

V53

## Mikrowellen in Hohlleitern

Christopher Krause  
christopher2.krause@tu-dortmund.de

Lucas Witthaus  
lucas.witthaus@tu-dortmund.de

Durchführung: 15.04.2019

Abgabe: DATUM

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Erzeugung von Mikrowellen . . . . .	3
2.2 Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung in einem Hohlleiter . . . . .	4
2.3 Bestimmung des Stehwellenverhältnisses . . . . .	5
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>8</b>
4.1 Darstellung der Moden . . . . .	8
4.2 Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung . . . . .	10
<b>5 Diskussion</b>	<b>12</b>
<b>Literatur</b>	<b>12</b>

# 1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll mithilfe eines Reflexklystrons verschiedene Eigenschaften, wie die Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung von Mikrowellen in Hohlleitern untersucht werden. Zusätzlich soll das Stehwellenverhältnis der Mikrowellen auf verschiedene Arten berechnet werden.

## 2 Theorie

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen in einem Frequenzbereich von 300 MHz bis 300 GHz. Durch Hohlleiter lassen sich Mikrowellen verlustärmer übertragen als bei anderen Leitern, da sie keinen großen elektrischen Widerstand bieten. Hohlleiter können verschieden Formen haben, jedoch wird in diesem Versuch lediglich ein rechteckförmiger verwendet. Der Hohlleiter kann die verschiedenen Wellentypen, welche Moden genannt werden, leiten. Jeder Modus hat eine bestimmte elektrische- und magnetische Feldverteilung. Bei einem TE-Modus ist das elektrische Feld senkrecht zur Hohlleiterachse ausgerichtet und bei einem TM-Modus das magnetische Feld. Ist beides der Fall, so liegt ein TEM-Modus vor. Die Moden haben eine Grenzfrequenz  $\lambda_c$ , sodass bei kleineren Frequenzen keine Energie mehr transportiert werden kann.

### 2.1 Erzeugung von Mikrowellen

Die Mikrowellen werden durch ein Reflexklystron erzeugt. In diesem treten Elektronen aus einer Kathode aus und werden auf einen Hohlraumresonator beschleunigt. An diesem wird eine Spannung angelegt, sodass ein LC-Schwingkreis ein Hochfrequenzfeld erzeugt. Durch dieses Feld werden die Elektronen bei dem Durchlaufen des Resonators teilweise beschleunigt und abgebremst. Hinter dem Resonator treffen die Elektronen auf einen Reflektor, wodurch deren Bewegungsrichtung umgekehrt wird und diese erneut den Hohlraumresonator durchlaufen. Durch das Umkehren der unterschiedlich schnellen Elektronen, formen diese sich zu Bündeln und geben beim Abbremsen in dem Resonator Energie an den Schwingkreis ab, wodurch dieser aufrecht erhalten wird. Die Energie des Schwingkreises wird induktiv ausgekoppelt und durch einen Hohlleiter transportiert. In Abbildung (1) ist der Aufbau eines Reflexklystrons dargestellt.

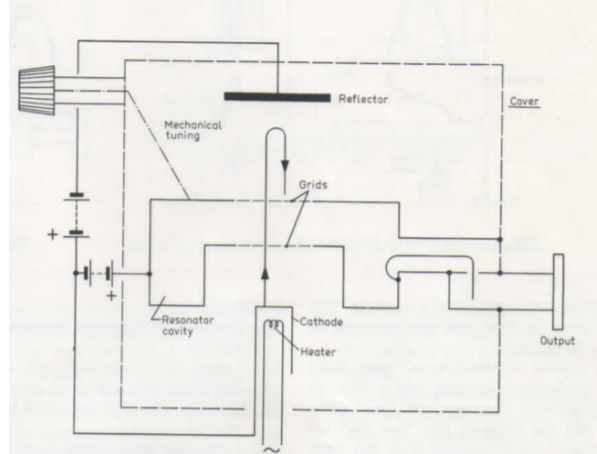


Abbildung 1: Aufbau eines Reflexklystron [1]

