

# **Versuch V406: Beugung am Spalt**

Martin Bieker  
Julian Surmann

Durchgeführt am 10.06.2014  
TU Dortmund

# 1 Einleitung

Im folgenden Versuch wird die Beugung von Licht an Einzelspalten und einem Doppelspalt untersucht. Unter Beugung versteht man die Abweichung der Ausbreitung von Licht hinter kleinen Öffnungen von den Gesetzen der geometrischen Optik.

## 2 Theorie

Im Fall der Beugung muss Licht als Welle betrachtet werden. Beugungsphänomene können dann z.B. mit dem Huygensschen Prinzip und dem Interferenzprinzip erklärt werden.

### 2.1 Beugung am Einfach-Spalt

Es sind zwei Formen der Beugung zu unterscheiden: Die Fresnel-Beugung und die Fraunhofer-Beugung (Abbildung 1).

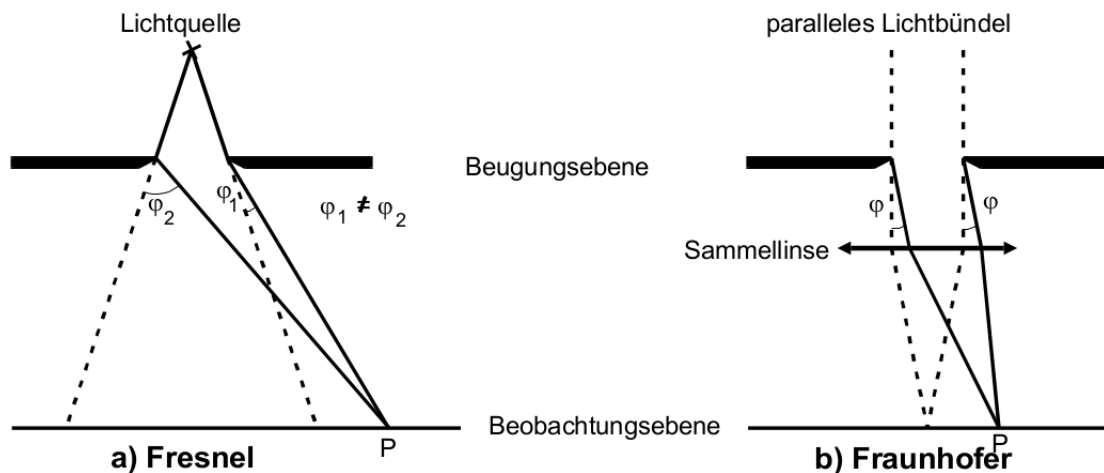


Abbildung 1: Fresnel- und Fraunhofer-Beugung [1]

Bei der Fresnel-Beugung befinden sich die Lichtquelle und der Beobachtungspunkt (Schirm) im Endlichen. Dabei interferieren im Beobachtungspunkt Strahlen, die unter verschiedenen Winkeln gebeugt wurden. Bei der Fraunhofer-Beugung liegt die Lichtquelle im Unendlichen, d.h. es werden parallele Strahlenbündel emittiert. Mathematisch ist der zweite Fall viel einfacher zu behandeln, auf die Fresnel-Beugung soll hier nicht weiter eingegangen. Der Länge des verwendeten Spaltes beträgt ein Vielfaches der Breite, sodass nur ein eindimensionales Beugungsbild entsteht. Es fällt eine ebene Welle mit der Feldstärke

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

pro Längeneinheit der Wellenfront aus der Z-Richtung ein. Um das Prinzip der Fraunhofer-Beugung zu verwenden, ist der Abstand Beugungsebene-Beobachtungsebene sehr viel größer als die Spaltbreite  $b$ .

Um die Amplitude des in Richtung  $\varphi$  gebeugten Lichtes zu berechnen, muss man über alle Strahlenbündel summieren, die von allen Orten der Spaltöffnung in Richtung  $\varphi$  emittiert

werden. Zwei beliebige Strahlenbündel, die im Spalt eine Strecke  $x$  voneinander entfernt sind, haben aufgrund der Wegdifferenz zur Beobachtungsebene eine Phasendifferenz  $\delta$  mit

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

Aufgrund der infinitesimal kleinen Breiten der Strahlenbündel geht in der Berechnung der Amplitude die Summe in ein Integral über:

$$B(z, t, \varphi) = A_0 \int_0^b e^{i\left(wt - \frac{2\pi z}{\lambda} + \delta\right)} dx = A_0 e^{i\left(wt - \frac{2\pi z}{\lambda}\right)} \int_0^b e^{i\left(\frac{2\pi x \sin \varphi}{\lambda}\right)} dx. \quad (3)$$

Durch Integration und Ausklammern ergibt sich über die Eulersche Formel

$$\sin \alpha = \frac{(e^{i\alpha} - e^{-i\alpha})}{2i} \quad (4)$$

der folgende Ausdruck:

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

Die Intensität des am Einfachspalt gebeugten Lichtes wird beschrieben durch

$$I(\varphi) \propto B(\varphi)^2 = A_0^2 b^2 \left(\frac{\lambda}{\pi b \sin \varphi}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right). \quad (6)$$

Die durch Formel (6) beschriebene Beugungsfigur besitzt bei den Nulldurchgängen von Formel (5) Minima.

## 2.2 Beugung am Doppelspalt

Die Intensitätsverteilung  $I(\varphi)$  lässt sich analog zum Einfachspalt berechnen. Die Amplitudenverteilung des Doppelspaltes wird durch Überlagerung zweier Einfachspalte, die sich im Abstand  $s$  voneinander befinden, berechnet. Die Intensitätsverteilung

$$I(\varphi) \propto B(\varphi)^2 = 4 \cos^2\left(\frac{\pi s \sin \varphi}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{\lambda}{\pi b \sin \varphi}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right) \quad (7)$$

ergibt sich als Quadrat der Amplitudenverteilung. Es zeigen sich zusätzliche Minima an den Stellen

$$\varphi(k) = \arcsin\left(\frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2s}\right), \quad (8)$$

also an den Nullstellen der  $\cos^2$ -Verteilung.

## 2.3 Fraunhofersche Beugung und Fourier-Transformation

Bei der Fraunhoferschen Beugung ist die Amplitudenverteilung auch auf allgemeine Weise möglich.  $B(\varphi)$  lässt sich als Fourier-Transformierte der Amplitudenverteilung der einfallenden Welle auffassen. Bei der Amplitudenverteilung handelt es sich hier um die Verteilung in der Beugungsebene.

Die Fourier-Transformation formuliert das Huygenssche Prinzip mathematisch. Auch Beugung an zweidimensionalen Objekten lässt sich mit Hilfe der Fourier-Transformation einfach berechnen.

### 3 Aufbau

Eine Skizze des Versuchsaufbaus ist in Abbildung (2) gezeigt.

