

V53

Mikrowellen auf Hohlleiter

Nico Guth

nico.guth@tu-dortmund.de

David Venker

david.venker@tu-dortmund.de

Durchführung: 21.06.2021

Abgabe: 28.07.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Erzeugung von Mikrowellen mittels eines Reflexklystrons	3
2.2	Mikrowellen auf Hohlleitern	5
2.3	Stehwellenverhältnis und dessen Messmethoden	6
2.3.1	Direkte Messmethode	7
2.3.2	3 dB-Messmethode	7
2.3.3	Abschwächer-Messmethode	7
3	Durchführung	8
3.1	Kalibrierung des Reflexklystrons und der Messleitung	8
3.2	Messung der Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung auf dem Hohlleiter . .	9
3.3	Messung des Stehwellenverhältnisses	10
4	Auswertung	11
4.1	Berechnung der Bandbreite	11
4.2	Frequenzmessung	13
4.3	Die Dämpfungskurve	13
4.4	Berechnung des Stehwellenverhältnisses	15
4.4.1	Direkte Bestimmung	15
4.4.2	3 dB-Methode	15
4.4.3	Abschwächer-Methode	16
5	Diskussion	16
	Literatur	17

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die Eigenschaften eines Reflexklystrons und von Mikrowellen auf einem Hohlleiter untersucht werden. Dazu zählt auch die Bestimmung des Stehwellenverhältnisses.

2 Theorie

Seit einigen Jahren findet Mikrowellen-Strahlung in vielen Bereichen eine Anwendung. Den meisten Leuten fällt beim Begriff Mikrowelle vermutlich als erstes der Mikrowellen-Ofen ein, da dieses Gerät ein wichtiger Bestandteil vieler Küchen heutzutage ist. Aber Mikrowellen haben noch deutlich mehr Anwendungsgebiete:

- jegliche Art der kabellosen Kommunikation. (Mobilfunk, WLAN, Bluetooth,...)
- Radartechnik
- Navigation über GPS
- Radioastronomie
- Spektroskopie
- ...

Das Wort „Mikrowellen“ ist allerdings irreführend, da die Wellenlänge von elektromagnetischer Strahlung in der Größenordnung Mikrometer Infrarot-Strahlung ist. Mikrowellen-Strahlung liegt hingegen im Wellenlängenbereich von Millimeter bis Meter bzw. einem Frequenzbereich von 300 MHz bis 300 GHz. Und das „Mikro“ in Mikrowellen steht eher für klein als für die Größenordnung.

Für die nahezu dispersionsfreie Übertragung von Mikrowellen werden Hohlleiter verwendet.

2.1 Erzeugung von Mikrowellen mittels eines Reflexklystrons

Um Mikrowellen-Strahlung mit einer hohen Intensität erzeugen zu können, hat man ein sogenanntes Klystron entwickelt. Da diese Klystrons allerdings groß sind, wurden sie zum sogenannten Reflexklystron weiterentwickelt. Die Funktionsweise des Reflexklystrons ist sehr ähnlich zum Klystron und lässt sich besser am Klystron erklären. Beide Geräte sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Elektronen werden von einer Glühkathode aus beschleunigt. Diese treten dann in einen „Buncher“ Hohlraum ein. In diesem Hohlraum schwingt ein elektrisches, annähernd homogenes Feld parallel zur Bewegungsrichtung der Elektronen. Diese Schwingung wird durch ein Eingangssignal angeregt und der Hohlraum funktioniert auf dem Prinzip

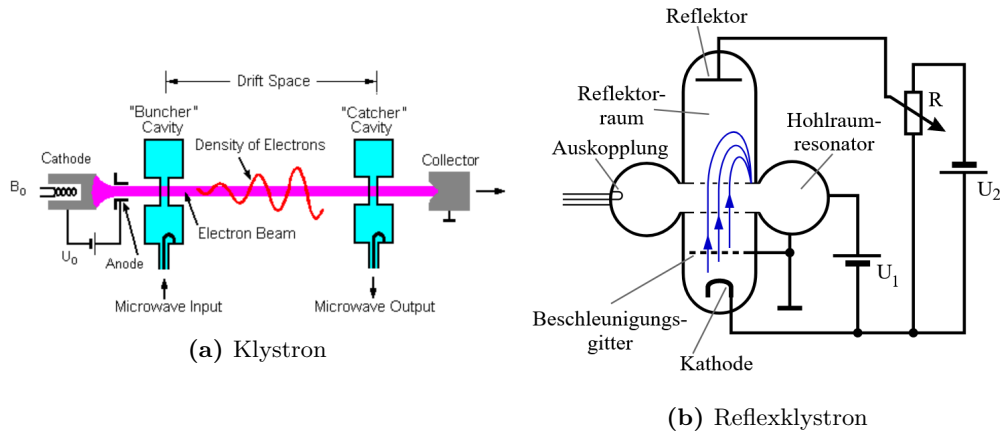


Abbildung 1: Schematische Skizzen vom Klystron und Reflexklystron [1]

eines RC-Schwingkreises, wobei in der Mitte ein Kondensator und außen eine Art Spule mit einer Windung ist. Durch das schwingende elektrische Feld werden die Elektronen unterschiedlich stark beschleunigt oder abgebremst (Geschwindigkeitsmodulation) und es entstehen auf dem Weg zum nächsten Hohlraum „Bunches“, also Häufungen von Elektronen. (Dichtemodulation)

