

Durchführung: 05.12.2018  
Abgabe: 12.12.2018

## PRAKTIKUMSPROTOKOLL V53

# MIKROWELLEN AUF HOHLLEITERN

Carolin Harkort<sup>1</sup>,  
Jacqueline Schlingmann<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>carolin.harkort@tu-dortmund.de

<sup>2</sup>jacqueline.schlingmann@tu-dortmund.de

## 1 Zielsetzung

Der Versuch dient zum einen zur Untersuchung eines Reflexklystrons. Zum anderen soll die Frequenz, die Wellenlänge und die Dämpfung bestimmt werden. Ein weiteres Ziel ist die Welligkeitsmessung.

## 2 Theorie

Mikrowellen decken den Frequenzbereich von ca. 300 MHz bis 300 GHz ab. Diese elektromagnetischen Wellen können mit einem Hohlleiter weitergeleitet werden. Jeder Wellentyp (Mode) hat eine Grenzfrequenz unter der kein Energietransport durch den Hohlleiter mehr statt findet. Sie ist abhängig von den Maßen des Hohlleiters. Es wird zwischen zwei Moden unterschieden. Den transversal elektrischen und magnetischen Moden. Diese Moden haben ein elektrisches bzw. magnetisches Feld, dass senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung ist.

Ein Klystron ist eine Mikrowellenröhre, in der durch Geschwindigkeitsmodulation Mikrowellenenergie gewonnen wird. An dem Reflektor liegt ein gegen die Kathode negatives Potential an, weshalb die emittierten Elektronen von ihm reflektiert werden. Sie laufen durch das Resonatorgitter und das Klystron fängt an zu schwingen. Die Elektronen verlassen den Resonator entweder beschleunigt oder abgebremmt, sodass sie einen Geschwindigkeitsunterschied haben. Daraus folgt, dass sich die Rückkehrenden Elektronen zu einem Bündel vereinigen. Dieser Bündel tritt in Wechselwirkung mit dem Feld und gibt so Energie an den Resonator ab. Bei  $n + 3/4$  Perioden tritt dabei die größte Schwingung auf.

Der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge kann im freien Raum beschrieben werden durch

$$c = f \cdot \lambda_0.$$

Im luftgefüllten Hohlleiter gilt

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_e}\right)^2}}. \quad (1)$$

$\lambda_e$  beschreibt dabei die Grenzwellenlänge im Hohlleiter. Sie entspricht zwei mal der Breitseite des Hohlleiters. für die Frequenz ergibt sich somit

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

An jedem Punkt der Hohlleitung kann die Welle als eine vom Generator reflektierte und einer emittierten Welle aufgefasst werden. Die reflektierte Welle entsteht durch

unebenheiten im Hohlleiter oder an einer Lastimpedanz. Haben beide Wellen die gleiche Phasenlage, wird die Feldstärke maximal. Das Verhältnis zwischen den elektrischen Feldstärken der emittierten und reflektierten Welle wird als Spannungs-Reflexionskoeffizient  $\rho$  beschrieben. Das "Spannungs-Stehwellen-Verhältnis" (SWR) wird durch den Quotienten aus maximaler und minimaler Feldstärke berechnet.

Es gibt mehrere Messverfahren zur Bestimmung von Welligkeiten. Zum einen die direkte Messung, die bei hohem SWR ungenau wird, und zum anderen die "3-dB-Methode". Das SWR wird berechnet mit

$$S = \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \left( \frac{\pi(d1-d2)}{\lambda_g} \right)}} \quad (3)$$

$$= \frac{\lambda_g}{\pi(d1 - d2)}. \quad (4)$$

Der zweite Teil ist eine Näherung, die angewandt werden kann, wenn  $S$  größer als 10 ist. Bei der "3-dB-Methode" kommt es zu Abweichungen des Detektors vom quadratischen Verhalten. Dieses wird mit der "Abschwächer-Methode" überwunden. Das Ausgangssignal im Maximum wird dem im Minimum gleichgesetzt.