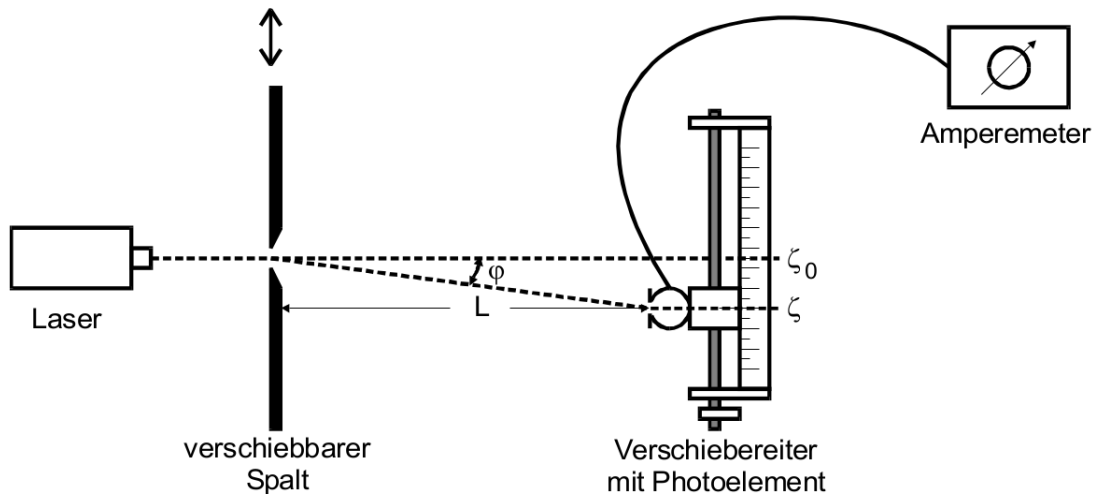


Abbildung 2: Versuchsaufbau [1]

Auf einer Schiene mit Längenskala sind ein He-Ne-Laser, eine Halterung für den Spalt und die verschiebbare Photodiode befestigt. Der Laser leuchtet auf den Spalt, der zwischen dem Laser und der Photodiode befestigt ist. Die Photodiode kann mit einer Auflösung von  $1/100$  mm über eine Strecke von 5 cm verschoben werden. Die Photodiode ist an einem empfindlichen Amperemeter angeschlossen.

Um die durch die Fraunhofer-Beugung beschriebene Interferenz paralleler Strahlen zu realisieren, wird die Beobachtungsebene in eine Entfernung verlegt, die sehr groß gegen die Spaltbreite ist. Die in Abbildung 1 dargestellte Sammellinse wird dann nicht mehr benötigt.

### 4 Durchführung

Vor den Messungen wird das Beugungsobjekt so ausgerichtet, dass das Hauptmaximum möglichst mittig im Messbereich liegt und beide Nebenmaxima erster Ordnung ungefähr die gleiche Intensität haben.

#### 4.1 Messung des Dunkelstroms

Die Photodiode gibt auch im unbelichteten Zustand einen (thermischen) Dunkelstrom  $I_{du}$  ab, der das Messergebnis insbesondere bei der Messung geringer Intensitäten deutlich beeinflussen kann. Daher muss der Dunkelstrom vor der Versuchsdurchführung bei abgedeckter Photodiode gemessen werden.

#### 4.2 Messungen mit dem Einfach-Spalt

Bei dem ersten Einfachspalt ( $b = 0.075$  mm) soll dessen Beugungsfigur punktweise ausgemessen werden. Die Schrittweite beträgt dabei 1 mm. Darüber hinaus soll die verwendete

Spaltbreite mit einem Mikroskop vermessen werden. Das Mikroskop wird zunächst kalibriert, dafür wird dessen Skala mit einem Objektmikrometer (Objektträger mit eingezätzter Skala) vermessen.

Anschließend wird ein weiterer Spalt ( $b = 0.15 \text{ mm}$ ) vermessen. Die Schrittweite der Messung wird im Bereich des Hauptmaximums verringert, um die Struktur des Beugungsbildes besser aufzulösen.

### 4.3 Messung am Doppelspalt

Der Doppelspalt ( $b = 0.15 \text{ mm}$ ,  $g = 0.25 \text{ mm}$ ) wird mit einer Schrittweite von  $1 \text{ mm}$  vermessen, um das Hauptmaximum herum wird die Schrittweite auf  $0.2 \text{ mm}$  verringert.

## 5 Auswertung

### 5.1 Mikroskopische Vermessung der Spalte

Das in diesem Versuch zur Vermessung der Beugungsobjekte verwendete Mikroskop besitzt eine unkalibrierte Skala. Daher muss dieses zunächst mit Hilfe eines Objektmikrometers kalibriert werden. Als Umrechnungsfaktor  $f$  ergibt sich:

$$f = 3.53 \times 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{Einheit}}$$

Die gemessenen und umgerechneten Werte für die Spaltbreite  $b$  und den Abstand der Spalte beim Doppelspalt  $g$  befinden sich in Tabelle 1.

	$\frac{b}{\text{Einheit}}$	$\frac{b}{\text{m}}$	$\frac{g}{\text{Einheit}}$	$\frac{g}{\text{m}}$
Einzelspalt A	1.9	$6.71 \times 10^{-5}$		
Einzelspalt B	3.8	$1.34 \times 10^{-4}$		
Doppelspalt	4.6	$1.63 \times 10^{-4}$	21	$7.35 \times 10^{-4}$

Tabelle 1: Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchung

### 5.2 Beugungsmuster am Einzelspalt

Die an den Einzelspalten gemessenen Werte befinden sich in den Tabellen 4 und 5. Von diesen Stromstärken muss noch der so genannte thermische Dunkelstrom

$$I_D = 9 \text{ pA}$$

abgezogen werden. Um die Messwerte mit der Theorie vergleichen zu können, werden die gemessenen Strecken  $x$  um die Position des 0. Maximums zentriert und in einen Winkel  $\varphi$  umgerechnet. Dabei gilt der Zusammenhang

$$\varphi \approx \frac{x - x_0}{L}$$

Der Abstand zwischen Schirm und Beugungsebene beträgt

$$L = 1.28 \text{ m.}$$

Diese Winkel und die korrigierten Stromstärken befinden sich ebenfalls in den Tabellen 4 und 5. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen den Photostrom in Abhängigkeit von  $\varphi$ .

