

Versuch 53

Mikrowellen

Lars Hoffmann
lars.hoffmann@udo.edu

Vukan Jevtic
vukan.jevtic@udo.edu

Durchführung: 09.11.2015

Abgabe: 13.11.2015

1 Zielsetzung

Ziel des Versuchs ist es, Mikrowellen zu erzeugen und in Hohlleitern zu vermessen.

2 Theorie

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von etwa 300 MHz bis 300 GHz

2.1 Hohlleiter

Ein Hohlleiter ist ein Metallrohr, durch das elektromagnetische Wellen geleitet werden können. Auf diese Weise lassen sich Hohlleiter für den Energietransport nutzen. Die Querschnitte von Hohlleitern sind oftmals rechteckig, können jedoch auch kreisrund oder elliptisch sein. Um eine elektromagnetische Welle im Hohlleiter auszurechnen, müssen die Maxwellgleichungen für die Randbedingungen der leitenden Hohlleiterwände gelöst werden. Im Hohlleiter nimmt die Wellengleichung

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi(\vec{r}, t) = v^2 \Delta \Psi(\vec{r}, t)$$

aufgrund der Randbedingungen die Form

$$\Delta_{\perp} \phi(x, y) = \left(k_z^2 - \epsilon_r \frac{\omega^2}{c^2} \right) \phi(x, y) \quad \text{mit} \quad \Delta_{\perp} \Psi := \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2}$$

an. Elektromagnetische Wellen, für die gilt $B_z = 0$ heißen *Transversal Magnetisch* **TM**. Wellen mit $E_z = 0$ heißen *Transversal Elektrisch* **TE**. Ist z die Ausbreitungsrichtung, lautet die allgemeine TE Lösung für einen Hohlleiter der Breite b und Höhe a

$$E_z = E_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{i(\omega t - k_z z)}$$

für die Ausbreitungsrichtung. Unterhalb einer Grenzfrequenz, der *Cutoff-Frequenz*,

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

können elektromagnetische Wellen nicht mehr durch den Hohlleiter propagieren, und folglich keine Energie transportieren.

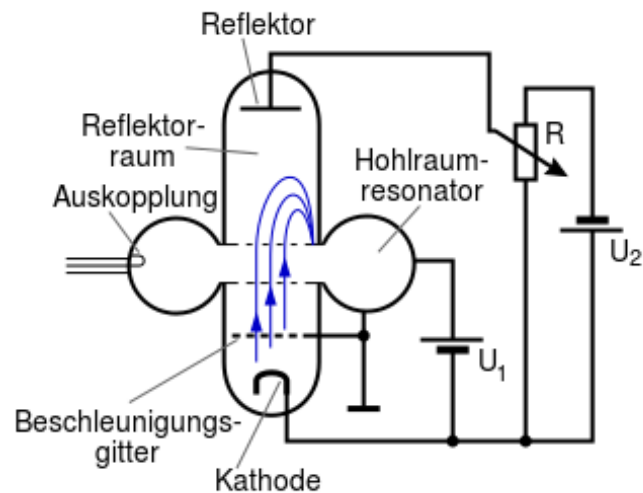


Abbildung 1: Reflexklystron [2]

2.2 Das Reflexklystron

Das Klystron ist ein Mikrowellengenerator. Der schematische Aufbau ist in Abb. 1 zu sehen. Die aus der Elektronenquelle austretenden Elektronen werden beschleunigt und durch einen Hohlleiter geleitet. Beim Austreten aus dem Hohlleiter werden sie an einer Anode reflektiert. Das im Hohlleiter entstehende hochfrequente Feld führt zusätzlich dazu, dass die Geschwindigkeit der Elektronen im Hohlleiter variiert und diese unterschiedliche Laufzeiten im Innenraum haben. An beiden Seiten des Hohlleiters befindet sich ein Gitter, in das Elektronen eintreten und den Hohlleiter anregen können. Bei einem Gangunterschied von $\varphi = n + 3/4$ kommt es zu Resonanz.

