

V 53

Mikrowellen auf Hohlleitern

Johannes Lamers
johannes.lamers@udo.edu

Sebastian Fischer
sebastian5.fischer@udo.edu

Durchführung: 07.06.2021

Abgabe: DATUM

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Mikrowellen	3
2.2	Hohlleiter	3
2.3	Reflex-Klystron	4
2.4	Stehende Wellen	4
2.5	Einige Bauteile und ihre Funktion	6
3	Durchführung	8
3.1	Untersuchen der Moden	8
3.2	Hohlleiterfrequenz	8
3.3	Dämpfung	8
3.4	Welligkeitsverhältnis	9
3.4.1	Direkte Methode	9
3.4.2	3 dB Methode	9
3.4.3	Abschwächermethode	9
4	Auswertung	9
4.1	Untersuchung des Hohlleiterfeldes	10
4.2	Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung	12
4.3	Stehwellen-Messungen	14
5	Diskussion	15
	Literatur	15

1 Zielsetzung

2 Theorie

2.1 Mikrowellen

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von ca. 30 cm bis 0,3 mm. Da aber die Wirkung der Strahlungseffekte innerhalb eines Schaltungs-Systems von dem Verhältnis zwischen der Größenordnung des Systems und der Wellenlänge der vorkommenden Strahlung abhängt, gilt der Bereich der Mikrowellentechnik für Wellenlängen die sehr viel kleiner als die Abmessungen des Systems sind. Mikrowellen werden vielseitig eingesetzt. Sie dienen z.B. in der Luft- und Schifffahrt der Orientierung und der Detektion von anderen Fahrzeugen. Außerdem kommen sie in der Forschung bei Material- und Plasmauntersuchungen zum Einsatz.

2.2 Hohlleiter

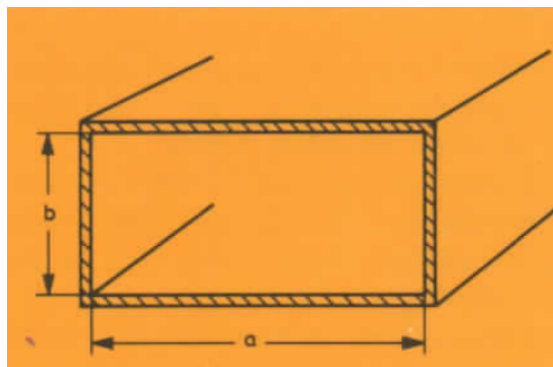


Abbildung 1: Rechteck-Hohlleiter im Querschnitt.[5]

Wenn sich elektromagnetische Wellen ungehindert im freien Raum bewegen können, dann breiten sie sich als transversale, ebene Wellen aus. Sobald sie jedoch durch Randbedingungen beschränkt werden, verändern sich die Eigenschaften der Wellen. Diese Randbedingungen können durch einen Hohlleiter realisiert werden. Ein Hohlleiter ist dabei ein Metallrohr mit jeweils unterschiedlicher Querschnittsfläche. In diesem Versuch werden zum leiten der Welle Rechteck-Hohlleiter verwendet, wesswegen im folgenden auch nur auf diese Art von Randbedingungen genauer eingegangen wird. Rechteck-Hohlleiter haben einen konstanten rechteckigen Querschnitt mit jeweils parallelen Wänden. Ein solcher Hohlleiter ist in Abbildung 1 dargestellt. Breitet sich eine Welle in so einem Hohlleiter aus, so wird sie ständig von Wand zu Wand reflektiert. Dabei entstehen theoretisch unendlich viele verschiedene Typen, welche jeweils **Modus** genannt werden. Aufgrund

der Randbedingungen sind die Wellenlänge der freien Welle und die im Hohlleiter unterschiedlich. Der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge im freien Raum λ_0 und der Wellenlänge im Hohlleiter λ_h ist über

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_h}\right)^2 + \left(\frac{1}{2a}\right)^2}} \quad (1)$$

gegeben. a beschreibt dabei die Länge der Breitseite des Hohlleiters, Die Frequenz der Welle lässt sich dann mit c als Lichtgeschwindigkeit im Vakuum über

$$f = \frac{c}{\lambda_0} \quad (2)$$

bestimmen.