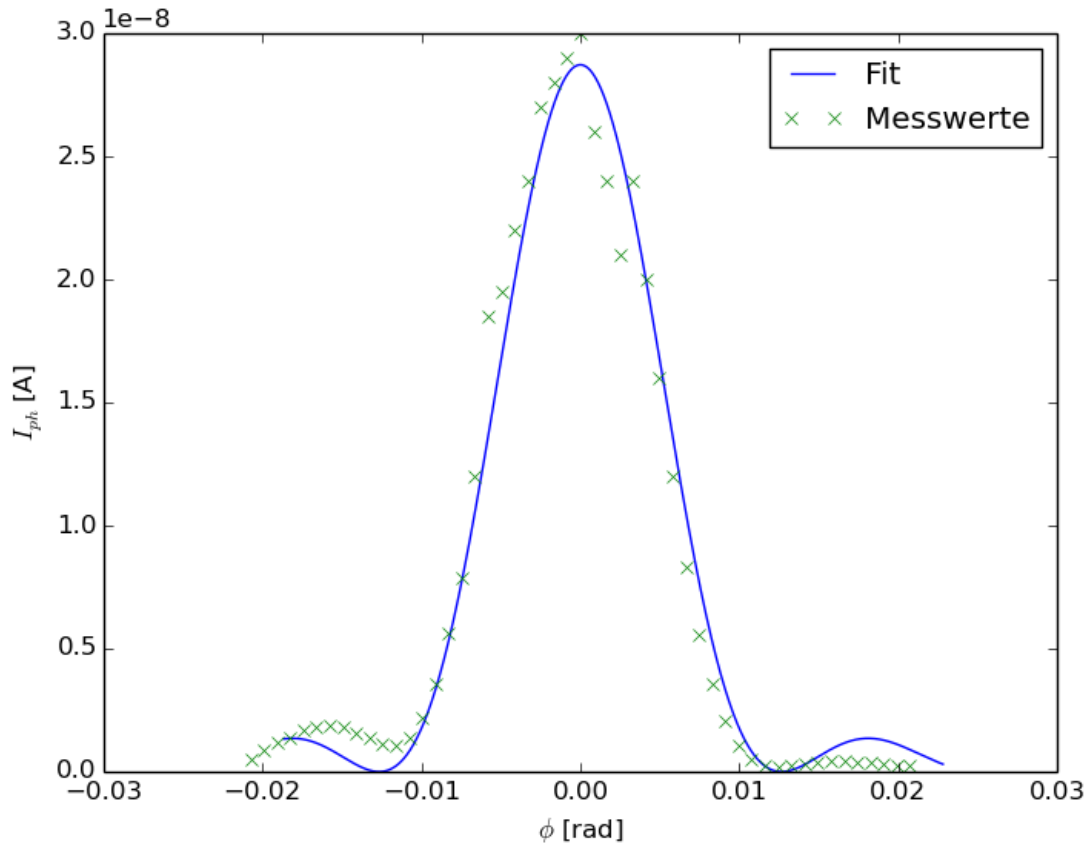


Abbildung 3: Diese Abbildung zeigt die Messwerte für das Beugungsbild am ersten Einfachspalt ( $b \approx 0.075 \text{ mm}$ ). Der Fit mit der Funktion  $I(\varphi) = A_0^2 b^2 \text{sinc}^2(b \cdot \sin \varphi \cdot \lambda^{-1})$  dieser Daten ist ebenfalls dargestellt.

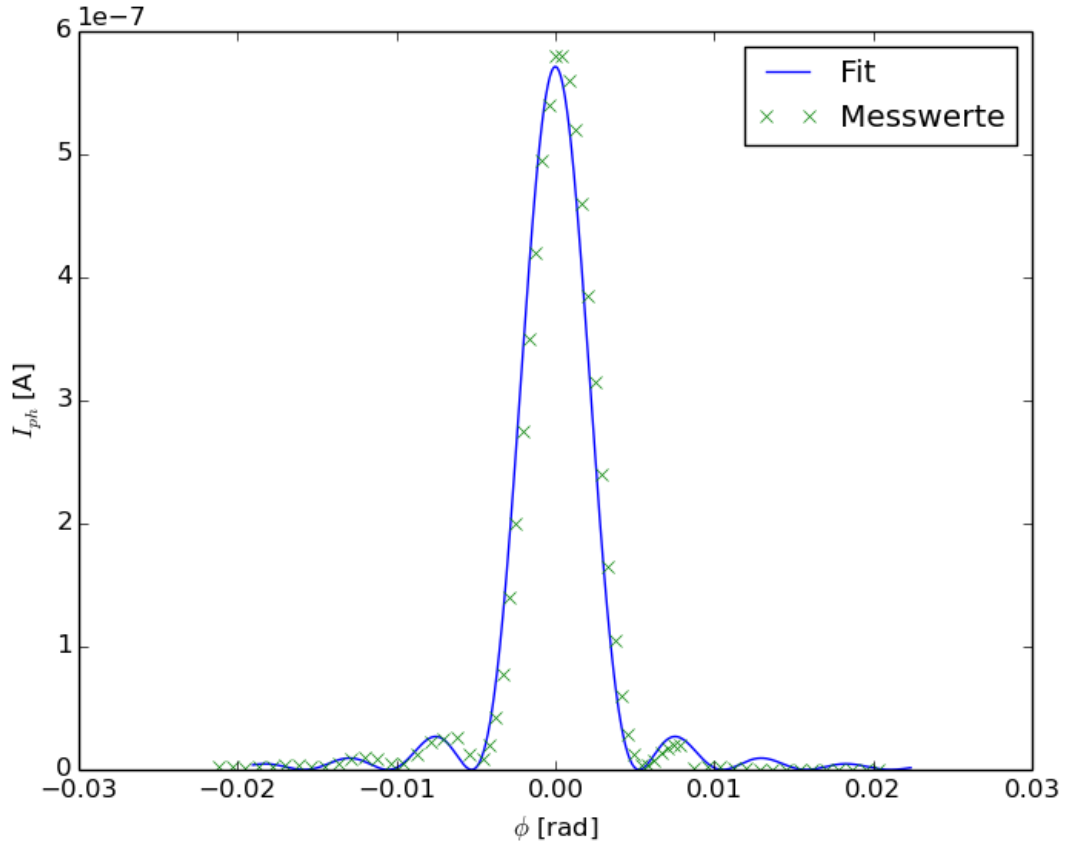


Abbildung 4: Diese Abbildung zeigt die Messwerte für das Beugungsbild am zweiten Einfachspalt ( $b \approx 0.15$  mm). Der Fit mit der Funktion  $I(\varphi) = A_0^2 b^2 \text{sinc}^2(b \cdot \sin \varphi \cdot \lambda^{-1})$  dieser Daten ist ebenfalls dargestellt.