In dem „Catcher“ Hohlraum sollten die Elektronbunches genau so ankommen, dass sie die Resonanzfrequenz des Hohlraums treffen und dort die Schwingung anregen. Da allerdings hier die Elektronen sehr stark abgebremst werden, wird viel Energie in die angeregte Schwingung abgegeben und das so erzeugte Ausgangssignal hat eine deutlich höher Intensität als das Eingangssignal.

Beim Reflexklystron erfüllt ein Hohlraum beide soeben beschriebenen Funktionen und die Elektronen werden durch einen Reflektor in den gleichen Hohlraum zurückgeleitet. Die so entstandene Schwingung kann z.B. über einen Draht oder einen Hohlleiter ausgekoppelt werden.

Da die Elektronen zum richtigen Zeitpunkt und in Bunches auf dem Rückweg wieder im Hohlraum ankommen müssen, müssen die Beschleunigungsspannung, die Reflektorspannung und die Abmessungen des Hohlraums so angepasst werden, dass eine maximale Ausgangsleistung erreicht wird. Eine optimale Flugdauer der Elektronen ist

$$\tau = T_0(N + 3/4), \quad (1)$$

wobei T_0 die Periodenlänge bei Resonanz des Hohlraums ist und N eine natürliche Zahl (oder 0) ist. Wie sich Amplitude und Frequenz des Ausgangssignals durch die Reflektorspannung verändert ist in Abbildung 2 zu sehen.

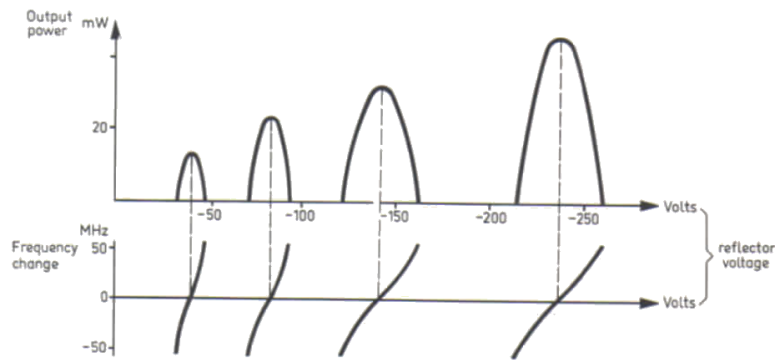


Abbildung 2: Amplituden- und Frequenzmodulation des Reflexklystrons in Abhängigkeit der Reflektorspannung [2]

2.2 Mikrowellen auf Hohlleitern

Eine Möglichkeit Wellen über eine große Strecke mit nahezu keiner Dispersion zu übertragen sind Hohlleiter. Im Fall von elektromagnetischer Strahlung werden als Hohlleiter Metallrohre verwendet, die meistens Luft enthalten und einen rechteckigen Querschnitt haben. Dadurch, dass die Welle an den Wänden reflektiert wird entsteht in der xy -Ebene eine stehende Welle, wenn die z -Richtung die Ausbreitungsrichtung ist.

Wir beschränken uns hier auf die Betrachtung von rechteckigen Hohlleitern mit den Kantenlängen a (x -Achse) und b (y -Achse). Außerdem definieren wir o.B.d.A $a \geq b$. Die Wellen im Hohlleiter können verschiedene Formen annehmen. Diese Form wird als Modus bezeichnet und durch die Zahlen $m, n \in \mathbb{N}_0$ gekennzeichnet, je nachdem wie viele Wellenbäuche in die x - oder y -Richtung liegen. Außerdem können entweder das elektrische, das magnetische oder beide Felder senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen. Ein Modus wird so eindeutig über $TE_{m,n}$, $TM_{m,n}$ oder $TEM_{m,n}$ gekennzeichnet. Ein Beispiel-Modus ist in Abbildung 3 zu sehen.

