

V53 - Mikrowellen auf Hohlleiter

Tabea Hacheney
tabea.hacheney@tu-dortmund.de

Steffen Kober
steffen.kober@tu-dortmund.de

Durchführung: 22.05.2023

Abgabe: 13.06.2023

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	4
2	Theorie	5
2.1	Mikrowellen	5
2.1.1	Stehende Wellen	5
2.1.2	Stehwellenverhältnis	6
2.1.3	Welle im Hohlleiter	7
2.2	Reflexklystron	8
2.2.1	Aufbau eines Reflexklystron	8
2.2.2	Funktionsweise des Reflexklystrons	8
2.2.3	Moden im Klystron	9
2.3	Einwegrichter	10
3	Durchführung	11
3.1	Kalibrierung des Versuchsaufbaus	11
3.2	Untersuchung der Moden mittels Oszilloskop	12
3.3	Frequenz- und Wellenlängen-, und Dämpfungsmessung im Hohlleiter . .	12
3.3.1	Frequenzmessung	13
3.3.2	Wellenlängenmessung	13
3.3.3	Messung der Dämpfung	14
3.4	Messung des Stehwellenverhältnisses	14
3.4.1	Direkte Methode	14
3.4.2	3 dB-Methode	14
3.4.3	Abschwächer-Methode	14
4	Auswertung	15
4.1	Untersuchung der Moden mittels Oszilloskop	15
4.2	Frequenzmessung	16
4.3	Wellenlängenmessung	16
4.4	Messung der Dämpfung	17
4.5	Messung des Stehwellenverhältnisses	19
4.5.1	Direkte Methode	19
4.5.2	3 dB-Methode	19
4.5.3	Abschwächer-Methode	19
5	Diskussion	21
5.1	Untersuchung der Moden im Hohlleiter	21
5.2	Frequenzmessung	21
5.3	Messung der Dämpfung	21
5.4	Messung des SWR	22
5.5	Zusammenfassung	22

Literatur	23
Anhang	24

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es ein fundamentales Verständnis von Wellenausbreitung auf Hohlleiter zu erlangen. Es werden dabei sowohl laufende als auch stehende Wellen untersucht. Dies geschieht anhand von Untersuchungen unterschiedlicher *Störeffekte* auf das Stehwellenverhältnis. Ebenfalls wird durch die Arbeit mit einem Reflexklystron die Erzeugung und Verstärkung von Mikrowellen verstanden.

2 Theorie

2.1 Mikrowellen

In diesem Versuch werden lediglich Mikrowellen betrachtet. Das heißt ein Frequenzbereich von 1 GHz-300 GHz beziehungsweise eine Wellenlänge von $\sim 33,3$ mm. Dieser Frequenzbereich ist sehr interessant, da Mikrowellen in der Atmosphäre nicht stark reflektiert oder absorbiert werden.

2.1.1 Stehende Wellen

Generell werden elektromagnetische Wellen durch die Maxwell Gleichungen beschrieben. In diesem Experiment werden allerdings Wellen in einem Hohlleiter betrachtet, welcher im Abschnitt 2.1.3 noch beschrieben wird. Daher genügt es die einfachste Form einer ebenen Welle zu betrachten.

$$A(x, t) = A_0 \sin(kx \pm \omega t)$$

In dieser Gleichung ist A_0 die Amplitude, k die Wellenzahl, ω die Kreisfrequenz. Das Vorzeichen gibt die Laufrichtung der Welle an. Für einen Hohlleiter ist es ebenfalls genügend ein eindimensionales Problem zu betrachten. Um eine stehende Welle zu erzeugen werden nun allerdings mindestens zwei ebene Wellen benötigt, da dies ein Interferenzeffekt ist. Das ebene Wellen die Kohärenzbedingungen erfüllen wird an dieser Stelle nicht näher diskutiert, da das Hauptaugenmerk später auf dem Klystron liegen soll. Wir betrachten zunächst eine einfache ebene Welle. Diese kann nun an einem Medium totalreflektiert werden, also die volle Amplitude bleibt erhalten. Nun existiert eine rechtslaufende Welle vor der Reflexion und eine linkslaufende Welle nach der Reflexion.

$$A(x, t) = A_0 \sin(kx - \omega t) + A_0 \sin(kx + \omega t)$$

Dieser Term kann in Gleichung 2.1 umgeschrieben werden.

$$A(x, t) = 2A_0 \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

In dieser Gleichung erkennt man, dass es räumlich feste Nullstellen gibt und die Welle nur noch zwischen diesen schwingt.

2.1.2 Stehwellenverhältnis

Gleichung 2.1 gilt lediglich für totale Reflexion. Aber im Anwendungsfall tritt so etwas nie auf, stattdessen treten weitere Mischterme in der überlagerten Welle auf. Dies geschieht nicht nur aufgrund von Transmissionseffekten, sondern auch durch Unstetigkeiten im Medium. Aufgrund dieser Mischterme entstehen keine Nullstellen, sondern lediglich Minima und Maxima der Amplitude. Das Verhältnis von Maxima und Minima wird Stehwellenverhältnis genannt.

$$S = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}, S \in [1, \infty] \quad (2.2)$$

Es beschreibt die Welligkeit der überlagerten Stehwelle. Je größer das Stehwellenverhältnis, desto größer ist das Maximum und oder kleiner ist das Minimum. Bei einer perfekten stehenden Welle divergiert das Stehwellenverhältnis. Eine mögliche Stehwelle wird in Abbildung 2.1 dargestellt.