An diese Werte wird nun die Formel

$$I(\varphi) = A_0^2 b^2 \text{sinc}^2\left(\frac{b \cdot \sin \varphi}{\lambda}\right) \quad (9)$$

angepasst. Die Wellenlänge des verwendeten HeNe-Lasers beträgt

$$\lambda = 633 \text{ nm.}$$

Die nichtlineare Ausgleichsrechnung wurde mit PYTHON durchgeführt. Für die Regressionsparameter  $A_0$  und  $b$  müssen dabei Startwerte angegeben werden. Für die Spaltbreite wurde dabei die im vorherigen Abschnitt mit dem Mikroskop gemessenen Werte verwendet. Der Amplitudenfaktor wurde aus dem Photostrom des 0. Maximums berechnet:

$$A_0 = \sqrt{\frac{I_{Max}}{b^2}}.$$

Die Ergebnisse der Regression finden sich in Tabelle 2 und die Ausgleichsfunktionen sind in den Abbildungen zu finden.

	$\frac{A_0}{\text{nA m}^{-2}}$	$\frac{g}{\text{m}}$
Einzelspalt A	$3.3915 \pm 0.0035$	$(4.996\,981\,99 \pm 0.000\,000\,10) \times 10^{-5}$
Einzelspalt B	$6.291 \pm 0.010$	$(1.201\,480\,81 \pm 0.000\,000\,05) \times 10^{-4}$

Tabelle 2: Regressionsergebnisse der Einzelspalte

### 5.3 Beugungsmuster am Doppelspalt

Die Berechnung des Photostroms  $I_p h$  und des Beugungswinkels  $\varphi$  wurden analog zum vorherigen Abschnitt durchgeführt. Die Ergebnisse befinden sich in Tabelle 6.

Abbildung 6 zeigt den Photostrom in Abhängigkeit von  $\varphi$ .

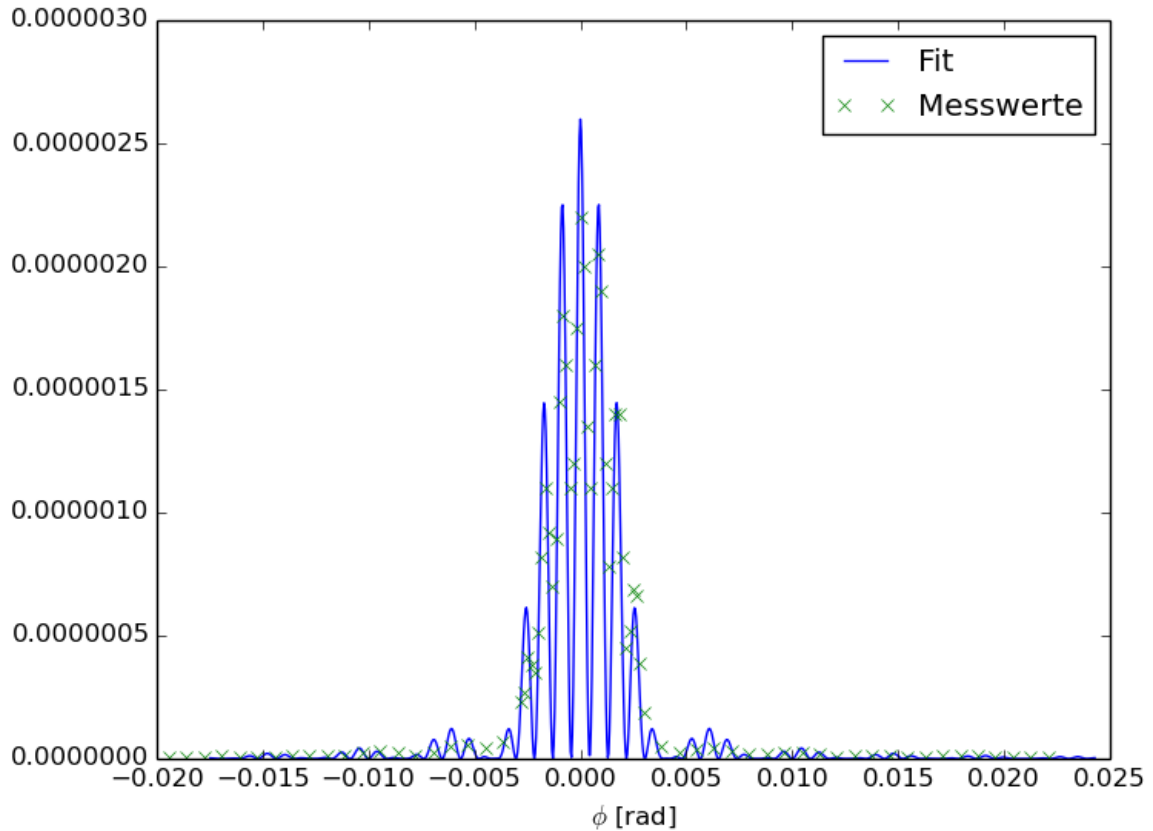


Abbildung 5: Diese Abbildung zeigt die Messergebnisse für den Doppelspalt ( $b \approx 0.15 \text{ mm}$  und  $g \approx 0.25 \text{ mm}$ ). Der Fit mit der Funktion  $I(\varphi) = 4 \cdot A_0^2 \cdot b^2 \cos^2 \left( \frac{\pi g \sin \varphi}{\lambda} \right) \cdot \text{sinc}^2 \left( \frac{b \sin \varphi}{\lambda} \right)$  dieser Daten ist ebenfalls dargestellt.

An diese Messwerte soll die Theoriefunktion

$$I(\varphi) = 4 \cdot A_0^2 \cdot b^2 \cos^2 \left( \frac{\pi \cdot g \cdot \sin \varphi}{\lambda} \right) \cdot \text{sinc}^2 \left( \frac{b \cdot \sin \varphi}{\lambda} \right) \quad (10)$$



angepasst werden. Analog zum Vorgehen beim Einzelspalt werden als Startwerte für die Regressionsparameter  $g$  und  $b$  die mikroskopisch bestimmten Messergebnisse verwendet. Für den Amplitudenfaktor gilt:

$$A_0 = \sqrt{\frac{I_{Max}}{4 \cdot b^2}}.$$

Durch die Regression wurden folgende Werte berechnet:

- $A_0 = (5.36 \pm 0.09) \text{ nA m}^{-1}$
- $b = (1.502\,808\,6 \pm 0.000\,000\,9) \times 10^{-4} \text{ m}$
- $g = (7.277\,939\,1 \pm 0.000\,000\,6) \times 10^{-4} \text{ m}$ .

Um einen Vergleich zwischen Beugung am Einzel- und am Doppelspalt zu ermöglichen zeigt Abbildung 6 beide Beugungsmuster. Die Amplituden sind dabei jeweils auf das 0. Maximum normalisiert.

