

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P2**

**Mikrowellenoptik**  
**P2-15**

Auswertung von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 24. Mai 2012



Ziel dieses Versuches ist es, zu zeigen, dass man viele bekannte Phänomene aus der Optik wie Interferenz und Beugung auch mit Mikrowellen beobachten kann. Im Gegensatz zu Licht liegen die beobachtbaren Phänomene allerdings im Bereich von Zentimetern, wodurch manche Effekte wie der optische Tunneleffekt erst gut sichtbar gemacht werden können. Die entstehenden Felder können einfach mit Hilfe einer Sonde ausgemessen werden. Die Transversalwelleneigenschaften von Mikrowellen werden damit eindrucksvoll demonstriert.

Gleichzeitig sollen in diesem Versuch Methoden moderner Datenerfassung eingesetzt und das Auswerten größerer Datenmengen mit Hilfe von Tabellenkalkulationen geübt werden. Sie benötigen einen USB-Stick zur Übernahme Ihrer Messdaten.

*Details zum Aufbau, Funktionsweise des CASSY Messinterfaces, zu versuchsspezifischen Effekten und zur Auswertung finden Sie in der Hilfe zu diesem Versuch.*

### **Aufgaben :**

**1 Bestimmen Sie die Wellenlänge der bei diesem Versuch benutzten Strahlung durch Ausmessen des Feldes einer stehenden Wellen vor einer Metallplatte.** Messen Sie mit dem Empfangsdipol. Sein Haltestift soll senkrecht zur Strahlrichtung montiert sein. Extrapolieren Sie die Intensität-über-Ort-Auftragung bis zur Metalloberfläche.

**2 Beobachten Sie das emittierte Signal mit Hilfe des Hornempfängers und CASSY.** Schließen Sie den Hornempfänger an den Eingang B von CASSY an und beobachten Sie das Mikrowellensignal. Wie sieht die Signalform aus? Überlegen Sie sich, wie Sie eine intensitätsproportionale Größe messen können.

**3 Justieren Sie den Aufbau zur Messung des Interferenzmusters und studieren Sie zunächst den Effekt der so genannten Fresnel-Beugung am Einzelspalt.** Verwenden sie hierzu den Bewegungswandler von CASSY zusammen mit der Scheibe und dem Keilriemen. Messen Sie die Intensität in Abhängigkeit vom Winkel. Justieren Sie den Aufbau, um ein möglichst optimales Messergebnis für den Grenzfall der Fraunhofer'schen Beugung zu erhalten. Woran können Sie den Effekt der Fresnel-Beugung im Spektrum erkennen ?

**4 Messen Sie das Spektrum eines Einzelspalts, eines Doppelspalts und eines Gitters mit Hilfe von CASSY.** Vergleichen Sie in der Auswertung die gemessene mit der theoretisch vorhergesagten Kurve, die als freie Parameter die Gitterparameter und die (oben bereits grob bestimmte) Wellenlänge enthält. In einer „Anpassung per Auge“ können Sie nun die Wellenlänge variieren, bis die beste Übereinstimmung Ihrer gemessenen Kurve mit der berechneten erreicht wird, und so ebenfalls die Wellenlänge bestimmen.

**5 Bauen Sie mit Hilfe zweier senkrecht zum Strahlengang montierter Plexiglasscheiben ein Interferometer auf.** Messen Sie die Intensität in Abhängigkeit vom Plattenabstand mit Hilfe von CASSY und dem Bewegungswandler. Bestimmen Sie wieder mit Hilfe einer „Anpassung per Auge“ die Wellenlänge der verwendeten Mikrowellen.

**6 Untersuchen Sie die Polarisation der Mikrowellenstrahlung a) ohne ein zusätzliches Element und b) mit einem  $\lambda/4$ -Plättchen' im Strahlengang.** Drehen Sie dazu den Hornempfänger um seine Achse und messen Sie die Intensität in Abhängigkeit von der Stellung. Das  $\lambda/4$ -Plättchen' ist ein Metallstreifengitter, dessen Streifen unter  $45^\circ$  gegen die Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung ausgerichtet sind. Es erzeugt elliptische und zirkulare Polarisation. Das liegt daran, dass die Teilwelle mit E-Feld parallel zu den Metallstreifen viel stärker gedämpft wird als die andere. Diskutieren Sie das Zustandekommen der elliptischen Polarisation. Vergleichen Sie die gemessenen Daten mit den theoretisch erwarteten Kurven.

**7** Vergleichen Sie bei Glas, bei Plexiglas und bei dem Paraffin der Linsen qualitativ das Absorptionsvermögen für Zentimeterwellen mit dem für sichtbares Licht (nur phänomenologisch, ohne Erklärung).

**8** Messen Sie die Intensität  $I$  der Strahlung, die bei 'Totalreflexion' an der Hypotenuse eines Prismas noch in das optisch dünnere Medium eintritt ('optischer Tunneleffekt'), als Funktion des Abstandes  $x$  von der Hypotenuse. Ändern Sie den Abstand zweier hypotenusenparalleler Prismen und messen Sie hinter dem zweiten Prisma die Intensität des parallel versetzten Strahls mit dem Hornempfänger. Achten Sie auf senkrechten Einfall der Strahlung bei den Kathetenflächen. Tragen Sie  $\ln(I)$  über  $x$  auf. Berechnen Sie die Steigung der Geraden und daraus die Reichweite  $R$ , nach der die Intensität um den Faktor  $e$  abgeschwächt ist. Vergleichen Sie  $R$  mit der Wellenlänge.

#### Zubehör:

- Gunn-Diode (ca.10 GHz), Netzgerät dazu
- Empfangsdipol mit Demodulator-Diode
- Hornempfänger mit Demodulator-Diode
- NF-Verstärker
- CASSY Messinterface mit Kabeln und Bewegungswandler
- PC zur Datenerfassung mit CASSY Lab Software
- optische Bank mit Schwenkteil und Winkelskala und diversen Reitern
- Drei Einfachspalte ( $b=3,8$  cm;  $b=7$  cm;  $b=11$  cm)
- Zwei Doppelspalte ( $b=7$  cm  $g=10,5$ cm;  $b=3,8$  cm  $g=7,6$  cm )
- Dreifachspalt ( $b=7$  cm  $g=10,5$  cm)
- Vierfachspalt ( $b=3,8$  cm  $g=7,6$  cm)
- Fünffachspalt ( $b=3,2$  cm  $g=6,4$  cm)
- Metallplatte (34 cm x 34 cm)
- zwei Plexiglasplatten (30 cm x 30 cm)
- Plexiglastisch (55 cm x 205 cm)
- zwei Paraffinlinsen (ca.  $f=29$  cm)
- zwei Zuckerprismen ( $n(10\text{ Ghz})=1,5$ )
- Glasplatte
- Metallstreifengitter (' $\lambda/4$ -Plättchen') für  $45^\circ$ -Montage

#### Literatur:

Kapitel zur Wellenoptik in jedem Physiklehrbuch (Gerthsen, Tipler, Hecht ...)

Bergmann, Schäfer: Experimentalphysik, Bd.3

Meyer, Pottel: HF-Technik

Frieser: Mikrowellenmeßtechnik

Hollerbach: Staatsexamensarbeit 'Optische Versuche mit cm-Wellen'

CASSY-Manual:

<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~simonis/praktikum/allgemeines/Cassy-Handbuch.pdf>

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P2**

**Mikrowellenoptik**  
**P2-15**

Versuchsvorbereitung von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 24. Mai 2012

In diesem Versuch werden Mikrowellen benutzt, die eine Wellenlänge von einigen Zentimetern haben. Damit lassen sich Phänomene aus der Optik wie Interferenz und Beugung beobachten. Die dabei entstehenden Felder lassen sich einfach mit Hilfe von Sonden ausmessen. Unter anderem sollen wir einen Einblick in die Methoden moderner Datenerfassung bekommen.

## 1 Bestimmung der Wellenlänge

Zunächst soll für die im Versuch verwendeten Strahlung die Wellenlänge bestimmt werden. Dazu verwenden wir eine Metallplatte. Diese hat eine sehr hohe Leitfähigkeit, weshalb dort das elektrische Feld null. Die Welle trifft also auf die Metallplatte und wird dort reflektiert und durchläuft die ankommenden Wellen. Es bilden sich somit stehende Wellen, wobei die Metallplatte einem Knotenpunkt entspricht. Mit einem Empfangsdipol kann nun das elektrische Feld der stehenden Welle ausgemessen werden und der Abstand zwischen Minima bzw. Maxima bestimmt werden. Da der Abstand  $d$  eines Minimus bzw. Maximums gerade der halben Wellenlänge entspricht, kann die Wellenlänge nun leicht berechnet werden:

$$\lambda = 2 \cdot d \quad (1)$$

## 2 Beobachtung des Signals mit Hilfe des Messsystems CASSY

Es soll nun das emittierte Mikrowellensignal beobachtet werden. Dazu wird der Hornempfänger an den Eingang B des CASSY-Systems angeschlossen.

