

Versuch 53 Mikrowellen

Robert Konradi
robert.konradi@tu-dortmund.de

Lauritz Klünder
lauritz.kluender@tu-dortmund.de

Durchführung: 24.10.2018, Abgabe: 05.11.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Untersuchung an einem Reflexklystron	3
1.2	Messung von Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung	4
1.3	Stehwellenmessungen	4
2	Durchführung	6
3	Auswertung	10
3.1	Untersuchung an einem Reflexklystron	10
3.2	Messung von Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung	12
3.3	Stehwellenmessungen	13
4	Diskussion	14
	Literatur	15

1 Theorie

Mikrowellen sind, wie sichtbares Licht, elektromagnetische Wellen. Die Frequenz umfasst einen Bereich von 300 MHz bis 300 GHz. Die Anwendungsgebiete der Mikrowellen sind meist in Radar- und Richtfunkanlagen. Um Mikrowellen verlustärmer zu übertragen, werden Hohlleiter verwendet. Hohlleiter bestehen aus Metallrohren mit unterschiedlichsten Formen. Am gebräuchlichsten sind rechteckige Hohlleiter. Die Hohlleiter können unterschiedliche Typen von Wellen fortleiten, welche Moden genannt werden. Bei elektromagnetische Wellen gibt es drei verschiedene Modentypen, TE-Modus, TM-Modus und der TEM-Modus. Bei Hohlleitern sind die Typen TE-Modus und TM-Modus wichtig, da sie eine kritische Frequenz besitzen, unter der keine Energietransporte möglich sind. Die kritische Frequenz kann durch die Abmessungen des Hohlleiters bestimmt werden. Die Modentypen werden weiter in verschiedene Moden unterteilt.

1.1 Untersuchung an einem Reflexklystron

Das Klystron wird verwendet, um Mikrowellen zu erzeugen oder zu verstärken. Eine Darstellung ist in Abbildung 1 gegeben.

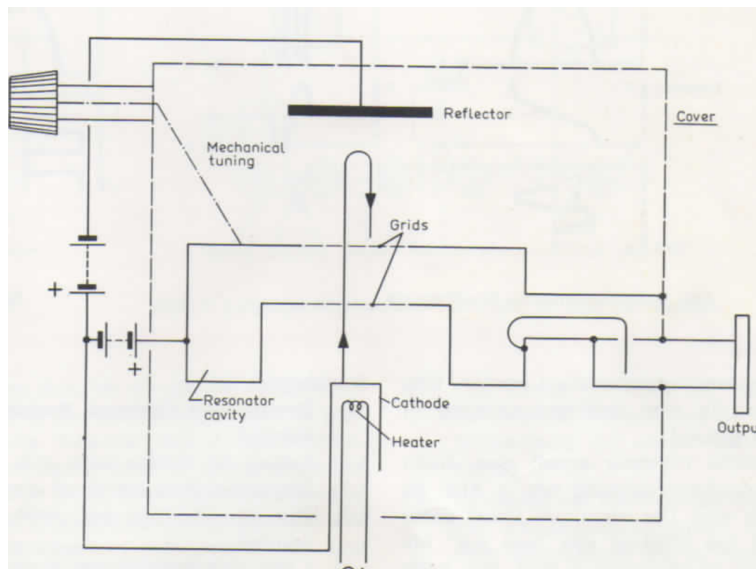


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Klystrons.[1]

Elektronen treten durch thermische Emissionen aus einer Kathode aus. Sie werden dann beschleunigt und durchlaufen einen Hohlraumresonator. Hinter diesem Resonator befindet sich ein Reflektor, der im Vergleich zu der Beschleunigungsspannung eine negative Spannung aufweist. Wird nun eine Spannungsquelle an dem Resonator Gitter angelegt, so entsteht darin ein Hochfrequenz-Feld. Im Feld werden die Elektronen aus der Kathode in Abhängigkeit des Feldes im Resonator weiter beschleunigt oder abgebremst. Es entsteht nun eine Geschwindigkeitsmodulation der Elektronen aufgrund der verschiedenen

Laufzeiten. Die Elektronen bündeln sich in dem Reflektorfeld und werden durch den Reflektor erneut durch den Resonator beschleunigt. Dringen sie zu einer Zeit in den Resonator ein, in dem das Hochfrequenz-Feld entgegen der Richtung des Bündels ist, so werden sie abgebremst und geben Energie ab. Diese Energie wird dann induktiv aus dem Resonator ausgekoppelt und durch einen Hohlleiter weitergeleitet. Die Frequenz kann durch mechanische Abstimmung des Resonators Raumes bestimmt werden. Dies wird im nächsten Kapitel näher erläutert.

