

ANFÄNGERPRAKTIKUM DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK,  
UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

---

**Versuch 19**  
**Mikrowellen**

---

Praktikant/in:

E-Mail:

Betreuer/in:

Datum der Durchführung: 30.11.2023

Testat:

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>4</b>
2.1	Grundlagen und an Wand reflektierte, stehende Welle . . . . .	4
2.2	Hohlraumresonator . . . . .	4
2.3	Brechungsindex der Lichtgeschwindigkeit in Materie . . . . .	5
2.4	Lecherleitung . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>7</b>
3.1	Teil 1: Stehende Wellen . . . . .	7
3.2	Teil 2: Lecherleitung . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1	Bestimmung der Wellenlänge der stehenden Welle in Luft und in der Lecherleitung . . . . .	9
4.2	Theoretisch zu erwartender Wert für Wellenlänge durch Maße des Gunn- Oszillators . . . . .	12
4.3	Brechungsindex von PVC . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>14</b>
5.1	Wellenlängen . . . . .	14
5.2	Brechungsindex . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>15</b>
6.1	Messdaten . . . . .	15
6.2	Formeln für Fehlerrechnung und lineare Regression . . . . .	16
	<b>Literatur</b>	<b>18</b>

---

# 1 Einleitung

Mikrowellen erwärmen Essen, indem im Inneren elektrische Energie aus der Steckdose in elektromagnetische Wellen umgewandelt wird.

Die Wassermoleküle, die sich in jedem Essen befinden, sind elektrische Dipole, da das Sauerstoffatom aufgrund seiner deutlich größeren Elektronennegativität an den Bindungselektronen stärker zieht als die Wasserstoffatome und dadurch negativen und positiven Ladungsschwerpunkt der Moleküle räumlich in Partiaalladungen trennt. Trifft nun die elektromagnetische Welle auf das Essen, werden die Wassermoleküldipole in dem Essen zur Oszillation angeregt und erzeugen aufgrund der entstehenden Reibung Wärme. Diese Wärme erhitzt das Essen. Daher kann auch Eis schlecht in der Mikrowelle aufgetaut werden, da die Wassermoleküle in starrerem Zustand liegen und dadurch kaum zum Schwingen angeregt werden können. Die Mikrowelle selbst erzeugt nämlich anders als ein Backofen keine eigene Wärme. Bei der Auftaufunktion von Mikrowellen werden daher immer nur Schübe von elektromagnetischen Welle alle paar Sekunden ausgesendet, da durch den Ausgleich der Wärmeenergie im Eis mit der Umgebungstemperatur flüssiges Wasser entsteht, dass anschließend anliegende Eisteile durch seine Schwingung auftauen kann.

Da sich allerdings die Energie der Welle vor allem in ihren Bäuchen befindet, welche bei Mikrowellen Zentimeter voneinander entfernt sind, würde bei stehenden Wellen das Essen spürbar inhomogen aufgewärmt. Daher haben Mikrowellen einen rotierenden Glas-teller, sodass das Essen gleichmäßig erwärmt wird.

Das war nur ein Alltagsbeispiel, warum das Verständnis von Mikrowellen und insbesondere stehenden Wellen eine große Bedeutung hat. Allerdings existieren in allen Bereichen der Physik stehende Wellen – sei es in der Quantenmechanik in Form des Welle-Teilchen-Dualismus oder bei der räumlichen Vermessung mancher Home-Soundanlagen zur Optimierung des Klages im ganzen Raum, sodass ein tiefgehendes Verständnis von stehenden Wellen obligatorisch erscheint, wofür dieser Versuch den Grundstein legt.

---

## 2 Theorie

### 2.1 Grundlagen und an Wand reflektierte, stehende Welle

Eine linear polarisierte elektromagnetische Welle mit Ausbreitungsrichtung in  $z$  hat die allgemeine Form

$$\vec{E}_i(z, t) = \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega t - kz) \quad (2.1.1)$$

nach [2, S. 194] mit  $\vec{E}_0 = (E_x, 0, 0)^T$  als der Amplitudenvektor in x-Richtung. Dabei ist  $\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot \frac{c}{\lambda}$  die Kreisfrequenz und  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  der Wellenvektor mit der Wellenlänge  $\lambda$  und der Wellengeschwindigkeit  $c$ . Nun treffe diese elektromagnetische Welle am Ort  $z = 0$  auf eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung in  $\hat{e}_z$  stehende, leitende Metallplatte. Dadurch wird die Welle in  $-z$ -Richtung mit derselben Frequenz reflektiert, sodass sich eine einlaufende Welle  $\vec{E}_i$  und eine auslaufende  $\vec{E}_o$  ergeben, welche sich zu

$$\vec{E} = \vec{E}_i + \vec{E}_o = \vec{E}_{0,i} \cdot \cos(\omega t - kz) + \vec{E}_{0,o} \cdot \cos(\omega t + kz) \quad (2.1.2)$$

