

**VERSUCH NUMMER 53**

## **Mikrowellen auf Hohlleiter**

Irgendjemand

irgend.jemand@tu-dortmund.de

Someone

some.one@tu-dortmund.de

Durchführung: 03.05.2023

Abgabe: 05.05.2023

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>1</b>
2.1 Das Reflexklystron . . . . .	1
2.2 Der Hohlleiter . . . . .	2
2.3 Der Abschwächer . . . . .	2
2.4 Die Gruppen- und Phasengeschwindigkeit . . . . .	2
2.5 Das SWR . . . . .	2
<b>3 Versuchsaufbau und Durchführung</b>	<b>3</b>
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	3
3.2 Messverfahren . . . . .	3
3.2.1 Kalibrierung . . . . .	4
3.2.2 Untersuchen der Moden . . . . .	4
3.3 Phasengeschwindigkeit . . . . .	4
3.3.1 Dämpfung . . . . .	5
3.3.2 Stehwellenverhältnis . . . . .	5
<b>4 Auswertung</b>	<b>5</b>
4.1 Moden . . . . .	6
4.2 Phasengeschwindigkeit . . . . .	8
4.3 Dämpfungsmessung . . . . .	9
4.4 Stehwellenverhältnis . . . . .	10
4.4.1 Direkte Methode . . . . .	10
4.4.2 3dB Methode . . . . .	10
<b>5 Diskussion</b>	<b>10</b>
5.1 Schwingungsmoden der Mikrowellen . . . . .	10
5.2 Phasengeschwindigkeit der Mikrowellen . . . . .	11
5.3 Dämpfung der Mikrowellen . . . . .	11
5.4 Stehwellenverhältnis . . . . .	11
<b>Literatur</b>	<b>11</b>

## 1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen verschiedene Eigenschaften von Mikrowellen untersucht werden. Dazu werden diese durch Hohlraumleiter geschickt und mit verschiedenen Instrumenten untersucht.

## 2 Theoretische Grundlagen

Für die Analyse der Mikrowellen werden zunächst die verwendeten Bauteile und deren Funktionsweise vorgestellt.

### 2.1 Das Reflexklystron

Zur Erzeugung von Mikrowellen wird ein Reflexklystron verwendet. Der Schematische Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

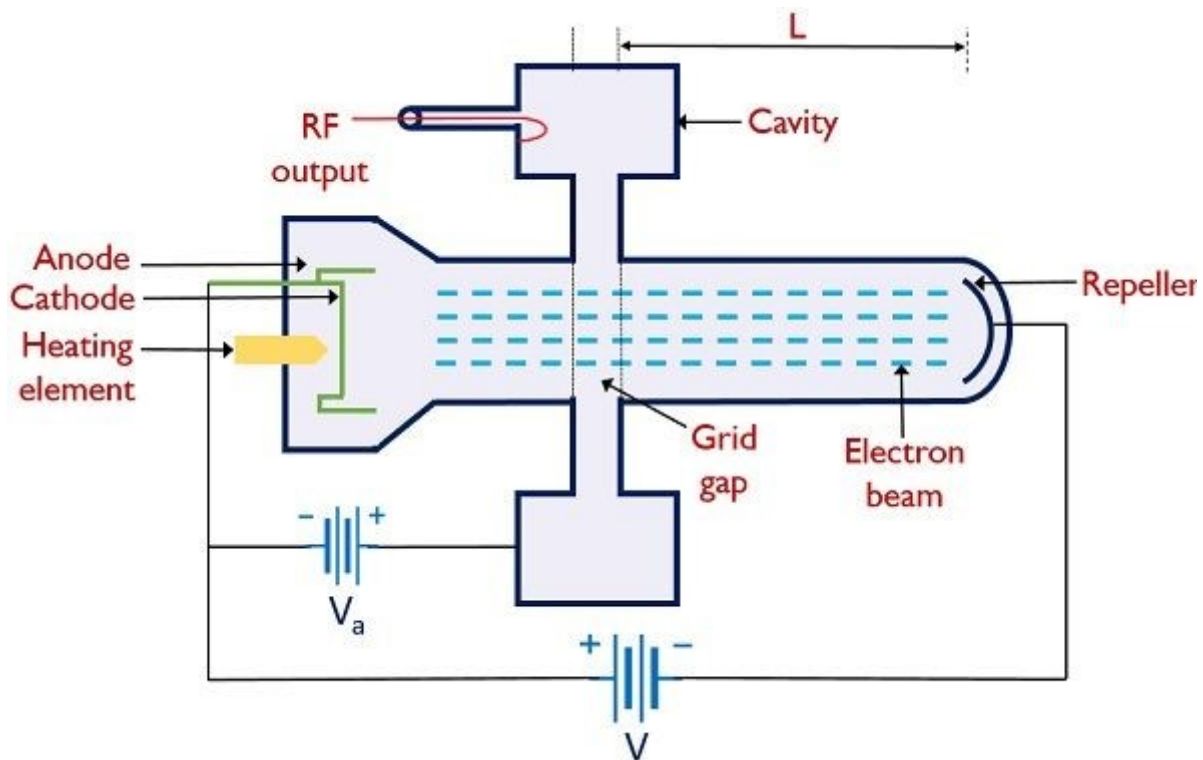


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines typischen Reflexklystrons.[1]

