Abweichungen bestätigen die Ergebnisse die theoretische Erwartung, dass die gemessenen Breiten des Doppelspalts präzisere Werte liefern als die des Einfachspalts, eine Folge der schärferen Intensitätsmaxima im Interferenzmuster. Dies zeigt eine qualitative Übereinstimmung mit den Vorhersagen der Beugungstheorie. Obwohl die absoluten Messwerte aufgrund experimenteller Unsicherheiten von der Theorie abweichen, bleibt die physikalische Tendenz erkennbar.

Letztlich ist in Abbildung 7 ein direkter Vergleich beider Intensitätsverteilungen zu sehen. Auffällig ist, dass die Verteilung des Einfachspalts im Vergleich zum Doppelspalt in gestreckter Form vorliegt. Sie bildet grob die Einhüllende zur Intensitätsverteilung des Doppelspalts, was wiederum die theoretische Erwartung bestätigt. Die Beugung bildet die Einhüllende des Doppelspaltmusters da die Interferenz des Doppelspalts als Modulation der Einfachspalt-Intensität aufgefasst werden kann. Erkennbare Abweichungen wie die Streckung des Graphen sowie austretende Peaks sind durch die unterschiedlichen Spaltbreiten zu erklären. Die dezente Asymmetrie in beiden Verteilungen lässt auf eine minimale Fehljustierung des Strahlengangs schließen. Dennoch bleibt die fundamentale Übereinstimmung mit der Fraunhoferschen Beugungstheorie erkennbar, da es sich um eine minimale Verschiebung von weniger als 0,01 rad handelt.

## 6 Anhang

Abbildung 8: Messwerte (1).

<b>Nullmessung</b>	$\approx 0$ mA	$2 \cdot 10^{-9} = 0,002 \cdot 10^{-6}$
$x (10^{-3} m)$	$I (10^{-6} A)$	$n \quad \mu \quad m$
-2,5	0,002	
-2,4	0,002	
-2,3	0,000	
-2,2	0,000	
-2,1	0,002	
-2,0	0,002	
-1,9	0,002	
-1,8	0,000	
-1,7	0,000	
-1,6	0,002	
-1,5	0,004	
-1,4	0,006	
-1,3	0,006	
-1,2	0,004	
-1,1	0,002	
-1,0,5	0,004	
-1,0	0,006	
-0,5	0,010	
-0,9	0,074	
-0,8,5	0,076	
-0,8	0,074	
-0,7,5	0,076	
-0,7	0,012	
-0,6,5	0,008	
-0,6	0,006	
-0,5,5	0,010	
-0,5	0,020	
-0,4,5	0,040	
-0,4	0,030	0,0090
-0,3,5	0,037	0,140
-0,3	0,200	
-0,2,5	0,280	
-0,2	0,370	
-0,1,5	0,420	
-0,1	0,460	
-0,0,5	0,500	
0,0	0,520	
0,5	0,500	
1	0,460	
1,5	0,400	
2	0,340	
2,5	0,260	
3	0,200	
3,5	0,120	
4	0,060	
4,5	0,040	
5,0	0,014	
5,5	0,006	
6	0,004	
6,5	0,008	

SC

Abbildung 9: Messwerte (2).

$X (10^{-3} \text{ m})$	$I (10^{-6} A)$	Nullmessung: $0.003 \cdot 10^{-6} A$	
		$X (10^{-3} \text{ m})$	$I (10^{-6} A)$
-25	0,003	-4	0,100
-26,5	0,002	-3,75	0,020
-24	0,0078	-3,5	0,060
-23,5	0,003	-3,25	0,140
-23	0,0004	-3	0,320
-22,5	0,0012	-2,75	0,200
-22	0,0024	-2,5	0,060
-21,5	0,001	-2,25	0,020
-21	0,002	-2	0,140
-20,5	0,003	-1,75	0,400
-20	0,002	-1,5	0,400
-19,5	0,0022	-1,25	0,200
-19	0,0022 - 0,0018	-1	0,020
-18,5	0,0078	-0,75	0,060
-18	0,0024	-0,5	0,320
-17,5	0,007	-0,25	0,140
-17	0,0008	0	0,360
-16,5	0,002	0,25	0,140
-16	0,006	0,5	0,020
-15,5	0,006	0,75	0,100
-15	0,002	1	0,320
-14,5	0,012	1,25	0,400
-14	0,006	1,5	0,260
-13,5	0,002	1,75	0,060
-13	0,012	2	0,040
-12,5	0,004	2,25	0,020
-12	0,004	2,5	0,320
-11,5	0,006	2,75	0,280
-11	0,002	3	0,140
-10,5	0,002	3,25	0,220
-10	0,004	3,5	0,040
-9,75	0,004	3,75	0,140
-9,5	0,002	4	0,220
-9,25	0,002	4,25	0,140
-9	0,004	4,5	0,040
-8,75	0,012	4,75	0,000
-8,5	0,018	5	0,040
-8,25	0,074	5,25	0,100
-8	0,004	5,5	0,100
-7,75	0,010	5,75	0,060
-7,5	0,030	6	0,200
-7,25	0,056	6,25	0,000
-7	0,050	6,5	0,040
-6,75	0,020	6,75	0,060
-6,5	0,006	7	0,040
-6,25	0,040	7,25	0,020
-6	0,100	7,5	0,020
-5,75	0,140	7,75	0,000
-5,5	0,100	8	0,020
-5,25	0,020	8,25	0,020
-5	0,020	8,5	0,000
-4,75	0,120	8,75	0,000
-4,5	0,220	9	0,000
-4,25	0,200		

Sle

Abbildung 10: Messwerte (3).

$x (10^{-3} \text{ m})$	$I (10^{-6} \text{ A})$	Fehler
9,25	0,004	Einzelfehler: 0,002
9,5	0,004	Doppel Fehler: 0,002
9,75	0,002	
10	0,002	
10,5	0,004	
11	0,003	
11,5	0,004	
12	0,004	
12,5	0,012	
13	0,004	
13,5	0,006	
14	0,012	
14,5	0,002	
15	0,006	Doppel 0,1   0,4   0,1 mm
15,5	0,002	
16	0,003	
16,5	0,001	Einfache 0,15 mm
17	0,002	
17,5	0,0032	
18	0,003	
18,5	0,003	
19	0,0032	
19,5	0,003	
20	0,0032	
20,5	0,003	
21	0,002	
21,5	0,003	
22	0,002	
22,5	0,002	
23	0,003	
23,5	0,002	
24	0,0024	
24,5	0,0032	
25	0,0024	

$\text{np. sin. e}(b \cdot \rho \cdot i)$

## **Literatur**

- [1] *V406: Beugung am Spalt.* TU Dortmund. 2025.