überlagern. Da auf der Oberfläche eines idealen Leiters kein elektrisches Feld existiert, kann die überlagerte Welle dort nicht schwingen, weshalb die Amplitude verschwindet, woraus

$$\vec{E}(z = 0, t) = \vec{0} \quad (2.1.3)$$

$$\Rightarrow \vec{E}_{0,i} + \vec{E}_{0,o} = \vec{0} \quad (2.1.4)$$

$$\Rightarrow \vec{E}_0 =: \vec{E}_{0,i} = -\vec{E}_{0,o} \quad (2.1.5)$$

folgt. Dies in Gleichung 2.1.2 einsetzen führt schlussendlich auf

$$\vec{E}(z, t) = 2\vec{E}_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}z\right) \sin\left(\frac{2\pi c}{\lambda}t\right). \quad (2.1.6)$$

Die neue Qualität einer laufenden Welle ist nun, dass es Orte in  $z$  gibt, an denen die Amplitude  $A = 2 \left| \vec{E}_0 \right| \cdot \sin(2\pi z/\lambda)$  zeitlich unabhängig zu 0 wird, die sogenannten *Wellenknoten*, während an den *Wellenbäuchen* an den Orten  $z_B$  stets  $\partial A/\partial z(z_B) = 0$  gilt.

### 2.2 Hohlraumresonator

Stehende Wellen können auch in einem Hohlraumresonator in drei Dimensionen angeregt werden. Nach [4, S. 457] muss die Wellenfrequenz  $\omega$  einer dreidimensionalen stehenden Welle in einem Quader der drei Kantenlängen  $a_i$

$$\omega = \pi c \sqrt{\sum_1^3 n_i^2 a_i^{-2}} \quad (2.2.1)$$

---

betragen, damit die stehende Welle angeregt wird, wobei  $n_i \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$  die zur jeweiligen Achse im Raum zugehörigen Eigenmoden beschreiben.

Wenn eine Fläche des Quaders offen bleibt, läuft die Summe in Gleichung 2.2.1 nur bis 2.

### 2.3 Brechungsindex der Lichtgeschwindigkeit in Materie

Für den Brechungsindex über die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  und der Wellengeschwindigkeit im Material  $c_m$  ergibt sich nach [4, S. 502]

$$n = \frac{c_0}{c_m}. \quad (2.3.1)$$

Nun ist das Material eine Platte der Dicke  $d$ . Die Zeit  $\Delta t$ , welche die Welle benötigt, um das Dielektrikum zu durchdringen, lautet

$$\Delta t = \frac{d}{c_m}. \quad (2.3.2)$$

Da die Wellengeschwindigkeit in dem Material stets kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist, müsste das Licht im Vakuum oder in der Luft mit  $n_{\text{Luft}} \approx 1$  statt  $d$  aus Gleichung 2.3.2 eine größere Strecke  $d + \Delta z$  in derselben Zeit zurücklegen.  $\Delta z$  ist hierbei genau die Verschiebung der Wellenknoten, die beim Durchdringen von elektromagnetischen Wellen durch ein Material entsteht. Gleichsetzen führt auf

$$\frac{d}{c_m} = \frac{d + \Delta z}{c_0}. \quad (2.3.3)$$

Einsetzen von  $c_m = c_0/n$  aus Gleichung 2.3.1 ergeben nach  $n$  umgestellt schlussendlich

$$n = \frac{d + \Delta z}{\underline{\underline{d}}}. \quad (2.3.4)$$

### 2.4 Lecherleitung

Elektromagnetische Wellen können zwar nicht senkrecht zu der Metallplatte schwingen, da dort die transversale Komponente der Welle verschwindet, sie können aber durch einen Leiter geführt werden.