Die **Signaldämpfung** wird in dB angegeben und lässt sich aus dem Verhältnis der Leistung ohne vorhandenen Dämpfer P_1 und der durch den Dämpfer abgeschwächten Leistung P_2 bestimmen. Die Umrechnung kann über

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)_{\text{dB}} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (3)$$

2.3 Reflex-Klystron

Ein Klystron ist ein Gerät zum erzeugen bzw. verstärken von Mikrowellen. In Abbildung 2 ist ein Reflex-Klystron dargestellt. In dem Hohlraumresonator befindet sich ein Wechselfeld. Der kontinuierliche Elektronenstrahl verlässt die Kathode und erfährt beim ersten durchtreten des Gitters des Mikrowellenresonators eine Geschwindigkeitsmodulation. Diese Elektronen werden dann über einen Reflektor reflektiert und passieren erneut das Gitter. Auf diese Weise, wenn die Elektronen-Banches zum richtigen Zeitpunkt das Gitter passieren, werden die Elektronen vom Wechselfeld gebremst, wodurch das Selbige verstärkt wird und Mikrowellen das Klystron verlassen können. Dieser Energieübertrag hat bei Flugzeiten von $t = T(n + 3/4)$, $n \in \mathbb{N}$ sein Optimum. T beschreibt die Periodendauer des Wechselfeldes. Über Variation der Reflektorspannung (elektronische Abstimmung) und des Resonatorvolumens (mechanische Abstimmung) lässt sich die Frequenz und Amplitude des Klystrons verändern. Die Abhängigkeit der Ausgangsleistung von der Reflektorspannung ist in Abbildung 3 dargestellt.

2.4 Stehende Wellen

Durch Unebenheiten oder gar Grenzflächen kommt es im Hohlleiter zu Reflexionen, bei denen die reflektierten Wellen wieder zurück in Richtung des Generators propagieren. Dadurch setzen sich die resultierenden Wellen aus der Überlagerung von einlaufenden und reflektierten Wellen zusammen. In abgeschlossenen Leitungen endlicher Länge kommt

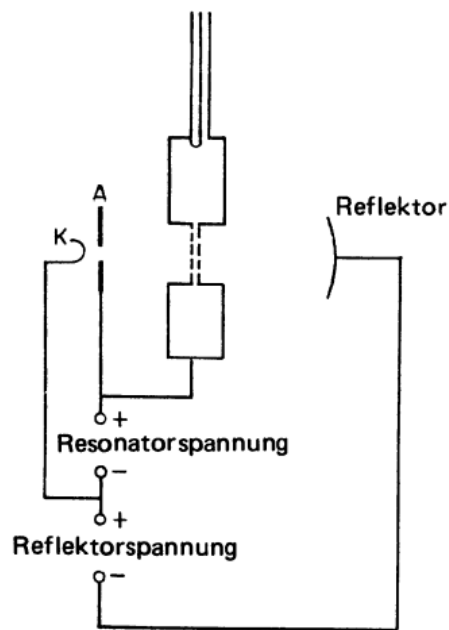


Abbildung 2: Darstellung eines Reflex-Klystrons.[5]

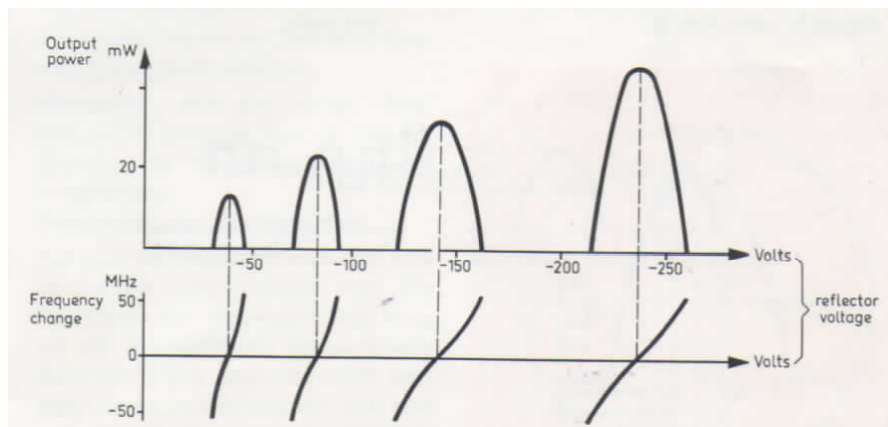


Abbildung 3: Ausgangsleistung in Abhängigkeit der Reflektorspannung.[5]