Es liegen drei Spannungen an dem Reflexklystron an. Eine Spannung löst Elektronen aus der Heizspule. Die anderen beiden werden dazu verwendet die Elektronen zu beschleunigen oder abzubremesen. Im Reflexklystron werden die Elektronen zunächst mit einer Spannung beschleunigt. Dann werden diese an einem Reflektor wieder abgebremst bis sie sich durch die erste Spannung wieder beschleunigen. Die Elektronen führen somit eine periodische Schwingung im Reflexklystron durch. Deswegen werden Reflexklystrone auch als Oszillatoren bezeichnet. Wenn die Spannungen zu einander abgestimmt werden, oszillieren die Elektronen so das über Influenz Energie ausgesendet werden kann. Durch die Kopplung an den Ausgang kann so, die aus der Frequenz der Elektronen bestimmte, elektromagnetisch Strahlung ausgesendet werden. Nur bestimmte Kombinationen von Spannungen erlauben diese Oszillation. Eine der Kenngrößen ist die Abstimmempfindlichkeit. Diese lässt sich aus der Bandbreite und der Spannungsdifferenz bestimmen zu

$$F = \frac{f_+ - f_-}{U_+ - U_-}, \quad (1)$$

wobei die Bandbreite als

$$f = f_+ - f_- \quad (2)$$

definiert ist. Dabei beschreiben  $f_{\pm}$  die Frequenz an den beiden äußeren Punkten.

## 2.2 Der Hohlleiter

In diesem Versuch soll es speziell um das Verhalten von Mikrowellen in Hohlleitern gehen. Bei Hohlleitern handelt es sich um eine leitende Hülle. In diesem Aufbau wird ein rechteckiger Hohlleiter, der mit Luft gefüllt ist, verwendet. Dieser wird durch seine Breite  $a$  und seine Höhe  $b$  charakterisiert. Für die Wellen in dem Hohlleiter wird zwischen  $TE_{nm}$  und  $TM_{nm}$  Wellen unterschieden. Diese Benennung meint dabei ob das E- oder das B-Feld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht. Es handelt sich in beiden Fällen um transversal Wellen weshalb diese  $TE_{nm}$  benannt. Die Indizes beschreiben die Anzahl der Maxima in x und y Richtung. So hat die Welle  $TE_{10}$  ein senkrechtes E-Feld mit einem Maximum in x-Richtung und keins in y-Richtung. Zudem kommt es in dem Hohlleiter für die Welle nur bis zu einer bestimmten Wellenlänge zu einem Transport. Für einen rechteckigen Hohlleiter gilt für die Grenzwellenlänge  $\lambda_g = 2a$ . Oberhalb dieser wird keine Leistung transportiert. Die Wellenlänge der  $TE_{10}$  Mode im Hohlleiter wird durch

$$\lambda_H = 2 \cdot d \quad (3)$$

berechnen, wobei  $d$  der Abstand zwischen zwei benachbarten Minima ist. Daraus lässt sich dann mit Hilfe der Gleichung

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_H}\right)^2 + \left(\frac{1}{2a}\right)^2}} \quad (4)$$

berechnet.[2] Für die Frequenz gilt dann  $f = \frac{c}{\lambda_0}$  mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$ .

## 2.3 Der Abschwächer

Ein weiteres Bauteil ist der Abschwächer. Dieser kann die Leistung der ausgesendeten Welle verändern. Diese Dämpfung wird in der logarithmischen Skala dB angegeben. Eine Dämpfung von  $\frac{P_1}{P_2}$  dB kann durch  $10 \log \frac{P_1}{P_2}$  bestimmt werden.

## 2.4 Die Gruppen- und Phasengeschwindigkeit

Die Gruppen- und Phasengeschwindigkeit sind weitere zu untersuchende Eigenschaften der Welle. Die Phasengeschwindigkeit beschreibt dabei die Geschwindigkeit einer einzelnen Phase der Welle. Das bedeutet wird ein Maximum der einhüllenden Funktion festgehalten bewegen sich die Phasen in der einhüllenden mit der Phasengeschwindigkeit. Die Gruppengeschwindigkeit beschreibt hingegen die Geschwindigkeit mit der sich diese einhüllende und damit auch die gesamte Welle bewegt. Da der Hohlleiter in diesem Versuch mit Luft gefüllt ist kann für den Brechungsindex  $n = 1$  genähert werden. Damit ist die Lichtgeschwindigkeit im Hohlleiter gleich der im Vakuum. Allgemein sind die Gruppen- und Phasengeschwindigkeit über die Dispersionsrelation gegeben. Für diesen Versuch wird die Phasengeschwindigkeit der Welle durch

$$c_{Ph} = c \cdot \lambda_H \quad (5)$$

bestimmt.[2]

## 2.5 Das SWR

Das SWR (standing wave ratio) kann für die Wellen auf verschiedenen Wegen bestimmt werden. Allgemein ist es durch

$$S = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \quad (6)$$

gegeben.[2] Es beschreibt also wie die Maxima und Minima der Welle im Verhältnis zu einander stehen. In diesem Versuch wird das SWR einmal direkt und einmal mit der 3 dB Methode bestimmt. Für die 3 dB Methode kann das SWR zu

$$S = \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\pi(d_1 - d_2)}{\lambda_H}\right)^2}} \quad (7)$$

bestimmen.

### 3 Versuchsaufbau und Durchführung

In diesem Abschnitt wird der Versuchsaufbau und die Durchführung des Versuchs beschrieben.