Die Intensität einer elektromagnetischen Welle ergibt sich aus dem zeitlichen Mittel des Poynting-Vektor  $\vec{S}$ .

$$I = \langle \vec{S} \rangle = \langle \vec{E} \times \vec{H} \rangle \quad (2)$$

für eine linear polarisierte Welle ergibt sich:

$$I = \langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot c \cdot E_0^2 \quad (3)$$

Da die Spannung  $U$  die gemessen werden kann proportional zu  $E$  ist, ist  $I \sim U^2$ . In der Fernzone nimmt die Intensität mit  $1/r^2$  ab.

## 3 Fresnel-Beugung am Einzelspalt

Zuerst soll der Effekt der sogenannten Fresnel-Beugung am Einzelspalt untersucht werden. Dazu wird der Bewegungswandler von CASSY verwendet und die Intensität in Abhängigkeit vom Winkel gemessen. Anschließend soll noch der Aufbau justiert werden um dann ein möglichst optimales Messergebnis für den Grenzfall der Fraunhofer Beugung zu erhalten.

### Fresnel-Beugung:

Von Fresnel-Beugung spricht man bei Beugung im divergenten oder konvergenten Wellenfeld. Sie tritt im Nahfeld auf, also wenn im geringen Abstand hinter dem Spalt das Beugungsmus-

ter beobachtet wird. Die einzelnen Wellenfronten haben unterschiedliche Beugungswinkel und unterschiedliche Wegunterschiede. Es ergibt sich ein kompliziertes Beugungsbild.

## 4 Einzelspalt, Doppelspalt und Gitter

Es soll nun das Spektrum eines Einzelspalts, Doppelspalts und eines Gitters mit CASSY aufgenommen werden und mit der theoretisch berechneten Kurve verglichen werden.

### Fraunhofer Beugung

Die Fraunhofer Beugung ist ein Grenzfall der Fresnel Beugung die sich ergibt, wenn der Abstand vom Spalt bzw. Gitter zum Beugungsmuster groß ist. Die Wellenfronten verlaufen dann alle annähernd parallel.

In folgendem Schaubild, ist der Übergang von Fresnel-Beugung zur Fraunhofer Beugung für einen Einzelspalt schematisch dargestellt.

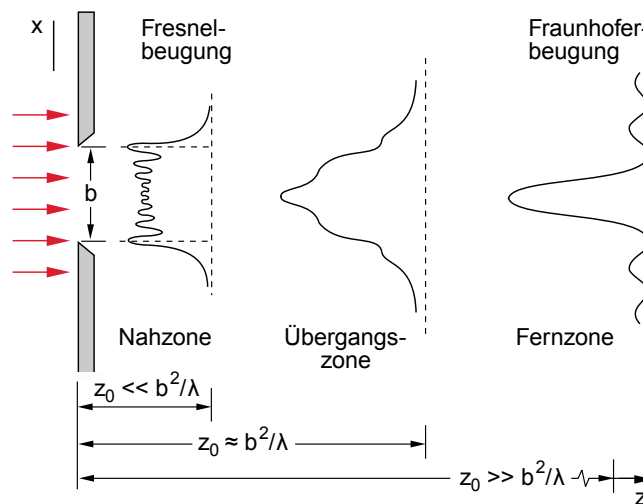


Abbildung 1: Schema: Beugung

Die Intensitätsverteilung für die Fraunhofer Beugung kann man über die Fouriertransformation berechnen. Die Verteilung ist proportional zum Betragsquadrat der Fouriertransformation der Transmissionsfunktion  $\tau(x)$ .

$$I = I_0 \cdot \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \tau(x) \cdot e^{-i \cdot k_x \cdot x} dx \right|^2 \quad (4)$$

mit  $k_x = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sin(\theta)$  und die Transmissionsfunktion ist 1 innerhalb der Öffnung und 0 außerhalb.

Für den Einzelspalt erhält man dann folgende Intensitätsverteilung:

$$I(x) = I_0 \cdot \frac{\sin^2(x)}{x^2} \quad \text{mit} \quad x = \frac{\pi \cdot b}{\lambda} \cdot \sin(\theta) \quad (5)$$

wobei  $b$  die Breite des Spaltes ist.

Für einen Mehrfachspalt ergibt sich folgendes Intensitätsmuster:

$$I(x) = I_0 \cdot \frac{\sin^2(x)}{x^2} \cdot \frac{\sin^2(N \cdot y)}{y^2} \quad \text{mit} \quad y = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

mit  $d$  = Spaltabstand und  $N$  = Anzahl der Spalte.

## 5 Interferometer

Nun werden zwei planparallele Plexiglasscheiben senkrecht zum Strahlengang montiert. Man erhält somit einen Fabry-Pérot-Interferometer.

Durch eine erste Linse werden die Strahlen parallelisiert und treffen dann auf die Platten, danach werden sie durch eine zweite Linse wieder zusammengeführt.

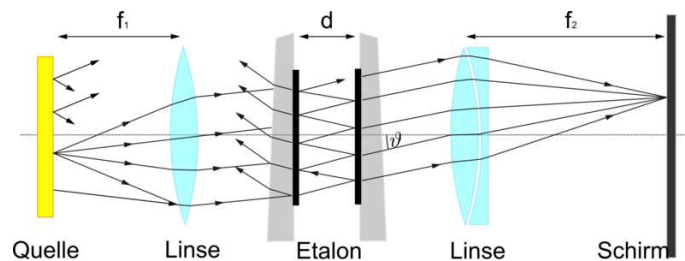


Abbildung 2: Schema: Fabry-Pérot Interferometer <sup>1</sup>

Gelangen die Strahlen nun auf die Plexiglasscheiben wird ein Strahl an beiden Scheiben transmittiert. Ein zweiter Strahl wird, bevor er an der zweiten Scheibe transmittiert wird, zweimal reflektiert. Diese beide Strahlen haben dann einen Wegunterschied  $\Delta s$  und es können somit Interferenzmuster entstehen.

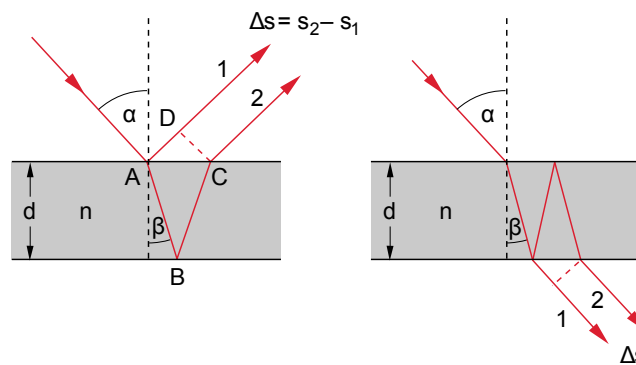


Abbildung 3: Schema: Interferenz an zwei planparallelen Platten

Der Wegunterschied  $\Delta s$  ergibt sich folgendermaßen:

$$\Delta s = n(\overline{AB} + \overline{BC}) - \overline{AD} = \frac{2nd}{\cos(\beta)} - 2d \cdot \tan(\beta) \cdot \sin(\alpha) \quad (7)$$

mit  $\sin(\alpha) = n \sin(\beta)$  :

$$\Rightarrow \Delta s = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} \quad (8)$$

Da wir die Platten senkrecht in den Strahlengang einbringen ist  $\alpha = 0$  und der Brechungsindex für Luft ist ungefähr eins ( $n = 1$ ).

$$\Delta s = 2d \quad (9)$$

Ein **Intensitätsmaxima** ergibt sich nun falls der Wegunterschied gerade ein vielfaches der Wellenlänge ist:

$$m \cdot \lambda = 2 \cdot d \quad (10)$$

Ein Intensitätsminimum ergibt sich, falls der Wegunterschied ein vielfaches der Wellenlänge plus einer halben Wellenlänge ist:

$$\left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda = 2 \cdot d \quad (11)$$

Nun kann man über die Variation von  $d$  und die Beobachtung des Interferenzmusters die Wellenlänge bestimmen.

