

VERSUCHSBERICHT ZU

O2 - MIKROWELLEN

Gruppe 14Mo

Alexander Neuwirth (E-Mail: a_neuw01@wwu.de)
Leonhard Segger (E-Mail: l_segg03@uni-muenster.de)

durchgeführt am 11.06.2018
betreut von
Stephan Majert

17. Juni 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	3
2	Methoden	3
3	Ergebnisse und Diskussion	4
3.1	Beobachtungen und Datenanalyse	4
3.1.1	Unsicherheiten	4
3.1.2	Bestimmung des Quellflecks des Senders	5
3.1.3	Bestimmung der Wellenlänge	8
3.1.4	Bestimmung des Brechungsindex von PVC	9
3.1.5	Frustierte Totalreflexion	11
3.1.6	Bragg-Reflexion	11
3.2	Diskussion	12
4	Schlussfolgerung	13

1 Kurzfassung

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen im Bereich von etwa 1 GHz bis etwa 300 GHz. Um verschiedene Eigenschaften von Mikrowellen im Allgemeinen und der vorliegenden Mikrowellenquelle im Speziellen zu untersuchen, werden mehrere Untersuchungen durchgeführt. Es wird vermutet, dass es sich bei dem durch die vorliegende Mikrowellenquelle ausgesendeten Strahl um einen Gauß-Strahl handelt. Hierzu wird die Divergenz des Strahls bestimmt und der Vergleich mit der für einen Gauß-Strahl erwarteten bestätigte diese Vermutung. Außerdem kann aus den Abständen der Minima der Intensität bei Erzeugung einer stehenden Welle durch senkrecht Bestrahlung einer Metallplatte die Wellenlänge der von der vorliegenden Quelle ausgesendeten Strahlung bestimmt werden. Diese Wellenlänge liegt erwartungsgemäß im Mikrowellenbereich. Es wird vermutet, dass sich Mikrowellen bei der Brechung an dem Übergang von Luft zu PVC und PVC zu Luft gemäß des Snelliusschen Brechungsgesetz verhalten. Dies kann gezeigt werden, indem der gemessene Brechungsindex mit dem gemäß eines Literaturwert erwarteten verglichen wird. Auch das Phänomen der frustrierten Totalreflexion wird untersucht und der zu erwartende exponentielle Abfall beobachtet. Zuletzt wird die Bragg-Reflexion betrachtet und gezeigt, dass sich dieses Phänomen an einem mit einem dreidimensionalen Gitter aus Metallkugeln gefüllten Schaumstoffquader beobachten lässt.

2 Methoden

Es wird der Mikrowellensender auf einer Schiene und der Empfänger auf einer sich dazu senkrecht befindenden befestigt. Dann wird durch Drehung des Senders um die Strahlungsachse die Polarisationssebene geändert, bis die vom Empfänger gemessene Intensität maximal ist. Die Intensität am Empfänger wird für unterschiedliche Abstände des Empfängers von der Strahlungsachse gemessen. Diese Geometrie ist in Abb. 1 dargestellt. Dies wird für unterschiedliche Abstände des Senders zur orthogonalen Schiene des Empfängers durchgeführt, um den virtuellen Quellfleck des Senders bestimmen zu können.

Dann wird eine Metallplatte in den Strahlengang gebracht, sodass sie die Strahlung reflektieren und eine stehende Welle bilden kann. Während mit einem Empfänger nach den Knoten gesucht wird, wird der Abstand der Metallplatte zur Quelle optimiert, bis die Knoten möglichst gut ausgebildet sind. Die Positionen mehrerer Knoten wird gemessen, um daraus die Wellenlänge bestimmen zu können.

Ein PVC-Halbzyylinder wird anstelle der Platte in den Strahlengang gebracht. Dieser ist drehbar gelagert, sodass der Einfallswinkel variabel ist. Für mehrere Einfallswinkel wird mit einem Empfänger der Winkel der maximalen Transmission gesucht und gemessen. Dies wird zweimal durchgeführt. Dabei wird einmal der Halbzyylinder so gedreht, dass die Welle erst durch die flache Seite des Halbzyinders und dann die runde fällt und einmal so, dass es andersherum stattfindet.