die Umhüllende dieser Überlagerung als **stehende Welle** vor. Dabei bleibt die Phase der Welle ortsfest. Das Spannungs-Stehwellen-Verhältnis (SWR) gibt Aussage über das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Feldstärke auf der Leitung. Es lässt sich also über

$$S = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \frac{|E_i| + |E_r|}{|E_i| - |E_r|} \quad (4)$$

berechnen. Wobei der Index r für die Feldstärke der reflektierten und i für die der einlaufenden Welle steht.

Im Rahmen des Versuches wird zum Messen des SWR die sogenannte "3dB Methode" angewandt. Aus den dort gemessenen Werten lässt sich das SWR über

$$S = \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\pi(d_1 - d_2)}{\lambda_h}\right)}} \quad (5)$$

bestimmen. Über die ebenso verwendete "Abschwächer-Methode" lässt sich das SWR über

$$S = 10^{\frac{A_2 - A_1}{20}} \quad (6)$$

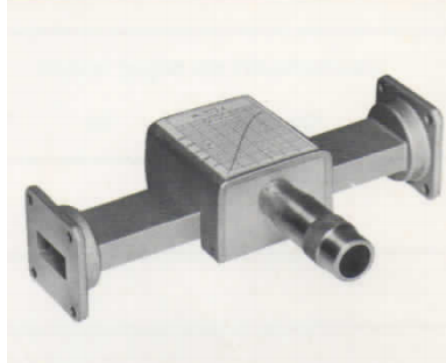
berechnen. Beide Methoden werden in der Durchführung 3 näher beschrieben.

2.5 Einige Bauteile und ihre Funktion

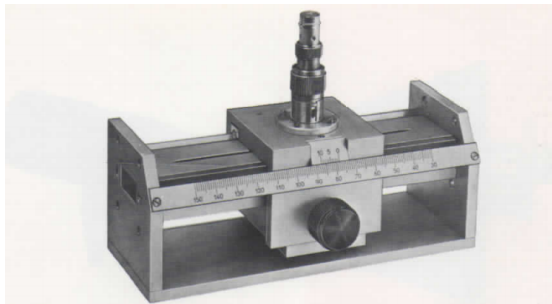
Die für den Versuch wichtigsten Bauteile sind neben dem Klystron die in Abbildung ?? dargestellten Komponenten. Der **Abschluss** absorbiert, mit Hilfe eines Absorptionsmaterial, beinahe die gesamte Leistung. Das **Dämpfungsglied** dient der Dämpfung der Leistung des Feldes. Über eine verschiebbare Widerstandsfolie lässt sich die Stärke der Dämpfung einstellen. Der **Gleitschraubentransformator** ist ein Bauteil, welches zum Anpassen eines fehlangepassten Kreises verwendet wird. Die Anpassung wird dabei durch einen variabel verschieb- und senkbaren Stift realisiert, welcher in der Leitung als beinahe reiner Blindwiderstand wirkt. Zum Messen der Frequenzen des Systems wird ein **Frequenzmesser** verwendet. Dieser besteht aus einem Hohlraumresonator mit verstellbarem Volumen. Befindet sich der Frequenzmesser in dem System, so entzieht der Hohlraumresonator die meiste Leistung, wenn die Resonanzfrequenz des Resonators der im System vorhandenen Frequenz entspricht. So kann also bei maximalem Leistungsentzug auf die Frequenz im System rückgeschlossen werden.



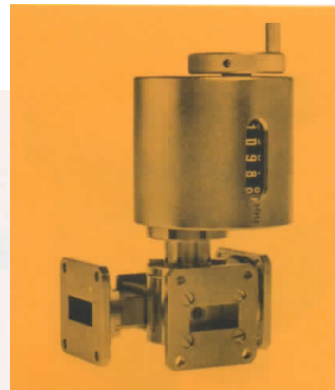
(a) Abschluss



(b) Dämpfungsglied



(c) Gleitschraubentransformator



(d) Frequenzmesser

Abbildung 4: Einige Bauteile.[5]