1.2 Messung von Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung

Zwischen Wellenlänge λ und Frequenz f ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned} \text{Vakuum : } c &= \lambda_0 \cdot f \\ \text{luftgefüllten Hohlleiter : } \lambda_g &= \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \\ \text{TE-, TM-Moden in rechteckigen Hohlleiter : } \lambda_c &= \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \end{aligned}$$

Dabei ist λ_c die Grenzwellenlänge des Hohlleiters mit den Abmessungen der Breite a und der Höhe b . Die Grenzwellenlänge kann in diesem Fall näherungsweise als der doppelte Abstand zwischen den beiden schmalen Wänden angenommen werden. Ineinander eingeführt ergibt sich nun für die Frequenz:

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

Die Dämpfung beschreibt zum Beispiel ein Leistungsverhältnis oder Spannungsverhältnis und wird in Dezibel dB angegeben.

$$D = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2} \quad (2)$$

Im nächsten Kapitel wird eines der wichtigen Messinstrument näher erläutert.

1.3 Stehwellenmessungen

Im Hohlleiter können sich stehende Wellen bilden aufgrund von Unstetigkeiten oder Lastimpedanzen. An diesen Fehlstellen wird die einfallende Welle reflektiert. Dann überlagern sich die einfallende Welle und die reflektierte Welle und es bildet sich eine stehende Welle. Dabei spielen die Amplituden sowie Phase der beiden Wellen eine Rolle. Ein Maximum ist genau dann, wenn die beiden Einzelwellen in gleicher Phase sind und identische Amplitude besitzen. Für ein Minimum ist es dann, wenn die Amplituden entgegengesetzt

sind. Der Abstand zwischen zwei Minima ist gerade die Hälfte der Grenzwellenlänge des Hohlleiters. Die stehende Welle wird durch das Spannungs-Stehwellen-Verhältnis (SWR) beschrieben. Das SWR ist das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Feldstärke in einem Hohlleiter

$$\text{SWR} = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}. \quad (3)$$

Dieses Stehwellen-Verhältnis könnte somit direkt über eine Sonde, die in den Hohlleiter hineinragt, gemessen werden. Dieses direkte Verfahren ist nur bei kleinen SWR genau, wenn die Sondentiefe nicht sehr groß sein muss, sodass das Feld nicht gestört wird. Außerdem kann, wenn die Sondentiefe zu groß ist, die Leistung am Detektor so groß werden, dass er nicht mehr richtig messen kann. Ein weiteres Verfahren zur Messung des SWR ist die „3 dB-Methode“. Dabei wird der Abstand zwischen jenen Punkten d_1 und d_2 gemessen, an welchen die Ausgangsspannung den doppelten Wert des Minimums v_{\min} erreicht. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 2 zu sehen.

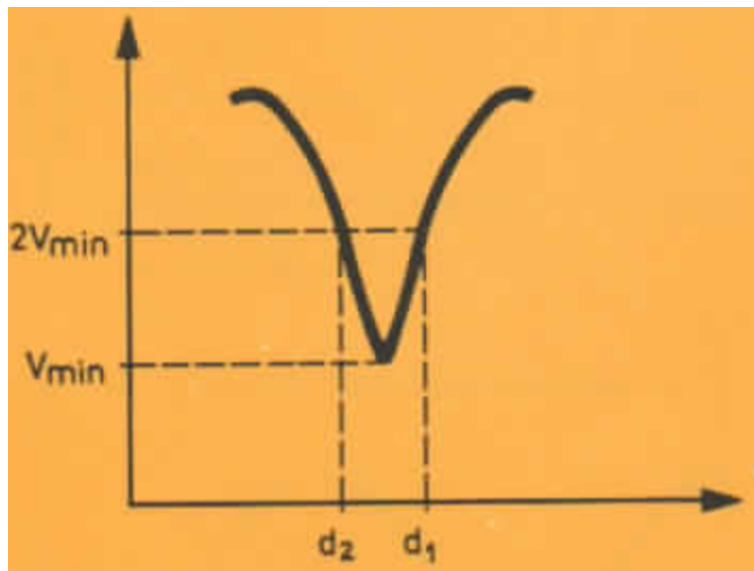


Abbildung 2: Die 3 dB-Methode.[1]

Um nun damit das SWR zu erhalten, wird die folgende Formel verwendet

$$\text{SWR} = \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \frac{\pi \cdot (d_1 - d_2)}{\lambda_g}}}. \quad (4)$$