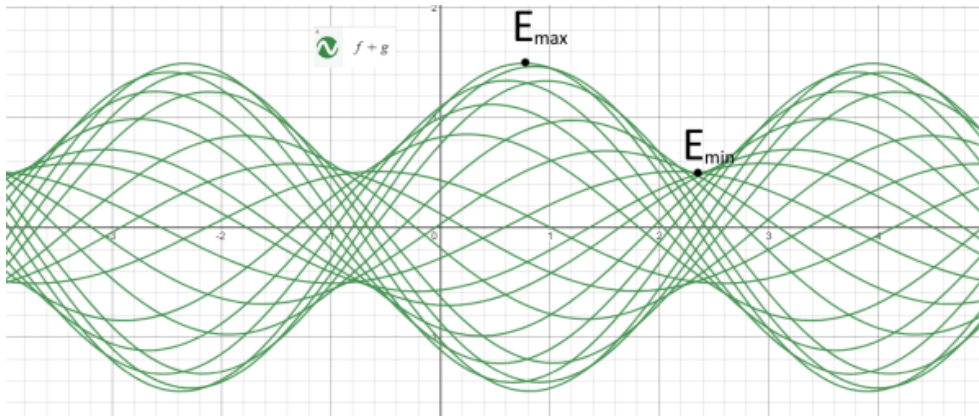


Abbildung 2.1: In dieser Abbildung wird eine stehende Welle mit festem Stehwellenverhältnis dargestellt.

Für die in der Durchführung beschriebene 3 dB-Methode in Unterabschnitt 3.4.2 kann das Stehwellenverhältnis durch

$$S = \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \left(\frac{\pi(x_{\text{links}} - x_{\text{rechts}})}{\lambda_H} \right)}} \quad (2.3)$$

berechnet werden. Wenn $\lambda_H \gg x_{\text{links}} - x_{\text{rechts}}$ kann man das SWR (Stehwellenverhältnis) durch

$$S = \frac{\lambda_H}{\pi(x_{\text{links}} - x_{\text{rechts}})} \quad (2.4)$$

genähert werden aufgrund der Kleinwinkelnäherung.

Bei der Abschwächer-Methode, welche in Unterabschnitt 3.4.3 beschrieben wird, kann das SWR durch

$$S = 10^{\frac{A_2 - A_1}{20 \text{ dB}}} \quad (2.5)$$

beschrieben werden.

2.1.3 Welle im Hohlleiter

Ein Hohlleiter ist zunächst erstmal ein hohles, das heißt eine innen nicht festes, Objekt. Dieses besteht aus einer leitenden Oberfläche, also meistens aus Metallen. Es dient der "Leitung" von Wellen und wird verwendet, da der Leistungstransfer im Frequenzbereich von 1 GHz bis 1500 GHz verlustärmer ist. In diesem Experiment wird ein rechteckiger Hohlleiter, welcher mit Umgebungsluft gefüllt ist verwendet. Eine Skizze wird in Abbildung 2.2 gezeigt.

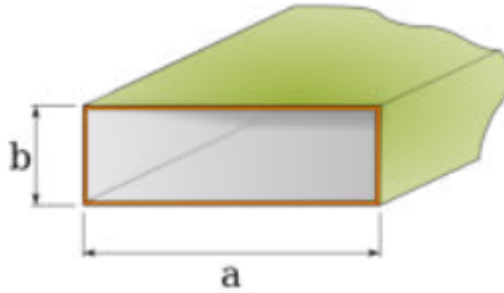


Abbildung 2.2: In dieser Abbildung werden schematisch die Seitenlängen eines Hohlleiters dargestellt.

Nun ist es wichtig zwischen Hohlraumresonatoren und Hohlleitern zu unterscheiden, da diese prinzipiell sehr ähnlich sind. Ein Hohlraumresonator ist ein geschlossenes innen hohles Objekt. Das bedeutet eine Welle in diesem Hohlraumresonator kann in alle kartesischen Richtungen an der Innenfläche reflektiert werden. Im Hohlleiter dagegen verhält es sich wie in einem Kabel. Er ist aufgebaut wie ein langes rechteckiges Rohr mit den Seitenlängen a und b . Die Welle in einem Hohlleiter kann daher nur in eine Richtung propagieren. In den anderen beiden Raumrichtungen wird sie reflektiert. Dabei entsteht eine stehende Welle orthogonal zur Öffnung, welche aber in Richtung der Öffnung verläuft. Aufgrund der Ähnlichkeit zum Hohlraumresonator existiert auch hier eine untere Grenzfrequenz, ab welcher stehende Welle in einem rechteckigen Hohlleiter entstehen können. Dazu korrespondiert die kritische Wellenlänge

$$\lambda_g = \frac{2}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}} \quad (2.6)$$

Dabei sind a und b die Seitenlängen des in Abbildung 2.2 dargestellten Hohlleiters. Diese Grenzwellenlänge gilt für **TEM** _{m,n} , wobei der Index n die Zahl der Mode ist. Das heißt eine Mode wird durch m, n charakterisiert. Unterhalb dieser Wellenlänge kann die Wellenlänge im Hohlleiter durch die Wellenlänge im freien Raum durch

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_g}{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2} \quad (2.7)$$

berechnet werden. Für eine TE₁₀ kann die Frequenz $f = c/\lambda_0$ durch

$$f = c \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2a}\right)^2} \quad (2.8)$$

2.2 Reflexklystron

Ein Reflexklystron wird zur Erzeugung von Mikrowellen verwendet. Dabei kann man diese aus dem Reflexklystron auskoppeln um diese dann auf einem Hohlleiter propagieren zu lassen oder für die jeweilige Anwendung nutzen. Das Reflexklystron ist dabei eine Entwicklungsstufe des klassischen Klystrons. Die Funktionsweise ist ähnlich jedoch unterscheidet sich der Aufbau.

2.2.1 Aufbau eines Reflexklystrons

Eine Skizze des Aufbaus wird in Abbildung 2.3 dargestellt. Es besteht aus einer Glühkathode und einer Reflektoranode und zwei Hohlraumresonator-kammern. Hinter der Kathode liegt ein Beschleunigungsgitter an. Danach treffen die beschleunigten Elektronen auf den Hohlraumresonator. Nachdem dieser durchlaufen wurde, treffen die Elektronen auf den Reflektor anhand desse diese umgekehrt werden und erneut auf den Hohlraumresonator treffen. Dies ist ein fortlaufender Prozess. Eine Hohlraumkammer dient dabei als wirklicher Hohlraumresonator und die andere als Auskopplungskammer.