#### 3.1 Versuchsaufbau

Der Versuch ist modular aufgebaut, sodass sich verschiedene Versuchsanordnungen realisieren lassen. Der Grundaufbau, welcher auch zur Kalibrierung verwendet wird, ist in Abbildung 2 dargestellt. Dieser besteht

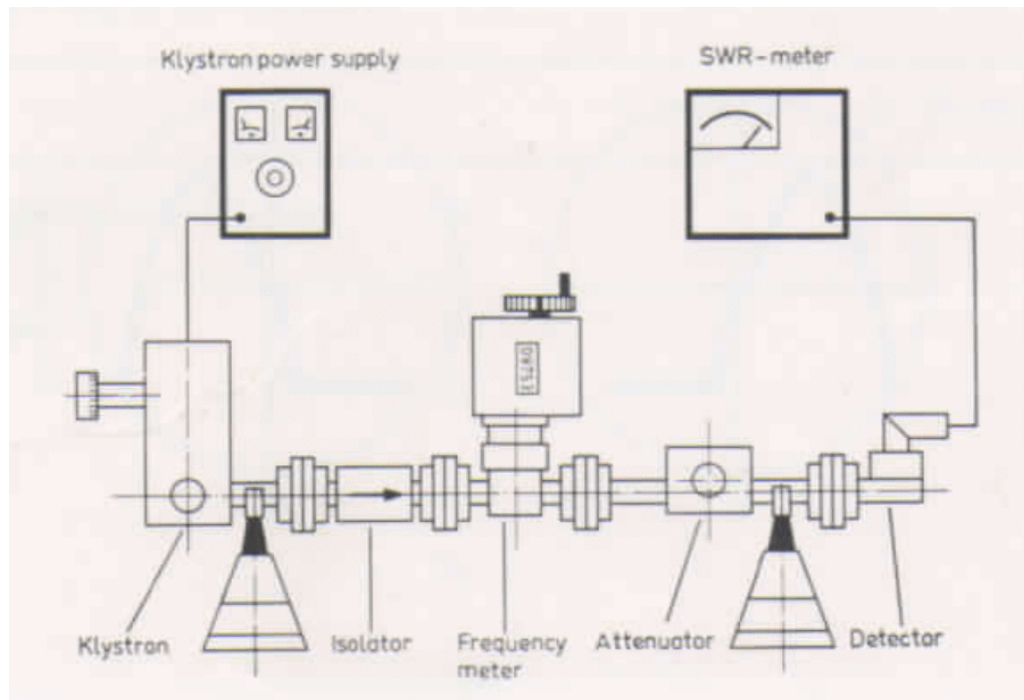


Abbildung 2: Grundaufbau des Versuchs [3].

aus einem Reflexklystron mit Speisegerät, einem Feldverdrängungsisolator, einem Frequenzmesser, einem Dämpfungsglied und einem Detektor. Zur Verfügung stehen außerdem ein Stehwellendetektor, ein Abschlusswiderstand, ein Gleitschraubentransformator und ein Kurzschluss. An die Detektoren kann entweder ein Oszilloskop oder ein SWR-Meter angeschlossen werden. Das Reflexklystron ist ein Mikrowellengenerator, wie er in Unterabschnitt 2.1 beschrieben ist. Der Feldverdrängungsisolator ist ein Bauteil, welches die Mikrowellen in eine Richtung durchlässt, in die andere Richtung jedoch absorbiert. Der Frequenzmesser besteht aus einem koaxialen Resonator, welcher an den Hohlleiter angeschlossen ist. Ist die am Resonator eingestellte Frequenz gleich der, des Signals im Hohlleiter wird dem Hohlleiter Leistung entzogen [3]. Dies kann dann beispielsweise auf dem Oszilloskop abgelesen werden. Das Dämpfungsglied ist ein Bauteil, welches die Leistung der Mikrowellen dämpft. Der Detektor wandelt die Leistung der Mikrowellen in eine Gleichspannung um, welche dann auf dem Oszilloskop oder dem SWR-Meter abgelesen werden kann. Der Stehwellendetektor arbeitet prinzipiell ähnlich wie der Detektor, jedoch sitzt die Diode hier auf einer Schiene, sodass die Leistung der Mikrowellen in Abhängigkeit des Ortes gemessen werden kann. Der Abschlusswiderstand ist ein Widerstand, welcher an das Ende des Hohlleiters angeschlossen werden kann, um die Mikrowellen zu absorbieren [3]. Der Gleitschraubentransformator wirkt fast als ein reiner Blindwiderstand. Dieser besteht aus einem Hohlleiter, in welchem ein Stift sitzt, dessen Tiefe im Hohlleiter über eine Mikrometerschraube eingestellt werden kann [3]. Der Kurzschluss ist ein Bauteil, welches die Mikrowellen reflektiert. Bis auf den Detektor am Ende bleibt der Grundaufbau bei jeder Messung gleich. Der genaue Aufbau der einzelnen Messungen wird im jeweiligen Kapitel beschrieben.

#### 3.2 Messverfahren

Hier werden die einzelnen Messungen beschrieben, welche durchgeführt werden.

### 3.2.1 Kalibrierung

Zuerst müssen die Geräte kalibriert werden. Dafür wird der Grundaufbau aus Unterabschnitt 3.1 verwendet. Das Dämpfungsglied wird auf 40 dB eingestellt, das SWR-Meter wird auf 40 dB, sowie auf 20 Hz eingestellt. Am Speisegerät wird der 1,0 kHz Schalter eingedrückt und eine Spannung von etwa 200 V eingestellt. Dann wird die Auslenkung am SWR-Meter mit dem 1,0 kHz Regler auf maximal eingestellt. Nun wird der Frequenzmesser verstellt, bis der Ausschlag am SWR-Meter zurückgeht. Die nun angezeigte Frequenz ist Schwingungsfrequenz des Klystrons. Mit dem Abstimmknopf am Klystron wird die nun Frequenz auf etwa 9,0 GHz eingestellt. So kann vor jeder Messung der Versuchsaufbau kalibriert werden.