Ein Beispiel hierfür ist die Lecherleitung, die aus zwei parallelen Drähten besteht, welche beide an einem Ende durch ein Drahtstück verbunden sind, welches deutlich kürzer ist als die Wellenlänge der durchlaufenden Wellen. Werden die längeren Drahtteile nun parallel zu der Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Wellen in ein Feld eines Mikrowellensenders gebracht, bilden sich in der Lecherleitung stehende Mikrowellen aus, die eine periodische Spannung und Stromverteilung induzieren. Die Abstände der Wellenbäuche und -knoten der Spannung und Stromverteilung können nun auf einem cm-Lineal abgelesen werden, wenn die Stromverteilung beispielsweise über eine kleine Induktionsspule

---

und die Spannung mit einer Glimmlampe erfasst werden. Am offenen Leiterende beider Drähte befindet sich ein Wellenbauch, an dem Stück, über das die Drähte verbunden sind, ein Wellenknoten [2, vgl. S. 211].

---

## 3 Durchführung

Der Versuch besteht aus zwei Teilen mit verschiedenen Aufbauten. In beiden Teilen wird ein Gunn-Oszillator mit Hornantenne, eine E-Feld-Sonde, eine Gunn-Versorgung mit Verstärker und ein Multimeter sowie zwei HF-Kabel benötigt.

Zunächst wird der Gunn-Oszillator mit dem HF-Kabel an die Gunn-Versorgung angeschlossen. Die E-Feld-Sonde wird auch mit einem HF-Kabel an den Verstärkereingang angeschlossen und das Multimeter wird am Ausgang des Verstärkers angeschlossen.

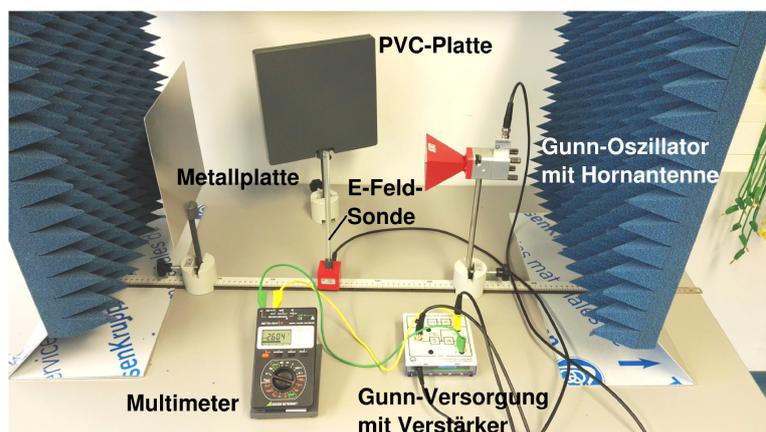
Zum Einstellen der Frequenz wird die E-Feld-Sonde mittig vor die Hornantenne gestellt und die Frequenz der Wellen durch Einstellen der Gunn-Versorgung so geregelt, dass die Sonde eine Maximum misst.

### 3.1 Teil 1: Stehende Wellen

Zunächst wird der erste Versuchsteil aufgebaut, zu sehen in Abbildung 3.1. Es werden dabei zusätzlich zu den bereits genannten Materialien eine Metallplatte und eine PVC-Platte mit Halter benötigt.

Die Metallplatte wird mit einem Halter in 200 mm Entfernung von der Hornantenne senkrecht zu dieser aufgestellt. Mit der E-Feld-Sonde wird ab einem Abstand von 50 mm vor der Hornantenne die Feldstärke gemessen. Dies wird in 5 mm Schritten gemacht, bis 50 mm vor der Metallplatte.

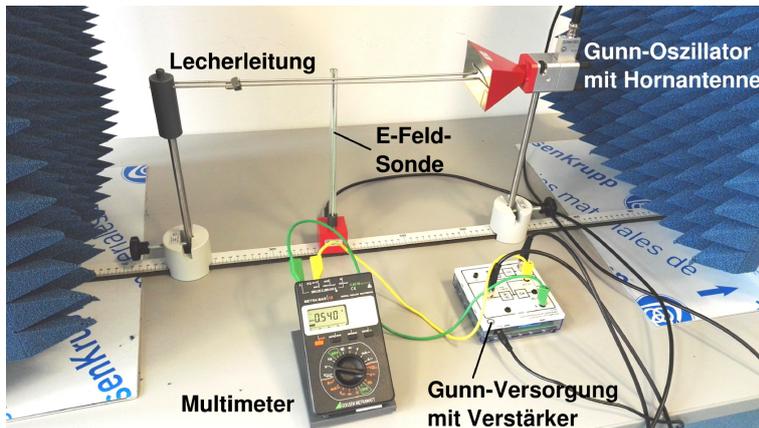
Nach dieser Messung werden an je fünf ermittelten Minima und Maxima genauere Messungen mit 2 mm-Schritten in einem 10 mm-Bereich um diese gemacht. Als letztes wird der Abstand der Metallplatte zur Hornantenne vergrößert, und mit der E-Feld-Sonde ein Minimum der Feldstärke ermittelt. Dieser Abstand wird notiert und anschließend wird die PVC-Platte auf einer Halterung zwischen die E-Feld-Sonde und die Metallplatte gestellt. Durch verschieben der E-Feld-Sonde in Richtung der PVC-Platte wird die verschobene Position des Minimums ermittelt.