3 Versuchsaufbau

Der Aufbau besteht aus einem Klystron, das mit einem Spannungsgerät betrieben wird. Am Wellenausgang befindet sich ein Frequenzmesser. Je nach Versuchsteil können eine Messsonde, ein Kurzschluß, oder ein Reflektor am Wellenausgang montiert werden. Als Messgeräte werden ein SWR Meter und ein Oszilloskop verwendet.

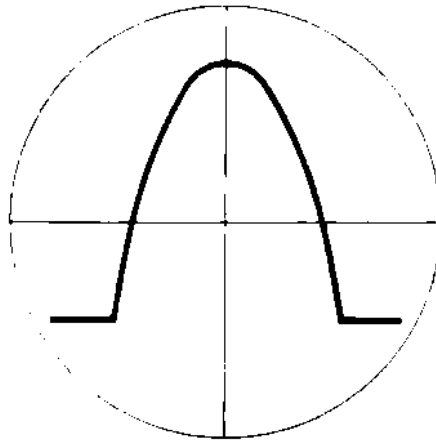


Abbildung 2: Beispiel einer Schwingungsmode [1]

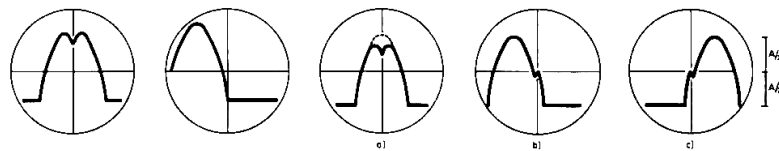


Abbildung 3: Verschiedene Modenkurven [1]

4 Versuchsdurchführung

4.1 Untersuchung eines Reflexklystrons

Die Leistung der emittierten Wellen ist abhängig von der Reflektorspannung, aus diesem Grund wird der Reflektor mit einer 50 V Wechselspannung betrieben. Der Leistung-Spannungszusammenhang wie in Abb. 2 kann dann am Oszilloskop abgelesen werden. Anschließend wird der Frequenzmesser so lange verstellt, bis eine Einsattelung in der Kurvenmitte zu sehen ist. In diesem Zustand wird das Klystron mechanisch verstimmt, das heißt, dass das Hohlraumvolumen geändert wird. Anschließend werden die Reflektorspannung und der Frequenzmesser so lange variiert, bis die Einsattelung an derselben Stelle erscheint. Die erhaltenen Werte werden notiert.

Bei der elektronischen Abstimmung wird die Reflektorspannung auf 9 GHz abgeglichen. Anschließend wird die Reflektorspannung so eingestellt, dass die drei letzten Modenkurven wie in Abb. 3 zu sehen sind. Aus den Einstellungen kann die Wellenlänge erneut berechnet werden.

4.2 Messung von Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung

Im zweiten Versuchsteil werden ein Kurzschluß und eine Messsonde am Ausgang des Klystrons angebracht. Der Ausschlag des SWR-Meters wird nun bei etwa $U_R = 200\text{ V}$ maximiert.

Um die Wellenlänge berechnen zu können, wird die Messsonde verschoben bis der Ausschlag am SWR Meter minimal wird. Die Positionen der Sonde werden jeweils notiert. Die Frequenz kann auch durch Abstimmen des Frequenzmessers bestimmt werden, dazu wird der Ausschlag am SWR Meter in Abhängigkeit von der Frequenz minimiert.

Bei einer anschließenden Messung kann die Frequenz durch Variation einer Dämpfung bestimmt werden. Dazu wird der Kurzschluss durch den Abschluss ersetzt und es werden die Einstellungen für mehrere Dämpfungen in 2 dB Schritten notiert.

4.3 Stehwellenmessung

Bei der Stehwellenmessung wird zusätzlich ein Gleitschraubentransformator eingebaut. Anschließend wird die Messsonde verschoben, bis das SWR Meter ein Minimum anzeigt. Die Einstellungen für die zwei durchlaufenen Minima werden notiert.

Bei der 3 dB-Methode wird die Sonde so lange verschoben, bis das SWR Meter ein Minimum anzeigt. Dann wird das SWR Meter so eingestellt, dass es 3 dB anzeigt. Anschließend wird die Sonde nach links verschoben, bis ein Vollausschlag zu sehen ist. Dasselbe wird in der Gegenrichtung durchgeführt.