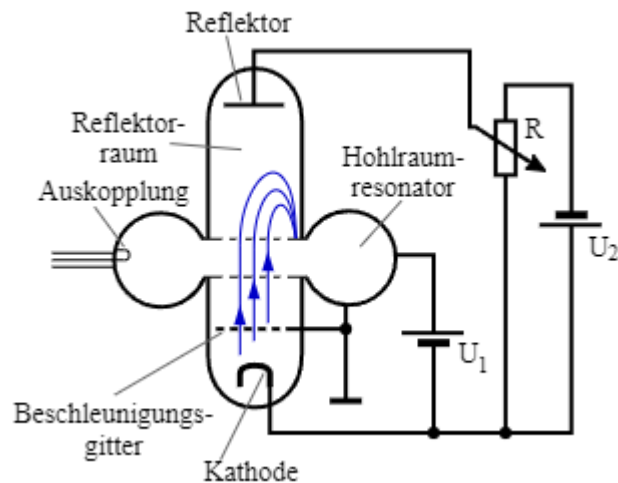


Abbildung 2.3: In dieser Abbildung wird der grundlegende Aufbau eines Reflexklystrons dargestellt.

2.2.2 Funktionsweise des Reflexklystrons

Wie bereits erwähnt durchläuft der Elektronenstrahl zunächst den Hohlraumresonator. Die Elektronen werden dabei Geschwindigkeitsmoduliert. Das geschieht jenach lokaler Feldstärke der stehenden Welle. Da die Elektronen also unterschiedlich stark in ihrer Geschwindigkeit moduliert werden, ist das gleichbedeutend mit einer Dichtemodulation des Elektronenstrahls. Dies nennt man *bunching*. Dieser dichtemodulierte Elektronenstrahl trifft nun auf den Reflektor und wird umgekehrt. Nun durchläuft er erneut die stehende Welle. Nun können zwei Effekte auftreten. Jenachdem, ob der *gebunchte*

Elektronenstrahl nun auf ein Maximum oder Minimum trifft kann ein dämpfender oder resonanter Effekt auftreten. Trifft der *gebunchte* Strahl mit einem Maximum an Elektronen nun auf ein Maximum des \vec{E} -Feldes, also auf ein positives Feld, so wird Energie in die Stehwelle eingekoppelt. Es tritt also eine resonante Wechselwirkung auf. Andernfalls kann ein Maximum des *gebunchte* Strahls auf ein minimales Feld, also ein negatives Feld, treffen. Dabei nimmt der Strahl Energie der Welle auf und dämpft diese damit. Es tritt also ein dämpfender Effekt auf. Das Auftreten eines Effektes hängt von der technischen Umsetzung, beziehungsweise den technischen Parametern ab. Eine einfache Methode der Einstellung eines Falles ist die Änderung der Spannung am Reflektor, aber es können ebenfalls die Höhe des Reflektors oder andere geometrische Eigenschaften verändert werden. Der Bunching-Prozess wird anschaulich an Abbildung 2.4 dargestellt.

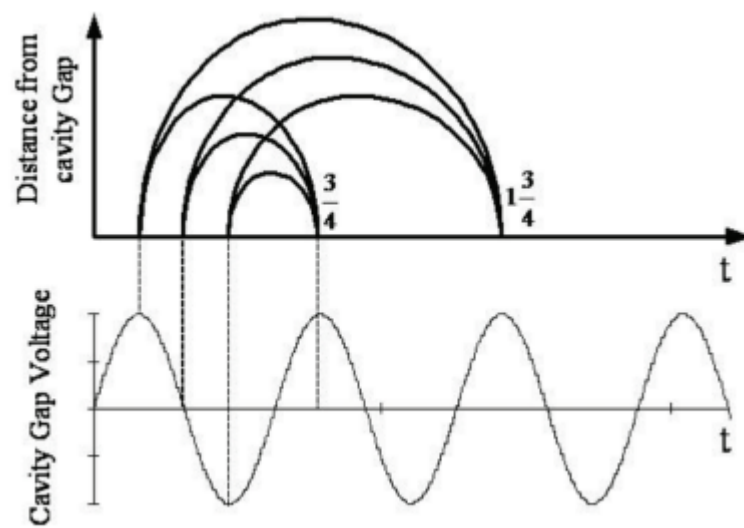


Abbildung 2.4: In dieser Abbildung wird der bunching Prozess dargestellt. Dies gilt für Parameter welche einen optimal Energieübertrag erzeugen. Dabei ist t in Einheiten von T_0 , der Periodendauer der Hohlraumresonatorfrequenz, angegeben.

2.2.3 Moden im Klystron

Für einen optimal Energieübertrag muss daher die geometrische Bedingung $t = T_0 (n + 3/4)$ erfüllt sein. Mit dieser Bedingung folgen Moden, welche in Abbildung 4.1 dargestellt werden. Dabei ist T_0 die Periodendauer der Hohlraumresonatorfrequenz und $n \in \mathbb{N}$.

Dabei wird in dem Graphen aus Abbildung 4.1 deutlich, dass der Energieübertrag parabelförmig um ein Maximum stattfindet. Außerdem ist zu beachten, dass die unterschiedlichen Energieüberträge ebenfalls etwas die Frequenz der Welle verändern. Deshalb wird ein Frequenzmesser eingebaut, welcher einen kleinen Teil der Energie auskoppelt, um so die Frequenz messen zu können. Der Frequenzmesser ist vor der Sonde plaziert, daher ist aufgrund der Entkopplung ein kleiner Spannungseinbruch sichtbar. Dies ermöglicht überhaupt erst die Frequenzmessung.