## 3 Durchführung

### 3.1 Untersuchung eines Reflexklystrons

Zunächst wird die Apparatur wie in Abbildung 1 zu sehen aufgebaut. Das Dämpfungsglied

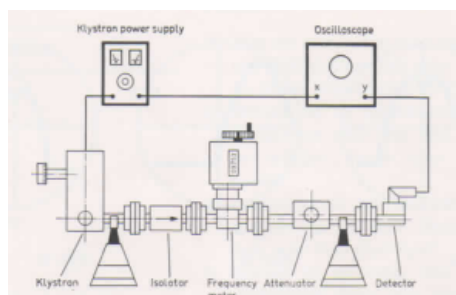


Abbildung 1: Aufbau für die Klystron-Untersuchungen mit dem Oszillographen[1]

wird auf 30 dB gestellt. Die Amplitude der Sinusspannung wird so eingestellt, dass sich eine horizontale Linie parallel zur Mittellinie ergibt. Die Reflektorspannung wird auf etwa 200 V eingestellt und so lange variiert bis die Modenkurven im Mittelpunkt liegen. Der Frequenzmesser wird so abgestimmt, dass eine Sattelung an der Spitze der Kurve erscheint, wie in Abbildung 2. Die Frequenz und die Spannung wird aufgenommen und die Kurve nach rechts bzw. links verschoben, wie in Abbildung 2 zu sehen, und die Spannungen werden wieder aufgenommen. Außerdem wird die Amplitude bestimmt.

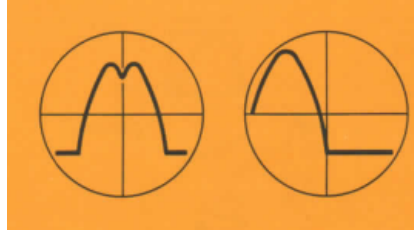


Abbildung 2: Mode mit Einsattelung und Verschiebung[1]

Nun wird der Frequenzmesser verstimmt und die Resonatorspannung neu abgestimmt, sodass das Maximum des Modus im Mittelpunkt liegt. Auch hier werden Spannungen, die Amplitude und die Frequenz für die drei Einstellungen aus Abbildung 3 bestimmt.

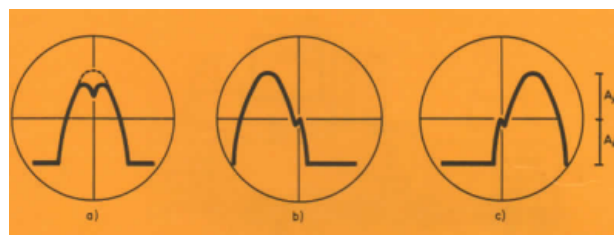


Abbildung 3: Abgleich der Reflektorspannung nach den Abbildungen a) - c)[1]

### 3.2 Messung von Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung

Die Apparatur wird nach Abbildung 4 geändert, sodass der Abschluss angebaut ist. Das Dämpfungsglied wird auf 20 dB gestellt und die Reflektorspannung auf ca. 200 V.

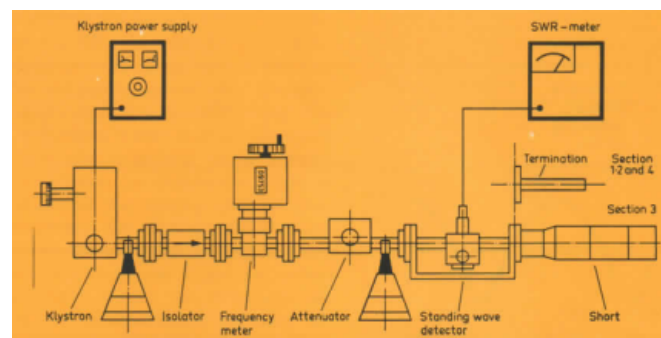


Abbildung 4: Aufbau zum zweiten Versuchsteil[1]

Am SWR-Meter werden 40 dB und eine Bandbreite von 100 Hz eingestellt. Mit dem 1 kHz knopf wird ein maximaler Ausschlag erzeugt. Danach wird der Frequenzmesser so verändert, dass es zu einem minimalen Ausschlag kommt.

Nun wird der Abschluss durch den verstellbaren Kurzschluss ersetzt und der Frequenzmesser verstimmt. Mit der Sonde werden nun die Punkte des minimalen Ausschlags gesucht.