Ist das SWR größer als 10, so gilt die Näherung

$$\text{SWR} = \frac{\lambda_g}{\pi \cdot (d_1 - d_2)}. \quad (5)$$

Mit diesem Verfahren wird die Sondenüberlastung überwunden. Eine weitere Methode, das SWR zu bestimmen, ist die „Abschwächer-Methode“. Hierbei wird das Ausgangssignal im Maximum mit dem Signal im Minimum gleichgestellt. Dazu wird ein Abschwächer, das Dämpfungsglied, zwischen Generator und Messleitung eingeführt. Es gilt:

$$\text{SWR} = \frac{1}{2} A_2 - A_1 \quad (6)$$

Mit dieser Methode wird die Leistungsüberlastung am Detektor überwunden.

2 Durchführung

Um Untersuchungen am Reflexklystron machen zu können, wird der Aufbau nach Abbildung 3 benötigt.

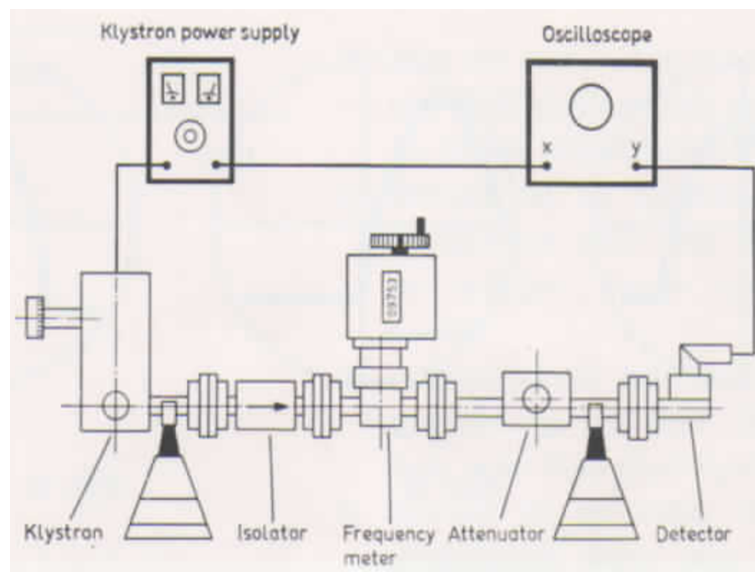


Abbildung 3: Aufbau für Klystron-Untersuchung.[1]

Da das SWR-Meter sehr sensibel ist und kaum stabilen Werte erbringt, wird dies durch ein Oszilloskop ersetzt. Zu Beginn der Messung wird noch eine Heizzeit von ca. einer Minute benötigt, um die Elektronen emittieren zu können. Das Dämpfungsglied wird auf 30 dB eingestellt. Die Abhängigkeit der Dämpfung von der Einstellung der Mikrometerschraube des Dämpfungsgliedes ist in Abbildung 5 gegeben.

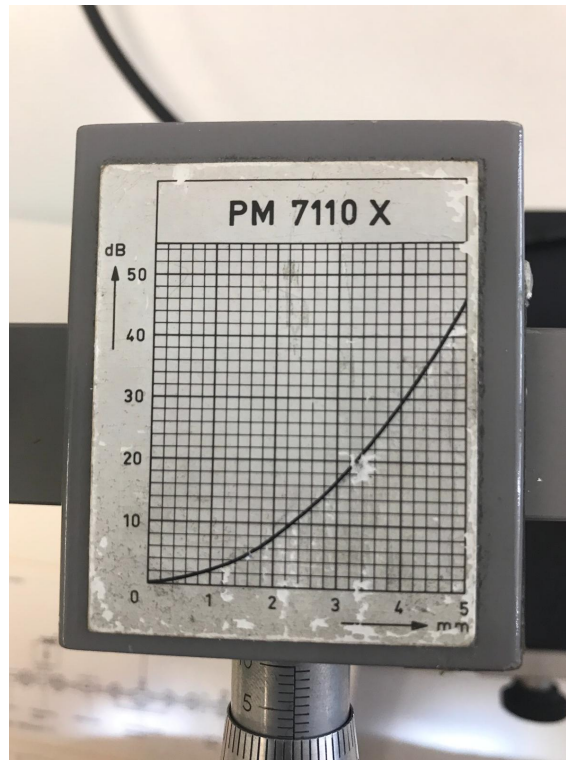


Abbildung 4: Kurve des Dämpfungsgliedes.

Am Oszilloskop werden die Spannungen vom Ausgangssignal des Detektors gegen das Eingangssignal des Speisegerätes dargestellt. Die Reflektorspannung wird auf etwa 200 V gestellt und durch Einstellen der Reflektorspannung soll eine Modekurve wie in Abbildung 6 erscheinen.