## 6 Polarisation der Mikrowellenstrahlung

Es soll die Polarisation der Mikrowellenstrahlung zunächst a) ohne zusätzliches Element und b) mit einem in den Strahlengang eingebrachtes "λ/4 - Plättchen" untersucht werden. Dazu wird der Hornempfänger um seine Achse gedreht und die Intensität in Abhängigkeit von seiner Stellung bzw. vom Winkel gemessen.

**a) ohne zusätzliches Element:** Die Polarisation der Mikrowellen ist linear polarisiert. Ist nun der Hornempfänger so ausgerichtet, dass der Empfangsdipol parallel zur Polarisationsrichtung ausgerichtet ist misst man die maximale Intensität. Dreht man den Hornempfänger nun um  $90^\circ$  müsste die Intensität auf null zurück gehen.

Deshalb erwartet man folgende Intensitätsverteilung:

$$I = I_0 \cdot \sin^2(\alpha) \quad (12)$$

**b) mit "λ/4-Plättchen' "**: wird nun das Metallstreifengitter so in den Strahlengang eingebracht, dass es um  $45^\circ$  gegen die Polarisationsrichtung ausgerichtet wird die Mikrowellenstrahlung zirkular bzw. elliptisch polarisiert.

Ist der elektrische Vektor senkrecht zum Metallgitter gerichtet, hat das Gitter keinen Einfluss auf die Wellenausbreitung.

Steht der elektrische Vektor aber nun parallel zum Gitter, so ergibt sich zwischen dem Gitter eine geänderte Phasengeschwindigkeit.

$$v_{ph} = \frac{c}{n} \quad (13)$$

wobei  $n$  die Brechzahl des Systems ist, die kleiner als 1 ist. Der Teil der Welle, dessen E-Vektor parallel zum Gitter ist durchläuft dieses schneller als der senkrechte Anteil. Dadurch kommt es zu einer Phasenverschiebung. Ist die Breite des Gitters nun so, dass eine Phasenverschiebung von  $\lambda/4$  zustande kommt ergibt sich bei der Ausrichtung mit  $45^\circ$  eine zirkular polarisierte



Welle.

Bei einer zirkular polarisierten Welle in z-Richtung ist die x und y Komponente des E-Feldes um  $90^\circ$  verschoben, aber besitzt die Gleiche Amplitude.

Da aber beim Metallgitter das E-Feld der parallelen Komponente stärker gedämpft wird als die senkrechte Komponente sind die Amplituden danach nicht mehr gleich groß und man erhält eine elliptisch Polarisierter Welle.

## 7 Absorptionsvermögen für Zentimeterwellen und sichtbares Licht

Es soll qualitativ das Absorptionsvermögen bei Glas, Plexiglas und Paraffin zwischen Zentimeterwellen und sichtbarem Licht verglichen werden. Dazu wird die Intensität zunächst ohne und dann mit Material gemessen und dann geschaut welcher Teil absorbiert wurde.

Absorptionsgesetz:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-\kappa \cdot l} \quad (14)$$

wobei  $\Phi$  die Strahlungsleistung,  $\kappa$  der Absorptionskoeffizient und  $l$  die Weglänge ist.

## 8 Optischer Tunneleffekt

Es soll die Intensität  $I$  der Strahlung als Funktion des Abstandes  $x$  zur Hypotenuse des Prismas gemessen werden, die bei Totalreflexion an der Hypotenuse noch in das optisch dünnere Medium eintritt.

Für diesen Versuch verwenden wir mit Zucker gefüllte Prismas. Zucker hat für elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz von 10GHz einen Brechungsindex von  $n = 1,5$ .

Damit ergibt sich der Grenzwinkel  $\theta_G$  für Totalreflexion zu:

$$\theta_G = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,5}\right) \approx 42^\circ \quad (15)$$

Das heißt, wir bringen das Prisma so in den Strahlengang ein, dass seine Kantenflächen senkrecht zum Strahl sind. Dadurch kommt es zur Totalreflexion an der Hypotenuse des Prismas.

Die Mikrowellen werden an der Hypotenuse total reflektiert und treten an der anderen Kantenfläche wieder heraus. An der Hypotenuse entsteht durch den optischen Tunneleffekt eine sogenannte evaneszente Welle. Diese Welle hat einen imaginären Wellenvektor und fällt somit exponentiell ab. Da diese Welle nicht propagiert, wird auch keine Energie in diesem Bereich wegtransportiert. Bei Totalreflexion wird also wirklich 100% der Welle reflektiert.

Bringen wir nun ein zweites Zuckerprisma nahe an die Hypotenuse des ersten Prismas ändert sich dies. Die evaneszente Welle fällt exponentiell ab und es gelangt somit ein Teil der Welle in das zweite Prisma. Dort kann sich die Welle nun wieder ausbreiten und transportiert somit Energie. Dadurch wird nun nicht mehr 100% der reflektiert, sondern ein Teil breitet sich im

zweiten Prisma aus.

An der Kante des zweiten Prismas können wir somit eine Intensität  $I(x)$  messen. Diese Intensität hängt exponentiell mit dem Abstand  $x$  der zwei Prismas zusammen.

$$I = I_0 \cdot e^{-m \cdot x} \quad (16)$$

Es soll nun  $\ln(I)$  über  $x$  aufgetragen werden und die Steigung ( $-m$ ) der Geraden bestimmt werden. Daraus ergibt sich die Reichweite, nach der die Intensität auf  $1/e$  abgefallen ist.

$$R = \frac{1}{m} \quad (17)$$

## 9 Quellen

- Abbildung 1 - Das Neue Physikalische; Eichler, Kornfeld, Sahm
- Abbildung 2 - [https://www.univie.ac.at/physikwiki/images/thumb/f/fd/FabryEtalon\\_\(Seitenansicht\).png/500px-FabryEtalon\\_\(Seitenansicht\).png](https://www.univie.ac.at/physikwiki/images/thumb/f/fd/FabryEtalon_(Seitenansicht).png/500px-FabryEtalon_(Seitenansicht).png), 23.05.2012 - 20:17 Uhr
- Abbildung 3 - Demtröder 2, Elektrizität und Optik, 5. Auflage

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P2**

**Mikrowellenoptik**  
**P2-15**

Auswertung von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 24. Mai 2012

## 1 Wellenlängenbestimmung

In dieser Aufgabe haben wir die Wellenlänge der Mikrowellen mit Hilfe einer Metallplatte ausgemessen. Dazu haben wir das Feld einer stehenden Welle vor dieser Metallplatte ausgemessen. Dabei war zu beachten, dass wir nicht zu weit entfernt von der Metallplatte Messwerte aufnehmen, da sich dort keine stehende Wellen mehr ausgebildet haben, sondern die einlaufende Welle dominierte. Den Bereich der stehenden Wellen hat man daran erkannt, da dort die Intensität annähernd konstant war. Gemessen haben wir immer die Spannung, auftragen müssen wir aber  $U^2$ , da  $I \propto U^2$  ist.

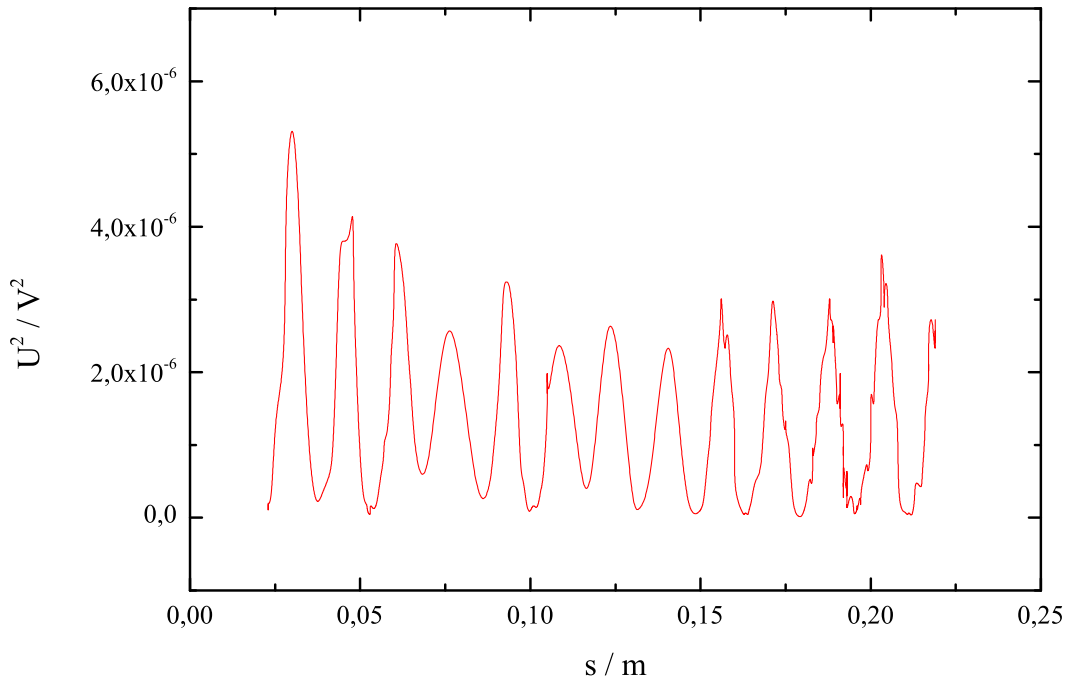


Abbildung 1: Feld einer stehenden Welle

Wir haben nun die Abstände  $d$  der Maxima bestimmt und daraus die Wellenlänge  $\lambda$  berechnet. Da der Abstand zweier Maxima gerade der halben Wellenlänge entspricht ergibt sich die Wellenlänge zu:

$$\lambda = 2 \cdot d \quad (1)$$

In folgender Tabelle sind nun unsere Messwerte und die Wellenlängen aufgeführt.