Dann wird der Halbzyylinder so gedreht, dass an der flachen Seite Totalreflexion zu beobachten ist. Ein zweiter Halbzyylinder wird auf die Transmissionsseite des ersten gebracht und die Intensität der Strahlung hinter dem zweiten Halbzyylinder in Abhängigkeit

vom Abstand der beiden Zylinder gemessen.

Zuletzt wird ein Schaumstoffquader, in dem sich ein dreidimensionales Gitter aus Metallkugeln befindet, in den Strahlengang gebracht und bei variablem Einfallswinkel die Intensität am gleich groß gewählten Reflexionswinkel gemessen.

Die Intensität wird mit einem Empfänger gemessen, der eine Spannung ausgibt, die proportional zur Intensität ist.

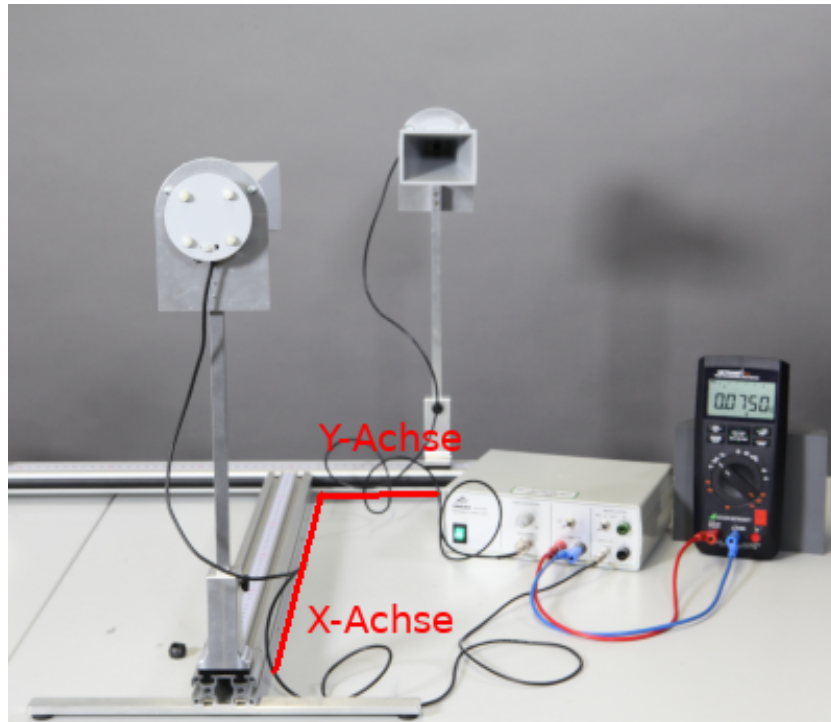


Abbildung 1: Aufbau zur Bestimmung des Quellflecks mit den jeweiligen Achsenbeschriftungen.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Beobachtungen und Datenanalyse

3.1.1 Unsicherheiten

Die Unsicherheiten wurden gemäß GUM ermittelt. Außerdem wurde für Unsicherheitsrechnungen die Python Bibliothek „uncertainties“ verwendet.

Messleiste: Die Unsicherheit der Messleiste wurde auf 0,2 cm abgeschätzt (dreieckige WDF).

Maßband/Geodreieck: Die Unsicherheit des Maßbands/Geodreiecks wurde mit 0,05 cm bemessen (dreieckige WDF).

Winkelmessung: Die Winkel wurden mit dem Auge anhand einer Skala abgelesen, wobei die Unsicherheit $0,4^\circ$ beträgt. Beim Verstellen des Winkelmessarmes hat dieser jedoch viel Spielraum gehabt in dem sich der Winkelzeiger nicht verändert hat. Deshalb wurde für diese Messung die doppelte Unsicherheit gewählt.

Multimeter: Das Multimeter zeigte die Spannung mit 2 Nachkommastellen an. Da bei den Messungen die Anzeige der letzten Ziffer schwankte, wurde die Unsicherheit mit $0,03\text{ V}$ abgeschätzt (rechteckige WDF).

3.1.2 Bestimmung des Quellflecks des Senders

Es wurde in vier verschiedenen Abständen zum Sender orthogonal 11 Intensitäten gemessen die Strahlung gemessen. Die gemessenen Strahlenprofile sind in Abb. 2 bis 5 dargestellt.