## 2.2 Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung in einem Hohlleiter

Für die Wellenlängen im freien Raum  $\lambda_0$  und in einem Hohlleiter  $\lambda_g$  gilt:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (1)$$

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

Hierbei ist  $\lambda_c$  die Grenzwellenlänge,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $f$  die Frequenz der Welle. Für den TE-oder TM-Modus gilt für die Grenzwellenlänge:

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

Mit den Moden  $m$  und  $n$ , sowie den Maßen des rechteckigen Hohlleiters  $a$  und  $b$ . Mit diesen Gleichungen folgt, unter der Bedingung  $\lambda_c = 2a$ , für die Frequenz:

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = c \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_g}\right)^2 - \left(\frac{1}{2a}\right)^2} \quad (4)$$

Die Dämpfung  $D$  kann sowohl aus einem Leistungsverhältnis als auch einem Spannungsverhältnis berechnet werden:

$$D = 10 \ln \frac{P_1}{P_2} = 20 \ln \frac{U_1}{U_2} \quad (5)$$

### 2.3 Bestimmung des Stehwellenverhältnisses

Die durch den Hohlleiter laufenden Mikrowellen können an Fehlstellen teilweise reflektiert werden, wodurch sie mit sich selbst überlagern und eine stehende Welle ausbilden können. Für eine maximale stehende Welle müssen Phasen und Amplituden der überlagernden Wellen gleich sein. Das Stehwellenverhältnis (SWR) ist dann als Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Feldstärke auf der Leitung definiert. Für das Bestimmen des Stehwellenverhältnisses sind drei unterschiedliche Methoden möglich.

1. Das SWR kann direkt durch eine Sonde gemessen werden, wobei nur kleine SWR damit genau gemessen werden können, da die Sonde das elektrische Feld sonst stärker stört.
2. Es werden die beiden Ausgangsspannungen gemessen, welche den doppelten Wert des Minimums haben. Für das SWR gilt dann:

$$S = \sqrt{1 + \left( \frac{1}{\sin^2 \frac{\pi(d_1 - d_2)}{\lambda_g}} \right)} \quad (6)$$

Ist  $S$  größer als 10 gilt:

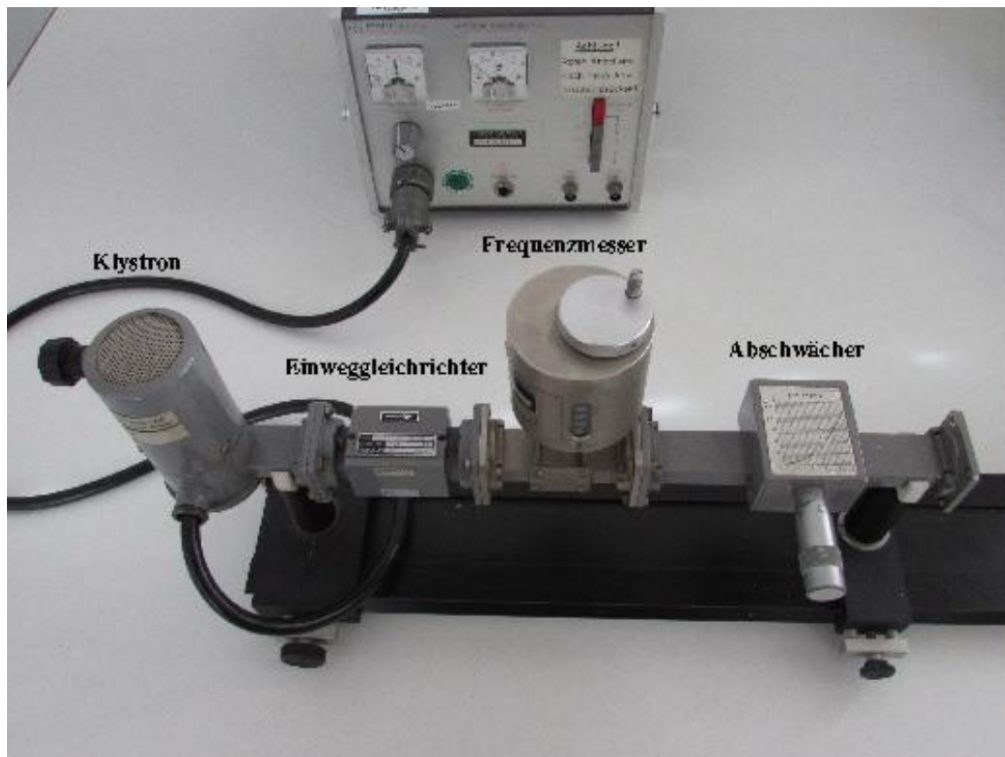
$$S = \frac{\lambda_g}{\pi(d_1 - d_2)} \quad (7)$$