**Abbildung 3.1:** Versuchsaufbau des ersten Teils des Versuchs mit Metallplatte und PVC-Platte zum Messen stehender Wellen, Grafik aus [3]

## 3.2 Teil 2: Lecherleitung

Für den zweiten Teil des Versuchs wird zusätzlich zu den anderen Materialien eine Lecherleitung und ein Kurzschlussbügel benötigt, die Metallplatte und PVC-Platte werden nicht mehr gebraucht. Es ist hierbei empfehlenswert, die



**Abbildung 3.2:** Versuchsaufbau des zweiten Versuchs-  
teils, mit Lecherleitung zum Messen der Mikrowellen,  
Grafik aus [3]

Metallplatte aus der Nähe des Aufbaus zu entfernen, da diese die Messungen stören kann.

Der Kurzschlussbügel wird auf der Lecherleitung angebracht und dies wird in der Halterung befestigt. Die Höhe der Hornantenne und der Lecherleitung sind auf das obere Ende der E-Feld-Sonde eingestellt und die Induktionsschleife der Lecherleitung wird in die Hornantenne eingeführt.

Mit der E-Feld-Sonde wird nun in 2mm-Schritten die Feldstärke auf der gesamten Länge der Lecherleitung gemessen.

Dieser Versuch kann durch äußere Faktoren beeinflusst werden, der Bereich vor der Hornantenne sollte deswegen freigehalten werden und nicht benötigte Materialien sollten an anderer Stelle abgelegt werden. Beim Ablesen der Messwerte vom Multimeter, benutzt als Voltmeter, sollte darauf geachtet werden, sich wenig zu bewegen, da dies die Messungen beeinflussen kann. Auch ist es empfehlenswert, das Voltmeter auf einen Messbereich von bis zu 10 V einzustellen anstelle der automatische Messbereichsauswahl.

---

## 4 Auswertung

### 4.1 Bestimmung der Wellenlänge der stehenden Welle in Luft und in der Lecherleitung

Wie in Unterabschnitt 2.1 beschrieben, lautet die Amplitude für die stehende Welle

$$A = 2E_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right). \quad (4.1.1)$$

Hierbei fällt die zeitliche Abhängigkeit der Amplitude weg, da wir die Bäuche einer stehenden Welle betrachten. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die E-Feld-Sonde die gemessene Spannungsamplitude zeitlich mittelt, da ansonsten die angezeigte Spannung sehr schnell zwischen 0 und der tatsächlichen momentanen Amplitudenspannung oszillieren müsste. Dazu findet man das Analogon aus der Elektrizitätslehre, wo die tatsächliche Spannungsamplitude bei  $U_0 \approx 400 \text{ V}$  liegt, während die effektive Spannung, welche man aus der Steckdose erhält, bei  $U_{\text{eff}} \approx 230 \text{ V}$  liegt. Da wir hier nur die Wellenlänge der Mikrowelle betrachten, hat die Höhe der Amplitude keine Relevanz für die weitere Auswertung. Es sei hier lediglich angemerkt.

Weil die angezeigte Spannung proportional zum Betragsquadrat der gemessenen Feldstärke ist, kann die Spannung nur positive Werte anzeigen, weswegen die Fitfunktion nach Gleichung 4.1.1 mit einem Betrag versehen werden muss. Durch mögliche Untergrundbeiträge in der Amplitude wird auch eine Geradengleichung hinzuaddiert.