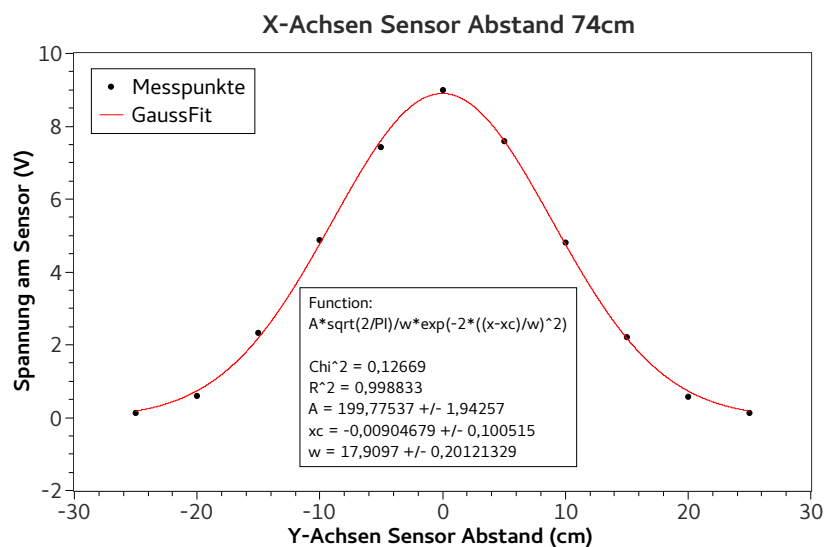


Abbildung 2: Strahlenprofil im Abstand von 74 cm. Die Unsicherheiten sind kleiner als die Symbolgröße.

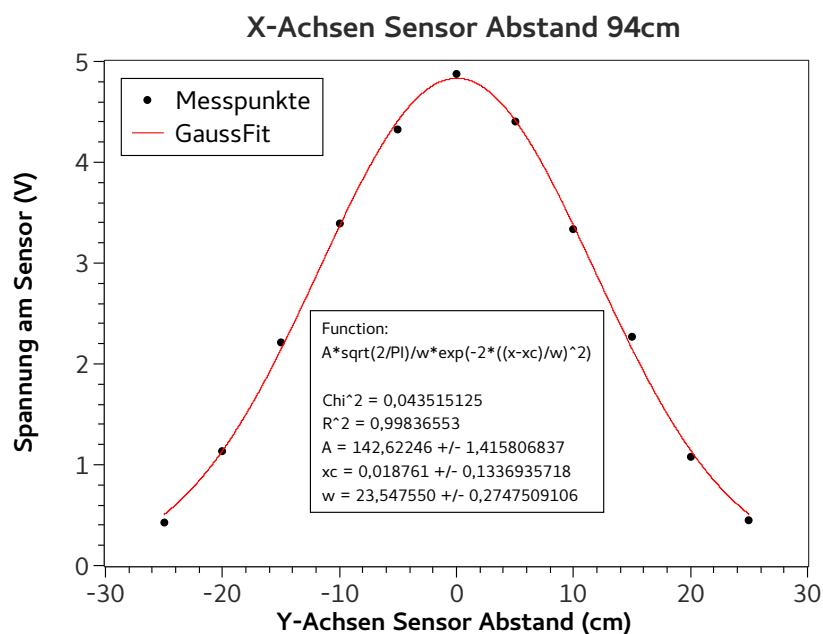


Abbildung 3: Strahlenprofil im Abstand von 94 cm. Die Unsicherheiten sind kleiner als die Symbolgröße.