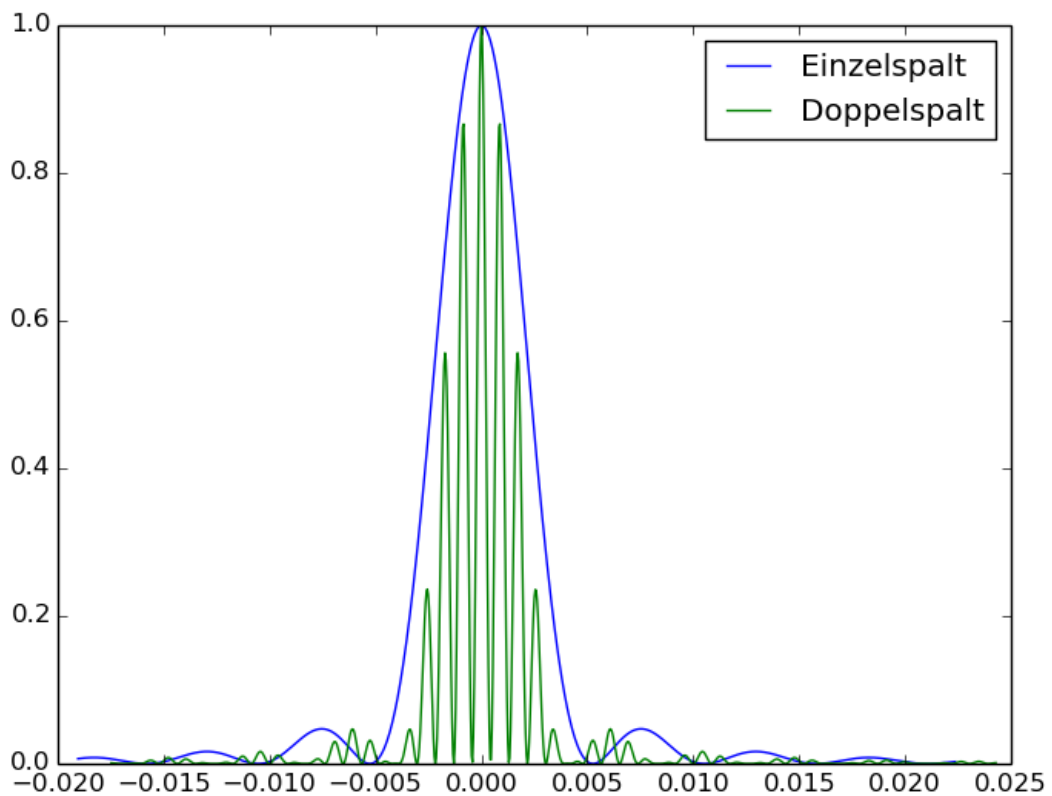


Abbildung 6: Vergleich zwischen Beugung am Doppelspalt und Beugung am Einzelspalt mit näherungsweise gleicher Spaltbreite ( $b \approx 0.15 \text{ mm}$ ). Hierzu werden die Fits für beide Messungen (jeweils normiert) zusammen in einem Diagramm dargestellt.

## 6 Diskussion

Beim Vergleich der Intensitätsverteilungen am Einfach- und Doppelspalt ist erkennbar, dass die Kurven nicht genau übereinander liegen. Dies deutet darauf hin, dass die Breite des Einzelspalts nicht der Breite des Doppelspalts entspricht. Die mikroskopische Messung wird dies bestätigen. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse für die Spaltbreiten und den Spaltabstand beim Doppelspalt sowie deren Herstellerangaben dargestellt. Um die Messmethoden zu vergleichen, werden die relativen Abweichungen der Messwerte zur Herstellerangabe berechnet.

	Einfachspalt A $b$	Einfachspalt B $b$	Doppelspalt $b$ $g$	
Herstellerangabe	$7.5 \times 10^{-5} \text{ m}$	$1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$	$1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$	$2.5 \times 10^{-4} \text{ m}$
mikroskopische Messung → Abweichung von der HA	$6.71 \times 10^{-5} \text{ m}$ 10.48 %	$1.34 \times 10^{-4} \text{ m}$ 10.48 %	$1.63 \times 10^{-4} \text{ m}$ 8.36 %	$7.35 \times 10^{-4} \text{ m}$ 193.99 %
Messung durch Beugung → Abweichung von der HA	$5.00 \times 10^{-5} \text{ m}$ 33.37 %	$1.20 \times 10^{-4} \text{ m}$ 19.90 %	$1.50 \times 10^{-4} \text{ m}$ 0.19 %	$7.28 \times 10^{-4} \text{ m}$ 191.11 %

Tabelle 3: Vergleichende Ergebnistabelle mit rel. Abweichungen von den Herstellerangaben

Bei der Vermessung der Spaltbreiten liegt die relative Abweichung der mit dem Mikroskop ermittelten Werte jeweils bei ca. 10 %. Dabei könnte es sich um einen systematischen Fehler handeln, entstanden z.B. bei der Kalibrierung des Mikroskopes. Bei der Messung von  $b$  durch den Messaufbau liegen die relativen Abweichungen bei bis zu 33.37 %, dafür ist die Messung der Spaltbreite am Doppelspalt mit einer relativen Abweichung von nur 0.19 % sehr genau. Die Messungen des Spaltabstandes  $g$  ergaben einen ähnlichen Wert, dieser beträgt aber fast das Dreifache der Herstellerangabe. Aufgrund der Übereinstimmung der Ergebnisse ist zu vermuten, dass die Herstellerangabe auf dem Dia des Doppelspaltes nicht richtig ist.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit dem Versuchsaufbau zwar sehr genaue Messungen der Spaltbreite möglich sind, der Versuchsaufbau aber viel aufwändiger und empfindlicher ist als das Mikroskop. Die große Empfindlichkeit des Versuchsaufbaus ist besonders bei der ersten Messung erkennbar. So wird die Messung zum Beispiel durch Restlicht, welches in die Photodiode einfällt, erheblich gestört. Auch kleine Erschütterungen können die Messung sehr stark beeinflussen.

Die Messung macht außerdem deutlich, dass man sich nach Möglichkeit nicht auf aufgeklebte Herstellerangaben verlassen sollte.

## 7 Quellen

[1] Entnommen der Praktikumsanleitung der TU Dortmund.