Weil die elektromagnetische Welle ganz sicher an der Metallplatte einen Wellenknoten hat, werden die Positionswerte der E-Feld-Sonde so normiert, dass sich die Null bei der Metallplatte befindet. Weil die Datenpunkte aber erst bei 50 mm beginnen, wird die Fitfunktion verschoben, sodass sich diese letztlich zu

$$f(z) = \left| 2E_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (z - 0.05 \text{ m})}{\lambda}\right) \right| + c + az. \quad (4.1.2)$$

ergibt. Durch die Normierung der  $z$ -Werte ergibt sich der Fehler von  $z$  nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung 6.2.5 zu

$$\sigma_z = \sqrt{2} \cdot 0,0005 \text{ m}. \quad (4.1.3)$$

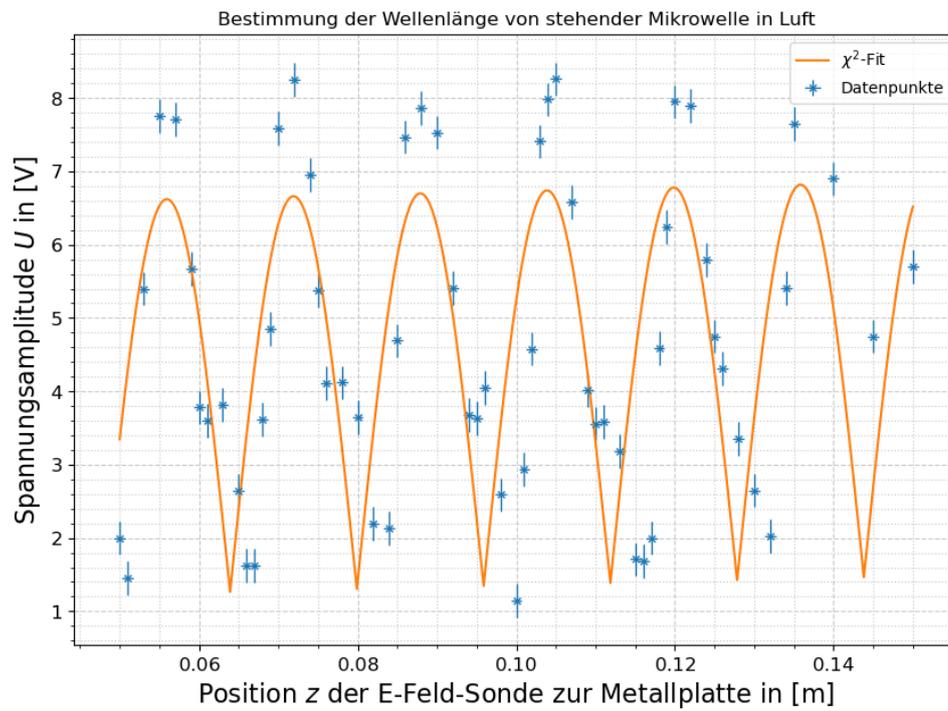
Für die Amplituden gab es auf dem Multimeter eine Schwankung  $s = 0,2 \text{ V}$ . Für das Digitalmultimeter ergibt sich ein Fehler von

$$\sigma_U = 0,01 \cdot \text{größter Messwert} + 3 \cdot \text{kleinster Skalenteil}. \quad (4.1.4)$$

Dann ist der Fehler für die Amplituden

$$\sigma_A = \sqrt{s^2 + \sigma_U^2}. \quad (4.1.5)$$

Das Ergebnis ist in Abbildung 4.1 dargestellt.



**Abbildung 4.1:**  $\chi^2$ -Fit für die stehende Mikrowelle in der Luft, welche an einer Metallplatte reflektiert wird

Die Fitparameter sind in Tabelle 1 dargestellt. Wie zu erkennen, beträgt die Wellenlänge der in der Luft stehenden Mikrowelle