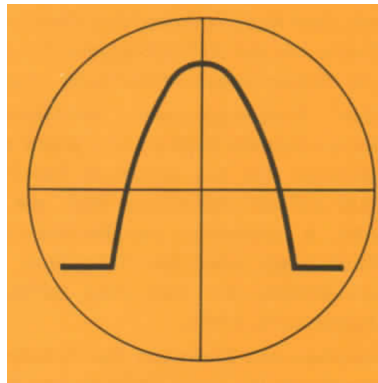


Abbildung 5: Darstellung einer Modenkurve.[1]

Es werden nun die Reflektorspannung und die Amplitudenspannung vom Oszilloskop und die Frequenz eingetragen. Die Frequenz wird durch den Frequenzmesser bestimmt, an

dem so lange gedreht wird, bis eine Einsattelung (Dip) auf der Spitze der Modenkurve zu sehen ist. Dieser Vorgang wird für zwei weitere Moden durch Erniedrigung der Reflektorspannung durchgeführt. Es wird noch die elektronische Abstimmung durchgeführt. Dabei wird ein Abgleich der Reflektorspannung auf den höchsten Modus mit einer Frequenz von 9 GHz eingestellt. Dabei soll der Vorgang wie in Abbildung 6 dargestellt ist, durchgeführt werden und die Reflektorspannung sowie Frequenz notiert werden.

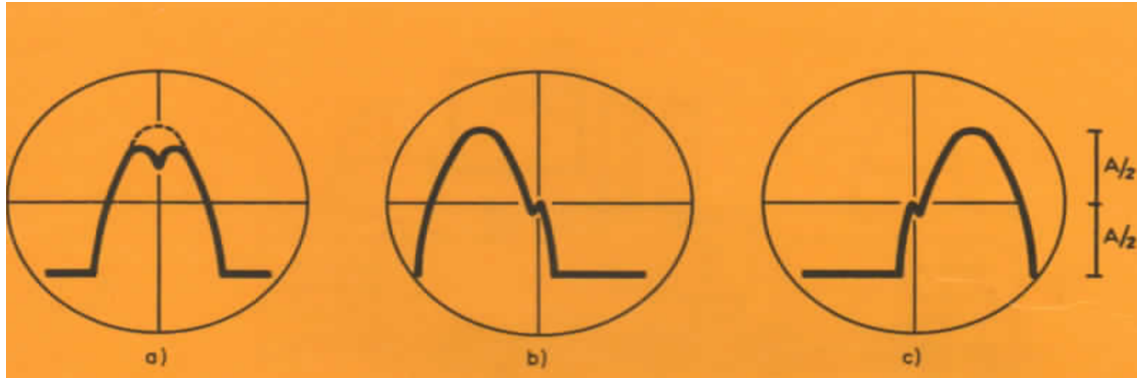


Abbildung 6: Vorgang zur Messung der elektrischen Abstimmung.[1]

Die elektronische Bandbreite ist die Differenz der beiden Frequenzen $f' - f''$ und die Abstimmempfindlichkeit ist definiert als die elektronische Bandbreite durch die Differenz der Reflektorspannungen $V' - V''$.

Für die Frequenzmessung wird der Aufbau in Abbildung 7 benötigt.

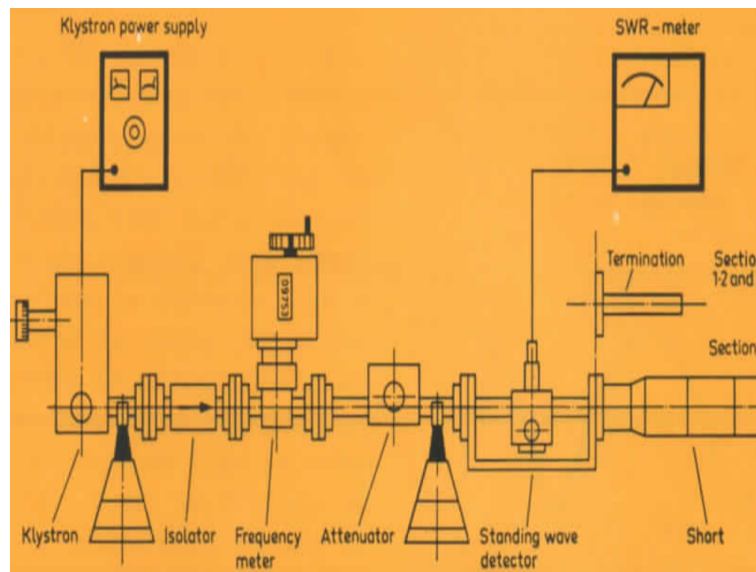


Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Frequenzmessung.[1]