Download am 16.06.14 unter:

<http://129.217.224.2/HOME PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V406.pdf>

## 8 Anhang

- Messwert-Tabellen
- Auszug aus dem Messheft

$x \text{ m}^{-1}$	$I \text{ A}^{-1}$	$\varphi$	$I_{Ph} \text{ A}^{-1}$
0.000	$4.8 \times 10^{-10}$	-0.0207	$4.71 \times 10^{-10}$
0.001	$9 \times 10^{-10}$	-0.0199	$8.91 \times 10^{-10}$
0.002	$1.2 \times 10^{-9}$	-0.0191	$1.19 \times 10^{-9}$
0.003	$1.4 \times 10^{-9}$	-0.0183	$1.39 \times 10^{-9}$
0.004	$1.7 \times 10^{-9}$	-0.0174	$1.69 \times 10^{-9}$
0.005	$1.8 \times 10^{-9}$	-0.0166	$1.79 \times 10^{-9}$
0.006	$1.9 \times 10^{-9}$	-0.0158	$1.89 \times 10^{-9}$
0.007	$1.8 \times 10^{-9}$	-0.0149	$1.79 \times 10^{-9}$
0.008	$1.6 \times 10^{-9}$	-0.0141	$1.59 \times 10^{-9}$
0.009	$1.4 \times 10^{-9}$	-0.0133	$1.39 \times 10^{-9}$
0.010	$1.15 \times 10^{-9}$	-0.0124	$1.14 \times 10^{-9}$
0.011	$1.1 \times 10^{-9}$	-0.0116	$1.09 \times 10^{-9}$
0.012	$1.4 \times 10^{-9}$	-0.0108	$1.39 \times 10^{-9}$
0.013	$2.2 \times 10^{-9}$	-0.00996	$2.19 \times 10^{-9}$
0.014	$3.6 \times 10^{-9}$	-0.00913	$3.59 \times 10^{-9}$
0.015	$5.65 \times 10^{-9}$	-0.0083	$5.64 \times 10^{-9}$
0.016	$7.9 \times 10^{-9}$	-0.00747	$7.89 \times 10^{-9}$
0.017	$1.2 \times 10^{-8}$	-0.00664	$1.2 \times 10^{-8}$
0.018	$1.85 \times 10^{-8}$	-0.00581	$1.85 \times 10^{-8}$
0.019	$1.95 \times 10^{-8}$	-0.00498	$1.95 \times 10^{-8}$
0.020	$2.2 \times 10^{-8}$	-0.00415	$2.2 \times 10^{-8}$
0.021	$2.4 \times 10^{-8}$	-0.00332	$2.4 \times 10^{-8}$
0.022	$2.7 \times 10^{-8}$	-0.00249	$2.7 \times 10^{-8}$
0.023	$2.8 \times 10^{-8}$	-0.00166	$2.8 \times 10^{-8}$
0.024	$2.9 \times 10^{-8}$	-0.00083	$2.9 \times 10^{-8}$
0.025	$3 \times 10^{-8}$	0	$3 \times 10^{-8}$
0.026	$2.6 \times 10^{-8}$	0.00083	$2.6 \times 10^{-8}$
0.027	$2.4 \times 10^{-8}$	0.00166	$2.4 \times 10^{-8}$
0.028	$2.1 \times 10^{-8}$	0.00249	$2.1 \times 10^{-8}$
0.029	$2.4 \times 10^{-8}$	0.00332	$2.4 \times 10^{-8}$
0.030	$2 \times 10^{-8}$	0.00415	$2 \times 10^{-8}$
0.031	$1.6 \times 10^{-8}$	0.00498	$1.6 \times 10^{-8}$
0.032	$1.2 \times 10^{-8}$	0.00581	$1.2 \times 10^{-8}$
0.033	$8.35 \times 10^{-9}$	0.00664	$8.34 \times 10^{-9}$
0.034	$5.6 \times 10^{-9}$	0.00747	$5.59 \times 10^{-9}$
0.035	$3.55 \times 10^{-9}$	0.0083	$3.54 \times 10^{-9}$
0.036	$2.1 \times 10^{-9}$	0.00913	$2.09 \times 10^{-9}$
0.037	$1.1 \times 10^{-9}$	0.00996	$1.09 \times 10^{-9}$
0.038	$5.3 \times 10^{-10}$	0.0108	$5.21 \times 10^{-10}$
0.039	$2.8 \times 10^{-10}$	0.0116	$2.71 \times 10^{-10}$
0.040	$2.2 \times 10^{-10}$	0.0124	$2.11 \times 10^{-10}$
0.041	$2.6 \times 10^{-10}$	0.0133	$2.51 \times 10^{-10}$
0.042	$3.4 \times 10^{-10}$	0.0141	$3.31 \times 10^{-10}$
0.043	$4.1 \times 10^{-10}$	0.0149	$4.01 \times 10^{-10}$

0.044	$4.5 \times 10^{-10}$	0.0158	$4.41 \times 10^{-10}$
0.045	$4.4 \times 10^{-10}$	0.0166	$4.31 \times 10^{-10}$
0.046	$4.1 \times 10^{-10}$	0.0174	$4.01 \times 10^{-10}$
0.047	$3.6 \times 10^{-10}$	0.0183	$3.51 \times 10^{-10}$
0.048	$3.3 \times 10^{-10}$	0.0191	$3.21 \times 10^{-10}$
0.049	$2.8 \times 10^{-10}$	0.0199	$2.71 \times 10^{-10}$
0.050	$2.4 \times 10^{-10}$	0.0207	$2.31 \times 10^{-10}$

Tabelle 4: Messwerte für den Einzelspalt A

$x \text{ m}^{-1}$	$I \text{ A}^{-1}$	$\varphi$	$I_{Ph} \text{ A}^{-1}$
0.000	$2.2 \times 10^{-9}$	-0.0212	$2.19 \times 10^{-9}$
0.001	$2.05 \times 10^{-9}$	-0.0203	$2.04 \times 10^{-9}$
0.002	$1.81 \times 10^{-9}$	-0.0195	$1.8 \times 10^{-9}$
0.003	$2.2 \times 10^{-9}$	-0.0187	$2.19 \times 10^{-9}$
0.004	$2.95 \times 10^{-9}$	-0.0178	$2.94 \times 10^{-9}$
0.005	$3.55 \times 10^{-9}$	-0.017	$3.54 \times 10^{-9}$
0.006	$3.15 \times 10^{-9}$	-0.0162	$3.14 \times 10^{-9}$
0.007	$2.6 \times 10^{-9}$	-0.0154	$2.59 \times 10^{-9}$
0.008	$3 \times 10^{-9}$	-0.0145	$2.99 \times 10^{-9}$
0.009	$5.1 \times 10^{-9}$	-0.0137	$5.09 \times 10^{-9}$
0.010	$8.3 \times 10^{-9}$	-0.0129	$8.29 \times 10^{-9}$
0.011	$1.01 \times 10^{-8}$	-0.012	$1 \times 10^{-8}$
0.012	$8.2 \times 10^{-9}$	-0.0112	$8.19 \times 10^{-9}$
0.013	$4.95 \times 10^{-9}$	-0.0104	$4.94 \times 10^{-9}$
0.014	$4.8 \times 10^{-9}$	-0.00954	$4.79 \times 10^{-9}$
0.015	$1.2 \times 10^{-8}$	-0.00871	$1.2 \times 10^{-8}$
0.016	$2.2 \times 10^{-8}$	-0.00788	$2.2 \times 10^{-8}$
0.017	$2.5 \times 10^{-8}$	-0.00705	$2.5 \times 10^{-8}$
0.018	$2.6 \times 10^{-8}$	-0.00622	$2.6 \times 10^{-8}$
0.019	$1.3 \times 10^{-8}$	-0.00539	$1.3 \times 10^{-8}$
0.020	$8.9 \times 10^{-9}$	-0.00456	$8.89 \times 10^{-9}$
0.021	$1.95 \times 10^{-8}$	-0.00415	$1.95 \times 10^{-8}$
0.021	$4.2 \times 10^{-8}$	-0.00373	$4.2 \times 10^{-8}$
0.022	$7.8 \times 10^{-8}$	-0.00332	$7.8 \times 10^{-8}$
0.022	$1.4 \times 10^{-7}$	-0.0029	$1.4 \times 10^{-7}$
0.022	$2 \times 10^{-7}$	-0.00249	$2 \times 10^{-7}$
0.023	$2.75 \times 10^{-7}$	-0.00207	$2.75 \times 10^{-7}$
0.024	$3.5 \times 10^{-7}$	-0.00166	$3.5 \times 10^{-7}$
0.024	$4.2 \times 10^{-7}$	-0.00124	$4.2 \times 10^{-7}$
0.025	$4.95 \times 10^{-7}$	-0.00083	$4.95 \times 10^{-7}$
0.025	$5.4 \times 10^{-7}$	-0.000415	$5.4 \times 10^{-7}$
0.026	$5.8 \times 10^{-7}$	0	$5.8 \times 10^{-7}$
0.026	$5.8 \times 10^{-7}$	0.000415	$5.8 \times 10^{-7}$
0.026	$5.6 \times 10^{-7}$	0.00083	$5.6 \times 10^{-7}$