$$\lambda = \underline{\underline{(0,031961 \pm 0,000024) \text{ m}}}$$

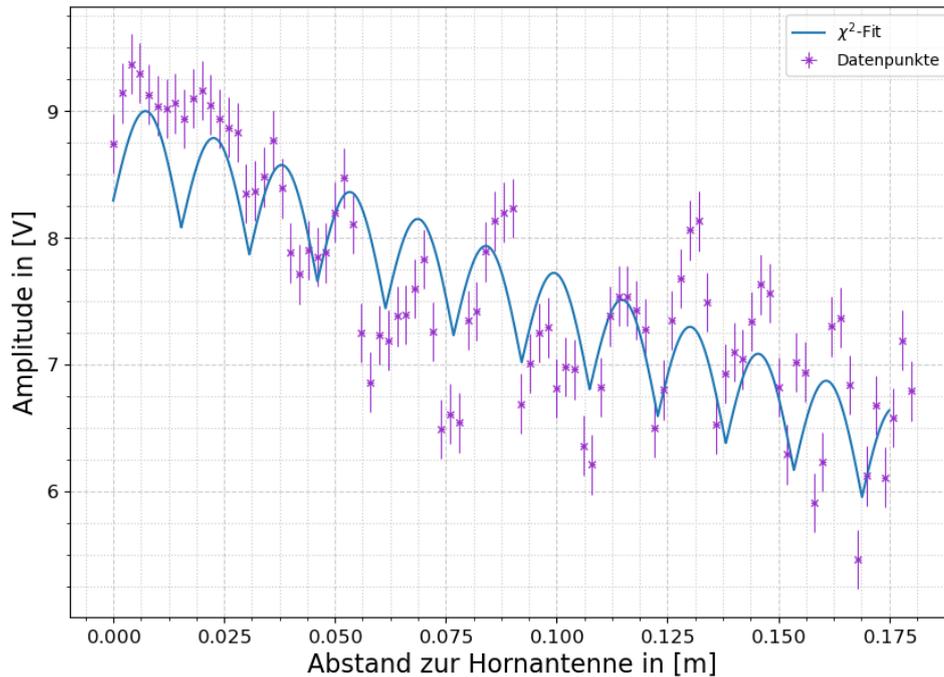
Fitparameter	Werte
$\lambda$	$(0,031961 \pm 0,000024) \text{ m}$
$E_0$	$(2,69 \pm 0,05) \text{ V}$
$c$	$(1,11 \pm 0,13) \text{ V}$
$a$	$(2,5 \pm 1,2) \text{ V/m}$

**Tabelle 1:** Fitwerte des  $\chi^2$ -Fits in Gleichung 4.1.2; wie bereits erläutert, hat  $E_0$  keine physikalische Bedeutung wegen der zeitlichen Mittlung und verkehrter Einheit

Für die an der Lecherleitung gemessenen Werte wurde ein analog hergeleiteter  $\chi^2$ -Fit verwendet, wobei hier die Normierung des Abstands so erfolgte, das sich die Hornantenne bei der Position Null befindet. Dies führt zu folgender Gleichung:

$$f(z) = \left| 2E_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (690 \text{ m} - z)}{\lambda}\right) \right| + c + az. \quad (4.1.6)$$

Der daraus bestimmte Fit ist in Abbildung 4.2 zu sehen.



**Abbildung 4.2:** gemessene Datenpunkte aus dem Aufbau der Lecherleitung mit Fehlern und  $\chi^2$ -Fit

Aus dem Fit kann man nun die Wellenlänge mit Fehler bestimmen. Diese ist hier  $\lambda = (0.03070 \pm 0,00007)$  m. Die anderen Fit-Parameter sind in Tabelle 2 zu finden.

	Wert	Fehler
$E_0$	0,40 V	0,04 V
$c$	8,29 V	0,07 V
$a$	-13,9 V/m	0,5 V/m

**Tabelle 2:** Fitparameter für den  $\chi^2$ -Fit der Messung an der Lecherleitung, bestimmt durch Python

## 4.2 Theoretisch zu erwartender Wert für Wellenlänge durch Maße des Gunn-Oszillators

In Unterabschnitt 2.2 wurde erläutert, dass die stehende Welle in einem offenen Hohlraum, bei dem eine Wand fehlt, was beim Gunn-Oszillator der Fall ist,

$$\omega = \pi c \sqrt{\left(\frac{n_1}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{a_2}\right)^2} \quad (4.2.1)$$

beträgt. Nach Unterabschnitt 2.1 ist die Kreisfrequenz der stehenden Mikrowelle außerdem

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}. \quad (4.2.2)$$

Wir gehen davon aus, dass die am einfachsten zu treffenden Eigenmoden für  $n_1 = n_2 = 1$  angeregt werden. Bei dem Gunn-Oszillator beträgt die Breite des Hohlraums  $a_1 = b = (23 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$  m und die Länge  $a_2 = l = (22 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$  m. Gleichsetzen von Gleichung 4.2.1 und Gleichung 4.2.2 und umstellen nach  $\lambda$  liefert schlussendlich

$$\lambda_{\text{theo}} = 2 \left( \frac{1}{b^2} + \frac{1}{l^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (4.2.3)$$

Für diese Formel ergibt sich ein Fehler nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung 6.2.5 von

$$\sigma_{\lambda_{\text{theo}}} = \sqrt{\sigma_b^2 \left( \frac{2l^3}{(b^2 + l^2)^{3/2}} \right)^2 + \sigma_l^2 \left( \frac{2b^3}{(b^2 + l^2)^{3/2}} \right)^2}. \quad (4.2.4)$$