Berechnen wir nun noch den Mittelwert aus den einzelnen Wellenlängen, so erhalten wir für die Wellenlänge folgenden Wert:

$$\lambda = 3,1 \text{ cm} \quad (2)$$

Auf dem Aufgabenblatt ist ein Wellenlänge von ca. 3cm angegeben. Der von uns bestimmte Wert stimmt also sehr gut mit dem Literaturwert überein.

Maxima /cm	Abstände /cm	Wellenlänge /cm
4,8		
6,1	1,3	2,6
7,6	1,5	3
9,3	1,7	3,4
10,8	1,5	3
12,3	1,5	3
14,1	1,8	3,6
15,6	1,5	3
17,1	1,5	3
18,8	1,7	3,4
20,3	1,5	3

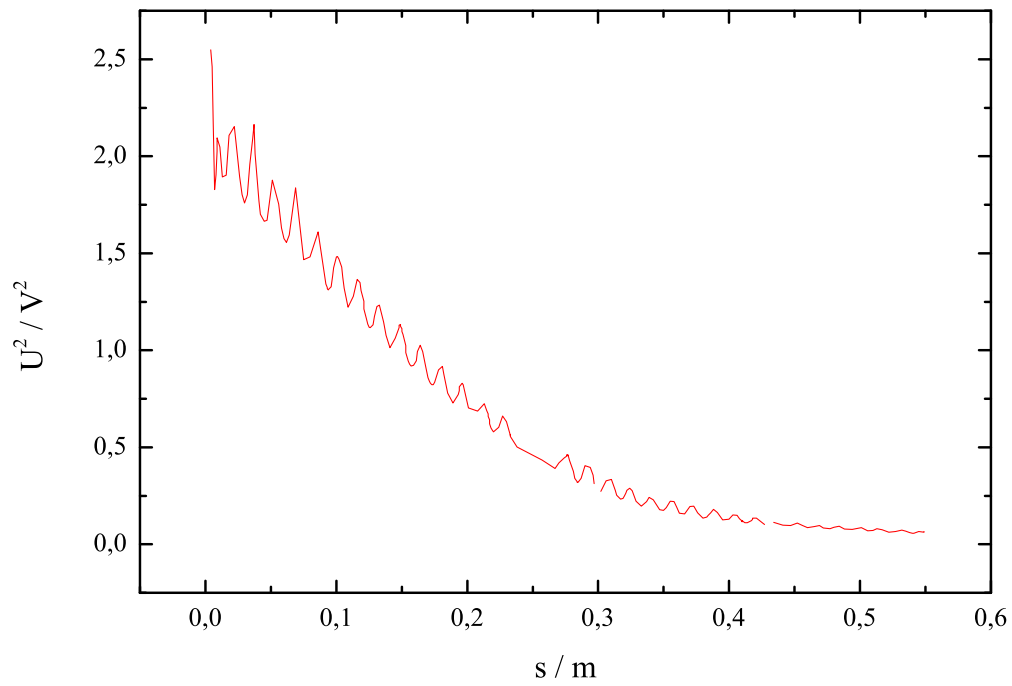
Tabelle 1: Bestimmung der Wellenlänge

## 2 Beobachtung des emittierten Signals

Bei dieser Aufgabe sollte das emittierte Signal beobachtet werden. Dabei haben wir zwei Sachen untersucht. Zum eine die Intensität um zum anderen die Richtcharakteristik des Senders.

Um zu überprüfen, dass die Intensität mit  $\frac{1}{x^2}$  abfällt, haben wir mit Hilfe des Hornempfängers und CASSY die Intensität in Abhängigkeit vom Abstand des Senders gemessen.

Folgendes Schaubild haben wir dabei aufgenommen:

Abbildung 2: Intensitätsabhängigkeit  $U^2$  über  $s$ 

Es soll nun gezeigt werden, dass die Intensität proportional zu  $\frac{1}{x^2}$  ist:

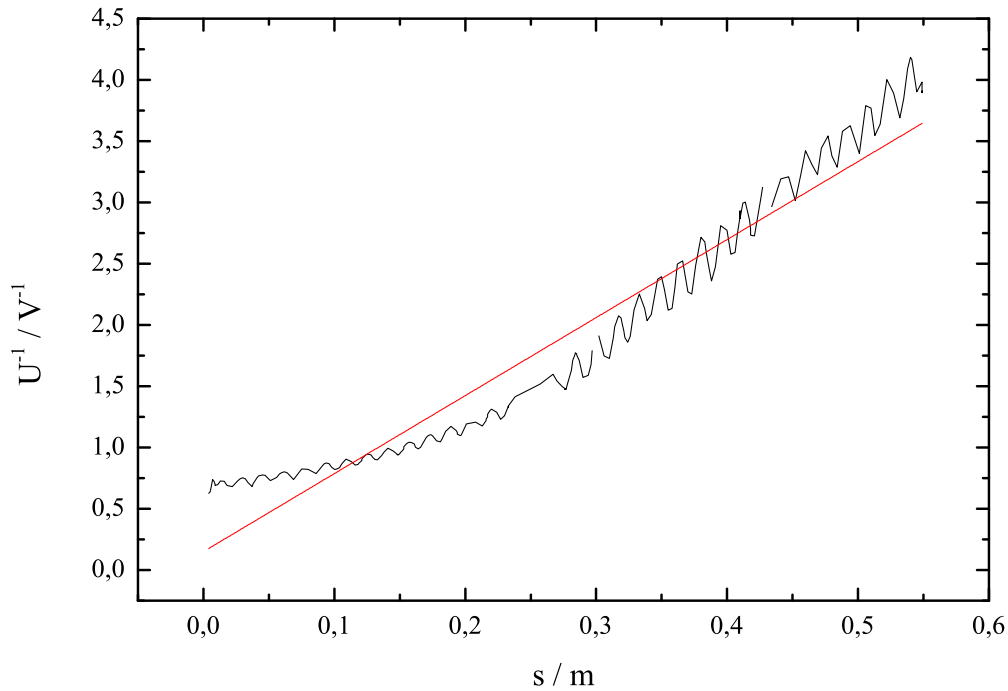
$$U^2 \propto I \propto \frac{1}{s^2} \quad (3)$$

also:

$$U^2 = \frac{c}{s^2} \quad (4)$$

tragen wir nun  $\frac{1}{U}$  über  $s$  auf, so erhalten wir eine Gerade:

$$\frac{1}{U} = \frac{s}{\sqrt{c}} \quad (5)$$

Abbildung 3: Intensitätsabhängigkeit  $\frac{1}{U}$  über  $s$ 

Man sieht, dass das Schaubild am Anfang sehr Gerade ist, dann einen Art Sprung besitzt und dann wieder Gerade ist. Die Gerade durch alle Punkte hat deshalb große Abweichungen. Aber da das Schaubild in den meisten Bereichen sehr gerade aussieht, können wir damit die erwartete  $\frac{1}{s^2}$  Abhängigkeit nachweisen.