3. Wird mit einem Dämpfer das Maximum des Ausgangssignal dem Minimum gleichgemacht, gilt:

$$A_2 - A_1 = 20 \ln(S) \quad (8)$$

Wobei  $A_2 - A_1$  die Differenz der Einstellungen des Abschwächers ist.

### 3 Durchführung

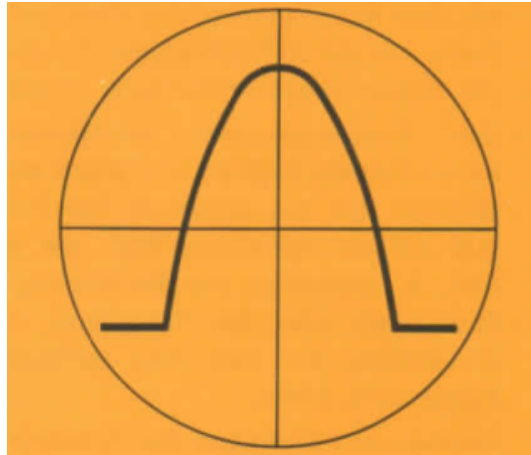


**Abbildung 2:** Grundlegender Aufbau des Versuchs. [1]

Für alle der im Folgenden beschriebenen Versuchsteile wird der gleiche Grundaufbau entsprechend Abbildung 2 verwendet. Ein Reflexklystron wird über ein Speisegerät mit Spannung versorgt. Dieses erzeugt, wie in der Theorie beschrieben, Mikrowellen, die dann in den daran angeschlossenen Hohlleiter geführt werden. Anschließend durchlaufen sie einen Einweggleichrichter sowie einen Frequenzmesser. Letzterer besteht aus einem koaxialen Resonator, dessen Resonanzfrequenz über ein rotierbares Rad geändert werden kann. Wird er nun genau mit seiner Resonanzfrequenz angeregt und somit folglich zur Resonanz gebracht, so entzieht der er dem Hohlleiter einene Teil seiner Leistung. Dies kann wiederum später auf einem Anzeigeinstrument sichtbar gemacht werden. Hinter dem Frequenzmesser liegt dann noch ein Abschwächer. Bei dem Dämpfungselement handelt es sich um eine Widerstandsfolie, die durch das Verstellen einer Schraube parallel zum elektrischen Feld verschoben werden kann. Je nach lage der Folie im Hohlleiter tritt eine unterschiedliche Dämpfung ein. Man erhält gerade eine maximale Dämpfung, wenn die Folie in der Mitte des Hohlleiters liegt.

Im ersten Versuchsteil wird das Dämpfungsglied auf 30 dB eingestellt und am Ende des oben beschriebenen Grundaufbaus lediglich eine Diode angebaut. Diese wird dann

über ein Kabel an den Y-Kanal eines Oszilloskops angeschlossen. Auf den X-Kanal des Oszilloskops wird ebenfalls durch das Speisegerät eine Spannung gegeben, welche jedoch hier mit einer entsprechenden 50 kHz Referenzfrequenz moduliert wird. So können dann die einzelnen Schwingungsmoden des Klystrons (Abbildung 3) auf dem Oszilloskop sichtbar gemacht werden. Die Amplitude und Lage von drei dieser Moden wird vermessen. Zudem wird auch die Frequenz an der Stelle derer Maxima gemessen.