Das Ergebnis ist

$$\lambda_{\text{theo}} = (3,180 \pm 0,021) \cdot 10^{-2} \text{ m.}$$

---

### 4.3 Brechungsindex von PVC

Zur Berechnung des Brechungsindex wird Gleichung 2.3.4 verwendet. Die Dicke  $d$  der PVC-Platte war vorgegeben mit  $d = 2$  cm. Damit ist nur noch  $\Delta z$  fehlerbehaftet. Da dies die Differenz der  $z$ -Position mit eigenem Fehler von  $\sigma_z = 0,0005$  mm ist, hat  $\Delta z$  den Fehler

$$\sigma_{\Delta z} = \sqrt{2} \cdot 0,0005 \text{ m.} \quad (4.3.1)$$

Damit ergibt sich ein Fehler für Gleichung 2.3.4 von

$$\sigma_n = \sigma_{\Delta z} \cdot \frac{1}{d}. \quad (4.3.2)$$

Für die Verschiebung erhalten wir

$$\Delta z = (1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

und damit einen Brechungsindex für Polyvinylchlorid von

$$n_{\text{PVC}} = 1,80 \pm 0,04.$$

---

## 5 Diskussion

### 5.1 Wellenlängen

Der aus der ersten Messung bestimmte Wert der Wellenlänge liegt mit  $\lambda = (0,031961 \pm 0,000024) \text{ m}$  in einem  $7\text{-}\sigma$ -Intervall zum theoretisch erwarteten Wert. Der durch die Lecherleitung bestimmte Wert hat mit  $\lambda = 0,03070 \pm 0,00007 \text{ m}$  ein  $16\text{-}\sigma$ -Intervall zum theoretischen Wert.

Der theoretische Wert hat mit  $\lambda_{\text{theo}} = (3,180 \pm 0,021) \cdot 10^{-2} \text{ m}$  ein  $7\text{-}\sigma$ -Intervall zur ersten Messung und ein  $6\text{-}\sigma$ -Intervall zur zweiten Messung.

Da die elektromagnetischen Wellen in der Lecherleitung durch eine Materialröhre geführt werden und nicht wie im ersten Versuchsteil sich in der Luft ausbreiten, entstehen Wechselwirkungen der Wellen mit dem Material, wodurch jene gedämpft werden.

Diese Dämpfungserscheinungen treten hier auf, weil die elektromagnetischen Wellen im Material eine stehende Spannungs- und Stromwelle induzieren. Dadurch gibt die elektromagnetische Welle Energie an Strom- und Spannungsverteilung ab. In der Folge wird das elektrische Feld der Welle, das durch die E-Feld-Sonde vermessen wird, mit steigendem Abstand zum Gunn-Oszillator schwächer durch den Energietransfer ins Material. Die E-Feld-Sonde erfasst nicht das elektrische Feld in der Lecherleitung, weil dieses nur im Leiter existiert, sodass die Messwerte nicht vom E-Feld in der Lecherleitung beeinflusst werden. Dadurch entsteht der antiproportionale Zusammenhang zwischen Amplituden und Abstand zum Gunn-Oszillator, der in Abbildung 4.2 zu sehen ist.

### 5.2 Brechungsindex

Der theoretische Wert für den Brechungsindex von PVC ist  $n_{\text{theo}} = 1,54$  nach [1]. Damit liegt der berechnete Wert des Brechungsindex in einem  $7\text{-}\sigma$ -Intervall des theoretischen Werts.

Die Fehler in diesem Versuch sind relativ klein, verglichen mit den Größenordnungen der Messwerte. Dabei sind recht große Fehlerintervalle entstanden. Es ist anzunehmen, dass der Grund dafür die anderen Experimente im Raum sind. Dieser Versuch ist leicht zu beeinflussen durch Bewegung im Raum, da die Permittivität von in der Nähe befindlichen Personen oder Gegenständen die Felder verändert. Am Tag der Durchführung befanden sich vier andere Gruppen mit demselben Experiment im selben Raum. Jeder dieser Aufbauten wird einen Einfluss auf dieses Experiment gehabt haben, welcher in der Fehlerrechnung nur wenig berücksichtigt wurde. Es waren zwar Schwankungen auf dem Voltmeter erkennbar, diese haben jedoch stark variiert im Laufe des Experiments. Es ist also anzunehmen, dass der dafür geschätzte Fehler von  $s = 0,2 \text{ V}$  diese Schwankungen nicht ausreichend berücksichtigt. Für genauere Werte wäre es also sinnvoll, dieses Experiment in kleineren Gruppen und einem größeren Raum durchzuführen.