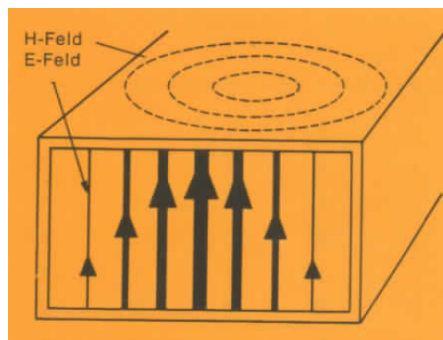


Abbildung 3: Skizze einer $TE_{1,0}$ Mode in einem rechteckigen Hohlleiter [2]

Schickt man nun eine elektromagnetische Welle mit der Wellenlänge λ_0 durch so einen

Hohlleiter, dann vergrößert sich diese Wellenlänge zu

$$\lambda_H = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_G}\right)^2}}, \quad (2)$$

wobei λ_H die Wellenlänge im Hohlleiter ist und λ_G die kleinstmögliche Wellenlänge bzw. die Grenzwellenlänge im Hohlleiter ist. Diese Grenzwellenlänge kann über

$$\lambda_G = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (3)$$

für den jeweiligen Hohlleiter berechnet werden.

Meistens wird ein Hohlleiter im niedrigsten Modus verwendet. Für den $TE_{1,0}$ -Modus kann nun mit $f = c/\lambda_0$ die Frequenz einer einlaufenden Welle über

$$f = c \cdot \sqrt{(\lambda_H)^{-2} + (2 \cdot a)^{-2}} \quad (4)$$

bestimmt werden.

In einen Hohlleiter kann ein sogenanntes Dämpfungsglied eingebaut werden, das die Leistung der übertragenen Welle abschwächt. Die Dämpfung wird dabei in dB angegeben.

2.3 Stehwellenverhältnis und dessen Messmethoden

Eine Übertragungsleitung wie ein Hohlleiter ist immer verlustbehaftet und Störfaktoren können nie vollkommen verhindert werden. Einer dieser Störfaktoren sind Reflektionen an Unreinheiten der Leitung oder an einem Übergang an eine Last, die eine nicht passende Impedanz hat. Die Wechselwirkung einer einlaufenden mit einer reflektierten Welle erzeugt dann eine stehende Welle. Das sogenannte Stehwellenverhältnis S (bzw. SWR für „standing wave ratio“) ist ein Maß für die Abschwächung der Leistung durch reflektierte Wellen. Es ist definiert über das Verhältnis der Feldstärken

$$S = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \quad (5)$$

und wird auch als Welligkeit bezeichnet.

Eine Größe, die damit in Verbindung steht ist der Spannungs-Reflexionskoeffizient ρ . Dieser ist definiert über das Verhältnis von reflektierter zu einlaufender Feldstärke und hängt mit S über

$$|\rho| = \frac{S - 1}{S + 1} \quad (6)$$

zusammen.

2.3.1 Direkte Messmethode

Um das Stehwellenverhältnis direkt zu messen, wird in die zu vermessende Leitung eine kapazitive Sonde eingeführt, die einen Bruchteil des übertragenen Signals auskoppelt und an einen hochsensitiven Spannungsmesser weiterleitet. Das Stehwellenverhältnis kann dann über

$$S = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \quad (7)$$

berechnet werden. In diesem Versuch wird ein SWR-Messer verwendet, der das Stehwellenverhältnis direkt ausgibt.

2.3.2 3 dB-Messmethode

Eine Methode die Spannungsüberlastung des SWR-Messers zu umgehen ist die 3 dB-Methode. Anstatt das Minimum und das Maximum der Spannung zu messen, wird hier nur die doppelte Spannung des Minimums gemessen. Diese Werte der Spannung müssen allerdings an zwei aufeinander folgenden Stellen gemessen werden und mit dem Abstand Δd kann dann das Stehwellenverhältnis über

$$S = \sqrt{1 + \sin^{-2} \left(\frac{\pi \cdot \Delta d}{\lambda_H} \right)} \quad (8)$$

bestimmt werden. Diese Gleichung kann zu

$$S = \frac{\lambda_H}{\pi \cdot \Delta d} \quad (9)$$

genähert werden, wenn $S \gtrsim 10$ ist.

2.3.3 Abschwächer-Messmethode

Der verwendete SWR-Detektor zeigt ein quadratisches Verhalten solange die Ausgangsspannung zur Eingangsspannung proportional ist. Eine Möglichkeit das Stehwellenverhältnis zu messen, wenn dies nicht der Fall ist, ist die Abschwächer-Methode. Das Signal wird hier durch ein Dämpfungsglied zwischen Generator und Messleitung so abgeschwächt, dass das Maximum gerade so hoch ist wie das Minimum vor der Abschwächung. Mit der Differenz ΔA eingestellten Dämpfungen vor und nach der Abschwächung kann dann das Stehwellenverhältnis über

$$S = 10^{\frac{\Delta A}{20}} \quad (10)$$

berechnet werden.

3 Durchführung

3.1 Kalibrierung des Reflexklystrons und der Messleitung

Zur Kalibrierung des Klystrons wird ein Aufbau wie in Abbildung 4 verwendet.