### 3.2.2 Untersuchen der Moden

Im Vergleich zum Versuchsaufbau wird hier das Oszilloskop an den Detektor angeschlossen. Das Dämpfungsglied wird auf 30 dB eingestellt. Das Oszilloskop wird im „x-y“-Modus betrieben. Dabei wird der Horizontaleingang an das Speisegerät angeschlossen und der Vertikaleingang an den Detektor. Am Speisegerät wird der 50 Hz Schalter gedrückt und eine Spannung von etwa 200 V eingestellt. Es werden drei Moden des Klystrons vermessen. Dabei wird je die Mode auf dem Oszilloskop durch Verstellen der Reflektorspannung zentriert. Dann wird mit Hilfe des Frequenzmessers die Frequenz des Signals bestimmt. Außerdem wird bei jeder Mode die Frequenz und die Reflektorspannung in den Schwingungseinsatz-Spannungen gemessen. Alles wird notiert. Bei dem höchsten Modus wird dann eine weitere Messung durchgeführt. Hier wird die Frequenz und die Spannung bei halber Leistung abgelesen und notiert.

### 3.3 Phasengeschwindigkeit

In dieser Messung soll am Ende die Phasengeschwindigkeit der Mikrowellen im Hohlleiter bestimmt werden. Dazu wird der Versuch wie in Abbildung 3 zu sehen ist umgebaut. Anstelle des Detektors wird nun der Stehwellendetektor

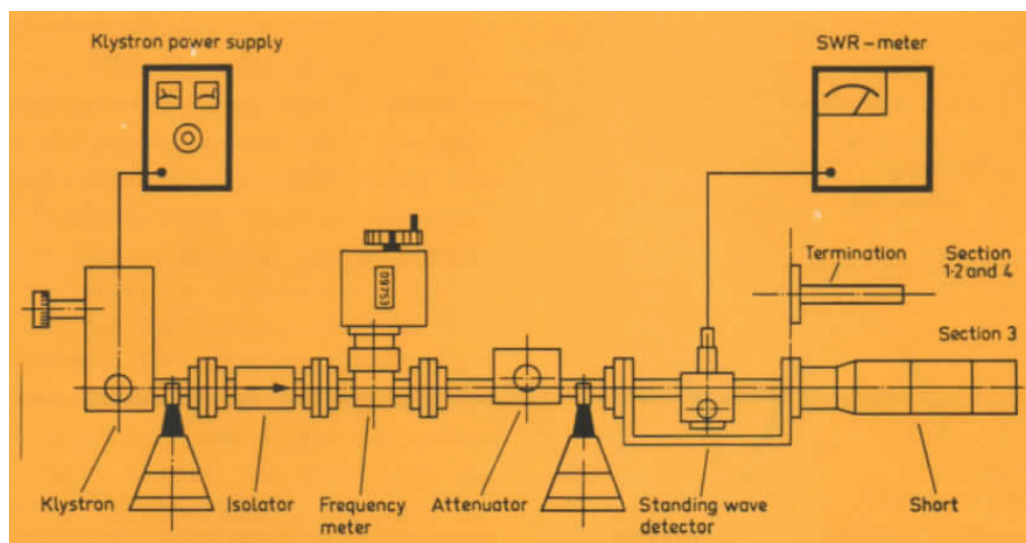


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Phasengeschwindigkeit [3].

in Kombination mit dem Kurzschluss verwendet. Das Dämpfungsglied wird auf 20 dB eingestellt. Das SWR-Meter wird auf 40 dB und 1,0 kHz eingestellt. Dann wird der Aufbau kalibriert, wie in Unterabschnitt 3.2.1 beschrieben. Gemessen wird nun der Abstand zweier Minima beziehungsweise zweier Maxima des Ausschlags auf dem SWR-Meter. Dazu wird die Position des Stehwellendetektors verändert, bis ein Minimum beziehungsweise ein Maximum auf dem SWR-Meter zu sehen ist und dann notiert. Daraus kann dann wie in Unterabschnitt 2.2 und Unterabschnitt 2.4 beschrieben die Phasengeschwindigkeit bestimmt werden.

### 3.3.1 Dämpfung

In dieser Messung soll die Dämpfung der Mikrowellen im Hohlleiter in Abhängigkeit von der Mikrometerschraube des Dämpfungsglieds untersucht werden. So lassen sich die Herstellerangaben auf dem Instrument untersuchen. Der Versuch wird wie in Unterabschnitt 3.3 beschrieben aufgebaut, nur das Anstelle des Kurzschlusses der Abschlusswiderstand verwendet wird. Die Verstärkung des SWR-Meters wird dabei im 40 dB Modus auf den Vollausschlag der unteren decibel Skala eingestellt. Nun wird in 2,0 dB-Schritten auf dem SWR-Meter die Dämpfung eingestellt und die Mikrometereinstellung des Dämpfungsglieds notiert.