Als letztes wird die Wellenlänge mit der Abschwächermethode bestimmt. Dazu wird die Sondenposition bei einer vorher eingestellten SWR Anzeige variiert. Beim Verschieben wird die Dämpfung so nachgeregelt, dass die Anzeige des SWR Meters auf der Skala bleibt. Die Dämpfungen und Sondenpositionen werden notiert.

# Modus	$\frac{U_0}{V}$	$\frac{U_1}{V}$	$\frac{U_2}{V}$	$\frac{A_0}{V}$	$\frac{f_0}{\text{MHz}}$
1	135	120	150	2,10	9000,0
2	142	128	155	2,18	9100,0
3	130	112	142	1,92	8831,5

Tabelle 1: gemessene Reflektorspannungen und Amplituden für verschiedene Moden

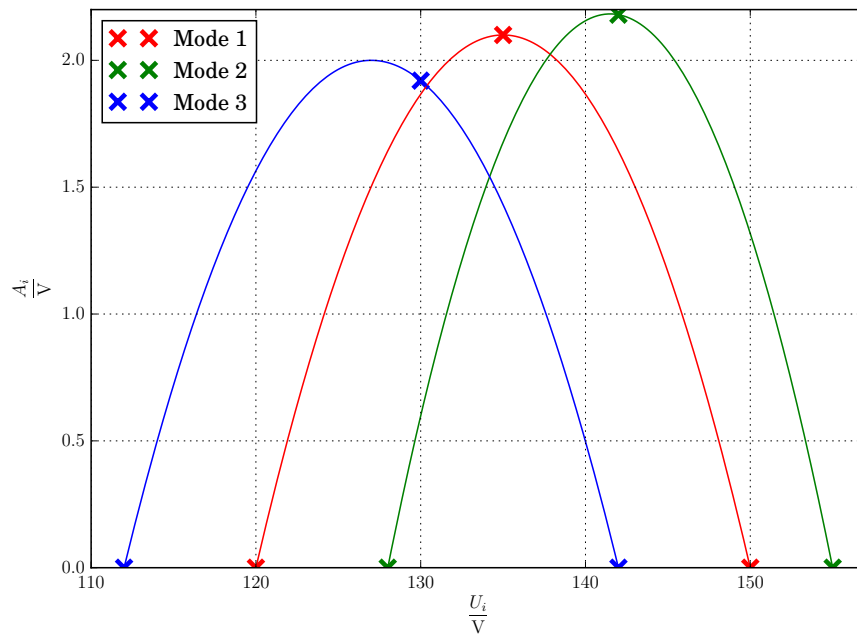


Abbildung 4: Modendiagramm

# Modus	$\frac{a}{1/V}$	b	$\frac{c}{V}$
1	$-9,33 \cdot 10^{-3}$	2,52	$-1,68 \cdot 10^2$
2	$-1,20 \cdot 10^{-2}$	3,39	$-2,38 \cdot 10^2$
3	$-8,89 \cdot 10^{-3}$	2,26	$-1,41 \cdot 10^2$

Tabelle 2: Koeffizienten für die Modenkurven

5 Auswertung

5.1 Untersuchung eines Reflexklystrons

Die Messwerte zur Erstellung des Modendiagramms sind in Tabelle 1 zu finden. Daraus ergibt sich das in Abbildung 4 gezeigte Modendiagramm. Die numerisch berechneten Koeffizienten der Parabeln $A(U) = aU^2 + bU + c$ sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Die Messwerte zur elektronischen Abstimmung sind in Tabelle 3 zu finden. Daraus ergibt sich als Bandbreite $\Delta f = f_3 - f_2 = 38,0 \text{ MHz}$ und als Abstimmempfindlichkeit

$$A = \frac{f_3 - f_2}{U_3 - U_2} = 1,90 \frac{\text{MHz}}{\text{V}}.$$

$\frac{U_R}{V}$	215	208	228
$\frac{f}{\text{MHz}}$	9000,0	8978,0	9016,0

Tabelle 3: elektronische Abstimmung

$\frac{f_{\text{gemessen}}}{\text{MHz}}$	$\frac{1. \text{ Min}}{\text{mm}}$	$\frac{2. \text{ Min}}{\text{mm}}$	$\frac{a}{\text{mm}}$	$\frac{\lambda_g}{\text{mm}}$	$\frac{f_{\text{berechnet}}}{\text{MHz}}$
9000,0	64,5	88,8	22,8	48,6	9015,2