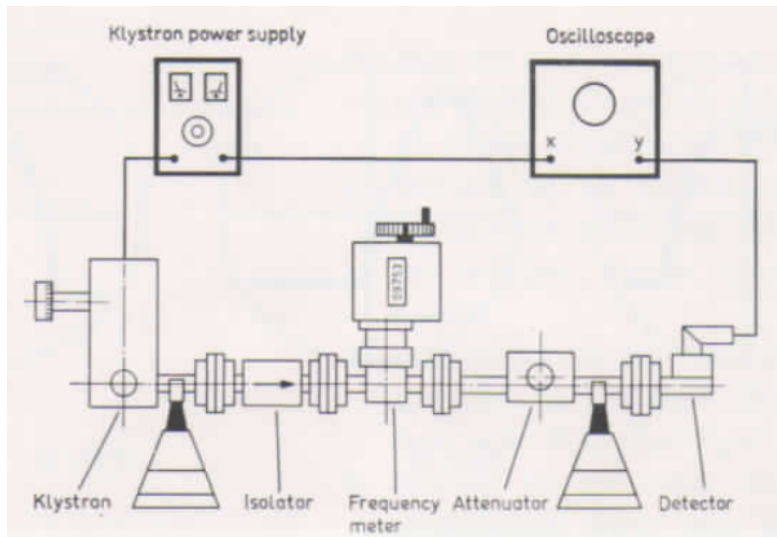


Abbildung 4: Aufbau für Klystron-Untersuchungen mit dem Oszilloskop [2]

Zunächst muss an das Reflexklystron eine 6,3 V Heizspannung angelegt werden und gewartet werden bis sich die Temperatur stabilisiert hat. Das Dämpfungsglied wird auf 30 dB, die Resonatorspannung auf 300 V und die Reflektorspannung auf 200 V gestellt. Nun wird am Speisegerät eine Sinusmodulation von 50 Hz mit einer 85 V Amplitude eingeschaltet.

Nun ist also auf dem Oszilloskop auf der x -Achse eine Sinusspannung und auf der y -Achse das Detektorsignal angezeigt. Es sollten die Ablenkkoeffizienten so eingestellt werden, dass das ganze Bild zu sehen ist, außerdem muss das Bild horizontal zentriert werden, damit in der Mitte genau die eingestellte Reflektorspannung liegt.

Auf dem Oszilloskop sollte nun annähernd eine Parabel wie in Abbildung 2 zu sehen sein. Diese Parabel kann nun vermessen werden indem der Wert der Reflektorspannung verändert und notiert wird, sodass nacheinander in der Mitte des Oszilloskops das linke Ende, das Maximum und das rechte Ende zu sehen sind. Die Amplitude der Parabel kann auf dem Oszilloskop abgelesen werden.

Zusätzlich kann mit dem Frequenzmesser die Resonanzfrequenz des Klystrons je nach Reflektorspannung bestimmt werden, indem der Frequenzmesser so angepasst wird, dass der dadurch entstandene „dip“ auf dem Maximum der Parabel liegt.

Auf diese Weise werden die ersten drei Moden des Reflexklystrons vermessen.

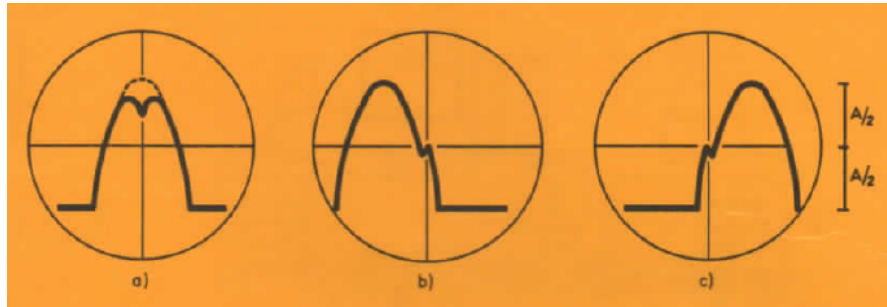


Abbildung 5: Resultierender „dip“ mit angepasstem Frequenzmesser [2]

Außerdem werden für den Modus, der am nächsten an 200 V Reflektorspannung liegt, mit dem Frequenzmesser die Punkte halber Leistung bestimmt, indem auf dem Oszilloskop Bilder wie in Abbildung 5 erzeugt werden und Frequenz und Reflektorspannung abgelesen werden.

3.2 Messung der Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung auf dem Hohlleiter

Für die Messung der Frequenz, der Wellenlänge und der Dämpfung der Hohlleiterwellen wird ein Aufbau wie in Abbildung 6 verwendet. Für die Frequenz- und Dämpfungs-Messung wird am Ende ein Abschluss verwendet und für die Wellenlängen-Messung wird ein einstellbarer Kurzschluss verwendet.