### 3.3.2 Stehwellenverhältnis

In diesem Abschnitt werden verschiedene Methoden zur Bestimmung des in Unterabschnitt 2.5 beschriebenen Stehwellenverhältnisses beschrieben. Der Versuch wird wie in Abbildung 4 zu sehen aufgebaut. Es kommt also hinter dem

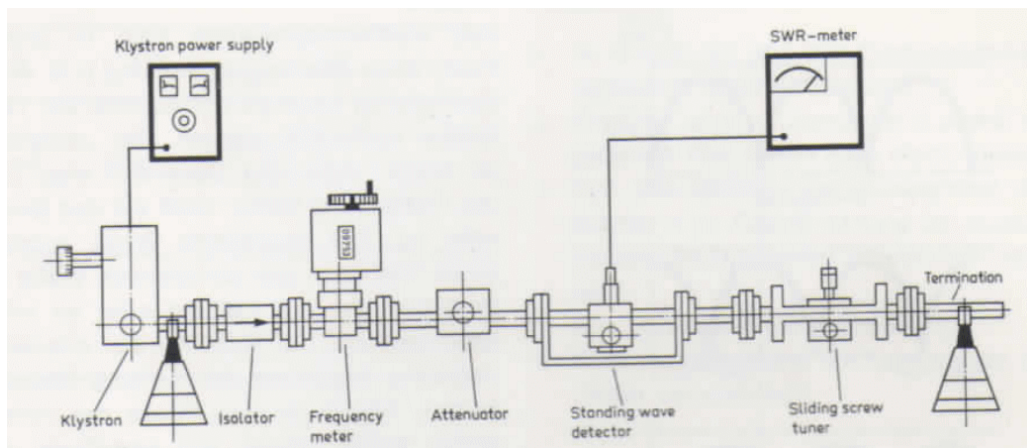


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Stehwellenverhältnisses. [3].

Stehwellendetektor der Gleitschraubentransformator und der Abschlusswiderstand. Das Dämpfungsglied wird auf 20 dB eingestellt. Das SWR-Meter wird auf 50 dB und 20 Hz eingestellt. Die Sonde des Gleitschraubentransformators ist dabei ganz herausgedreht. Der Aufbau kann nach Unterabschnitt 3.2.1 kalibriert werden.

**Direkte Methode** Um das Stehwellenverhältnis direkt zu bestimmen wird bei den Sondentiefen 0 mm, 3,0 mm, 5,0 mm, 7,0 mm und 9,0 mm je ein Maximum auf der oberen Skala (Wert 1.0) des SWR-Meters gesucht, indem die der Stehwellendetektor verschoben wird. Dann wird ein Minimum gesucht und das Stehwellenverhältnis direkt am SWR abgelesen.

**3dB Methode** Die 3dB Methode wird nur bei der Sondentiefe von 9,0 mm durchgeführt. Hier wird auf der Messleitung nach einem Minimum am SWR-Meter gesucht. Dann wird die Verstärkung des SWR-Meters so angepasst, dass auf der unteren Skala 3,0 dB beträgt. Nun wird rechts und links vom Minimum nach den Positionen gesucht, welche für Maximalausschlag sorgen. Diese werden notiert. Dann wird der Gleitschraubentransformator und der Abschlusswiderstand gegen den Kurzschluss getauscht. Und der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Minima wird gemessen. Daraus kann dann das Stehwellenverhältnis bestimmt werden.

## 4 Auswertung

Hier werden die Messergebnisse, der in Abschnitt 3 beschriebenen Versuche, ausgewertet. Es sei dabei darauf hingewiesen, dass alle Berechnungen, Graphen sowie das Bestimmen der Unsicherheiten mit Python 3.8.8 und entsprechenden Bibliotheken<sup>1</sup> durchgeführt werden.

<sup>1</sup>Numpy [4], Uncertainties [5] and Matplotlib [6]

## 4.1 Moden

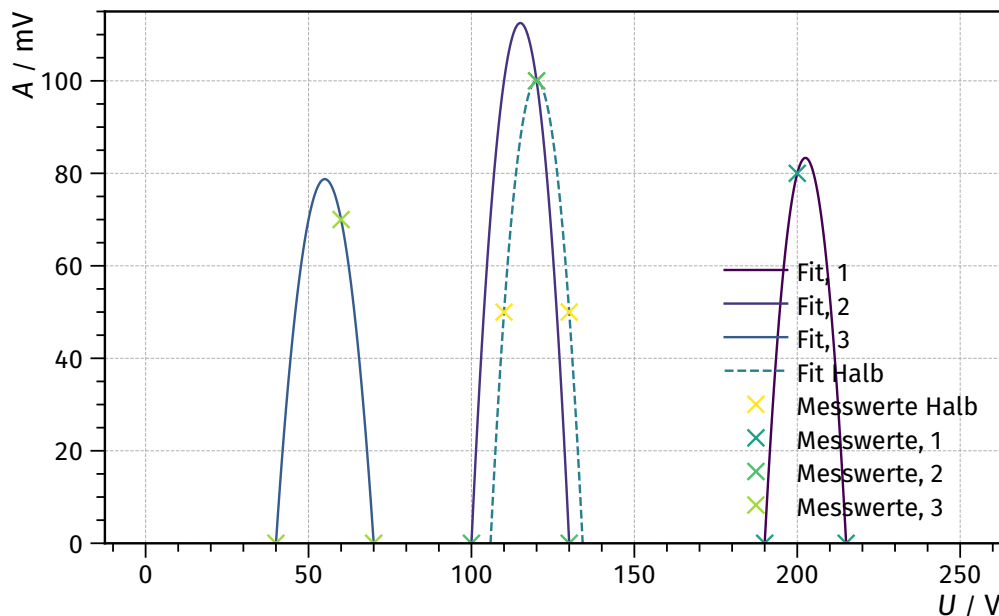
In diesem Teil der Auswertung werden die Moden der Mikrowelle untersucht.