0.027	$5.2 \times 10^{-7}$	0.001 24	$5.2 \times 10^{-7}$
0.028	$4.6 \times 10^{-7}$	0.001 66	$4.6 \times 10^{-7}$
0.028	$3.85 \times 10^{-7}$	0.002 07	$3.85 \times 10^{-7}$
0.029	$3.15 \times 10^{-7}$	0.002 49	$3.15 \times 10^{-7}$
0.029	$2.4 \times 10^{-7}$	0.0029	$2.4 \times 10^{-7}$
0.030	$1.65 \times 10^{-7}$	0.003 32	$1.65 \times 10^{-7}$
0.030	$1.05 \times 10^{-7}$	0.003 73	$1.05 \times 10^{-7}$
0.030	$6.05 \times 10^{-8}$	0.004 15	$6.05 \times 10^{-8}$
0.031	$2.85 \times 10^{-8}$	0.004 56	$2.85 \times 10^{-8}$
0.032	$1.2 \times 10^{-8}$	0.004 98	$1.2 \times 10^{-8}$
0.032	$3.8 \times 10^{-9}$	0.005 39	$3.79 \times 10^{-9}$
0.033	$3.6 \times 10^{-9}$	0.005 81	$3.59 \times 10^{-9}$
0.033	$7.8 \times 10^{-9}$	0.006 22	$7.79 \times 10^{-9}$
0.034	$1.35 \times 10^{-8}$	0.006 64	$1.35 \times 10^{-8}$
0.034	$1.8 \times 10^{-8}$	0.007 05	$1.8 \times 10^{-8}$
0.035	$2 \times 10^{-8}$	0.007 47	$2 \times 10^{-8}$
0.035	$2 \times 10^{-8}$	0.007 88	$2 \times 10^{-8}$
0.036	$1.55 \times 10^{-9}$	0.008 71	$1.54 \times 10^{-9}$
0.037	$2.2 \times 10^{-9}$	0.009 54	$2.19 \times 10^{-9}$
0.038	$2.4 \times 10^{-9}$	0.0104	$2.39 \times 10^{-9}$
0.039	$1.8 \times 10^{-9}$	0.0112	$1.79 \times 10^{-9}$
0.040	$8.8 \times 10^{-10}$	0.012	$8.71 \times 10^{-10}$
0.041	$3.55 \times 10^{-10}$	0.0129	$3.46 \times 10^{-10}$
0.042	$3.2 \times 10^{-10}$	0.0137	$3.11 \times 10^{-10}$
0.043	$5.05 \times 10^{-10}$	0.0145	$4.96 \times 10^{-10}$
0.044	$5.6 \times 10^{-10}$	0.0154	$5.51 \times 10^{-10}$
0.045	$4.2 \times 10^{-10}$	0.0162	$4.11 \times 10^{-10}$
0.046	$2.55 \times 10^{-10}$	0.017	$2.46 \times 10^{-10}$
0.047	$2.1 \times 10^{-10}$	0.0178	$2.01 \times 10^{-10}$
0.048	$2.8 \times 10^{-10}$	0.0187	$2.71 \times 10^{-10}$
0.049	$3.25 \times 10^{-10}$	0.0195	$3.16 \times 10^{-10}$
0.050	$3.1 \times 10^{-10}$	0.0203	$3.01 \times 10^{-10}$