Tabelle 4: Bestimmung von Wellenlänge und Frequenz

5.2 Messung von Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung

Die Messwerte und die daraus berechnete Wellenlänge und Frequenz sind in Tabelle 4 zu finden. Die Wellenlänge berechnet sich dabei als $\lambda_g = 2a$, die Frequenz ist gegeben durch

$$f = c \sqrt{\frac{1}{\lambda_g^2} + \frac{1}{4a^2}}.$$

Tabelle 5 zeigt die auf dem SWR-Meter abgelesene Dämpfung und die zur jeweiligen Mikrometereinstellung gehörenden Theoriewerte. Zusätzlich sind dort die prozentualen Abweichungen der SWR-Meter-Messergebnisse von den auf dem Dämpfungsglied angegebenen Dämpfungen aufgelistet. Negative Vorzeichen bei der Abweichung bedeuten eine Abweichung nach unten. Diese Werte sind in Abbildung 5 graphisch dargestellt.

SWR-Meter $\frac{1}{\text{dB}}$	Mikrometereinstellung $\frac{1}{\text{mm}}$	Theoriewert $\frac{1}{\text{dB}}$	Abweichung
0	0,00	0	0,0 %
2	1,60	5	-60,0 %
4	2,32	10	-60,0 %
6	2,73	14	-57,1 %
8	3,20	19	-57,9 %
10	4,30	34	-70,6 %

Tabelle 5: mit dem SWR-Meter gemessene Dämpfung und Theoriekurve

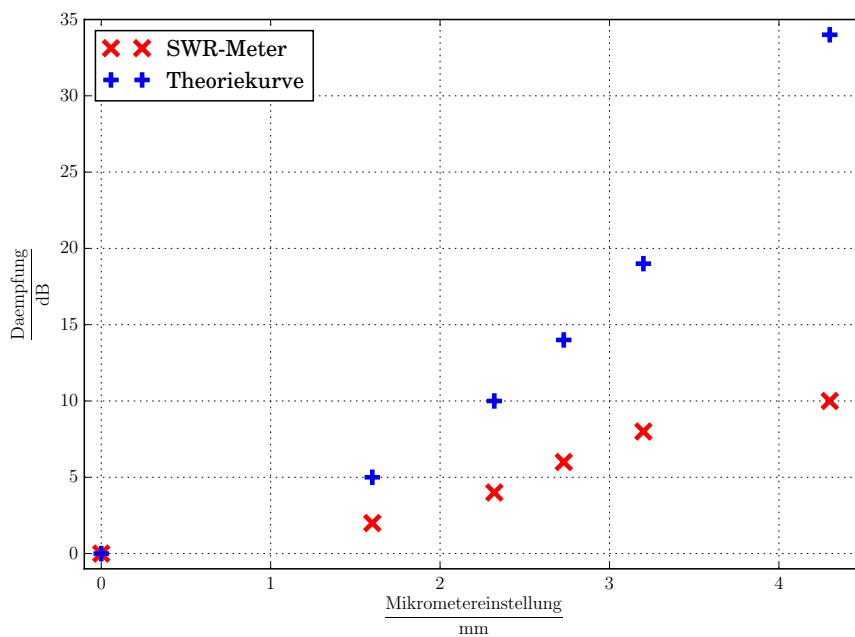


Abbildung 5: Vergleich der gemessenen Dämpfung mit den Theoriewerten

Tiefe mm	3	5	7	9
SWR	1,22	1,38	2,10	3,50

Tabelle 6: SWR-Meter-Methode

$\frac{d_1}{\text{mm}}$	$\frac{d_2}{\text{mm}}$	1. Min mm	2. Min mm	$\frac{\lambda_g}{\text{mm}}$	SWR
71,8	78,5	90,0	74,0	32	1,92