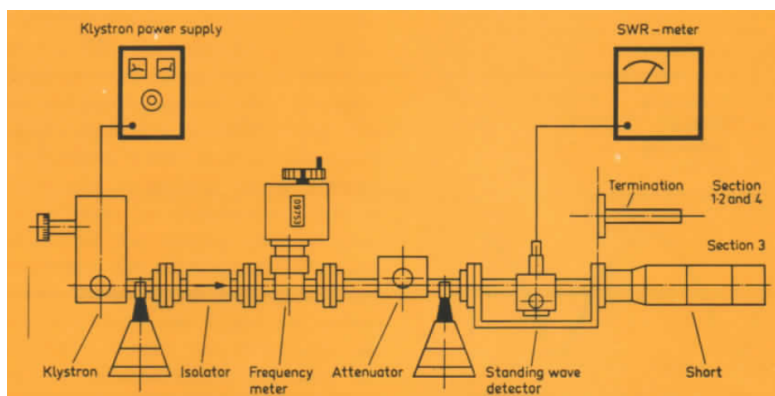


Abbildung 6: Aufbau zur Frequenz-, Wellenlängen- und Dämpfungs-Messung [2]

Es wird eine Dämpfung von 20 dB eingestellt und die Mode um 200 V Reflektorspannung eingestellt, sodass auf dem SWR-Messer ein Maximum zu sehen ist. Das Klystron wird mit einer Rechteckspannung moduliert.

Nun wird der Frequenzmesser so eingestellt, dass ein „dip“ zu erkennen ist. Die Frequenz kann abgelesen und notiert werden. Danach wird der Frequenzmesser wieder verstimmt.

Für die Wellenlängen-Messung wird die Messsonde verschoben und der Abstand zweier aufeinanderfolgender Minima wird notiert. Außerdem werden nun die Innenmaße des Hohlleiters benötigt.

Für die Dämpfungs-Messung wird die Dämpfung auf die maximale darstellbare Dämpfung auf dem SWR-Meter im 30 dB Modus eingestellt. Nun wird die Millimeterschraube des Dämpfungsglieds so verstellt, dass die Dämpfung auf dem SWR-Meter um 2 dB sinkt. Die Einstellung der Millimeterschraube wird zusammen mit der Dämpfung notiert. Dies wird so lange wiederholt, bis die Dämpfung nicht mehr ablesbar ist.

3.3 Messung des Stehwellenverhältnisses

Für die Stehwellenverhältnis-Messung werden die drei, in der Theorie beschriebenen, Messmethoden verwendet. Aber für alle dieser Methoden wird ein Aufbau wie in Abbildung 7 verwendet.

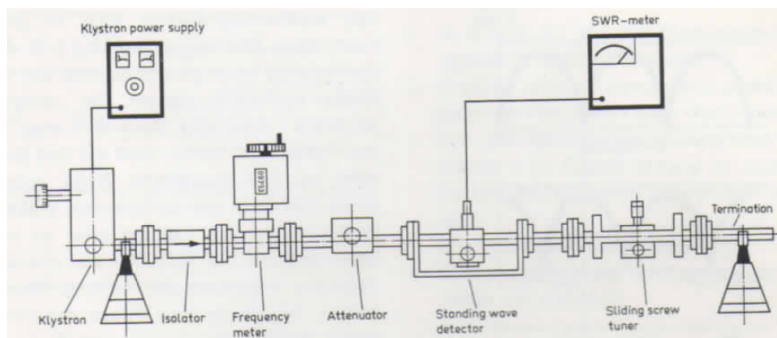


Abbildung 7: Aufbau zur Stehwellenverhältnis-Messung [2]

Auch hier wird eine Dämpfung von 20 dB verwendet und das Klystron bei der gleichen Mode rechteckmoduliert. Die Verschiebung der Sonde sollte nun den Ausschlag des SWR nur wenig verändern.

Für die Direkte Messung wird die Sonde des Gleitschraubentransformators in die Messleitung gedreht. Die Sonde wird zu einem Maximum geführt und das SWR-Meter wird auf das Maximum gestellt. Nun wird die Sonde zum nächsten Minimum geführt und auf dem SWR-Meter kann das Stehwellenverhältnis abgelesen werden. Dies wird für insgesamt 4 verschiedene Sondentiefen (3, 5, 7, 9 mm) durchgeführt.

Für die 3 dB-Messung wird der Gleitschraubentransformator auf 9 mm gestellt. Das SWR-Meter wird an einem Minimum auf 3 dB gestellt und es werden die Punkte links und rechts gesucht, an denen das SWR-Meter den Vollausschlag erreicht. Außerdem wird mit einem Kurzschluss statt Gleitschraubentransformator und Abschluss der Abstand zweier Minima gemessen.