**Abbildung 3:** Eine Modenkurve. [1]

Im zweiten Versuchsteil wird die oben genannte feste Diode durch eine parallel zum Hohlleiter bewegliche Diode, den sogenannten Stehwellen-Detektor, ausgetauscht. Dieser wird dann an ein SWR-Meter angeschlossen. Dahinter wird dann auch noch ein Gleitschraubentransformator und ein Kurzschluss angebaut. Der Gleitschraubentransformator besteht aus einem Stück Hohlleiter, in welches über eine Drehschraube ein einfacher Metallstrift hineingedreht werden kann. Dieser findet jedoch erst im folgenden Versuchsteil Verwendung und wird hier dementsprechend komplett hinausgedreht. Der Kurzschluss dient zur vollständigen Reflexion der einlaufenden Mikrowellen. Durch ihn kann im inneren des Hohlleiters also ein Stehwellenfeld erzeugt werden. Mit Hilfe der verschiebbaren Sonde werden dann lediglich die Positionen der einzelnen Minima im Stehwellenfeld gemessen, indem der Ausschlag am SWR-Meter bei Variation der Sondenposition beobachtet wird.

Anschließend soll die Dämpfung bestimmt werden. Diese wird ebenfalls einfach am SWR-Meter für unterschiedliche Einstellungen des Dämpfungsgliedes abgelesen.

Im vierten und letzten Versuchsteil soll dann noch das Stehwellenverhältnis (SWR) bestimmt werden. Dies kann, wie bereits beschrieben, über drei unterschiedliche Methoden gemacht werden. Dazu wird in der Versuchsanordnung lediglich der Kurzschluss durch einen Abschluss ersetzt. Dieser reflektiert die einlaufenden Wellen nicht, sondern er absorbiert sie vollständig. Die erste Methode ist dann die "direkte Methode". Dabei wird das SWR direkt mit der Sonde bestimmt. Diese wird zu Beginn so positioniert, dass sie sich in einem Maximum des Stehwellenfelds befindet. Anschließend wird die Verstärkung

des SWR-Meters so variiert, dass dieses einen Wert von 1,0 anzeigt. Dann wird die Sonde in ein Minimum verschoben. Der Wert, den das SWR-Meter dann anzeigt ist das gesuchte Stehwellenverhältnis. Diese Messung wird ebenfalls für andere Einstellungen des Gleitschraubentransformators (0 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm) wiederholt.

Die zweite Methode ist die 3dB-Methode. Dabei wird die Sonde zuerst in ein Minimum des Stehwellenfeldes verschoben. Die Verstärkung des SWR-Meters wird dann so eingestellt, dass sich eine Anzeige von 3 dB ergibt. Anschließend wird die Sonde nach links verschoben, bis sich am SWR-Meter ein maximaler Ausschlag (0 dB) ergibt. Das gleiche wird auch für eine Verschiebung nach rechts getan. Aus den sich dabei jeweils einstellenden Werten am SWR-Meter lässt sich das SWR berechnen. Auch diese Messung wird für jede einzelne der oben genannten Einstellungen des Gleitschraubentransformators durchgeführt.

Die dritte Methode ist die Abschwächer-Methode. Die Sonde wird dabei wieder in einem Minimum positioniert, um den sich dabei einstellenden Wert am SWR-Meter zu ermitteln. Das Dämpfungsglied wird hier nun auf einen Wert von 20 dB eingestellt. Anschließend wird die Sonde in ein Maximum verschoben. Dann wird das Dämpfungsglied so umgestellt, dass sich in diesem Maximum der gleiche Wert wie zuvor beim Minimum am SWR-Meter ergibt. Aus der Änderung der Dämpfung lässt sich dann das Stehwellenverhältnis ermitteln.