Nun wollten wir noch den Winkel bestimmen, unter dem der Sender die Mikrowellen aussendet. Dazu haben wir den Hornempfänger im Abstand  $d$  auf eine Drehbare Schiene mit Radius  $r$  gestellt. Mittels eines Motors konnte die Schiene gedreht werden und somit der Empfänger um einen bestimmten Winkel um den Mittelpunkt bewegt werden. Diesen Winkel ( $\varphi$ ) und die Intensität in Abhängigkeit von diesem Winkel haben wir gemessen. Dabei haben wir den Winkel  $\varphi$  auf der Mittelachse auf null gesetzt. Der Aufbau war nach folgender Skizze aufgebaut:

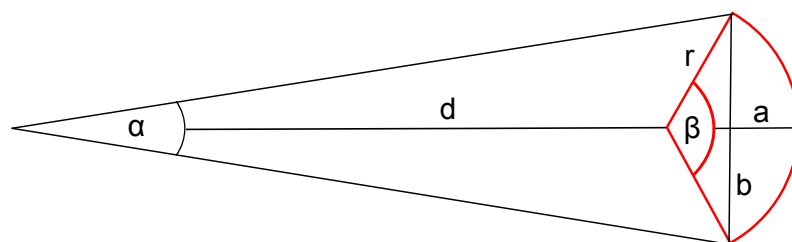


Abbildung 4: Aufbau zur Winkelmessung

Wir erwarten, dass die Intensität bei  $\varphi = 0$  am Größten ist, und nach außen dann abnimmt. Folgendes Schaubild haben wir aufgenommen:

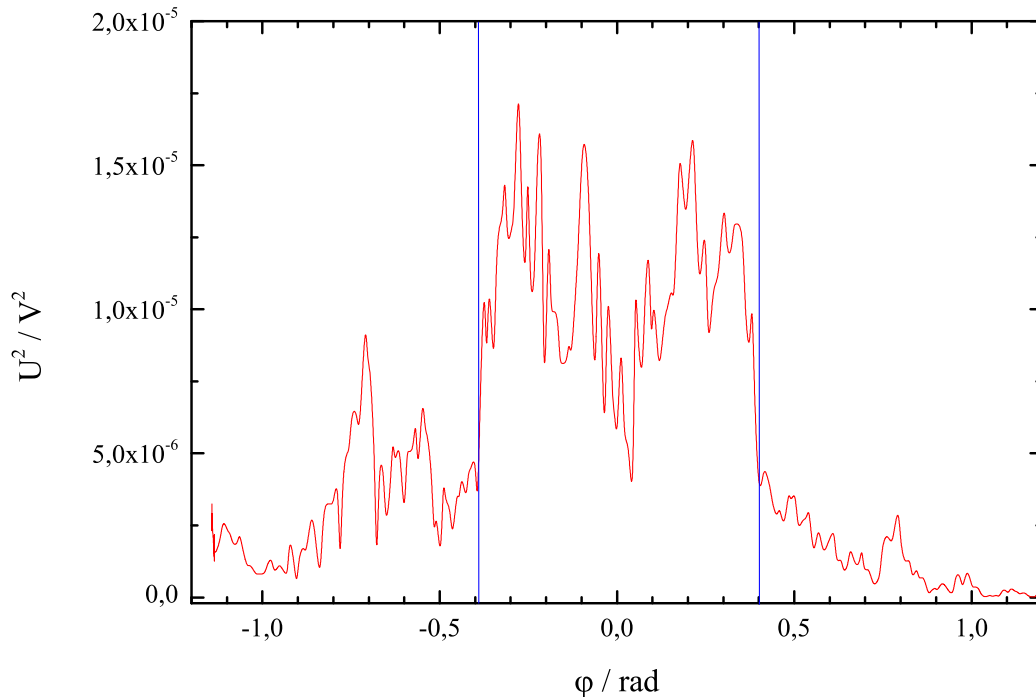


Abbildung 5: Intensitätsabhängigkeit vom Winkel

Man sieht, dass die Intensität in einem bestimmten Bereich annähernd konstant ist, und dann stark abfällt. Der Bereich, indem die Intensität annähernd konstant ist, geht von  $\varphi = -0,38\text{rad}$  bis  $\varphi = +0,4\text{rad}$ . Damit ergibt sich der Winkel  $\beta$  in Abbildung 4 zu:

$$\beta = 0,78\text{rad} = 44,7^\circ \quad (6)$$

Da wir den Radius  $r$  und den Abstand  $d$  gemessen haben, können wir nun den Winkel  $\alpha$  berechnen. Dieser ergibt sich durch Ausnutzen der Winkelfunktionen zu:

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{\sin(\frac{\beta}{2})}{\frac{d}{r} + \cos(\frac{\beta}{2})}\right) \quad (7)$$

Mit  $r = 0,77\text{m}$  und  $d = \dots$  ergibt sich der Abstrahlwinkel  $\alpha$  des Senders zu:

$$\alpha = \dots \quad (8)$$

Man sieht, dass der Abstrahlwinkel recht klein ist und der Sender somit hauptsächlich gerade nach vorne abstrahlt.

### 3 Fresnel-Beugung am Einzelspalt

Zuerst haben wir die Fresnel-Beugung am Einzelspalt untersucht. Dazu haben wir den Einzelspalt mit einer Breite  $b = 3,8\text{ cm}$  vor der Drehscheibe montiert und den Empfänger auf der drehbaren Schiene. Wir können somit die Intensität in Abhängigkeit vom Winkel messen.



Um die Fresnel-Beugung zu bekommen, dürfen wir mit unserem Empfänger nicht zu weit vom Spalt entfernt sein, da wir sonst einen Übergang von Fresnel- zu Fraunhoferbeugung messen. Zu nahe am Spalt konnten wir aber auch nicht messen, da sich sonst kein schönes Schaubild ergab.

Bei einem Abstand von 25,4cm vom Spalt haben wir folgendes Schaubild aufgenommen:

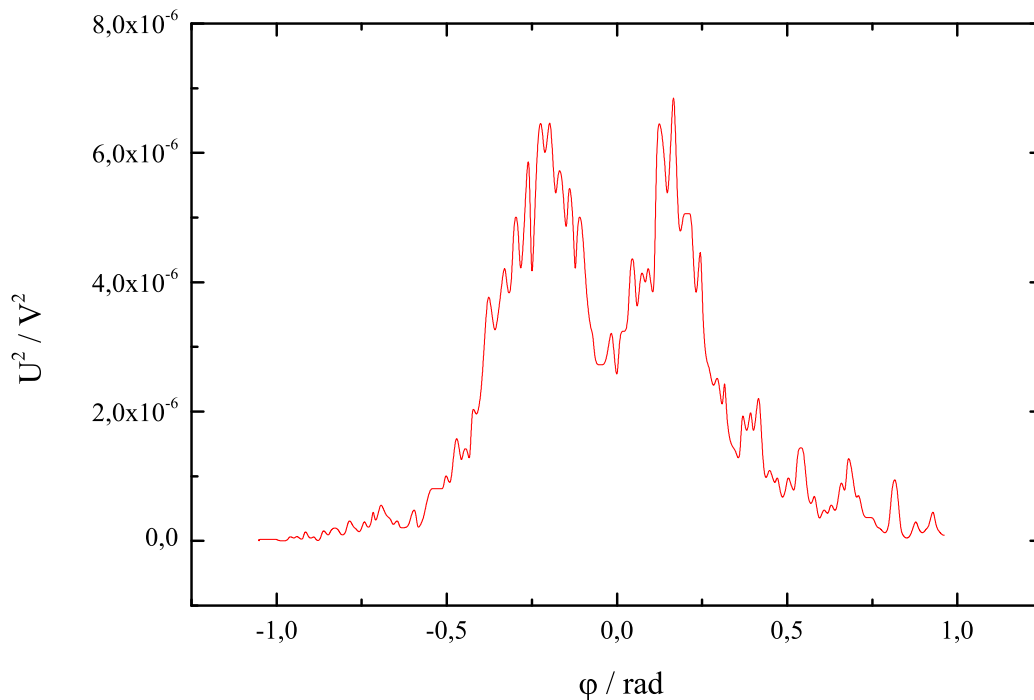


Abbildung 6: Fresnel-Beugung am Einzelspalt

Diese Intensitätsverteilung sieht nicht nach einer reinen Fresnel-Beugung aus, sondern entspricht eher einem Übergang von Fresnel- zu Fraunhofer-Beugung. Um nur die Fresnel-Beugung zu erhalten, hätte man noch näher an den Spalt gehen sollen. Dies war aber nicht möglich, da bei geringerem Abstand keine schöne Intensitätsverteilung mehr messbar war.