**Tabelle 1:** Daten aus der Messung der Moden des Hohlleiters mit den Randpunkten beim Nullpunkt.

$U_{\text{ref, peak}} / \text{V}$	$f_{\text{peak}} / \text{MHz}$	$A / \text{mV}$	$U_{0,-} / \text{V}$	$f_{0,-} / \text{MHz}$	$U_{0,+} / \text{V}$	$f_{0,+} / \text{MHz}$
200	9000	80	190	9000	220	9100
120	9000	100	100	9000	130	9100
60	9100	70	40	9000	70	9100

**Tabelle 2:** Daten aus der Messung der Mode bei 120 V mit den Randpunkten bei halber Amplitude.

$U_{\text{ref, peak}} / \text{V}$	$f_{\text{peak}} / \text{MHz}$	$U_{1/2,-} / \text{V}$	$f_{1/2,-} / \text{MHz}$	$U_{1/2,+} / \text{V}$	$f_{1/2,+} / \text{MHz}$
120	9000	110	9000	130	9000



**Abbildung 5:** Darstellung der verschiedenen Moden.

Für die Moden ergeben sich die Bandbreiten nach (2) zu

$$f_1 = (30 \pm 7) \text{ MHz}, f_{2,1} = (53 \pm 7) \text{ MHz}, f_{2,2} = (46 \pm 7) \text{ MHz}, f_3 = (91 \pm 7) \text{ MHz}.$$

Dass die verschiedenen Wege an die Bandbreite von Mode 2 zu kommen, innerhalb der Unsicherheiten liegen lässt grobe Messfehler bei Mode 2 ausschließen. Die elektrische Abstimmempfindlichkeit (1) ergibt sich für die Moden zu

$$F_1 = (1,2 \pm 0,4) \frac{\text{MHz}}{\text{V}}, F_{2,1} = (1,8 \pm 0,5) \frac{\text{MHz}}{\text{V}}, F_{2,2} = (2,3 \pm 0,9) \frac{\text{MHz}}{\text{V}}, F_3 = (3,0 \pm 0,8) \frac{\text{MHz}}{\text{V}}.$$

Die Fehler der Frequenzen wurden mit  $\Delta f = 5,0 \text{ MHz}$  und die Fehler der Spannungen mit  $\Delta U = 5,0 \text{ V}$  abgeschätzt. Die Fehler der Bandbreiten ergeben sich dann nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung nach

$$\Delta f(f_+, f_-) = \sqrt{(\Delta f_+)^2 + (\Delta f_-)^2}.$$



Die Fehler der elektrischen Abstimmempfindlichkeiten entsprechend nach

$$\Delta F(U_+, U_-, f_+, f_-) = \sqrt{\left(\frac{f_+ - f_-}{(U_+ - U_-)^2}\right)^2 \cdot ((\Delta U_+)^2 + (\Delta U_-)^2) + (\Delta f_+)^2 + (\Delta f_-)^2}.$$

## 4.2 Phasengeschwindigkeit

**Tabelle 3:** Daten der Position der Minima beziehungsweise Maxima.

$d_1$ / mm	$d_2$ / mm
57	81
68	93

Aus den Werten der Position der Minima beziehungsweise Maxima aus Tabelle 3 wird zuerst der Abstand dieser berechnet. Es ergibt sich als mittlerer Abstand  $(24,65 \pm 0,35)$  mm. Der Mittelwert wurde dabei mit der Formel

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

bestimmt und die Standardabweichung mit

$$s = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}.$$

Die Hohlleiterwellenlänge  $\lambda_H$  berechnet sich nach (3) zu  $\lambda_H = (49,3 \pm 0,7)$  mm. Daraus lässt sich dann über die Formel (4) die freie Wellenlänge  $\lambda_0 = (33,52 \pm 0,22)$  mm berechnen. Der Fehler ergibt sich nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung über

$$\Delta\lambda_0(\lambda_H, a) = \sqrt{\left(\frac{2}{a^3\left(\frac{4}{\lambda_H^2} + \frac{1}{a^2}\right)^{\frac{3}{2}}}\right)^2 \cdot (\Delta a)^2 + \left(\frac{8}{\lambda_H^3\left(\frac{4}{\lambda_H^2} + \frac{1}{a^2}\right)^{\frac{3}{2}}}\right)^2 \cdot (\Delta\lambda_H)^2}.$$

Die Grenzwellenlänge ergibt sich wiederum, wie in Unterabschnitt 2.2 beschrieben als das doppelte der Hohlleiterbreite  $a = (22,860 \pm 0,046)$  mm [3] zu  $\lambda_{\text{grenz}} = (45,72 \pm 0,09)$  mm. Die Frequenz ergibt sich dann ebenfalls wie in Unterabschnitt 2.2 erläutert zu  $f = \frac{c_0}{\lambda_0} = (8,95 \pm 0,06)$  GHz, wobei die Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  hier als Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $c_0 \approx 3,0 \cdot 10^8$  m/s) angenommen wird.  $c_{\text{ph}}$  berechnet sich nach (5) zu

$$c_{\text{ph}} = (4,412 \pm 0,034) \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 1,5c_0,$$

mit dem Fehler

$$\Delta c_{\text{ph}}(\lambda_H, f) = \sqrt{\lambda_H^2 (\Delta f)^2 + f^2 (\Delta\lambda_H)^2}.$$

### 4.3 Dämpfungsmessung

Die gemessene Dämpfung ist in Tabelle 5a aufgelistet und wird mit der von dem Hersteller angegebenen Dämpfung verglichen. Dazu wurden Punkte auf der Grafik des Herstellers abgelesen. Diese sind in Tabelle 6a aufgelistet.