---

## **6 Anhang**

### **6.1 Messdaten**

---

## 6.2 Formeln für Fehlerrechnung und lineare Regression

Mittelwert (Bestwert, für den die quadratischen Abweichungen minimal werden): wird verwendet, um verschiedene Werte für **dieselbe** gemessene Größe zu mitteln:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.2.1)$$

Gewichteter Mittelwert: wird verwendet, um durch Mitteln der Ergebnisse mehrerer Messvorgänge, abhängig von unterschiedlichen Variablen, eine Größe zu bestimmen:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (6.2.2)$$

Fehler des gewichteten Mittelwertes:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (6.2.3)$$

Gesamtfehler: der Gesamtfehler ist eine Möglichkeit, den statistischen und systematischen Fehler in der Formel zu verbinden und auf einen Fehler zu berechnen; der systematische Fehler ist ein Fehler, der sich beispielsweise durch eine falsche Messkalibrierung durch einen gesamten Versuch, auch bei Wiederholung desselben Experimentes, durchzieht. Der statistische Fehler ist ein zufälliger Fehler, der durch ungenaues Ablesen oder Zufälligkeiten im Versuchsaufbau entsteht:

$$\sigma_{ges} = \sqrt{\sigma_{sys}^2 + \sigma_{stat}^2} \quad (6.2.4)$$

Fehlerfortpflanzung: die zu berechnende Größe  $f$ , die von den zu bestimmenden Größen  $A$  und  $B$  abhängt, kann um weitere Variablen  $C$ ,  $D$ ,  $E$  usw. ergänzt werden, wenn sich die Formel so gestaltet; die Fehler für weitere Variablen werden nach derselben Logik unter der Wurzel hinzugefügt; wurde sie verwendet, wurden die jeweiligen Größen und Ableitungen in die Formel eingesetzt:

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\sigma_A \cdot \frac{\partial f}{\partial A}\right)^2 + \left(\sigma_B \cdot \frac{\partial f}{\partial B}\right)^2} \quad (6.2.5)$$

---

Lineare Regression: die Steigung  $m$  und der Achsenabschnitt  $b$  des linearen Fits werden – wenn benutzt – durch ein Skript in Python berechnet:

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6.2.6)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6.2.7)$$

Fehler für die Fitwerte der linearen Regression:

$$\sigma_m^2 = \frac{n \sum (y_i - b - mx_i)^2}{(n - 2)(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)} \quad (6.2.8)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{\sum x_i^2 \sum (y_i - b - mx_i)^2}{(n - 2)(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)} \quad (6.2.9)$$

---

## Literatur

- [1] ChemicalBook. Polyvinyl chloride, 2019. [https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_DE\\_CB8294089.htm](https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_DE_CB8294089.htm), last access: 02.12.23.
- [2] W. Demtröder. *Experimentalphysik 2 Elektrizität und Optik*. Springer Spektrum, 6. edition, 2013.
- [3] J. Große-Knetter. Praktikum zu Experimentalphysik III: 19 - Mikrowellen, 2020. <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/8269>, last access: 26.11.23.
- [4] D. Meschede. *Gerthsen Physik*. Springer Spektrum, 25. edition, 2015.

---

# Abbildungsverzeichnis

- 3.1 Versuchsaufbau des ersten Teils des Versuchs mit Metallplatte und PVC-Platte zum Messen stehender Wellen, Grafik aus [3] . . . . . 7
- 3.2 Versuchsaufbau des zweiten Versuchsteils, mit Lecherleitung zum Messen der Mikrowellen, Grafik aus [3] . . . . . 8
- 4.1  $\chi^2$ -Fit für die stehende Mikrowelle in der Luft, welche an einer Metallplatte reflektiert wird . . . . . 10
- 4.2 gemessene Datenpunkte aus dem Aufbau der Lecherleitung mit Fehlern und  $\chi^2$ -Fit . . . . . 11

---

## Tabellenverzeichnis

1	Fitwerte des $\chi^2$ -Fits in Gleichung 4.1.2; wie bereits erläutert, hat $E_0$ keine physikalische Bedeutung wegen der zeitlichen Mittlung und verkehrter Einheit . . . . .	11
2	Fitparameter für den $\chi^2$ -Fit der Messung an der Lecherleitung, bestimmt durch Python . . . . .	12