## 4 Einzelspalt, Doppelspalt und Gitter

Nun sollte das eines Einzelspalts, Doppelspalts und eines Gitters im Grenzfall der Fraunhofer-Beugung ausgemessen werden. Dazu haben wir zwei Paraffin Linsen verwendet, zwischen denen der Spalt angebracht wird. Zu Beginn wurden die Linsen so aufgebaut, dass die erste Linse ca. 30cm hinter dem Sender steht und die zweite ca. 30cm vor dem Empfänger. Der Empfänger wurde wieder auf der um den Spalt drehbaren Schiene aufgebaut um die Intensität in Abhängigkeit vom Winkel messen zu können.

Zuerst wurde keine Spalt zwischen den Aufbau gebracht und der Empfänger auf 0 rad eingestellt, dort sollte die maximale Intensität messbar sein. Diese Intensität sollte durch leichtes verschieben der Linsen auf einen Wert von ca. 1V gebracht werden. Dies war leider bei uns nicht

möglich. Nach längerem Einstellen der Linsen konnten wir einen maximalen Wert von 0,12V erreichen. Daran erkennen wir schon, dass wir von den Ergebnissen nicht zu viel erwarten können.

Zusätzlich zu den gemessenen Kurven haben wir noch die theoretisch angepassten Kurven in die Schaubilder eingetragen. Die theoretischen Kurven ergeben sich nach Formel (5) und (6) der Vorbereitung. Wobei  $\theta$  der von uns gemessene Winkel in rad ist und die Breite der Spalte beim Einzelspalt, Doppelspalt sowie Gitter  $b = 3,8\text{cm}$  betragen haben. Die Gitterkonstante  $d$  beim Doppelspalt beträgt  $d = 7,6\text{cm}$  und beim Gitter bzw. Fünffachspalt  $d = 6,4\text{cm}$ .

Durch Anpassung von  $I_0$  und der Wellenlänge  $\lambda$  soll die theoretische Kurve der gemessenen Kurve angepasst werden.

### Einzelspalt:

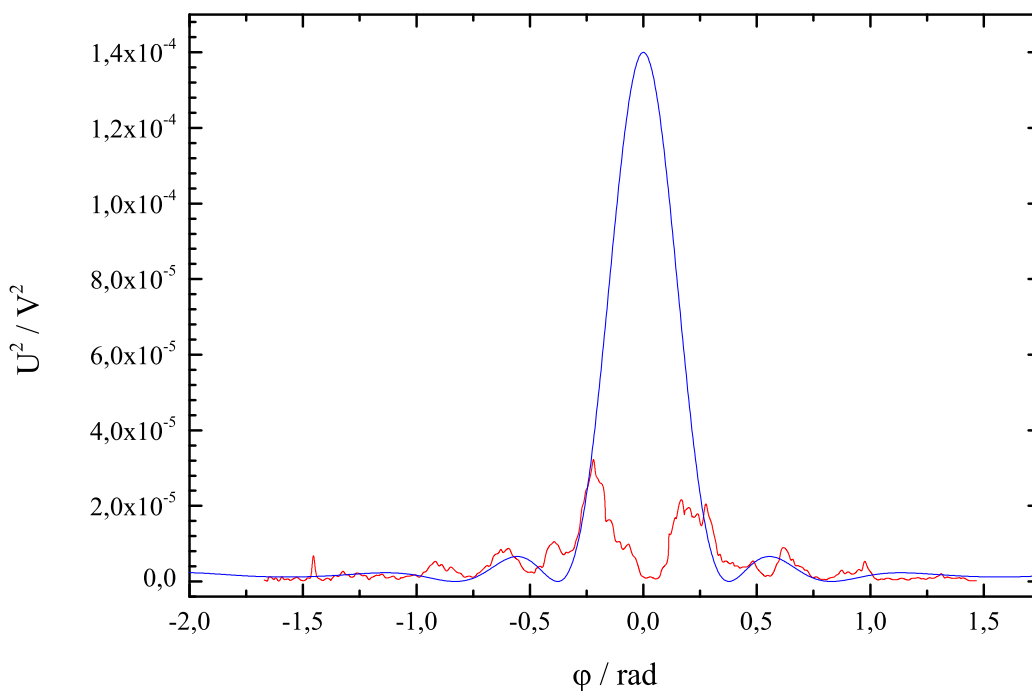


Abbildung 7: Fraunhofer-Beugung am Einzelspalt

Beim Einzelspalt ergab sich die beste Anpassung für die Werte  $I_0 = 14 \cdot 10^{-5} \text{ V}^2$  und  $\lambda = 1,4\text{cm}$ . Die Wellenlänge ist also deutlich kleiner als der theoretische Wert.

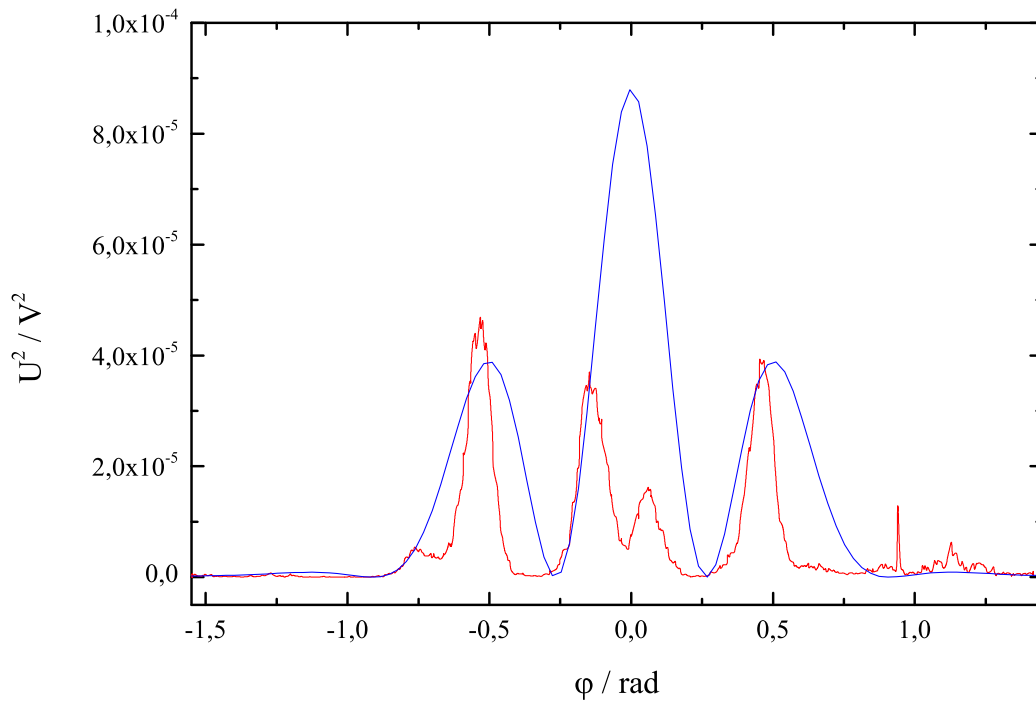
**Doppelspalt:**

Abbildung 8: Fraunhofer-Beugung am Doppelspalt

Für den Doppelspalt ergab sich die beste Anpassung für  $I_0 = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ V}^2$  und  $\lambda = 4\text{cm}$ . Die so bestimmte Wellenlänge liegt also höher als der eigentliche Wert.

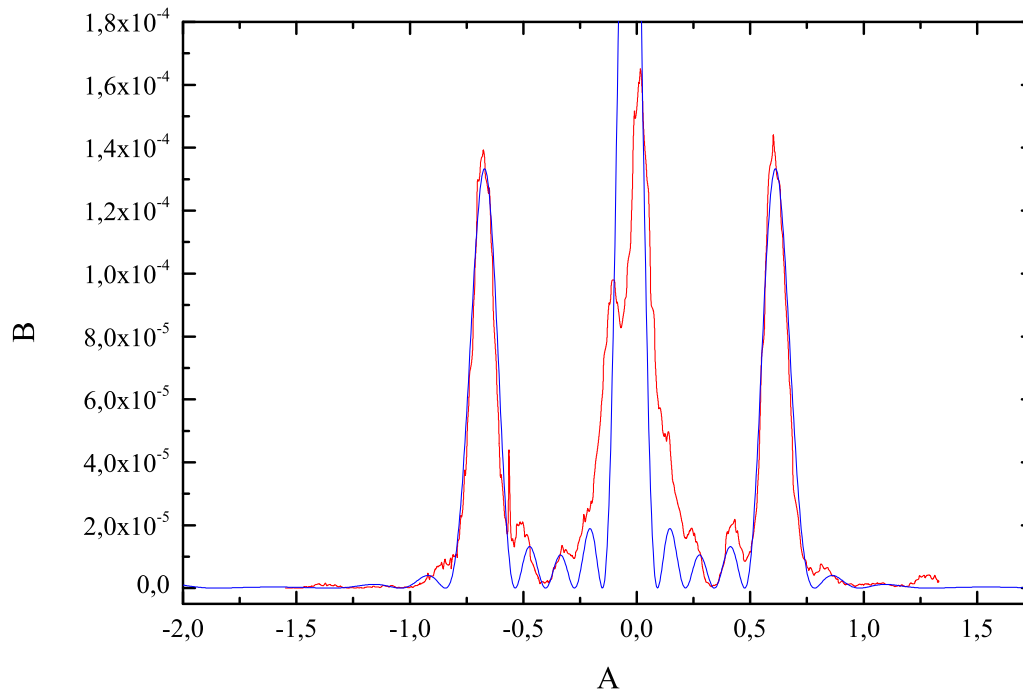
**Gitter:**

Abbildung 9: Fraunhofer-Beugung am Mehrfachspalt

Die beste Anpassung beim Gitter ergab sich für  $I_0 = 13 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2$  und  $\lambda = 4,6 \text{ cm}$ . Die so bestimmte Wellenlänge liegt auch höher als der eigentliche Wert.