Für die Abschwächer-Messung wird wieder der Gleitschraubentransformator auf 9 mm gestellt. Die Sonde wird auf ein Minimum geführt, bei einer eingestellten Dämpfung (z.B. 20 dB) wird das SWR-Meter auf einen gut ablesbaren Wert gestellt. (z.B. 3 dB) Dann wird ein Maximum gesucht und gleichzeitig die Dämpfung verändert. An dem Maximum sollte die Dämpfung so eingestellt werden, dass der gleiche Wert auf dem SWR-Meter angezeigt wird wie zuvor beim Minimum. Die beiden eingestellten Dämpfungen werden notiert.

4 Auswertung

4.1 Berechnung der Bandbreite

Zunächst werden die Messwerte für die verschiedenen Moden in Tabelle 1 notiert. An-

Tabelle 1: Messwerte der drei verschiedenen Moden

Modenzahl	V_0 / V	V_1 / V	V_2 / V	A_0 / V	f_0 / MHz
1. Mode	85	70	92	0,8	9036
2. Mode	140	122	150	1,0	9030
3. Mode	220	208	230	0,9	9027

schließend wird zur besseren Übersicht ein Plot mit diesen Werten erstellt. Dabei wird für jede der drei Moden ein Curve-Fit mit der Funktion

$$A = aU^2 + bU + c \quad (11)$$

durchgeführt. Dementsprechend erhalten wir neun verschiedene Parameter. Diese werden in Tabelle 2 präsentiert. Der dazugehörige Plot ist in Abbildung 8 dargestellt.

Tabelle 2: Parameter der drei Ausgleichsparabeln

Modenzahl	$a / 1/V$	b	c / V
1. Mode	-0,008	1,234	-49,067
2. Mode	-0,006	1,511	-101,667
3. Mode	-0,008	3,285	-358,800

Danach findet die eigentliche Bestimmung der Bandbreite und der Abstimm-Empfindlichkeit statt. Dafür wurden ebenfalls Messwerte aufgenommen, die in Tabelle 3 einsehbar sind. Dabei ist a) die Messung bei maximaler Amplitude. b) und c) sind jeweils die Spannungen und Frequenzen bei halber Amplitude, rechts bzw. links davon.

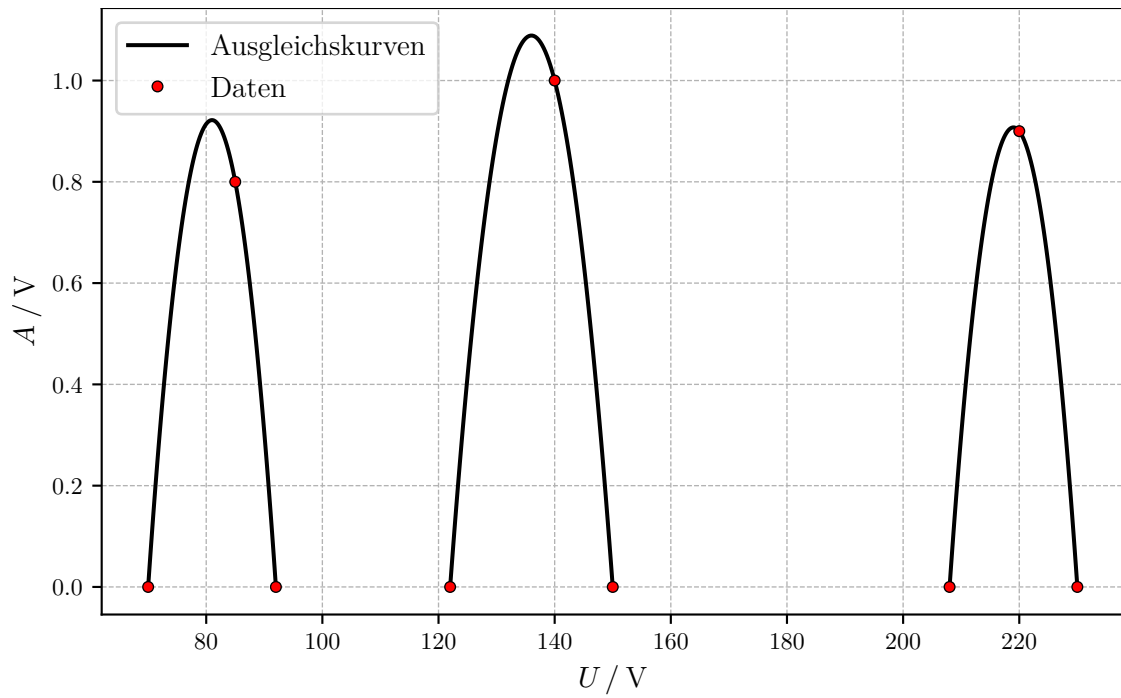


Abbildung 8: Plot der aufgenommenen Moden

Tabelle 3: Messwerte einer Mode für die Bestimmung der Bandbreite

	V/V	f/MHz
a)	220	9028
b)	211	9005
c)	235	9053

Über die Differenz von f_c und f_b kann nun die elektronische Bandbreite F als

$$F = 48 \text{ MHz}$$

berechnet werden. Über die Bandbreite kann ein weiterer Wert bestimmt werden, die Abstimm-Empfindlichkeit