Der Kurzschluss wird wieder durch den Abschluss ersetzt und die Frequenz auf 9000 MHz gestellt. Die Verstärkung des SWR-Meters wird auf den maximalen Ausschlag gedreht. Das Dämpfungsglied wird zunächst so gestellt, dass keine Dämpfung vorliegt. Dann wird die Dämpfung immer weiter verstärkt um das Verhältnis zwischen mm und dB zu erhalten. Dies wird bis 10 dB durchgeführt.

### 3.3 Stehwellen-Messungen

Für die Messung der Welligkeiten wird der Versuchsaufbau nach Abbildung 5 verändert. Der abschwächer wird fest auf 20 dB eingestellt und am SWR-Meter werden 40 dB und

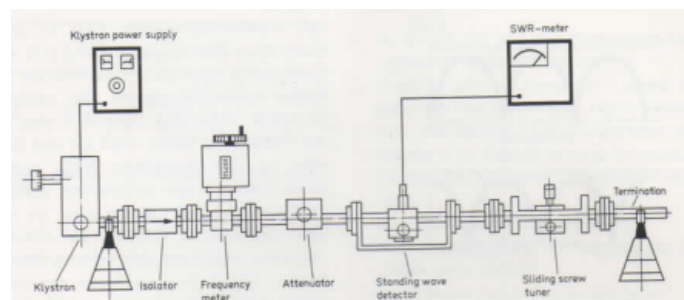


Abbildung 5: Aufbau zur Stehwellen-Messung

eine Bandbreite von 20 Hz eingestellt. Das Klystron wird bei 9 GHz zum schwingen gebracht. Nun werden die kleinen und mittleren Welligkeiten gemessen. Dafür wird zunächst die Sondentiefe des Gleitschraubentransformators auf 3, 5, 7 und 9 mm gestellt und ein Maximum, sowie ein Minimum gesucht.

Mit der "3 dB-Methode" werden nun die großen Welligkeiten gemessen. Die Sonde wird auf 9 mm gestellt und es wird wieder ein Minimum gesucht. Mit dem Verstärker wird die Anzeige dann auf 3 dB geregelt. Die Sonde der Messleitung wird dann einmal nach recht und einmal nach links verschoben bis sich ein Vollausschlag ergibt. Jetzt wird wieder der Kurzschluss eingebaut und der Abstand zwischen den Minima gemessen.

Die großen Welligkeiten werden nun mit der "Abschwächer-Methode" bestimmt. Die ersten Schritte von der vorherigen Methode werden wiederholt. Zusätzlich wird nun allerdings das Dämpfungsglied auf 20 dB gesetzt bevor auf 3 dB justiert wird. Durch Veränderung des Dämpfungsglied bei Verschieben der Messleitung wird das relative Maximum bestimmt.

## 4 Auswertung

### 4.1 Untersuchung eines Reflexklytrons

Die Messwerte der Untersuchung drei verschiedener Moden auf einem Oszilloskop sind in Tabelle ?? eingetragen.

Mode	$U_0 / \text{V}$	$U_1 / \text{V}$	$U_2 / \text{V}$	$A_0 / \text{V}$	$f_0 / \text{MHz}$
1	60	50	70	0,9	9015
2	100	90	110	1,3	9007
3	150	140	170	2,5	9001

Tabelle 1: Messwerte für die Reflektorspannungen mit der jeweiligen Amplitude und Frequenz

Aus den Messwerten kann eine Regression der Form

$$A(U) = xU^2 + yU + z$$

durchgeführt werden. Diese ist in Abbildung 6 zu sehen.