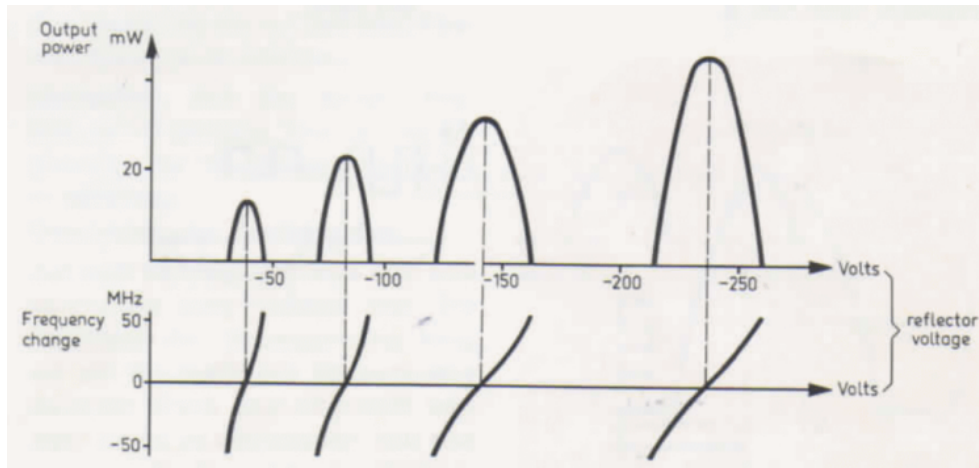


Abbildung 2.5: In dieser Abbildung werden die Moden des Reflexklystrons in Abhängigkeit der Reflektorspannung dargestellt.

2.3 Einwegrichter

Zuletzt wird nun der Einwegrichter erklärt. Dieser wird innerhalb des Hohlleiters verwendet, damit die Strahlung nur in eine Richtung propagieren kann. Der Einwegrichter besteht aus einem Permanentmagneten und einem absorbierendem Material. Mit Hilfe des Farady-Effektes und Feldveränderungsisolatoren lenkt dieser die Strahlung ab. Beiden Strahlenrichtungen werden aber betragsmäßig gleich abgelenkt. Daher wird zusätzlich ein Strahlen-Tor verwendet um eine Absorption in eine Richtung zu erhalten und Transmission in die entgegengesetzte.

3 Durchführung

In diesem Versuch wird ein Reflexklystron als Mikrowellensender verwendet, dessen funktionsweise in Kapitel 2 genauer beschrieben ist. Als Stromzufuhr dient hier ein Netzteil. Diese erschaffenen Mikrowellen passieren zunächst einen Einweggleichrichter, welcher in entgegengesetzte Richtung die Wellen stark dämpft.

Als nächstes Bauteil wird ein Frequenzmesser im MHz-Bereich verwendet und anschließend ein Abschwächer, welcher die Mikrowellenleistung in Abhängigkeit der Tiefe einer Mikrometerschraube dämpfen kann. Dieser Grundaufbau ist für alle Teilversuche identisch.

An das offene Ende des Hohlleiters lassen sich nun entweder Abschluss oder Kurzschluss anschließen, wobei der Abschluss die Wellen absorbiert und der Kurzschluss diese reflektiert. Als drittes mögliches Element kann eine Störstelle mit Abschluss verbaut werden, in welche sich eine Mikrometerschraube drehen lässt. Das Signal wird schließlich mittels eines Detektors aufgenommen und auf einem SWR-Meter oder Oszilloskop wiedergegeben.

Der Grundaufbau des Versuchs ist bei jedem Versuchsteil gleich und ist in Abbildung 3.1 gezeigt.

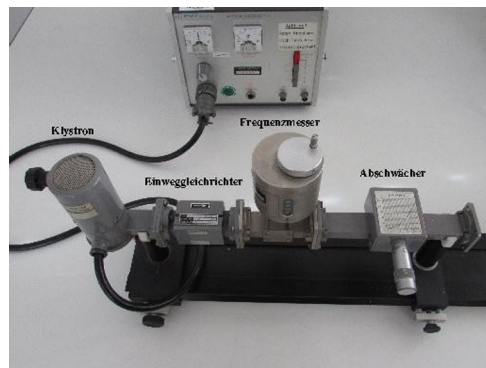


Abbildung 3.1: Verwendeten Grundaufbau für alle Versuchsteile. [4]

3.1 Kalibrierung des Versuchsaufbaus

Das Klystron wird vor dem ersten Teilversuch etwa eine Minute vorgeheizt bei abgeschalteten *Taster Res./Ref.*-Knopf. Um das Klystron zu kalibrieren wird der in Abbildung 3.2 gezeigte Aufbau verwendet.

Der Abschwächer wird auf 40 dB eingestellt, der 30 decibel-Knopf des SWR-Meters gedrückt und der 1 kHz- und Verstärkungsdrehknopf in die mittlere Ausrichtung gebracht. Am Klystron-Netzteil wird der 1 kHz-Modus verwendet und die Reflektorspannung auf

etwa 100 V gestellt. Der *Taster Res./Ref.*-Knopf wird nun angeschaltet. Die Reflektorspannung wird bei etwa 200 V so eingestellt, dass das SWR-Meter einen maximalen Ausschlag hat. Der Frequenzmesser wird anschließend so abgestimmt, dass sich ein Rückgang am SWR-Meter beobachten lässt.

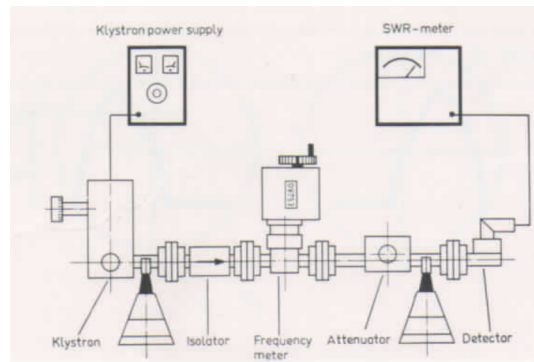


Abbildung 3.2: Experimenteller Aufbau zur Kalibrierung des Klystrons. [2]

3.2 Untersuchung der Moden mittels Oszilloskop

Für den ersten Teilversuch wird der Aufbau Abbildung 3.3 verwendet. Hier wird lediglich SWR-Meter und Oszilloskop ausgetauscht.