---

Tabelle 5: Messwerte für den Einzelspalt B

$x \text{ m}^{-1}$	$I \text{ A}^{-1}$	$\varphi$	$I_{Ph} \text{ A}^{-1}$
0.000	$4 \times 10^{-9}$	-0.0194	$3.99 \times 10^{-9}$
0.001	$4.45 \times 10^{-9}$	-0.0186	$4.44 \times 10^{-9}$
0.002	$8.8 \times 10^{-9}$	-0.0178	$8.79 \times 10^{-9}$
0.003	$1.1 \times 10^{-8}$	-0.0169	$1.1 \times 10^{-8}$
0.004	$6.9 \times 10^{-9}$	-0.0161	$6.89 \times 10^{-9}$
0.005	$4.2 \times 10^{-9}$	-0.0153	$4.19 \times 10^{-9}$
0.006	$7.8 \times 10^{-9}$	-0.0144	$7.79 \times 10^{-9}$
0.007	$1.4 \times 10^{-8}$	-0.0136	$1.4 \times 10^{-8}$
0.008	$1.4 \times 10^{-8}$	-0.0128	$1.4 \times 10^{-8}$
0.009	$1.15 \times 10^{-8}$	-0.012	$1.15 \times 10^{-8}$
0.010	$1.55 \times 10^{-8}$	-0.0111	$1.55 \times 10^{-8}$
0.011	$2.65 \times 10^{-8}$	-0.0103	$2.65 \times 10^{-8}$
0.012	$3.25 \times 10^{-8}$	-0.009 46	$3.25 \times 10^{-8}$
0.013	$2.4 \times 10^{-8}$	-0.008 63	$2.4 \times 10^{-8}$
0.014	$1.45 \times 10^{-8}$	-0.0078	$1.45 \times 10^{-8}$
0.015	$2.5 \times 10^{-8}$	-0.006 97	$2.5 \times 10^{-8}$
0.016	$4.8 \times 10^{-8}$	-0.006 14	$4.8 \times 10^{-8}$
0.017	$5.5 \times 10^{-8}$	-0.005 31	$5.5 \times 10^{-8}$
0.018	$4.2 \times 10^{-8}$	-0.004 48	$4.2 \times 10^{-8}$
0.019	$7 \times 10^{-8}$	-0.003 65	$7 \times 10^{-8}$
0.020	$2.3 \times 10^{-7}$	-0.002 82	$2.3 \times 10^{-7}$
0.020	$2.7 \times 10^{-7}$	-0.002 66	$2.7 \times 10^{-7}$
0.020	$4.1 \times 10^{-7}$	-0.002 49	$4.1 \times 10^{-7}$
0.021	$3.8 \times 10^{-7}$	-0.002 32	$3.8 \times 10^{-7}$
0.021	$3.5 \times 10^{-7}$	-0.002 16	$3.5 \times 10^{-7}$
0.021	$5.1 \times 10^{-7}$	-0.001 99	$5.1 \times 10^{-7}$
0.021	$8.2 \times 10^{-7}$	-0.001 83	$8.2 \times 10^{-7}$
0.021	$1.1 \times 10^{-6}$	-0.001 66	$1.1 \times 10^{-6}$
0.022	$9.2 \times 10^{-7}$	-0.001 49	$9.2 \times 10^{-7}$
0.022	$7 \times 10^{-7}$	-0.001 33	$7 \times 10^{-7}$
0.022	$8.95 \times 10^{-7}$	-0.001 16	$8.95 \times 10^{-7}$
0.022	$1.45 \times 10^{-6}$	-0.000 996	$1.45 \times 10^{-6}$
0.022	$1.8 \times 10^{-6}$	-0.000 83	$1.8 \times 10^{-6}$
0.023	$1.6 \times 10^{-6}$	-0.000 664	$1.6 \times 10^{-6}$
0.023	$1.1 \times 10^{-6}$	-0.000 498	$1.1 \times 10^{-6}$
0.023	$1.2 \times 10^{-6}$	-0.000 332	$1.2 \times 10^{-6}$
0.023	$1.75 \times 10^{-6}$	-0.000 166	$1.75 \times 10^{-6}$
0.023	$2.2 \times 10^{-6}$	0	$2.2 \times 10^{-6}$
0.024	$2 \times 10^{-6}$	0.000 166	$2 \times 10^{-6}$
0.024	$1.35 \times 10^{-6}$	0.000 332	$1.35 \times 10^{-6}$
0.024	$1.1 \times 10^{-6}$	0.000 498	$1.1 \times 10^{-6}$
0.024	$1.6 \times 10^{-6}$	0.000 664	$1.6 \times 10^{-6}$
0.024	$2.05 \times 10^{-6}$	0.000 83	$2.05 \times 10^{-6}$
0.025	$1.9 \times 10^{-6}$	0.000 996	$1.9 \times 10^{-6}$

0.025	$1.2 \times 10^{-6}$	0.001 16	$1.2 \times 10^{-6}$
0.025	$7.8 \times 10^{-7}$	0.001 33	$7.8 \times 10^{-7}$
0.025	$1.1 \times 10^{-6}$	0.001 49	$1.1 \times 10^{-6}$
0.025	$1.4 \times 10^{-6}$	0.001 66	$1.4 \times 10^{-6}$
0.026	$1.4 \times 10^{-6}$	0.001 83	$1.4 \times 10^{-6}$
0.026	$8.2 \times 10^{-7}$	0.001 99	$8.2 \times 10^{-7}$
0.026	$4.5 \times 10^{-7}$	0.002 16	$4.5 \times 10^{-7}$
0.026	$5.2 \times 10^{-7}$	0.002 32	$5.2 \times 10^{-7}$
0.026	$6.85 \times 10^{-7}$	0.002 49	$6.85 \times 10^{-7}$
0.027	$6.6 \times 10^{-7}$	0.002 66	$6.6 \times 10^{-7}$
0.027	$3.9 \times 10^{-7}$	0.002 82	$3.9 \times 10^{-7}$
0.027	$1.85 \times 10^{-7}$	0.002 99	$1.85 \times 10^{-7}$
0.028	$5.2 \times 10^{-8}$	0.003 82	$5.2 \times 10^{-8}$
0.029	$2.6 \times 10^{-8}$	0.004 65	$2.6 \times 10^{-8}$
0.030	$3.9 \times 10^{-8}$	0.005 48	$3.9 \times 10^{-8}$
0.031	$4.2 \times 10^{-8}$	0.006 31	$4.2 \times 10^{-8}$
0.032	$2.9 \times 10^{-8}$	0.007 14	$2.9 \times 10^{-8}$
0.033	$1.65 \times 10^{-8}$	0.007 97	$1.65 \times 10^{-8}$
0.034	$1.8 \times 10^{-8}$	0.008 80	$1.8 \times 10^{-8}$
0.035	$2.6 \times 10^{-8}$	0.009 63	$2.6 \times 10^{-8}$
0.036	$2.55 \times 10^{-8}$	0.010 50	$2.55 \times 10^{-8}$
0.037	$1.6 \times 10^{-8}$	0.011 30	$1.6 \times 10^{-8}$
0.038	$8.4 \times 10^{-9}$	0.012 10	$8.39 \times 10^{-9}$
0.039	$1.05 \times 10^{-8}$	0.012 90	$1.05 \times 10^{-8}$
0.040	$1.45 \times 10^{-8}$	0.013 80	$1.45 \times 10^{-8}$
0.041	$1.2 \times 10^{-8}$	0.014 60	$1.2 \times 10^{-8}$
0.042	$5.5 \times 10^{-9}$	0.015 40	$5.49 \times 10^{-9}$
0.043	$4.8 \times 10^{-9}$	0.016 30	$4.79 \times 10^{-9}$
0.044	$1.05 \times 10^{-8}$	0.017 10	$1.05 \times 10^{-8}$
0.045	$1.4 \times 10^{-8}$	0.017 90	$1.4 \times 10^{-8}$
0.046	$1 \times 10^{-8}$	0.018 80	$9.99 \times 10^{-9}$
0.047	$4.35 \times 10^{-9}$	0.019 60	$4.34 \times 10^{-9}$
0.048	$4.2 \times 10^{-9}$	0.020 40	$4.19 \times 10^{-9}$
0.049	$6.9 \times 10^{-9}$	0.021 20	$6.89 \times 10^{-9}$
0.050	$6.8 \times 10^{-9}$	0.022 10	$6.79 \times 10^{-9}$

---

Tabelle 6: Messwerte für den Doppelspalt