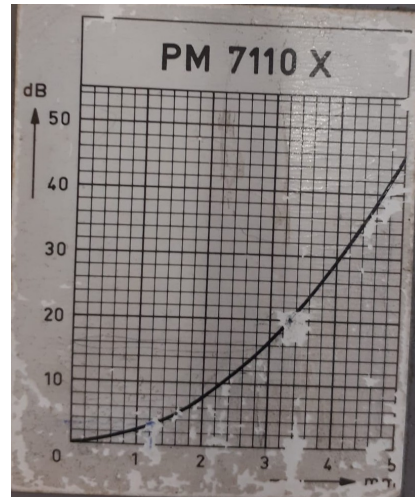
**Tabelle 4:** Messdaten und Herstellerdaten zur Dämpfung.

**(a)** Messdaten zur Dämpfung.

$P$ / dB	$m$ / mm
0	2,0
2,0	2,2
4,0	2,4
6,0	2,6
8,0	2,8
10	3,0

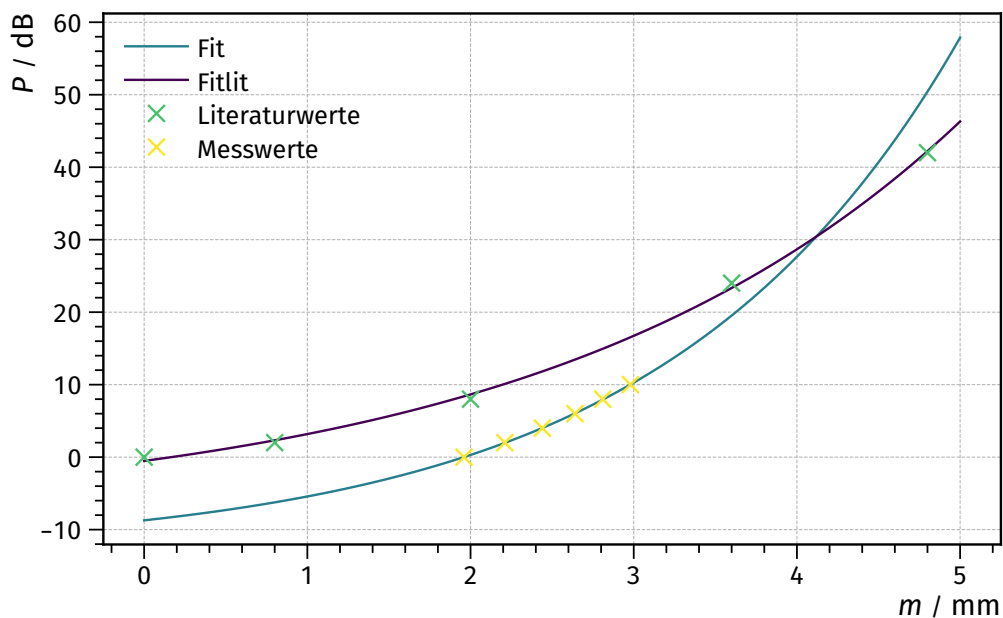
**(a)** Abgelesene Herstellerdaten.

$P$ / dB	$m$ / mm
0	0
2,0	0,80
8,0	2,0
24	3,6
42	4,8



**Abbildung 6:** Herstellerangaben zur Dämpfung.

Durch die jeweiligen Punkte wird nun ein exponentieller Fit  $P(m) = a * \exp(b * m) + c$  gelegt und diese werden dann in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7:** Dämpfung Plot.

Hier fällt auf, dass die Werte nicht besonders gut passen. Mehr dazu in Unterabschnitt 5.3. Auch die Parameter des

Fits der Messdaten

$$a = (4,4 \pm 0,8) \text{ dB} \quad (8)$$

$$b = (0,55 \pm 0,04) \frac{1}{\text{mm}} \quad (9)$$

$$c = (-13,2 \pm 1,3) \text{ dB} \quad (10)$$

sind sehr unterschiedlich zu den Parametern des Fits der Herstellerdaten:

$$a = (7,8 \pm 1,8) \text{ dB} \quad (11)$$

$$b = (0,39 \pm 0,04) \frac{1}{\text{mm}} \quad (12)$$

$$c = (-8,3 \pm 2,3) \text{ dB} \quad (13)$$

#### 4.4 Stehwellenverhältnis

In diesem Abschnitt wird das Stehwellenverhältnis (SWR) bestimmt. Dazu wird die direkte Methode und die 3dB Methode verwendet. Das Messverfahren ist in Unterunterabschnitt 3.3.2 beschrieben.

##### 4.4.1 Direkte Methode

Die mit der direkten Methode gemessenen Werte sind in Tabelle Tabelle 7 aufgelistet.

**Tabelle 7:** Daten aus der Messung des Standwellenverhältnisses.

$t / \text{mm}$	SWR
0	1,0
3,0	1,2
5,0	1,6
7,0	2,8
9,0	$\infty$

##### 4.4.2 3dB Methode

Die bei der 3dB Methode gemessenen Werte sind in Tabelle Tabelle 8 aufgelistet.