Auffällig bei allen drei Graphen ist, dass bei einem Winkel von 0 rad die Intensität ein Minimum hat, obwohl dort eigentlich die höchste Intensität sein sollte. Dies können wir uns leider nicht erklären.

Da die Wellenlängen recht weit vom eigentlichen Wert abweichen, haben wir eigentlich schon erwartet, da die Intensität so gering war.

## 5 Fabry-Pérot-Interferometer

Wir bringen zwei parallele Plexiglasscheiben mit Abstand  $d$  zwischen Sender und Empfänger. Damit ergibt sich ein Fabry-Pérot-Interferometer, wobei bei senkrechtem Einfall für ein Intensitätsmaxima gilt:

$$m \cdot \lambda = 2 \cdot d \quad (9)$$

Eine Plexiglasscheibe haben wir nun befestigt und die andere Scheibe konnten wir bewegen. Damit können wir den Abstand der Scheiben ändern und diesen Abstand messen. Nun haben wir die Intensität in Abhängigkeit des Abstandes gemessen und erhalten folgendes Schaubild.

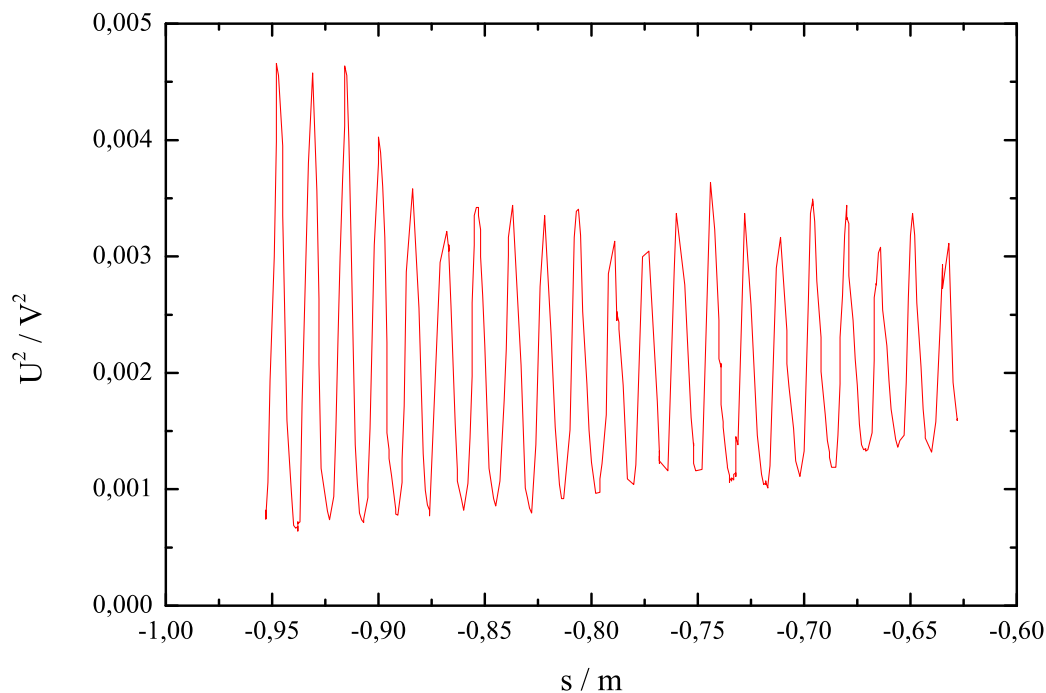


Abbildung 10: Fabry-Pérot-Interferometer

Nun messen wir die Abstände zweier benachbarter Abstände aus und bilden davon den Mittelwert.

Mit folgendem Mittelwert:

$$d = 1,58 \quad (10)$$

Da wir immer die Abstände zweier benachbarter Maxima gemessen haben, setzen wir  $m = 1$  in (9) und erhalten für die Wellenlänge:

$$\lambda = 2 \cdot d = 3,16 \text{ cm} \quad (11)$$

Dieser Wert passt sehr gut mit dem Literaturwert von ca. 3 cm überein.

### Fazit über die Bestimmung der Wellenlänge

Wir haben die Wellenlänge der Mikrowellen nun auf drei verschiedene Arten bestimmt. In Aufgabe 1 haben wir sie über das Feld einer stehenden Welle ausgemessen. In Aufgabe 4 aus den Spektren eines Einzel-, Doppel- bzw. Mehrfachspalt und zuletzt in Aufgabe 5 mit Hilfe eines Fabry-Pérot-Interferometer.

Mit der Methode der stehenden Welle und des Fabry-Pérot-Interferometer haben wir sehr gute Ergebnisse erreicht. Dies liegt daran, dass wir die Wellenlänge relativ direkt durch Ausmessen eines Abstand zweier Maxima bestimmen können. Die Aufbauten sind sehr einfach und somit weniger Fehler anfällig. Beim Fabry-Pérot-Interferometer muss man noch darauf achten, dass

Maxima /cm	Abstände /cm	Wellenlänge /cm
94,8		
93,1	1,7	3,4
91,6	1,5	3
90	1,6	3,2
88,4	1,6	3,2
86,8	1,6	3,2
85,3	1,5	3
83,7	1,6	3,2
82,2	1,5	3
80,6	1,6	3,2
78,9	1,7	3,4
77,3	1,6	3,2
76	1,3	2,6
74,4	1,6	3,2
72,8	1,6	3,2
71,1	1,7	3,4
69,6	1,5	3
68	1,6	3,2
66,4	1,6	3,2
64,9	1,5	3
63,2	1,7	3,4

Tabelle 2: Bestimmung der Wellenlänge

die Mikrowellen möglichst senkrecht auf die Plexiglasplatten treffen. Die beiden Methoden dienen zur direkten Messung der Wellenlänge und haben Aufbauten, die keine zu großen Fehler erwarten lassen und liefern deshalb auch sehr gute Ergebnisse.

Die Methode mit den Spalten ist komplizierter und schwieriger. Man verwendet ein Linsensystem und der Gesamtaufbau ist größer und somit mit mehr Fehlern behaftet.

Man muss zusätzlich darauf achten, dass die Fraunhofer-Beugung nur ein Grenzfall ist, und sich somit nicht sicher sein kann, dass keine Überlagerung von Fresnel- und Fraunhofer-Beugung vorliegt.

Bei uns war es nicht möglich die gewünschte Intensität zu erreichen und somit konnten wir nur sehr geringe Spannungen messen. Dadurch kommen auch immer noch zusätzliche Abweichungen hinzu.