Auch hier wurde das Oszilloskop verwendet, da das SWR-Meter zu sensibel ist. Der

Frequenzmesser wird so eingestellt, dass sich am Oszilloskop ein minimaler Ausschlag einstellt und der Wert dieser Frequenz wird notiert. Zur Wellenlängenmessung soll die Sonde zu einem Punkt minimalen Ausschlags verschoben werden und dieser Wert wird notiert. Das Gleiche gilt für das nächste Minimum. Eine Innenabmessung des Hohlleiters a wurde der Wert

$$a = (22,860 \pm 0,046) \text{ mm}$$

angegeben [1]. Bei der Dämpfungsmessung wurde das Dämpfungsglied auf 0 dB eingestellt. Der Ausschlag am Oszilloskop ist der Spannungsreferenzwert. Mit der Formel 2 wird dann aus dem am Oszilloskop gezeigten Spannungen die Dämpfung in dB bestimmt. Damit wird für verschiedene gemessene Dämpfungen die Stellung des Dämpfungsgliedes notiert und die zugehörige Dämpfung die auf dem Dämpfungsglied angegeben ist. Als Letztes wird noch die Stehwellenmessungen durchgeführt. Der Aufbau ist in Abbildung 8 dargestellt.

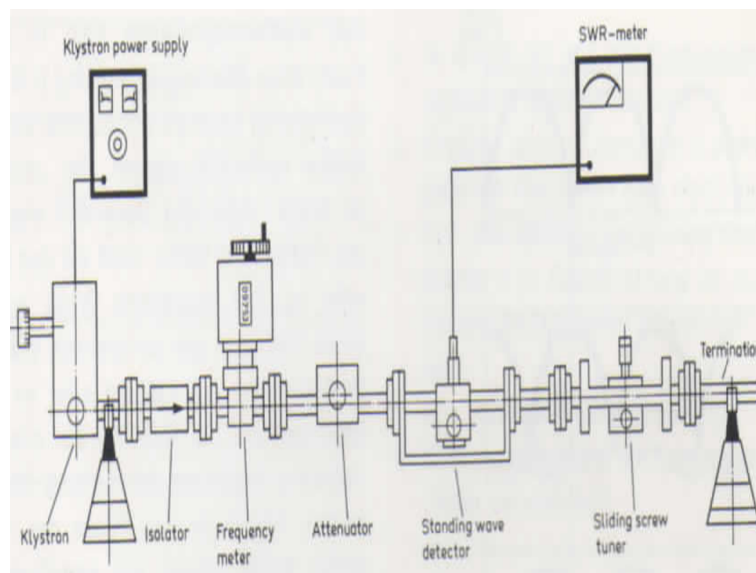


Abbildung 8: Versuchsaufbau zur Stehwellenmessung.[1]

Die Messung nach der ersten Methode wird noch mit dem Oszilloskop durchgeführt. Dabei wird die maximale und minimale Spannung für vier verschiedene Sondentiefen gemessen. Aus den Spannungen lässt sich dann das SWR bestimmen. Daraufhin wird das SWR-Meter benötigt. Bei der „3 dB-Methode“ wird eine Sondentiefe von 9 mm eingestellt. Nun wird es auf einem Minimum verschoben und das SWR-Meter wird so eingestellt, dass es 3 dB anzeigt. Nun wird die Sonde erst in die eine, dann in die andere Richtung verschoben, bis kein Ausschlag zu sehen ist. Dies beiden Werte werden notiert. Zur „Abschwächer-Methode“ wird die Sondentiefe bei 9 mm eingestellt und auf einem Minimum gelegt. Das Dämpfungsglied wird auf $A_1 = 20 \text{ dB}$ eingestellt und am SWR-Meter wird ein Ausschlag von 3 dB eingestellt. Durch Verschiebung der Sonde und

gleichzeitig die Verschiebung des Dämpfungsgliedes soll ein relatives Maximum aufgesucht werden. Dies wird dadurch erreicht, wenn das SWR-Meter auf der zuvor eingestellten Skala bleibt. Dabei wird A_2 notiert und den Stehwellenverhältnis mit der Formel 6 berechnet.