Der Abschwächer wird auf 30 dB eingestellt und der Detektor mit dem Oszilloskop verbunden. Der andere Eingang des Oszilloskops wird mit dem 0-30 V, 50 Hz Ausgang des Netzteils verbunden und der Knopf 50 Hz auf dem Netzteil gedrückt. Bei ausgeschalteten *Taster Res./Ref.*-Knopf lässt sich eine horizontale Linie auf dem Oszilloskop beobachten, welche mittig ausgerichtet werden soll.

Der *Taster Res./Ref.*-Knopf wird anschließend wieder aktiviert und die Reflektorspannung auf etwa 200 V eingestellt. Die Reflektorspannung wird langsam verändert, bis sich eine deutliche Mode erkennen lässt.

Der Frequenzmesser wird wieder so eingestellt, bis sich eine Einkerbung (*dip*) mittig in der Mode zeigt. So kann ermittelt werden, in welchen Frequenzbändern sich die Moden bewegen. Hierzu werden bei jeweils drei verschiedenen Moden die Frequenzen, die Reflektorspannungen und relativen Amplitudenverhältnisse notiert, wo sich ein *dip* in der Mitte und auf halber Höhe links und rechts vom Maximum zeigt.

3.3 Frequenz- und Wellenlängen-, und Dämpfungsmessung im Hohlleiter

Im nächsten Teilversuch soll die Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung unserer Welle im Hohlleiter bestimmt werden. Es wird der in Abbildung 3.4 gezeigte Aufbau verwendet. Für alle drei Messungen wird zunächst der Abschwächer auf 20 dB eingestellt, der Detektor durch einen verschiebbaren Stehwellen-Detektor ersetzt und an das SWR-Meter angeschlossen. An den Detektor wird zudem ein Abschluss angeschlossen.

Der 40 dB-Knopf des SWR-Meters wird gedrückt, die Bandbreite auf 100 Hz gestellt

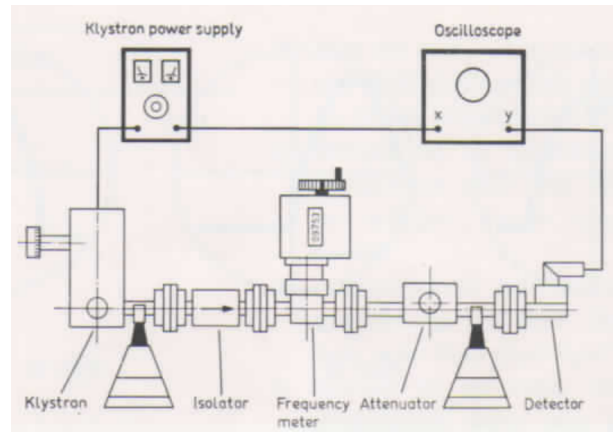


Abbildung 3.3: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Klystronmoden. [2]

und der 1 kHz- und Verstärkungsdrehknopf in die mittlere Ausrichtung gebracht. Die Reflektorspannung des Netzteils wird auf circa 200 V eingestellt und der 1 kHz-Modus verwendet. Die Reflektorspannung wird verändert bis das SWR-Meter einen maximalen Ausschlag anzeigt. Mit dem 1 kHz-Knopf wird dieser Ausschlag maximal gemacht und der Bandbreitenschalter wieder auf 20 Hz verringert.

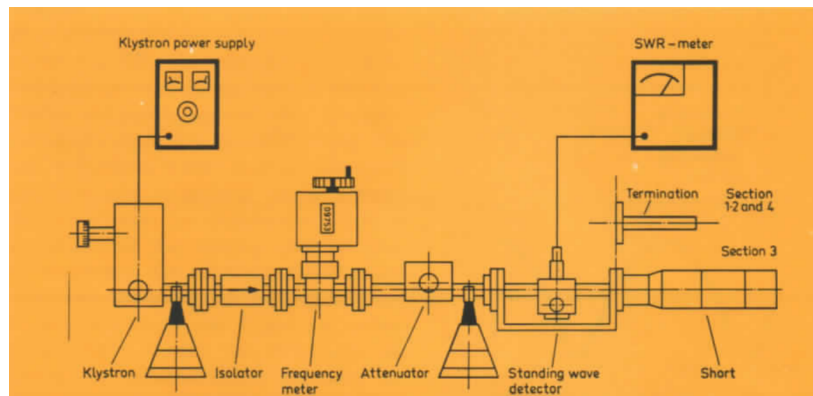


Abbildung 3.4: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Klystronmoden. [2]

3.3.1 Frequenzmessung

Um die Frequenz zu messen, wird der Frequenzmesser so lange gedreht, bis sich ein *dip* am SWR-Meter zeigt. Diese Frequenz wird notiert.

3.3.2 Wellenlängenmessung

Für die Messung der Wellenlänge wird der Abschluss durch einen Kurzschluss ersetzt und der Frequenzmesser leicht verstimmt. Der Detektor wird entlang seiner Schiebe verschoben, bis der Ausschlag am SWR-Meter minimal ist. Diese Stelle wird notiert. Anschließend wird der Detektor weitergeschoben bis zum nächsten *dip*. Auch diese Stelle wird notiert.

3.3.3 Messung der Dämpfung

Für die Messung der Dämpfung des Abschwächers wird der Kurzschluss wieder durch einen Abschluss ersetzt. Das Klystron wird auf etwa 9 GHz abgestimmt und die Verstärkung am SWR Meter so eingestellt, dass ein Vollausschlag im 30 dB-Bereich zu beobachten ist. Die Dämpfung wird durch drehen der Mikrometerschraube verstärkt und die Mikrometeranzeige in 2 dB-Schritten auf der unteren Skala bis 10 dB notiert.