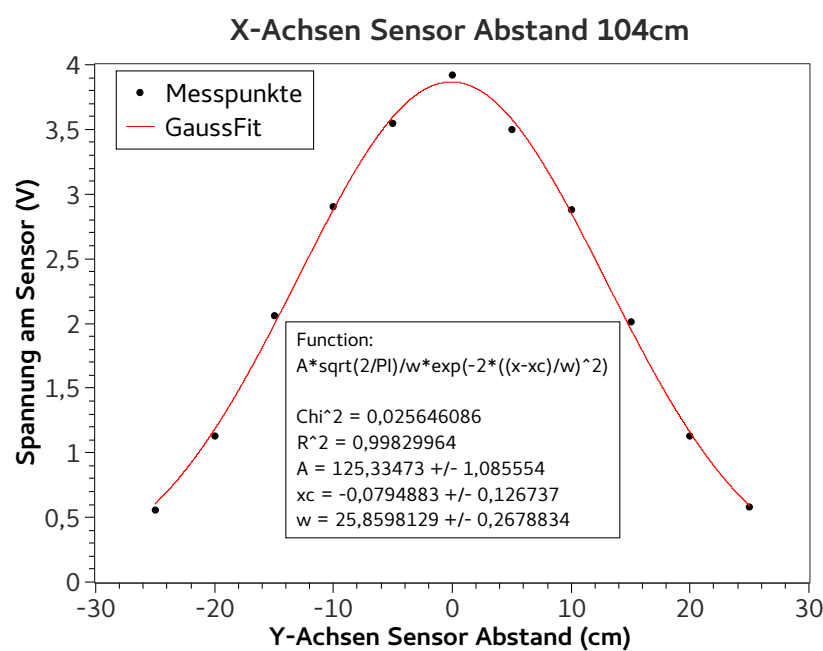


Abbildung 4: Strahlenprofil im Abstand von 104 cm. Die Unsicherheiten sind kleiner als die Symbolgröße.

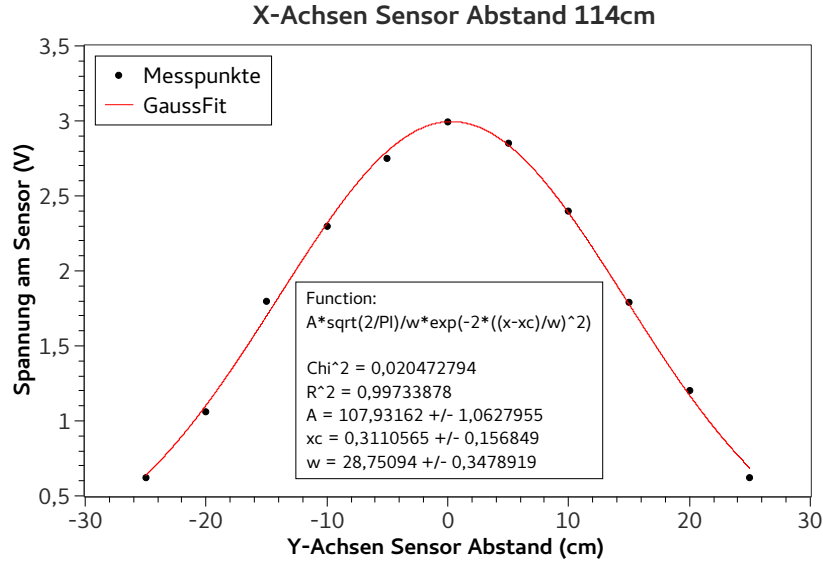


Abbildung 5: Strahlenprofil im Abstand von 114 cm. Die Unsicherheiten sind kleiner als die Symbolgröße.

Um die Hypothese, dass der Sender einen Gauß-Strahl aussendet, zu überprüfen, wurde ein Gaußkurven-Fit durchgeführt. Die resultierenden xc in den Graphen sind die Abweichung des Quellflecks entlang der Y-Achse (Abb. 1). Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt:

Tabelle 1: Zur Strahlungsrichtung orthogonale Abweichung xc des Quellpunkts zum Sender.

X-Achsen Abstand Sender/Empfänger in cm	xc in cm
74	$-0,01 \pm 0,10$
94	$0,02 \pm 0,13$
104	$-0,08 \pm 0,13$
114	$0,31 \pm 0,16$

Die Halbwertsbreiten der Strahlenprofile beträgt:

$$h = \sigma \cdot 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln(2)} = \omega \cdot \sqrt{2 \cdot \ln(2)}. \quad (1)$$

In Abb. 6 sind die Halbwertsbreiten des Strahls gegen den X-Achsen Abstand zwischen Sender und Empfänger aufgetragen. Die Steigung des linearen Fits ist die Strahlungsdivergenz $S = 0,317 \pm 0,007$. Die Verschiebung des Quellflecks zum Sender parallel zur Strahlungsrichtung lässt sich berechnen aus der Bedingung in welchem Abstand x $ax + b = 0$ erfüllt, also die Breite des Strahls minimal wird. Es folgt $x = (7,2 \pm 2,4)$ cm, das heißt der Quellfleck befindet sich $(7,2 \pm 2,4)$ cm vor dem Sender (also näher am Empfänger).