3 Auswertung

3.1 Untersuchung an einem Reflexklystron

In dem ersten Teil des Versuchs geht es um die verschiedenen Moden, die sich in dem Hohlleiter ausbilden bei unterschiedlichen Reflektorspannungen. Dabei wird bei drei verschiedene Moden die Reflektorspannung U an drei verschiedenen Punkten bestimmt, um somit ein Moden-Diagramm zu zeichnen. Die einzelnen Moden haben die Form eines Polynom 2. Grades, somit werden aus den drei bestimmten Punkten mit der folgenden Gleichung die Modengleichungen bestimmt

$$f(x) = ax^2 + bx + c.$$

Die Messwerte sind in Tabelle 1 dargestellt. Dabei sind A die Amplituden der Moden und f die Frequenz.

Tabelle 1: Messdaten für das Moden-Diagramm.

	U / V	A / V	f / MHz
1.Mode	210	35	9002,0
	190	0	
	225	0	
2.Mode	130	37	9006,5
	110	0	
	140	0	
3.Mode	70	30	9011,7
	57	0	
	81	0	

Mit diesen Messwerten ergibt sich nun das Moden-Diagramm, welches in Abbildung 9 dargestellt ist.

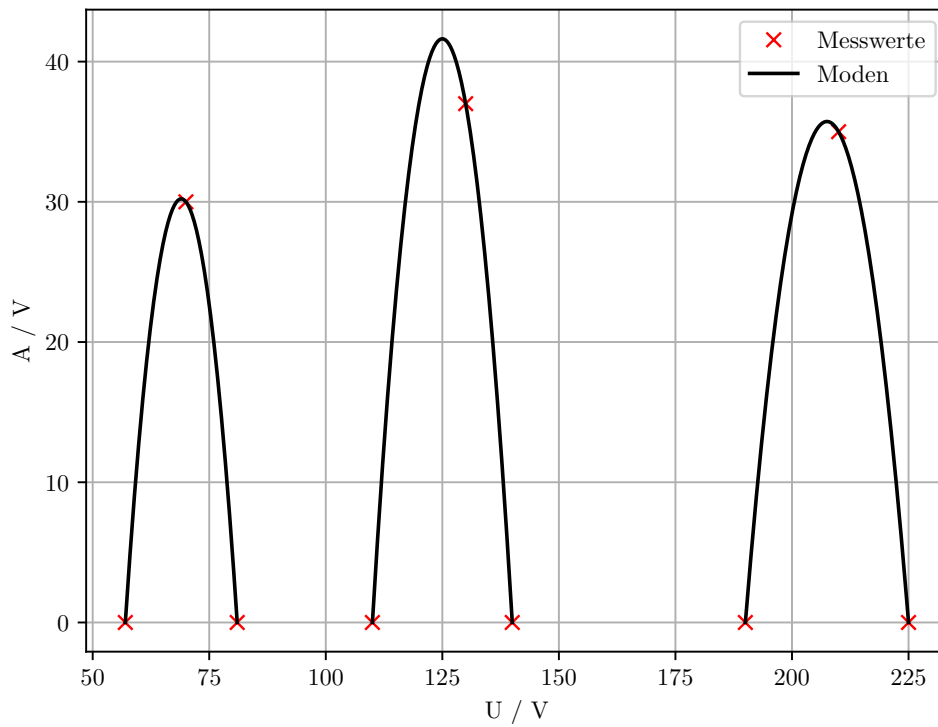


Abbildung 9: Darstellung der drei gemessenen Moden in einem Moden-Diagramm.

Daraufhin werden die Bandbreite $\nu = f' - f''$ und die Abstimm Empfindlichkeit $\kappa = \frac{f' - f''}{U' - U''}$ bestimmt. Dabei werden die Punkte halber Leistung von der Mode bei $f = 9000$ MHz gemessen. Die Messwerte sind in Tabelle 2 gezeigt.

Tabelle 2: Messergebnisse der elektronischen Abstimmung.

U / V	f / MHz
200	8977,5
221	9025,0

Damit ergeben sich für die Bandbreite und die Abstimm Empfindlichkeit

- $\nu = 47,50$ MHz
- $\kappa = 2,26$ MHz/V

3.2 Messung von Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung

Bei diesem Teil des Versuchs wird als Erstes die Frequenz der stehenden Welle auf zwei verschiedene Arten bestimmt. Zunächst wird die Frequenz direkt mit dem Frequenzmesser bestimmt. Die abgelesene Frequenz ist

$$f_1 = 8998 \text{ MHz.}$$

Bei der zweiten Art wird erst die Wellenlänge in dem Hohlleiter λ_g bestimmt und aus der Wellenlänge wird dann die Frequenz mithilfe der Gleichung 1. Dabei ist $a = (22,860 \pm 0,046) \text{ mm}$ die Breitseite des Hohlleiters und $c = 3 \cdot 10^{11} \text{ mm/s}$ die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit. Da für c der gerundete Wert verwendet wird, wird auch für a die Näherung $a = 22,9 \text{ mm}$ verwendet.