3.4 Messung des Stehwellenverhältnisses

Es wird ein ähnlicher Versuchsaufbau weiterverwendet. Der Kurzschluss wird durch eine Störstelle mit Abschluss ersetzt. Die Schraube an der Störstelle wird so weit reingedreht, bis eine Dämpfung sichtbar ist. Optimalerweise sollte dies bei 0 μm der Fall sein. Der Abschwächer wird auf 20 dB eingestellt, der 40 dB-Knopf auf dem SWR-Meter gedrückt und der Bandbreitenschalter auf 20 Hz gestellt. Die Einstellung des Klystrons können aus dem vorherigen Versuch übernommen werden. Im folgenden wird das Stehwellenverhältniss (SWR) über drei verschiedene Methoden bestimmt.

3.4.1 Direkte Methode

Die Sondentiefe der Störstelle wird auf 5 mm erhöht. Der Detektor wird entlang seiner Schiene bis zu einem maximalen Ausschlag des SWR-Meters verschoben. Die Verstärkung des SWR-Meters wird so verstellt, dass dieser maximale Ausschlag bei 1,0 auf der oberen Skala liegt. Die Sonde wird nun an eine Stelle minimalem Ausschlags verschoben. Der Wert auf der oberen Skala wird notiert. Die Stärke des Ausschlags wird für die Schraubentiefen 0 bis 10 mm gemessen.

3.4.2 3 dB-Methode

Die Sondentiefe der Störstelle wird auf 9 mm eingestellt. Der Detektor wird entlang seiner Schiene in ein Minimum gefahren. Die Verstärkung des SWR-Meters wird nun so eingestellt, dass auf der unteren Skala 3 dB angezeigt werden. Die Sonde wird anschließend nach links verschoben bis sich ein Vollausschlag ergibt. Die jeweiligen Positionen des Detektors werden notiert. Der Detektor wird nun nach rechts gefahren bis ein weiterer Vollausschlag auftritt. Auch diese Position wird notiert.

3.4.3 Abschwächer-Methode

Die Sondentiefe der Störstelle bleibt weiterhin auf 9 mm. Der Detektor wird verschoben, bis sich ein Minimum am SWR-Meter zeigt. Die Verstärkung erneut so einstellen, dass sich ein Ausschlag von 3 dB ergibt. Der Detektor wird zeitgleich mit dem Abschwächer so verschoben/verstellt, dass der Ausschlag auf dem SWR-Meter ähnlich bleibt. Auf diese Weise wird ein relatives Maximum gesucht. Die entsprechende Abschwächung in der Endposition wird notiert.

4 Auswertung

4.1 Untersuchung der Moden mittels Oszilloskop

Für 3 Moden wurden jeweils Reflektorspannung U , Frequenz f und Output Power U_{out} (die Amplitude der Mode) an drei Messstellen gemessen. Als Messstellen wurden die Maxima und jeweils die Hälften der Maxima links und rechts gewählt.

Aus den drei Datenpunkten lassen sich für die Moden selber eine Parabelgleichung aufstellen und für die Frequenzbänder eine kubische Parabel.

Die aufgenommenen Messwerte lassen sich in Tabelle 4.1 finden. Mithilfe von *python*, den libraries *uncertainties*[3] und *matplotlib*[1] werden die Parameter bestimmt, Ungenauigkeiten berechnet und die Funktionen grafisch dargestellt.

Da die meisten Messwerte lediglich abgelesen werden ist hier der systematische Fehler unbekannt und wird im Folgenden vernachlässigt.

In Abbildung 4.1 sind die gefitteten Messwerte mit Ausgleichsfunktionen dargestellt.

U/V	U_{out}/mV	f/GHz
200	200	8,858
211	400	8,874
220	200	8,886
120	185	8,854
130	370	8,877
140	185	8,895
70	100	8,849
80	200	8,881
88	100	8,910

Tabelle 4.1: Positionen der Minima zum Berechnen der Wellenlänge und Frequenz

Die Bandbreiten der Moden ergeben sich daher über die Differenz der gemessenen Frequenzen (auf halber Höhe der Maxima) zu:

$$\Delta f_1 = 0,028 \text{ GHz}$$

$$\Delta f_2 = 0,041 \text{ GHz}$$

$$\Delta f_3 = 0,061 \text{ GHz.}$$

Die elektrische Abstimmempfindlichkeit lässt sich schließlich über

$$F_i = \frac{\Delta f_i}{\Delta U_i}$$

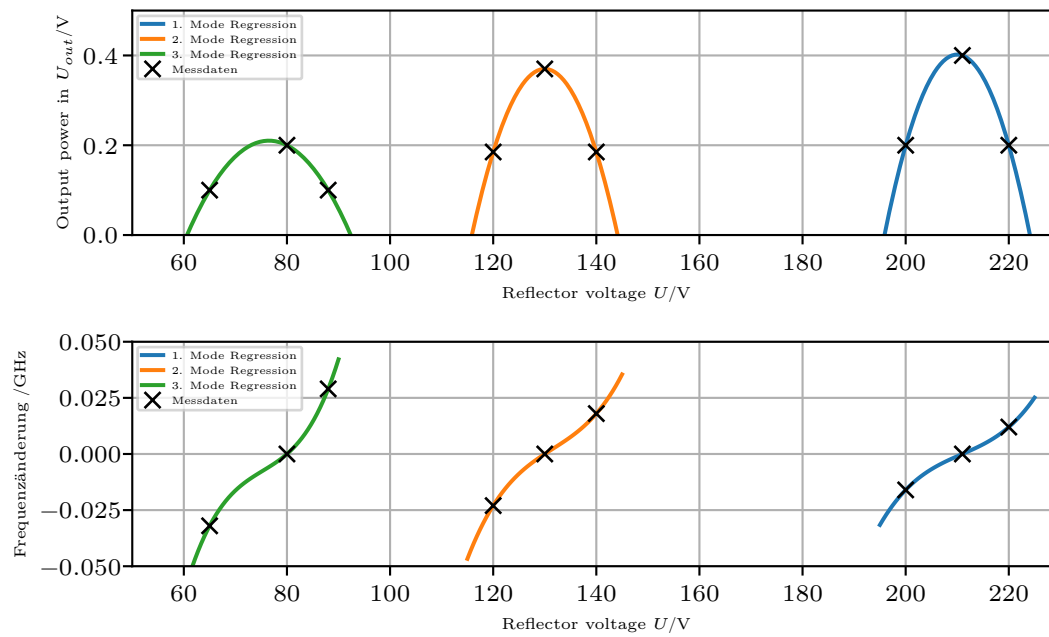


Abbildung 4.1: Moden und Frequenzbänder des Klystrons.