Tabelle 7: 3 dB-Methode

$\frac{A_1}{\text{dB}}$	$\frac{A_2}{\text{dB}}$	$\frac{\Delta A = A_2 - A_1}{\text{dB}}$	SWR, $S = \frac{\Delta A}{2}$
20	18	2	1

Tabelle 8: Abschwächer-Methode

5.3 Stehwellenmessung

Die stehenden Wellen werden mit drei verschiedenen Methoden ausgemessen. Die Ergebnisse der SWR-Meter-Methode sind in Tabelle 6 aufgelistet, die Messwerte der 3 dB-Methode sind in Tabelle 7 zu finden. Die Wellenlänge λ_g berechnet sich als doppelte Entfernung der beiden Minima zueinander. Das SWR ergibt sich als

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

Die Ergebnisse der Abschwächermethode sind in Tabelle 8 gezeigt.

6 Diskussion

Insgesamt werden im gesamten Versuch sehr wenig Messwerte aufgenommen, oft lediglich ein einzelner Wert für die zu bestimmende Größe. Daher lässt sich oft nur wenig über die Genauigkeit der einzelnen Ergebnisse sagen.

Auffällig beim Messgerät ist aber, dass das SWR-Meter fast immer stark um den Messwert oszilliert, weswegen das genaue Ablesen eines Wertes erheblich erschwert ist.

6.1 Untersuchung eines Reflexklystrons

Der Trend, dass mit steigender Reflektorspannung die Amplitude zunimmt, kann bestätigt werden. Jedoch ist auch erkennbar, dass bei zwei der drei Moden das Maximum der Parabel nicht mit dem Messwert übereinstimmt.

6.2 Messung von Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung

Die aus der Wellenlänge und den Hohlleiterabmessungen berechnete Frequenz weicht um 0,17 % von der direkt gemessenen Frequenz ab. Daher kann diese Messung als gut bewertet werden.

Bei der Dämpfungsmessung fällt auf, dass die auf dem Dämpfungsglied angegebenen Dämpfungen in der Eichkurve bei gegebener Mikrometereinstellung außer beim ersten Messwert immer über den mit dem SWR-Meter gemessenen Werten liegen. Auch wenn wegen der kleinen Graphik auf dem Dämpfungsglied und der stark oszillierenden Anzeige des SWR-Meters Ablesefehler nicht ausgeschlossen werden können, zeigt sich anhand der Fehler von ungefähr 57 % bis ungefähr 71 %, dass ein systematischer Fehler vorliegen muss.

6.3 Stehwellenmessung

Die mit den drei Methoden bestimmten SWR stimmen in der Größenordnung überein, allerdings weicht der kleinste Wert, $S = 1$, um ca. 71 % vom größten Wert, $S = 3,5$, ab. Bei der Sondentiefe 9 mm liefert die SWR-Methode $S = 3,50$ und die 3 dB-Methode $S = 1,92$. Der letztgenannte Wert weicht um 45 % vom größeren Wert ab. Hieraus lässt sich bereits auf eventuelle Messfehler und systematische Fehler schließen. Weiterhin ist auffällig, dass die insgesamt kleinste Welligkeit mit der Abschwächermethode, die zur Messung großer Welligkeiten vorgesehen ist, gemessen wird. Insbesondere hier kann die fehlerhafte Dämpfung diesen Messwert stark beeinflusst haben.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Skript zu Versuch 53 – Mikrowellen*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/AnlMikrowelle.pdf> (besucht am 09.11.2015).
- [2] “Reflex.sch.enp.ger” von Reflex.sch.enp.svg: Vanessaekowitzderivative work: Dgnthr - Diese Datei wurde von diesem Werk abgeleitet Reflex.sch.enp.svg:. Lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reflex.sch.enp.ger.svg/media/File:Reflex.sch.enp.ger.svg>. *Reflexklystron*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Klystron#/media/File:Reflex.sch.enp.ger.svg> (besucht am 12.11.2015).