**Tabelle 8:** Daten der Messung des Standwellenverhältnisses mit der 3db Methode.

$d_1 / \text{mm}$	$d_2 / \text{mm}$	$\min_1 / \text{mm}$	$\min_2 / \text{mm}$
100	110	88	110

Daraus lässt sich das Standwellenverhältnis über die Formel (7) berechnen, wobei die Hohlleiterwellenlänge wie in Unterabschnitt 4.2 aus dem Abstand der Minim bestimmt wird. Es ergibt sich  $\text{SWR} = 8,199 \pm 0,028$ .

## 5 Diskussion

### 5.1 Schwingungsmoden der Mikrowellen

Da eine Parabel durch drei Punkte eindeutig bestimmt ist, sind die Parabeln, welche in Abbildung Abbildung 5 zu sehen sind, eindeutig bestimmt. Es ist allerdings zu erkennen, dass nur bei dem Fit der Messung mit der halben Amplitude der Messwert für den Peak auch tatsächlich im Peak ist. Aus diesem Grund sollte den Bandbreiten und elektrischen Abstimmempfindlichkeiten von den Moden 1 und 3 nicht unbedingt vertraut werden. Außerdem sind diese nicht vergleichbar mit denen der Messung mit der halben Amplitude, da sich offensichtlich andere Breiten

ergeben. Es würde sich hier lohnen, die Messung erneut durchzuführen, allerdings mit den Punkten der halben Amplitude als Messwerte. Ein möglicher Grund für die Abweichung der Messwerte von den Fits könnte sein, dass die Messung nicht genau genug durchgeführt wurde, da das Ablesen der genauen Werte auf dem Oszilloskop durch eine starke Störung erschwert wurde. Hier könnte über einen Tiefpassfilter nachgedacht werden um die Störung zu verringern. Grundlegend ist der Versuchsaufbau geeignet um die Moden der Mikrowellen zu untersuchen, allerdings muss die Amplitude für aussagekräftige Ergebnisse reiner sein. Die untersuchten Oszilloskop Bilder haben von Parabeln abgewichen und deuten somit daraus hin, dass es sich nicht um perfekte Parabeln handelt. Außerdem sollten mehr Messwerte aufgenommen werden, um die statistischen Fehler zu unterdrücken.

## 5.2 Phasengeschwindigkeit der Mikrowellen

Die mit dem Frequenzmesser bestimmte Frequenz  $f = 9,0$  GHz liegt in der Fehlertoleranz der mit Unterabschnitt 4.2 bestimmten Frequenz  $f = (8,95 \pm 0,06)$  GHz. Der Aufbau eignet sich also gut um die Frequenz der Mikrowellen zu bestimmen. Auch hier ließen sich die Ergebnisse durch mehr Messwerte verbessern. Auch das die Wellenlänge im Hohlleiter größer ist als die im freien Raum entspricht den Erwartungen. Interessant ist es, dass die Phasengeschwindigkeit im Hohlleiter  $1.5c_0$  beträgt. Dies steht allerdings nicht im Widerspruch mit der Relativitätstheorie, da die Phasengeschwindigkeit nicht die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle ist und somit keine Informationen in dieser Geschwindigkeit übertragen werden können.

## 5.3 Dämpfung der Mikrowellen

Werden die Werte und Fits in Abbildung 7 betrachtet, so ist zu erkennen, dass irgendeine systematische Abweichung vorliegt. Um herauszufinden, von welchem Bauteil diese Abweichung herrührt, müsste der Versuch erneut durchgeführt werden. Dabei müssten dann einzeln die Bauteile mit anderen der selben Art ersetzt werden um zu bestimmen woher der Fehler kommt. Es ist natürlich auch möglich, dass der Fehler durch eine falsche Kalibrierung des Versuchsaufbaus entstanden ist. Auch das ließe sich durch eine erneute Messung validieren. Grundlegend ist der Versuchsaufbau allerdings geeignet um die Dämpfung der Mikrowellen zu untersuchen,

## 5.4 Stehwellenverhältnis

In Tabelle 7 ist zu erkennen, dass die direkte Messung von hohen Stehwellenverhältnissen nicht möglich ist und das SWR-Meter nur noch  $\infty$  anzeigt. Für Messungen von großen Stehwellenverhältnissen scheint die 3dB-Methode also besser geeignet zu sein. Für kleine Stehwellenverhältnisse ist die direkte Messung allerdings besser geeignet, da sie leichter durchzuführen ist. Dadurch, dass nur für 3,0 dB eine Messung mit beiden Methoden vorliegt lassen sich diese nicht weiter vergleichen. Dazu müssten weitere Messungen durchgeführt werden.

## Literatur

- [1] Reflex Klystron. URL: <https://electronicsdesk.com/reflex-klystron.html> (besucht am 01.05.2023).
- [2] Ausbreitung von Mikrowellen in Hohlleitern, Mikrowellenoptik. URL: [http://dodo.fb06.fh-muenchen.de/maier/PraktikumPh4/Anleitungen/MIW\\_WS1314.pdf](http://dodo.fb06.fh-muenchen.de/maier/PraktikumPh4/Anleitungen/MIW_WS1314.pdf) (besucht am 01.05.2023).
- [3] Philips. Experimente mit Mikrowellen 1. Philips.
- [4] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [5] Eric O. Lebigot. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [6] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.