Zur Bestimmung von λ_g werden nun mit der Sonde zwei Minima ausgemessen und der doppelte Abstand dieser Minima ist die gesuchte Wellenlänge. Die Positionen der Minima sind:

- 1. Minimum : 69 mm
- 2. Minimum : 92 mm

Damit ergibt sich eine Wellenlänge im Hohlleiter von $\lambda_g = 4,6 \text{ cm}$. Damit kann nun die Frequenz der Welle bestimmt werden.

Nun ergibt sich die Frequenz zu

$$f_2 = 9243,3 \text{ MHz.}$$

Als Nächstes wird die Funktion des Dämpfungsgliedes untersucht. Dabei wird die Spannung U bei verschiedenen Stellungen des Dämpfungsgliedes mit dem Oszilloskop bestimmt. Diese Spannungen können dann in dB dargestellt werden, da die Spannung $U_0 = 16 \text{ V}$ ist, wenn die Dämpfung minimal ist. Die gemessenen Dämpfungen werden dann mit der Kurve des Dämpfungsglied verglichen. Die Messwerte sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Werte der Dämpfung bei verschiedenen Stellungen des Dämpfungsgliedes.

U / V	Dämpfung gemessen / dB	Stellung / mm	Dämpfung Eichkurve / dB	Abweichung / %
2,60	15,78	3,00	17	7,2
1,64	19,78	3,30	20	1,1
1,04	23,74	3,52	23	3,2
0,65	27,82	3,68	25	11,3
0,41	31,82	3,90	28	13,6
0,26	35,78	4,15	31	15,4

Diese Messwerte sind in Abbildung 10 graphisch dargestellt, um die beiden Kurven anschaulicher vergleichen zu können.

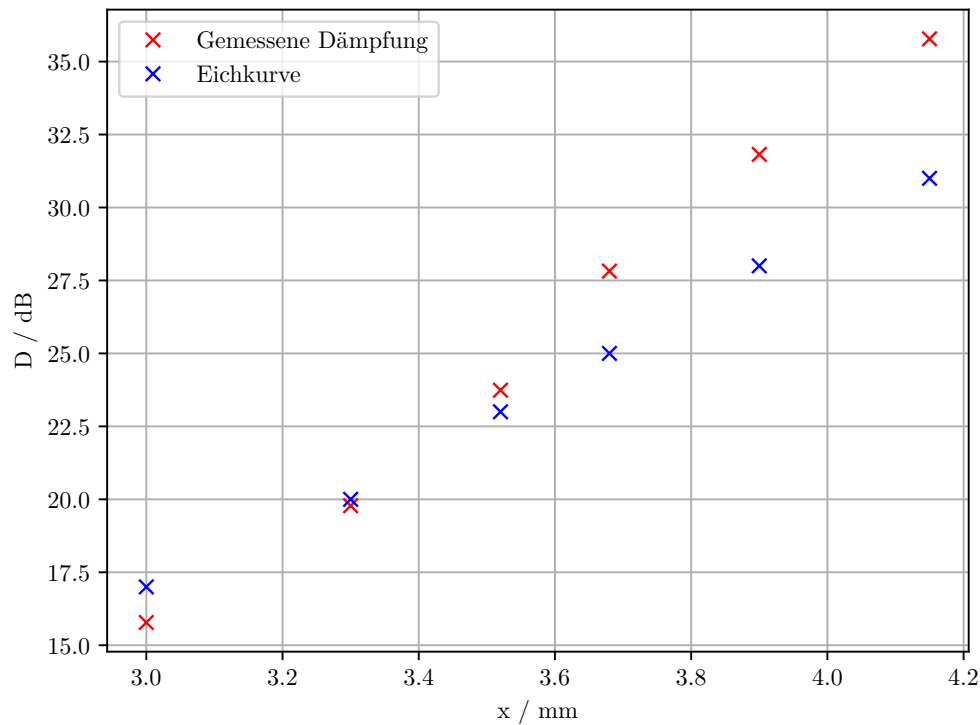


Abbildung 10: Graphische Darstellung der gemessenen Dämpfungskurve und der Eichkurve.

3.3 Stehwellenmessungen

In dem letzten Teil wird das Spannungs-Stehwellenverhältnis mit drei verschiedenen Methoden bestimmt. Dabei wird die Frequenz des Klystrons auf 9 GHz eingestellt und nicht verändert.