$$\frac{F}{A_c - A_b} = 2000 \frac{\text{Hz}}{\text{V}}.$$

4.2 Frequenzmessung

Die zur Frequenzbestimmung benötigten Werte sind im Folgenden notiert. Hierbei sind m_1 und m_2 die auf dem Messgerät abgelesenen Abstände. f ist die eingestellte Frequenz, die es gleich zu bestätigen gilt.

$$f = 9027 \text{ MHz}$$

$$m_1 = 53,2 \text{ mm}$$

$$m_2 = 78,4 \text{ mm}$$

$$a = 22,8 \text{ mm}$$

a ist die vorgegebene Innenabmessung des Hohlleiters. Mit diesen Werten kann nun über Gleichung 4 die Frequenz berechnet werden, wobei

$$\lambda_H = 2 \cdot (m_2 - m_1) = 50,4 \text{ mm} \quad (12)$$

die Wellenlänge im Hohlleiter ist. Damit erhalten wir eine Frequenz

$$f = 8872 \text{ Hz}.$$

4.3 Die Dämpfungskurve

Die zur Aufstellung der Dämpfungskurve benötigten Daten sind in Tabelle 4 dargestellt. Der Hersteller des Dämpfungsglied gibt zudem einen Zusammenhang zwischen der Tiefe der Mikrometerschraube und der Dämpfung an. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in Tabelle 4 aufgezeigt.

Nun werden diese Werte nun in einem Plot dargestellt. Durch die Theoriekurve wurde eine Curve-Fit Parabel der Form Gleichung 11 gelegt. Die entstandenen Parameter sind

$$a = (1,749 \pm 0,134) \frac{1}{\text{dB}}$$

$$b = (0,403 \pm 0,316)$$

$$c = (-0,031 \pm 0,173) \text{ dB}.$$

Es fällt auf, dass die Messwerte nicht mit der Theoriekurve übereinstimmen. Zwischen den Mess- und Theoriewerten liegt eine Differenz von etwa 12,1 dB. Zur Vollständigkeit sind die an die Theoriekurve angepassten Messwerte ebenfalls in Abbildung 9 dargestellt.

Tabelle 4: Messwerte und Werte des Herstellers für die Dämpfungskurve

SWR-Ausschlag / dB	d / mm	d_{theorie} / mm
0	2,50	0,00
2	2,67	1,00
4	2,92	1,40
6	3,09	1,75
8	3,20	2,00
10	3,41	2,30