3 Durchführung

Der grundlegende Aufbau ist in Abbildung ?? zu sehen. Der Teil, mit dem die Mikrowellen für die weitere Vermessung erzeugt wird, bleibt über den gesamten Versuch gleich. Das Reflexklystron, dessen Spannung variabel ist, emittiert Mikrowellen, die per Hohlleiter über den gesamten Aufbau weitergeleitet werden. Als ersten treffen diese auf einen Einweggleichrichter, der Rückflussresonanzen unterdrückt und somit Messfehler vorbeugt. Es folgt ein Frequenzmesser und darauf eine Dämpfungseinheit, die die Intensität der Mikrowellen abschwächt. Für die weiteren Teilversuche werden nach Bedarf die weiteren Komponenten hinzugefügt.

3.1 Untersuchen der Moden

Hierfür wird die Dämpfung auf 30 dB gestellt und am Klystron der 50 MHz-Modus verwendet. In der Abbildung [] ist der um eine Diode erweiterte Aufbau zu sehen. Desweiteren bildet ein Oszilloskop, welches im xy-Modus (x: Netzspannung des Klystrons, y: Messstelle Hohlleiter) betrieben wird, die Modenverläufe ab. Mit dem Frequenzmesser kann eine Frequenz, die im Frequenzband einer Mode liegt, getroffen werden, wodurch es an dieser Stelle zu einem Leistungseinbruch, der im Folgenden auch als Dip referenziert wird, kommt. Dieser kann dann über die Höhenverstellung am Klystron so verschoben werden, dass der Dip genau am Maximum der Mode liegt. Außerdem wird der Dip noch jeweils auf beiden Seiten auf die halbe Höhe der Amplitude verschoben. Damit können die Amplitudenverhältnisse, und die jeweiligen Frequenzen abgelesen werden. Dieser Vorgang wird für drei verschiedene Moden wiederholt. In der Abbildung [] die Messpunkte an den Moden schematisch dargestellt.

3.2 Hohlleiterfrequenz

Es wird hier der 1 kHz-Modus mit einer Dämpfung von 20 dB verwendet und der Versuch wie in der Abbildung [] erweitert. Mit dem Frequenzmesser wird nach der Frequenz gesucht, bei der ein minimaler Ausschlag am SWR-Meter gemessen wird, und diese notiert. Daraufhin wird der Abschluss am Ende des Hohlleiters wieder durch einen Kurzschluss ersetzt. Nun wird die Messsonde verschoben, bis wieder ein Minimum am SWR-Meter zu sehen ist und die Position der Messsonde notiert. Danach wird diese weiter bis zum nächsten Minimum verschoben und die Position notiert.

3.3 Dämpfung

Für die Untersuchung der Dämpfung wird wieder ein Abschluss anstelle des Kurzschlusses montiert. Das SWR-Meter wird vorab kalibriert und die Dämpfung wird variiert. Dabei werden in 2 dB Schritten die eingestellte Dämpfung notiert.

3.4 Welligkeitsverhältnis

Die Bestimmung des Welligkeitsverhältnis geschieht über drei verschiedene Methoden. Der Aufbau bleibt dabei für alle Methoden der Gleiche. Dieser ist in der Abbildung[] zu sehen.

3.4.1 Direkte Methode

Hierfür wird der Aufbau nach der Abbildung [] verwendet. Bei einer konstanten Stifttiefe wird die Messsonde bis zu einem Maximum verschoben, wonach das SWR-Meter auf 1 normiert wird, indem die Dämpfung variiert wird. Danach wird sie zu einem Minimum verschoben um das Stehwellenverhältnis ablesen zu können. Dies wird für die Stifttiefen 3,5,7 und 9 mm durchgeführt.

3.4.2 3 dB Methode

Aufbau nach Abbildung []. Bei einer Stifttiefe von 9 mm wird die Sonde in ein Minimum verschoben und das SWR-Meter auf 3 dB eingestellt. Daraufhin wird die Sonde verschoben, bis der Ausschlag auf dem SWR-Meter 0 dB anzeigt und die Sondenposition notiert. Das gleiche Verfahren wird in die andere Richtung des Minimums durchgeführt, bis auch wieder 0 dB abzulesen sind. Danach wird der Abschluss durch einen Kurzschluss ersetzt und der Abstand Sonde zwischen zwei Minima abgelesen.