## 4 Auswertung

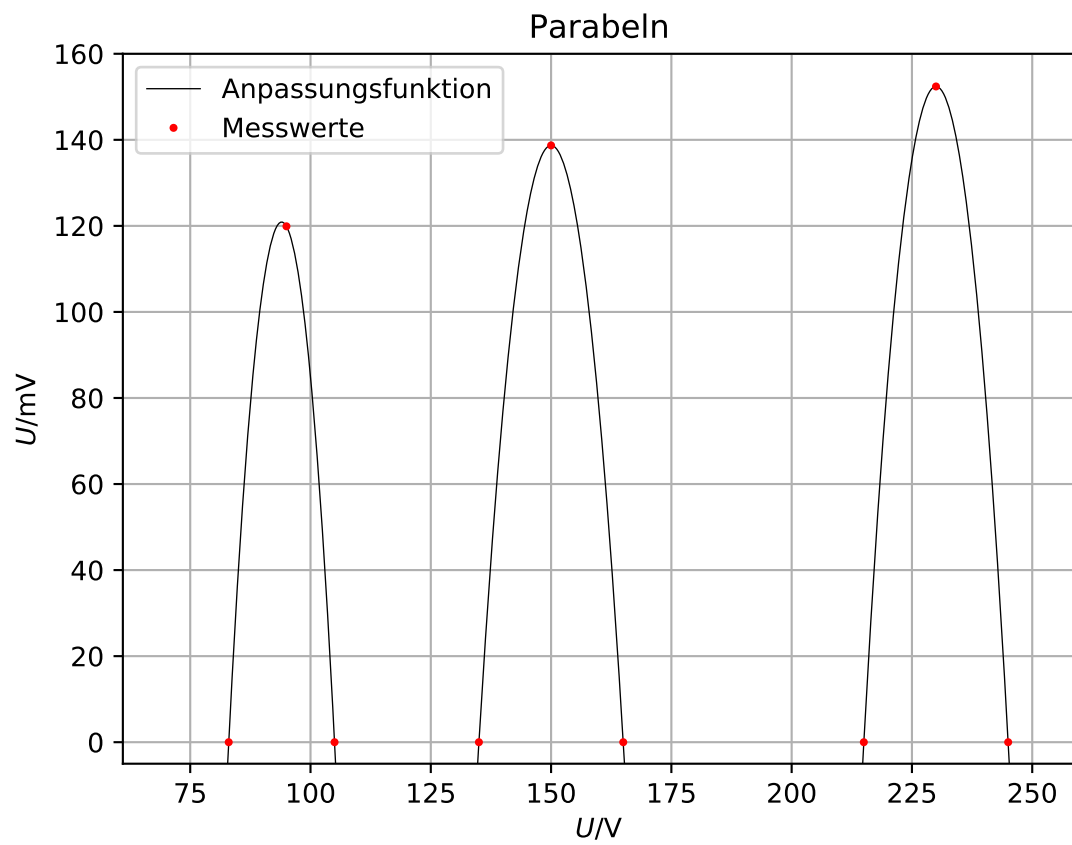
### 4.1 Darstellung der Moden

Die Reflektorspannungen  $U$ , die Spannungsamplituden  $A$ , sowie Frequenzen  $f$  für drei verschiedene Moden sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Stromstärke beträgt dabei  $I = 25\text{mA}$ .

**Tabelle 1:** Reflektorspannungen, die Spannungsamplituden und die Frequenzen der drei Moden

Mode	$U/\text{V}$	$A/\text{mV}$	$f/\text{s}$
1.	83	119.9	8999
	95		
	105		
2.	135	152.4	8994
	150		
	165		
3.	215	138.7	8988
	230		
	245		