bestimmen. Wobei ΔU_i die Differenzen der Reflektorspannungen auf halber Höhe des Maximums sind. Somit ergeben sich folgende Abstimmempfindlichkeiten:

$$F_1 = 1,4 \frac{\text{MHz}}{\text{V}}$$

$$F_2 = 2,05 \frac{\text{MHz}}{\text{V}}$$

$$F_3 = 2,65 \frac{\text{MHz}}{\text{V}}.$$

4.2 Frequenzmessung

Für die direkte Frequenzmessung wird eine Frequenz von

$$f_1 = 9,103 \text{ GHz}$$

an einem *dip* gemessen.

4.3 Wellenlängenmessung

Der Detektor wurde von einem Minimum in das nächste geschoben und die Positionen als Messwerte x_1 und x_2 notiert. Diese lassen sich in Tabelle 4.2 finden.

Die Hohlleitungswellenlänge λ_g berechnet sich aus dem doppelten Abstand des Δx . Die Frequenz f_2 lässt sich anschließend mithilfe von Gleichung 2.8 berechnen. Das Ergebnis

lässt sich ebenfalls in Tabelle 4.2 finden.

x_1/mm	x_2/mm	$\Delta x/\text{mm}$	λ_g/mm	f_2/GHz
79,1	104,1	25	50	$8,885 \pm 0,01$

Tabelle 4.2: Positionen der Minima zum Berechnen der Wellenlänge und Frequenz

Mit diesen zwei Messwerten für die Hohlleiterfrequenz lässt sich die Phasengeschwindigkeit v_{ph} im Hohlleiter bestimmen mittels

$$v_{\text{ph},i} = f_i \cdot \lambda_g$$

Somit ergeben sich folgende Phasengeschwindigkeiten:

$$v_{\text{ph},1} = 4,443 \pm 0,005 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\text{ph},2} = 4,552 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Der Mittelwert mit Standardabweichung ergibt sich hier zu

$$v_{\text{ph}} = 4,4970 \pm 0,0024 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

4.4 Messung der Dämpfung

In diesem Versuchsabschnitt soll die Herstellerangabe der Dämpfung des Abschwächers überprüft werden. Dafür werden in Abhängigkeit der Tiefe der Millimeterschraube d die Dämpfungen P gemessen. Die Messwerte lassen sich in Tabelle 4.3 finden.

Die Angaben des Herstellers des Abschwächers lassen sich auf dem Gerät selber finden.

d/mm	$x_{\text{Herst}}/\text{mm}$	P/dB	$\ln(P)/\text{dB}$
1	0,9	2	0,69
1,45	1,4	4	1,38
1,74	1,78	6	1,79
2,01	2,02	8	2,08
2,19	2,22	10	2,30

Tabelle 4.3: Messwerte der Millimeterschraubenposition und zugehörigen Dämpfungen

Sie sind außerdem in Abbildung 4.2 gezeigt. Die Schwächung zeigt einen exponentiellen Verlauf. Es wird daher der natürliche Logarithmus der Herstellerangaben genommen, linear gefittet und mit den Messwerten verglichen. Der Vergleich ist in Abbildung 4.3 gezeigt. Die Abweichung der jeweiligen Messwerte und der Angaben des Herstellers sind im Durchschnitt 4%.

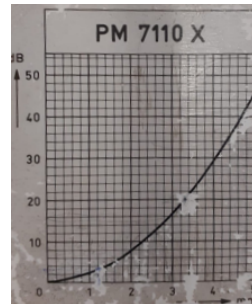


Abbildung 4.2: Herstellerangaben des Abschwächers.

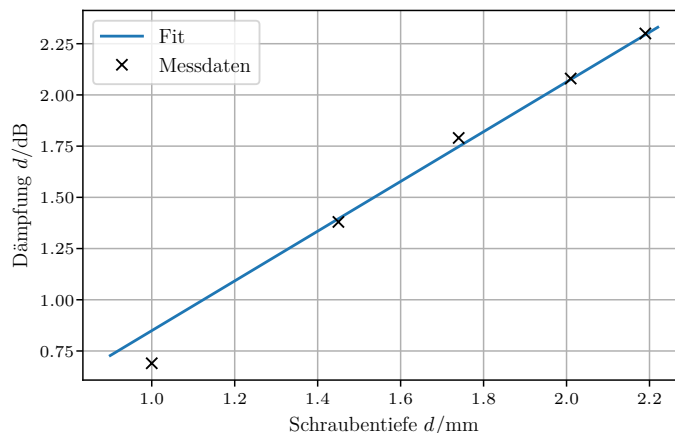


Abbildung 4.3: Ausgleichsgerade mithilfe der Herstellerangaben 4.2 und die Messwerte.

4.5 Messung des Stehwellenverhältnisses

Es werden im folgenden drei Methoden zur Messung des Stehwellenverhältnisses evaluiert.

4.5.1 Direkte Methode

Die direkte Methode wird über das SWR-Meter gemessen. Hier wird bei verschiedenen Tiefen der Störstelle d der Ausschlag am SWR-Meter gemessen. Die Messwerte befinden sich in Tabelle 4.4.

d/mm	SWR
0	1,21
1	1,24
2	1,26
3	1,3
4	1,36
5	1,51
6	1,8
7	2,2
8	2,3
9	∞

Tabelle 4.4: Messwerte der Millimeterschraubenposition der Störstelle und das Stehwellenverhältniss

4.5.2 3 dB-Methode

Es werden Vollausschläge links und rechts eines Minimas gesucht. Die Messwerte lassen sich in Tabelle 4.5 finden. Die Wellenlänge wurde bereits berechnet. Zur Berechnung

d_1/mm	d_2/mm	λ_g/mm	S
83,0	84,3	50	12,24

Tabelle 4.5: Messwerte zur 3 dB-Methode

des Stehwellenverhältnis S wird Gleichung 2.4 verwendet. Die Ergebnisse lassen sich ebenfalls in Tabelle 4.5 finden.