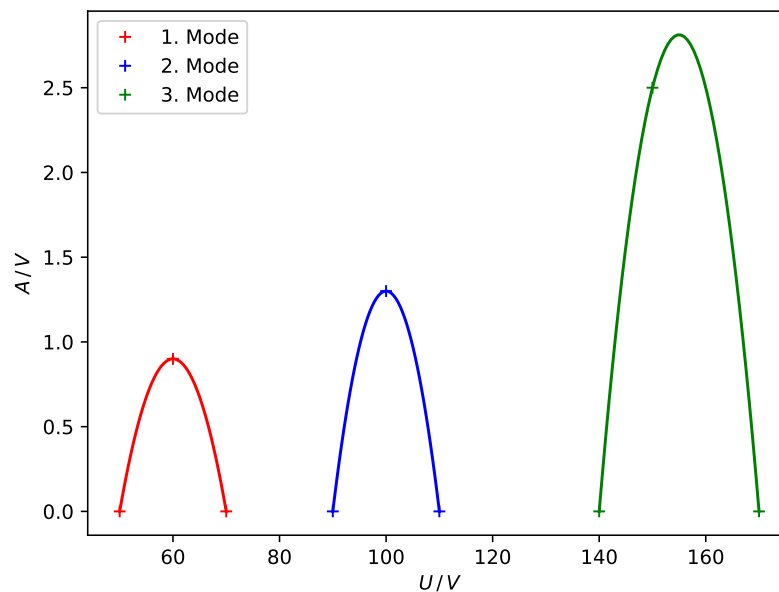


Abbildung 6: Graphen der drei Moden

Die daraus resultierenden Parameter sind in Tabelle ?? aufgetragen.

$x / \frac{1}{V}$	$y$	$z / V$
-0,009	1,080	-31,500
2,600	-0,013	-128,700
3,875	-0,125	-297,450

Tabelle 2: Fitparameter der Reflektorspannungen

Für die elektronische Abstimmung des Reflexklytrons sind die Messwerte in Tabelle ?? zu sehen.

$U_0 / V$	$f_0 / \text{MHz}$
235	9001
230	8985
250	9021

Tabelle 3: Messwerte der elektronischen Abstimmung

Die Bandbreite  $\Delta f$  berechnet sich nach

$$\Delta f = f^I - f^{II} = 15 \text{ MHz.}$$

Für die Abstimmempfindlichkeit ergibt sich mithilfe der zuvor berechneten Bandbreite

$$E = \frac{f^I - f^{II}}{U^I - U^{II}} = 0,42 \frac{\text{MHz}}{V}.$$

## 4.2 Messung von Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung

Die Messwerte sind in Tabelle ?? dargestellt.

f / MHz	1. Minimum / mm	2. Minimum / mm	$\lambda_g$ / mm	a / mm
8952	72,6	97,5	43,7	21,85

Tabelle 4: Messreihe zur Bestimmung der Frequenz

Der Abstand a ist dabei genau der Abstand zwischen den beiden Minima. Aus diesem wird die Hohlwellenlänge  $\lambda_g$  berechnet, welche genau dem doppelte Abstand a entspricht. Mit Formel 2 ergibt sich die Frequenz  $f = 9701,84$  MHz.

In Tabelle ?? sind die Messergebnisse für die Dämpfung zu sehen. Bei der Mikrometereinstellung sind die Werte auf 2,5 mm normiert.

SWR-Meter Ausschlag / dB	Mikrometereinstellung / mm	Dämpfung / dB	Abweichung
0	0,00	0,0	0%
2	0,50	1,0	500%
4	0,70	1,5	500%
6	1,00	2,0	500%
8	1,15	3,0	617%
10	1,25	4,3	709%

Tabelle 5: Messergebnisse der Dämpfung

In Abbildung 7 ist die Dämpfungskurve dargestellt.