3.4.3 Abschwächermethode

Die Stifttiefe ist hierfür wieder auf 9 mm eingestellt und die Sonde wird wieder zu einem Minimum verschoben. Die Dämpfungseinheit wird auf 20 dB eingestellt und das SWR-Meter im Minimum auf 3 dB angepasst. Daraufhin wird simultan die Sonde in Richtung eines Maximums verschoben, wobei die Dämpfungseinheit so variiert wird, dass der Ausschlag auf dem SWR-Meter bei 3 dB bleibt. Bei Erreichen des Maximums wird dann die eingestellte Dämpfung abgelesen.

4 Auswertung

Alle Berechnungen werden mit dem Programm „Numpy“[4], die Unsicherheiten mit dem Modul „Uncertainties“[3], die Ausgleichsrechnungen mit dem Modul „Scipy“[2] durchgeführt und die grafischen Darstellungen über das Modul „Matplotlib“[1] erstellt.

4.1 Untersuchung des Hohlleiterfeldes

Die vom Oszillografen abgelesenen Werte sind in Tabelle 1 einsehbar. Aus diesen Werten lässt sich ein Modus-Diagramm erstellen. Dazu werden jeweils in die Daten eine Funktion gemäß einer Parabel

$$f(U) = aU^2 + bU + c \quad (7)$$

gelegt. So ergeben sich die in Abbildung 5 dargestellten Moden. Die aus dem Fit erhaltenen Parameter lauten für den jeweils i-ten Modus:

$$\begin{aligned} a_1 &= -0,04 \frac{1}{V^2} \\ b_1 &= 17,84 \frac{1}{V} \\ c_1 &= -1982,4 \\ a_2 &= -0,0445 \frac{1}{V^2} \\ b_2 &= 12,2945 \frac{1}{V} \\ c_2 &= -840,7955 \\ a_3 &= -0,0341 \frac{1}{V^2} \\ b_3 &= 5,8253 \frac{1}{V} \\ c_3 &= -242,8220 \end{aligned}$$

Tabelle 1: Daten von drei verschiedenen Moden.

		1. Modus	2. Modus	3. Modus	
Reflektorspannung	U_0	220	140	85	Volt
	U_1	210	125	72	
	U_2	236	151	99	
Amplitude (y)	A_0	6.4	7.35	6.2	Teilstriche
Frequenz	f_0	9010	9013	9018	MHz

Aus den Werten der Tabelle 2 lassen sich die Bandbreite

$$B = f_c - f_b \quad (8)$$

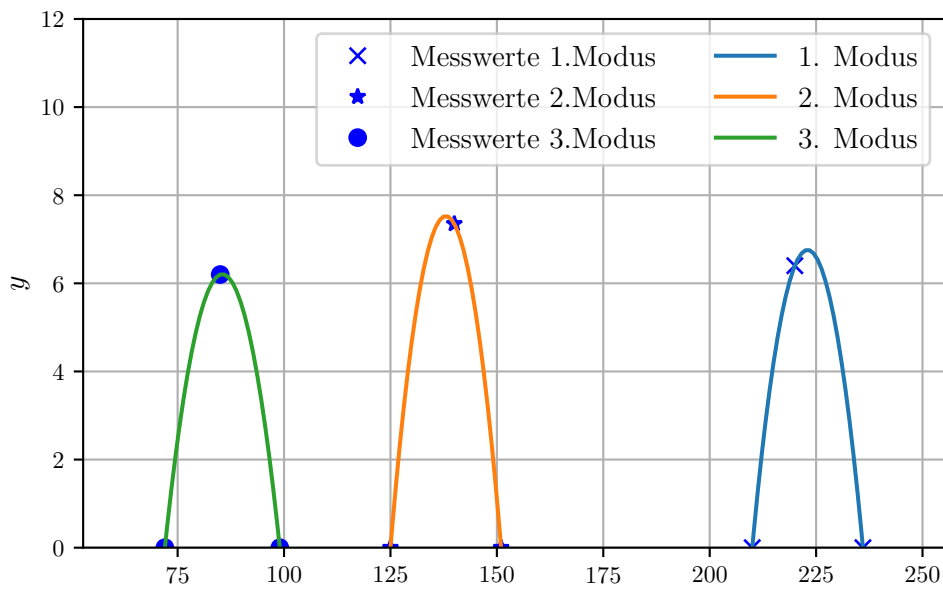


Abbildung 5: Modus-Diagramm der drei Moden.

und die Abstimm-Empfindlichkeit

$$A = \frac{B}{V_c - V_b} \quad (9)$$

zu

$$B = 78 \text{ MHz}$$

und

$$A = 5,2 \frac{\text{MHz}}{\text{V}}$$

bestimmen.