**Abbildung 4:** Anpassungsfunktionen für die Messwerte der drei Moden

## 4.2 Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung

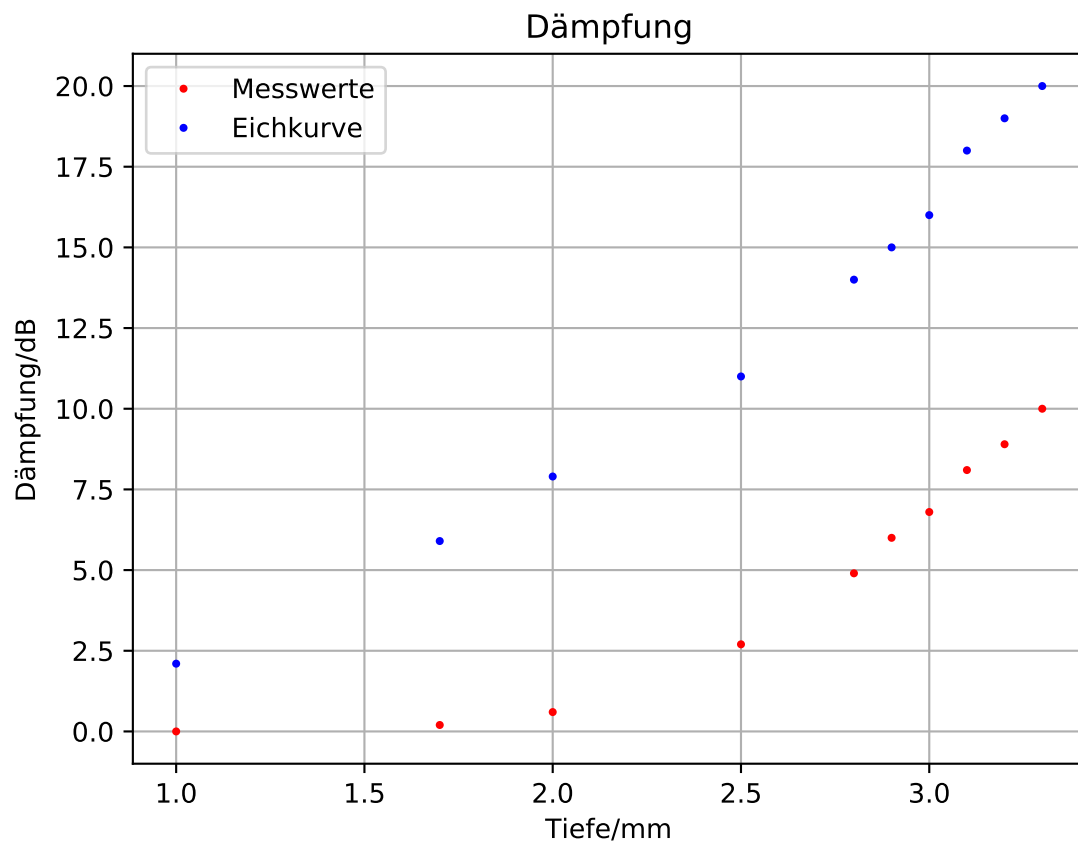
Die Abstände der Minima zu dem jeweiligen nächsten Minima betragen 113.0mm, 90.0mm, 65.0mm und 42.0mm. Für den Mittelwert der Wellenlänge im Hohlleiter ergibt sich  $(4,73 \pm 0,13)$  cm.

Die Dämpfung  $D$ , in Abhängigkeit von der Tiefe  $d$  der Mikrometerschraube des Abschwächers, ist in Tabelle 2 dargestellt. Dabei sind einmal die gemessenen Werte der Dämpfung  $D_1$ , sowie die Dämpfungswerte der Eichkurve  $D_2$  angegeben.

**Tabelle 2:** Dämpfungen in Abhängigkeit von der Tiefe der Mikrometerschraube

$d/\text{mm}$	$D_1/\text{dB}$	$D_2/\text{dB}$
1.0	0	2.1
1.7	0.2	5.9
2.0	0.6	7.9
2.5	2.7	11.0
2.8	4.9	14.0
2.9	6.0	15.0
3.0	6.8	16.0
3.1	8.1	18.0
3.2	8.9	19.0
3.3	10.0	20.0

In Abbildung 3 sind die Messwerte in einem Diagramm dargestellt.



**Abbildung 5:** Eichkurve und gemessene Dämpfungen

## **5 Diskussion**

### **Literatur**

- [1] TU Dortmund. *Versuch zum Literaturverzeichnis*. 2014.