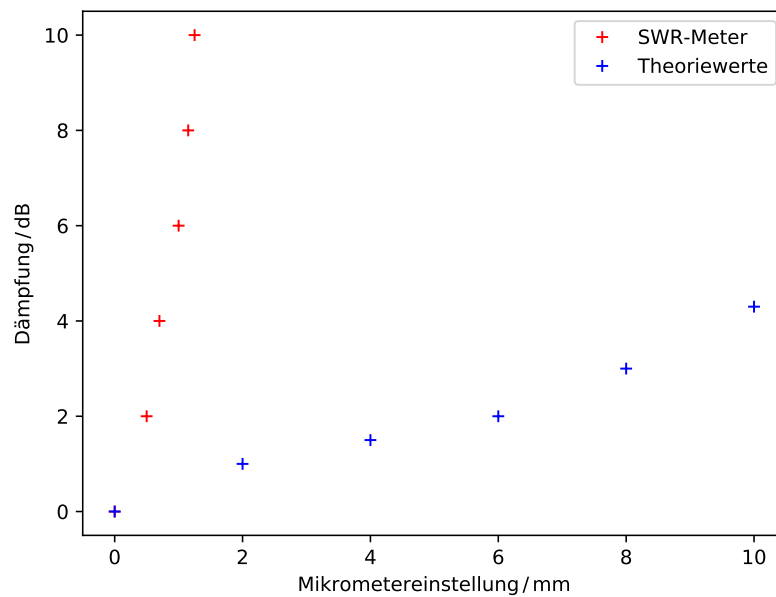


Abbildung 7: Vergleich der experimentellen und theoretischen Werte der Dämpfungskurve

### 4.3 Stehwellenmessung

Zur Bestimmung der Stehwellenmessungen werden die drei möglichen Methoden durchgeführt. Die resultierenden Messergebnisse sind aus Tabelle ?? für die SWR-Methode, in Tabelle ?? für die 3dB-Methode und in Tabelle ?? für die Abschwächer-Methode zu entnehmen.

Sondentiefe / V	SWR-Meter Ausschlag
3	1,430
5	1,625
7	2,400
9	4,000

Tabelle 6: SWR-Meter-Methode

Bei der 3dB-Methode lässt sich das SWR mithilfe von Formel 4 berechnen.

$d_1$ / mm	$d_2$ / mm	1. Minimum / mm	2. Minimum / mm	$\lambda_g$	SWR
77	54	69	72	27,2	4,88

Tabelle 7: 3 dB-Methode

$A_1$ / dB	$A_2$ / dB	$ A_2 - A_1 $ / dB	SWR = $\frac{\Delta A}{2}$
20	27,14	7,14	3,57

Tabelle 8: Abschwächer-Methode

## 5 Diskussion

Die Bestimmung der Messwerte mithilfe des SWR-Meters führte während der Durchführung zu einigen Ungenauigkeiten, da dieses auf kleinste Bewegungen im Raum reagierte.

Der zu erwartende Anstieg der Amplituden bei steigender Reflektorspannung ist in der Diagramm der 3 Moden gut zu erkennen. Jedoch stimmt bei der 3. Mode das Maximum der Parabel nicht mit dem gemessenen Maximum überein. Der Grund dafür könnte sein, dass die Einsattelung nicht genau mit dem Oszilloskop erkennbar war.

Die Ergebnisse für die experimentell und theoretisch bestimmte Frequenz ist in Tabelle ?? zu sehen.

$f_0$ / MHz	$f_{\text{berechnet}}$ / MHz	Abweichung
8952	9701,84	7,7%

Tabelle 9: Vergleich der Frequenzen

Die prozentuale Abweichung liegt bei 7,7%. Diese Abweichung lässt sich durch das schwierigere Auffinden zweier Minima erklären.

Bei der Messung der Dämpfung liegt die prozentuale Abweichung in einem sehr hohen Bereich von 500-709%. Diese ist auch in Abbildung 7 zu sehen. Die gemessenen Werte weichen sehr stark von den Theoriewerten ab. Hier ist schon während des Versuchs aufgefallen, dass die Messwerte so nicht stimmen können und sich ein systematischer Fehler eingeschlichen hat, der allerdings nicht behoben werden konnte. Deshalb ist die Messreihe eher zu vernachlässigen.

Die Ergebnisse für die drei verschiedenen Methoden der Stehwellenmessung sind in Tabelle ?? dargestellt.

SWR-Meter-Methode	3 dB-Methode	Abschwächer-Methode
4	4,8	3,57

Tabelle 10: Vergleich der unterschiedlichen Methoden

Es fällt auf, dass die Werte alle in derselben Größenordnung liegen, aber besonders der Wert der SWR-Meter-Methode deutlich von dem Wert der Abschwächer-Methode abweicht. Auch hier könnte die fehlerhaft verwendete Dämpfung zu der Ungenauigkeit beigetragen haben.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung V53*. URL: <http://129.217.224.2/HOME PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/AnlMikrowelle.pdf> (besucht am 12. 12. 2018).