Zunächst wird das SWR für verschiedene Sondentiefen bestimmt. Bei dieser direkten Methode wird für die verschiedenen Sondentiefen die Amplitude eines Minimums und eines Maximums bestimmt und damit wird das Verhältnis gebildet. Die Messwerte von diesem Teil sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Messwerte zur Bestimmung des SWR für verschiedene Sondentiefen.

Sondenstellung :	3 mm	5 mm	7 mm	9 mm
Maximum:	6,6 V	7,6 V	10,0 V	12,4 V
Minimum:	6,2 V	5,2 V	3,2 V	0,4 V
SWR:	1,06	1,46	3,13	31

Daraufhin wird für die Sondenstellung von 9 mm das SWR mit der „3 dB-Methode“ bestimmt. Dabei wird zunächst die Wellenlänge in dem Hohlleiter λ_g nochmal bestimmt. Das Vorgehen ist das gleiche wie zuvor:

- 1. Minimum: 45,7 mm
- 2. Minimum: 70,0 mm
- $\lambda_g = 4,86$ cm

Nun werden noch die Werte d_1 und d_2 , die in dem Kapitel 1.3 definiert wurden, mit dem SWR-Meter bestimmt:

- $d_1 = 48,0$ mm
- $d_2 = 51,4$ mm

Damit ergibt sich mithilfe der Gleichung 5

$$\text{SWR} = 4,56.$$

Als letztes wird die „Abschwächer-Methode“ verwendet, auch für eine Sondenstellung von 9 mm. Bei dieser Methode wird über Dämpfungen das SWR bestimmt. Dabei sind die Messergebnisse

- $A_1 = 20$ dB
- $A_2 = 24$ dB
- $\Delta A = 4$ dB

Mit diesen Werten lässt sich nun das SWR mit der Gleichung 6 bestimmen.

$$\text{SWR} = 2$$

4 Diskussion

Bei der Durchführung des Versuches ist aufgefallen, dass das SWR-Meter sehr störungsanfällig ist. Deshalb wurde bei allen Versuchsteilen, bei denen es ging das Oszilloskop verwendet.

Bei dem ersten Versuchsteil kann an dem Moden-Diagramm gesehen werden, dass die gemessenen Maxima der Amplituden nicht mit den Maxima der gezeichneten Moden übereinstimmt. Das bedeutet, dass entweder das Maximum oder die Schwingungseinsätze nicht genau gemessen wurden. Es wird aber gut sichtbar, dass der Abstand der Moden immer größer wird, je größer die Reflektorspannung wird.

In dem zweiten Versuchsteil ist die erste gemessene Frequenz $f_1 = 8998$ MHz und die zweite $f_2 = 9243,3$ MHz. Das ergibt eine Abweichung von 2,73%. Diese Abweichung

liegt im Toleranzbereich und auch die bestimmte Wellenlänge $\lambda_g = 4,6 \text{ cm}$ liegt in dem Bereich von Mikrowellen. Bei der Dämpfung fällt auf, dass die gemessenen Werte für größere Dämpfungen immer stärker von der Eichkurve abweichen. Zum einen kann das daran liegen, dass die Dämpfung mit dem Oszilloskop gemessen wurde und bei größeren Dämpfungen war es schwierig, die Spannung genau abzulesen. Zum anderen kann es sein, dass das Dämpfungsglied nicht perfekt funktioniert, sodass die Eichkurve nicht mehr stimmt für größere Dämpfungen.

Die Messwerte der Stehwellenverhältnis-Messung für verschiedene Sondentiefen stimmen mit den theoretischen Grundlagen überein, dass das SWR immer größer wird, je tiefer die Sonde in den Hohlleiter reinragt. Außerdem kann gut gesehen werden, dass die erste Methode sich nicht gut eignet um hohe SWR zu bestimmen, weil bei dieser Methode für eine Sondentiefe von 9 mm das $\text{SWR} = 31$ beträgt. Die anderen beiden Methoden sind besser geeignet um hohe SWR zu messen. Bei der „3 dB-Methode“ ist das $\text{SWR} = 4,56$ und bei der „Abschwächer-Methode“ ist es $\text{SWR} = 2$. Die mit diesen Methoden bestimmten SWR sind überraschend, weil zum einen die Sondentiefe am größten war und zum anderen diese Methoden für große SWR verwendet werden. Bei den letzten beiden Methoden musste das SWR-Meter benutzt werden. Die Messungen waren schwierig, da das SWR-Meter stark geschwankt hat, was die Abweichung zwischen den beiden Methoden erklären könnte.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 53: Mikrowellen*. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/AnlMikrowelle.pdf>.