Tabelle 2: Reflektorspannungen in Abhängigkeit der drei Kurvenpositionen.

	a)	b)	c)	
Reflektorspannung	85	75	90	Volt
Frequenz	9018	8977	9055	MHz

4.2 Frequenz, Wellenlänge und Dämpfung

Aus den Werten der Tabelle 3 lässt sich die Wellenlänge über den zweifachen Abstand benachbarter Minima berechnen. Über den Mittelwert dieser Ergebnisse ergibt sich eine Wellenlänge von

$$\lambda_h = (48,9 \pm 0,1) \text{ mm.} \quad (10)$$

Nach (2) lässt sich die Frequenz zu

$$f = (8983 \pm 13) \text{ MHz} \quad (11)$$

bestimmen.

Tabelle 3: Frequenz und Orte der Minima.

f / MHz	Ort des Minimums x / mm		
	x_1	x_2	x_3
9006	48,1	72,5	97,0

Die Ergebnisse der Dämpfungsmessungen sind in Tabelle 4 dargestellt. Aus den Werten der Herstellerangaben lässt sich die Eichkurve der Dämpfung bestimmen. Als Fit-Funktion wird dabei eine Parabel der Form

$$P(x) = ax^2 + bx + c \quad (12)$$

verwendet. Das Ergebnis dieser Ausgleichsrechnung ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Parameter der Ausgleichsrechnung ergeben sich zu:

$$a = (1,7598 \pm 0,1515) \frac{\text{dB}}{\text{mm}^2} \quad (13)$$

$$b = (0,3299 \pm 0,3570) \frac{\text{dB}}{\text{mm}} \quad (14)$$

$$c = (0,0516 \pm 0,1881) \text{ dB} \quad (15)$$

Werden in diesen Plot die Dämpfungen in Abhängigkeit der gemessenen Mikrometereinstellungen aufgetragen, so liegen alle Messpunkte in einem konstanten Abstand unterhalb der Herstellerangabe. Über eine Korrektur von 14 dB nach oben lässt sich erkennen, dass die gemessenen Werte gut dem Verlauf der Parabel folgen.

Die Messwerte und die verschobenen Werte sind in Abbildung 7 einzusehen und zur besseren Übersicht sind die Korrigierten Werte nochmal in Tabelle 5 aufgeführt.

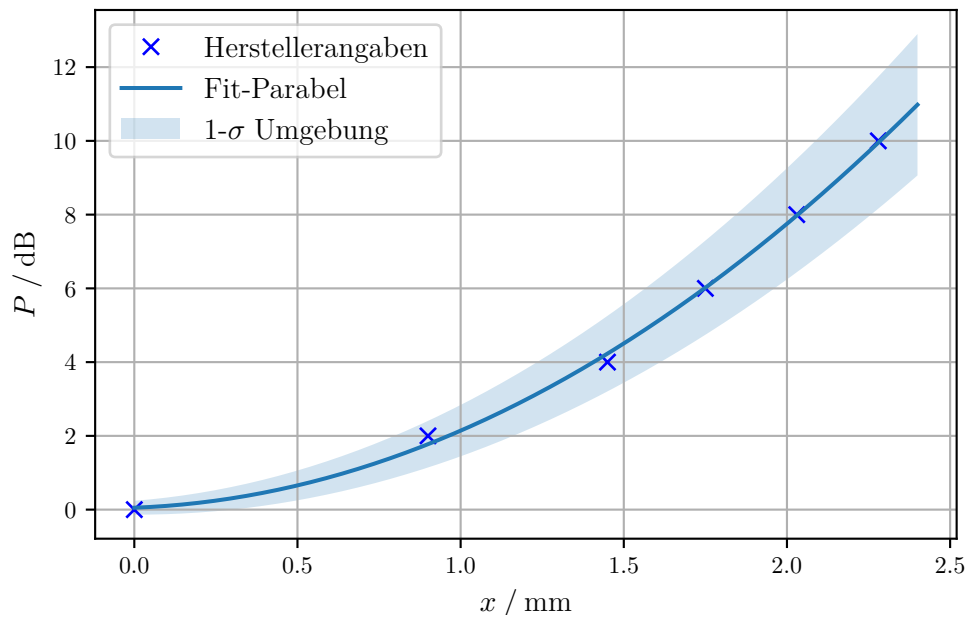


Abbildung 6: Eichkurve nach Hersteller in Form einer Fit-Parabel.