4.5.3 Abschwächer-Methode

Die zwei gemessenen Dämpfungen sind in Tabelle 4.6 zu finden. Das Stehwellenverhältnis S wird über Gleichung 2.5 berechnet und ist ebenfalls in der Tabelle zu finden.

A_1/dB	A_2/dB	S
20	5	5,62

Tabelle 4.6: Messwerte der Dämpfungen

5 Diskussion

5.1 Untersuchung der Moden im Hohlleiter

Als erstes wurden die Moden des Hohlleiters mit einem Oszilloskop untersucht. Dabei wurden drei unterschiedliche Moden aufgenommen. Dann wurde ein Polynom zweiten Grades an die Messwerte aus Tabelle 4.1 gefittet. Dieser Fit repräsentiert die aufgenommenen Moden. Er ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Frequenzbänder wurden ebenfalls aus diesen Messdaten bestimmt. Dazu wurde ein Polynom dritten Grades an die Frequenzmesswerte gefittet. Die Frequenzbänder sind ebenfalls in Abbildung 4.1 dargestellt. Außerdem wurde aus diesen Messwerten die Abstimmempfindlichkeit berechnet. Diese ergeben sich zu $F_1 = 1,4 \text{ MHz/V}$, $F_2 = 2,05 \text{ MHz/V}$ und $F_3 = 2,65 \text{ MHz/V}$. Obgleich die Moden nicht perfekt getroffen wurden, wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist, weisen die steigenden Abstimmempfindlichkeiten einen sinnvollen Verlauf auf. Besonders fällt auf, dass die erste und dritte Mode nicht genau im Maximum gemessen wurde, weshalb es im folgendem zu Ungenauigkeiten kommen kann.

5.2 Frequenzmessung

Als nächstes wurde die Frequenz auf zwei Arten bestimmt. Es ergeben sich die Frequenzen $f_1 = 9,103 \text{ GHz}$ und $f_2 = (8,885 \pm 0,010) \text{ GHz}$. Dabei ist es nicht möglich eine Unsicherheit für f_1 zu bestimmen. Die Frequenzen liegen nicht sehr nah beieinander, weshalb auf eine systematische Ungenauigkeit geschlossen werden muss. Diese kann in diesem Versuch an viele Stellen eingeflossen sein. Zum Beispiel ist die Nadel am SWR-Meter nie wirklich stabil. Außerdem sind sämtliche Einstellungen nicht hoch präzise. Aus diesen Frequenzen lassen sich die Phasengeschwindigkeiten $v_{\text{ph},1} = (4,443 \pm 0,005) \cdot 10^8 \text{ m/s}$ und $v_{\text{ph},2} = 4,552 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ berechnen. Neben den eben diskutierten Abweichungen voneinander fällt auf, dass diese Geschwindigkeiten oberhalb der Lichtgeschwindigkeit liegen. Allerdings ist dies bei Phasengeschwindigkeiten, welche bei dispersiven Wellen von der Gruppengeschwindigkeit abweicht, erlaubt.

5.3 Messung der Dämpfung

Danach wurde die Dämpfung durch den Abschwächer mit den Herstellerangaben verglichen werden. Die Regression der Herstellerangaben werden zusammen mit den Messdaten in Abbildung 4.2 dargestellt. Es ergibt sich eine mittlere Abweichung zu den Herstellerangaben von 4%. Diese Abweichung ist genügend klein und zu erwarten aufgrund der Einstellmöglichkeit der Schraube.

5.4 Messung des SWR

Zuletzt wurde die SWR auf drei unterschiedliche Arten gemessen. Zunächst wurde über die direkte Methode gemessen. Diese Daten sind in Tabelle 4.4 dargestellt. Die Steigung mit zunehmender Schraubentiefe ist zu erwarten. Danach wurde dann die 3dB-Methode angewendet. Die Messdaten, sowie S sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Die verwendete Gleichung gilt lediglich für $S > 10$. Da ein Wert $S = 12,24$ bestimmt wurde ist die anwendung der Gleichung legitim. Zuletzt wurde S über die Abschwächer Methode bestimmt. Die Daten werden in Tabelle 4.6 dargestellt. Hier hat sich ein $S = 5,62$ bestimmt. Dieser Wert ist sehr klein, weshalb von einem systematischem Fehler ausgegangen werden muss. Ein realistisches Ergebnis sollte < 10 sein. Diese erwartung konnte nur mit der 3dB-Methode bestätigt werden. Mögliche Fehlerquellen können eine Nichterfassung von Maxima oder Minima sein.

5.5 Zusammenfassung

Insgesamt sind die Messergebnisse nicht ausgezeichnet. Dennoch konnte man bei der Durchführung, das Ziel der Wissenserlangung erfüllen. Das SWR-Meter war aufgrund von starken Schwankungen schwierig einzustellen. Insgesamt konnte aber das Ziel des Versuches zu einem gewissen Grad erfüllt werden.

Literatur

- [1] *Matplotlib: Visualization with Python*. URL: <https://matplotlib.org/> (besucht am 12.06.2023).
- [2] PHILIPS. *Experimente mit Mikrowellen 1*.
- [3] *Uncertainties package Python*. URL: <https://pythonhosted.org/uncertainties/> (besucht am 12.06.2023).
- [4] *V53 - Mikrowellen auf Hohlleiter*. TU Dortmund. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/2672086/mod_resource/content/2/V53.pdf (besucht am 12.06.2023).

Anhang