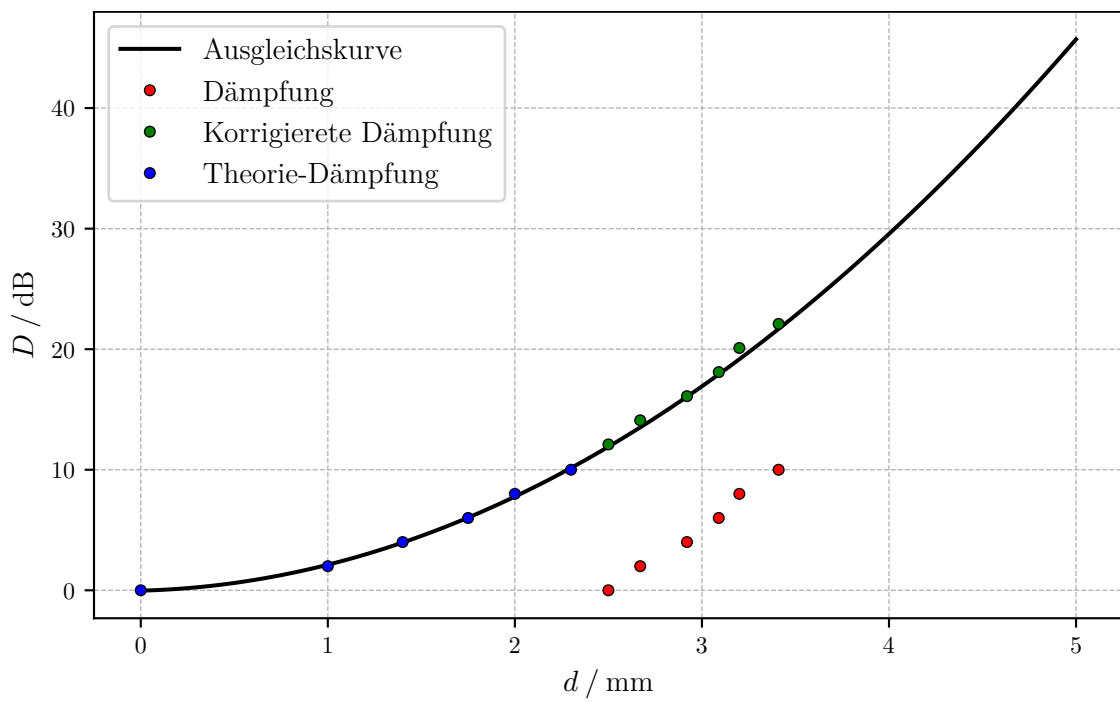


Abbildung 9: Plot der Dämpfungskurve mit gemessenen und korrigierten Werten

4.4 Berechnung des Stehwellenverhältnisses

Für die Berechnung des Stehwellenverhältnisses werden drei verschiedene Methoden verwendet. Diese sind nachfolgend aufgeführt.

4.4.1 Direkte Bestimmung

In Tabelle 5 sind die direkt bestimmten Werte des SWR-Meters notiert, sowie die Einstellung des Gleitschraubentransformators.

Tabelle 5: Messwerte des SWR in Abhängigkeit der Tiefe des Gleitschraubentransformators

d / mm	SWR
3	1,15
5	1,65
7	3,45
9	10,00

4.4.2 3 dB-Methode

Die gemessenen Werte der 3 dB-Methode sind nachfolgend aufgelistet

$$\begin{aligned}d_1 &= 63,5 \text{ mm} \\d_2 &= 61,8 \text{ mm} \\m_1 &= 67,0 \text{ mm} \\m_2 &= 90,8 \text{ mm} .\end{aligned}$$

Dabei sind m_1 und m_2 jeweils die gemessenen Abstände der Maxima. Aus diesen Werten kann über die bekannte Relation aus Gleichung 12 die Hohlleiterwellenlänge λ_H erneut bestimmt werden. So ergibt sich

$$\lambda_H = 47,6 \text{ mm} .$$

Nun kann das Stehwellenverhältnis S_2 über Gleichung 8 bestimmt werden. Es ergibt sich

$$S_2 = 8,987 .$$

4.4.3 Abschwächer-Methode

Für die Abschwächer-Methode werden am Dämpfungsglied zwei verschiedene Einstellungen A_1 und A_2 benötigt. Das entsprechende Stehwellenverhältnis S_3 ergibt sich dann über Gleichung 10.

$$A_1 = 20,0 \text{ dB}$$

$$A_2 = 43,0 \text{ dB}$$

$$S_3 = 47,6 .$$

5 Diskussion

Abbildung 8 zeigt gut, dass die aufgenommenen Messwerte nicht ganz perfekt sind. Die angeblichen Maxima der Moden sind nicht ganz mittig, wodurch die Fit Funktion eine Art neues Maximum erzeugt. Dabei ist die Mode bei etwa 220 V die beste von den dreien.

Ein erstes Indiz für die Genuigkeit der Messung war die erneute Bestimmung der Frequenz. Diese war als $f_{\text{theorie}} = 9027 \text{ MHz}$ eingestellt worden. Der in der Auswertung ausgerechnete Wert ist $f_{\text{gemessen}} = 8872 \text{ Hz}$. Die Abweichung von beiden ist somit $\Delta f = 1.75\%$.

Es ist schwer die Dämpfungskurve richtig zu bewerten. Die gemessenen Werte weichen, wie bereits beschrieben, um einen festen Wert von der Theoriekurve ab. Wir haben also vermutlich einen systematischen Fehler beim Einstellen der Nulllinie gemacht. Die Messwerte passen sich nämlich nach der Verschiebung gut dem Fit an. Schlussendlich war die Messung an sich also erfolgreich.

Bei der Berechnung des Stehwellenverhältnisses gab es drei verschiedene Wege. Vergleichen kann man dabei die SWRs bei denen die Tiefe des Gleitschraubentransformators 9 mm beträgt. Für die drei Messergebnisse bekamen wir

$$S_1 = 10,00$$

$$S_2 = 8,987$$

$$S_3 = 14,125 .$$

S_1 war allerdings sehr schwer abzulesen. Wir mussten die Skala des SWR-Meters daran anpassen, da der Ausschlag immer maximal war. Eigentlich sind die letzten beiden Methoden dafür geeignet Stehwellenverhältnisse bei großer Tiefe des Gleitschraubentransformators zu messen. Hier liegen aber alle Werte in etwa um S_1 verteilt. Es ist also möglich, dass wir beim Ablesen von S_1 einen Fehler gemacht haben.

Literatur

- [1] Wikipedia. *Klystron* — *Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 23. Juli 2021]. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Klystron&oldid=197586504>.
- [2] Phillips. *Versuchsanleitung. Experimente mit Mikrowellen 1*.