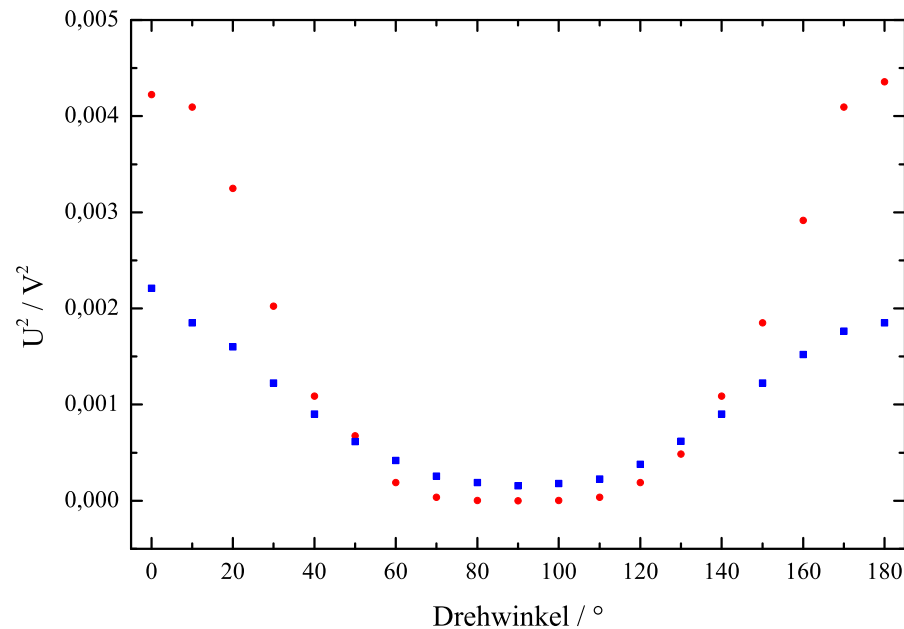
Bei dieser Methode nimmt man ein Spektrum auf und durch Anpassung per Auge einer theoretischen Kurve wird somit auf Umwegen die Wellenlänge bestimmt.

Dies Gründe zeigen, dass mit dieser Methode, mit unserem verwendeten Aufbau keine sehr guten Ergebnisse erreichbar sind. Dies sieht man auch an unseren Messwerten, die zum Teil um

ca. 50% vom Literaturwert abweichen.

Möchte man also die Wellenlänge bestimmen, so kann dies mit einfachen Mitteln mit der Methode der stehenden Welle oder mit Hilfe eines Fabry-Pérot-Interferometer erreicht werden.

## 6 Polarisation der Mikrowellenstrahlung



## 7 Absorptionsvermögen

Wir haben für Glas, Plexiglas und Paraffin das Absorptionsvermögen für Mikrowellen mit sichtbarem Licht verglichen.

Bei sichtbarem Licht haben wir durch das jeweilige Material geschaut und qualitativ geschaut wieviel durchgelassen wird.

Bei den Mikrowellen haben wir die Intensität mit und ohne Material zwischen Sender und Empfänger gemessen und geschaut welche Prozentzahl durchgelassen wurde.

- Paraffin: ein Teil des sichtbaren Lichtes wurde an den dünnen Stellen der Paraffin Linsen noch durchgelassen. Dort war ein helles schimmern zu erkennen. Für das sichtbare Licht ist Paraffin also nahezu undurchlässig. Für Mikrowellen hingegen ist Paraffin fast vollständig durchlässig. Aus diesem Grund sind die Linsen für Mikrowellen auch aus Paraffin gebaut.
- Glas: Sichtbares Licht wird vom Glas so gut wie nicht absorbiert, wird also fast vollständig transmittiert. Die Mikrowellen hingegen werden stark absorbiert.

- Plexiglas: Das sichtbare Licht wird auch kaum vom Plexiglas absorbiert. Es wird fast genau so viel durchgelassen wie bei Glas. Die Mikrowellen werden absorbiert, aber nicht so stark wie bei Glas. Bei der ca. 0,5 cm breiten Scheibe wurden ca. 40% absorbiert.

## 8 Optischer Tunneleffekt

Zunächst haben wir das erste Prisma in den Strahlengang gebracht, so dass eine der kurzen Seite senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Materiewellenstrahlung stand. Nun haben wir an der Hypotenuse, welche nun etwa in einem Winkel von  $42^\circ$  (vgl. Vorbereitung) zur Ausbreitungsrichtung stand, die Intensität mit der Sonde gemessen. Wie es schon erwartet wurde, trat nun eine Totalreflexion statt. Zur Überprüfung, haben wir nun noch auf der zweiten kurzen Seite gemessen. Dort hatten wir 100% der Intensität.

Nun brachten wir das zweite mit Zucker gefüllte Prisma in den Strahlengang. Es wurde mit seiner Hypotenuse an jene des anderen gebracht. Zunächst wurden sie dicht aneinander gebracht, so dass sie sich berührten. Anschließend wurde dieser Abstand mit Klötzchen variiert.

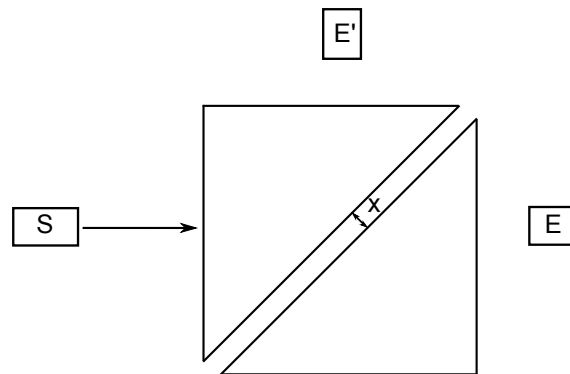


Abbildung 11: Versuchsanordnung

In der folgenden Tabelle ist der Abstand, die Intensität hinter dieser Anordnung (Empfänger E) sowie die die Intensität an der Seite (Empfänger E') aufgelistet.

Abstand $x$ / mm	Intensität (trans.) / V	Intensität / (refl.) / V
0	0,161	0
1	0,155	0,008
2	0,126	0,0044
4	0,0845	0,045
8	0,0535	0,131
16	0,0131	0,454
32	0,0075	0,517

Tabelle 3: Intensität bei verschiedenen Abständen



Wie in der Vorbereitung bereits erwähnt hängt die Intensität welche wir bei E messen können exponentiell vom Abstand  $x$ , den wir variiert haben ab. Daher haben wir:  $\ln(I/I_0)$  über  $x$  aufgetragen.

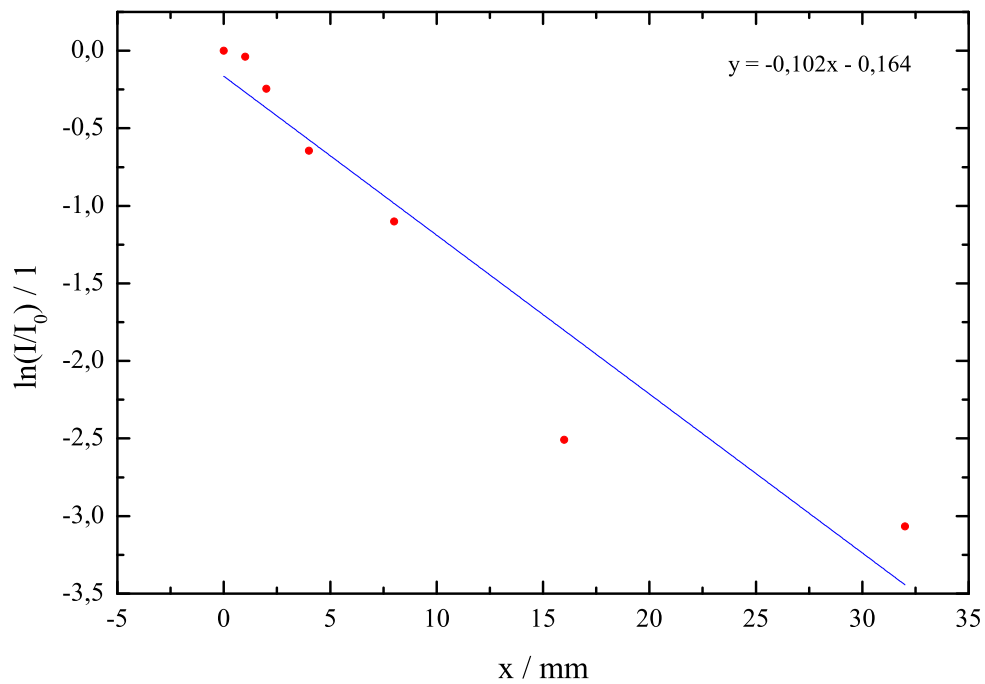


Abbildung 12: exponentieller Abfall der Intensität

Durch eine linearen Regression erhalten wir die Steigung:

$$m = -0,102 \text{ mm}^{-1} \quad (12)$$

Aus dieser Steigung lässt sich nun die Reichweite bestimmen, nach der die Intensität auf  $\frac{1}{e}$  abgefallen ist.

$$\frac{1}{e} \cdot I_0 = I_0 \cdot e^{-0,102 \text{ mm}^{-1} R} \Rightarrow R = \frac{-1}{-0,102} \text{ mm} = 9,8 \text{ mm} \quad (13)$$

**TODO: Vergleich mit Wellenlänge - welcher Wellenlänge?!**