Tabelle 4: Daten der Dämpfungsmessungen.

Dämpfung P / dB	Mikrometereinstellung / mm	Herstellerangabe / mm
0	2,69	0,00
2	2,93	0,90
4	3,11	1,45
6	3,27	1,75
8	3,44	2,03
10	3,58	2,28

Tabelle 5: Daten der Dämpfungsmessungen nach Korrektur.

Dämpfung P / dB	Mikrometereinstellung / mm	Herstellerangabe / mm
14	2,69	2,72
16	2,93	2,92
18	3,11	3,10
20	3,27	3,27
22	3,44	3,44
24	3,58	3,60

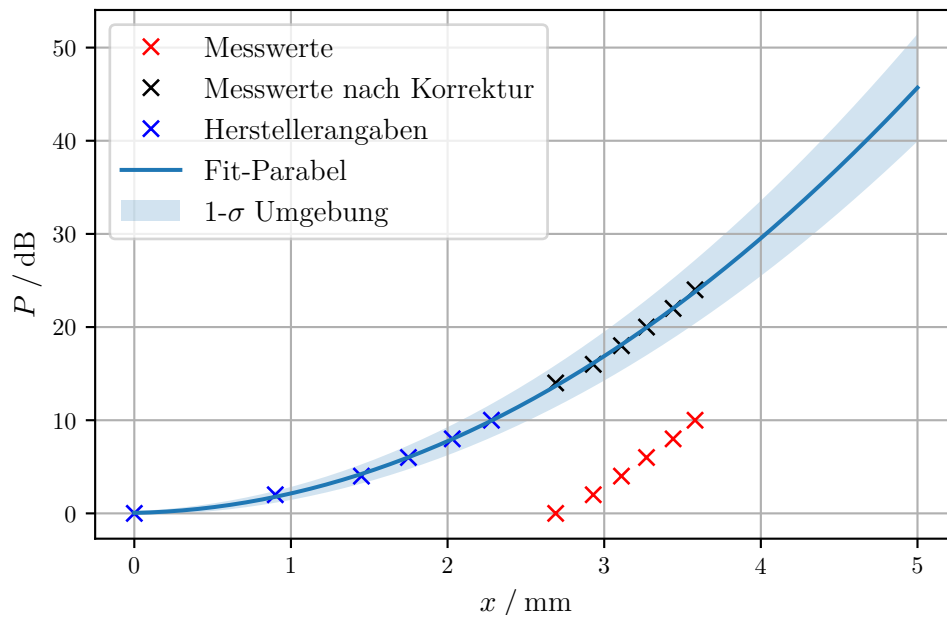


Abbildung 7: Messwerte und auf die Eichkurve verschobenen Werte.

4.3 Stehwellen-Messungen

Die Messergebnisse der SWR-Meter Methode und der 3-dB-Methode sind in den Tabellen ?? und 7 aufgetragen.

Aus den Ergebnissen der 3-dB-Methode lässt sich dann über (5) das SWR zu

$$S = 10.42$$

berechnen.

Die gemessenen Werte der Abschwächer-Methode sind

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

und

$$A_2 = 43,5 \text{ dB}.$$

Mit diesen Werten kann über den Zusammenhang (6) das SWR zu

$$S = 14.96 \tag{16}$$

bestimmt werden.

Tabelle 6: Daten der SWR-Meter Methode.

Sondentiefe / mm	Dämpfung / dB
0	1,00
3	1,11
5	1,55
7	3,20
9	9,50

Tabelle 7: Daten der 3-dB Methode.

d_1 / mm	d_2 / mm	1. Min / mm	2. Min / mm
74,0	72,5	108,9	84,5

5 Diskussion

Literatur

- [1] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [2] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [5] Philips. *Experimente mit Mikrowellen 1*.