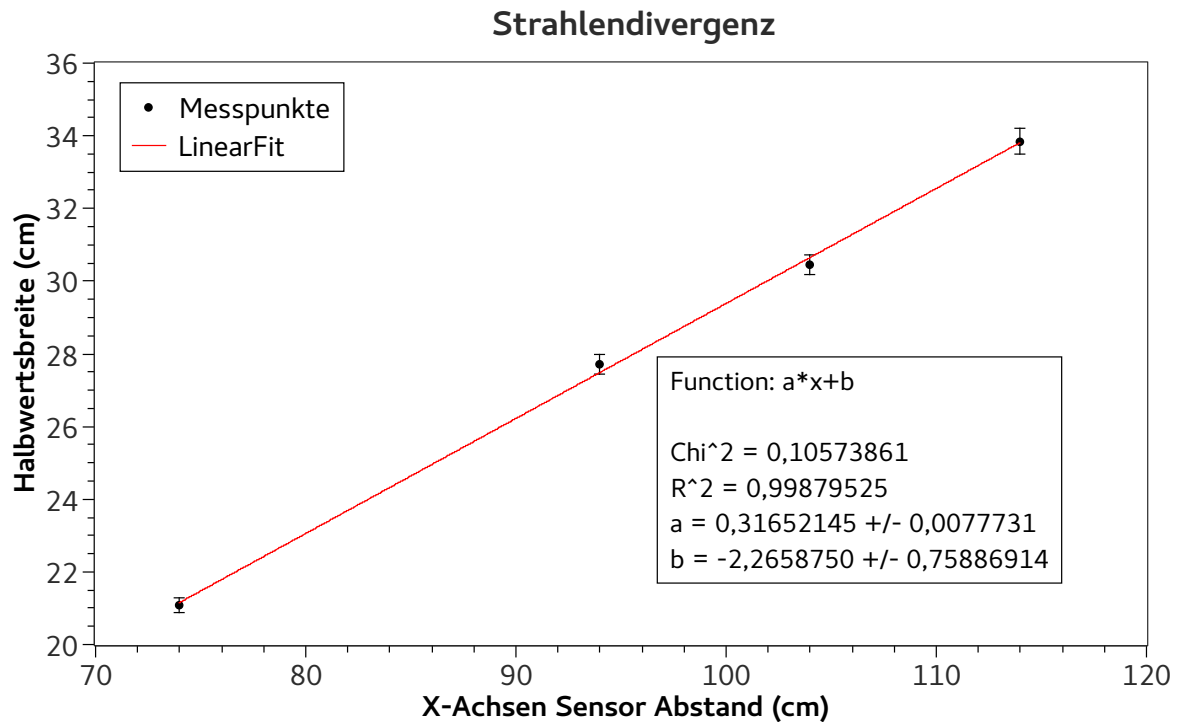


Abbildung 6: Die Halbwertsbreiten der Strahlenprofile sind gegen den Abstand des Sensors in X-Richtung aufgetragen.

3.1.3 Bestimmung der Wellenlänge

Bei der bestmöglichen Auflösung der Knoten der stehenden Welle betrug die Spannung an den Minima (Knoten) noch 0,03 V. In Abb. 7 sind die Positionen der Minima aufgelistet. Die gemessenen Positionen der jeweiligen Strahlungsminima wurden linear angeordnet. Die gemittelte halbe Wellenlänge ergibt sich aus dem Abstand des ersten zum letzten Minimum geteilt durch die Anzahl der Minima. So folgt:

$$\lambda = 2 \cdot \frac{(28,1 \pm 0,2) \text{ cm} + (12,4 \pm 0,2) \text{ cm}}{10} = (3,14 \pm 0,05) \text{ cm}. \quad (2)$$

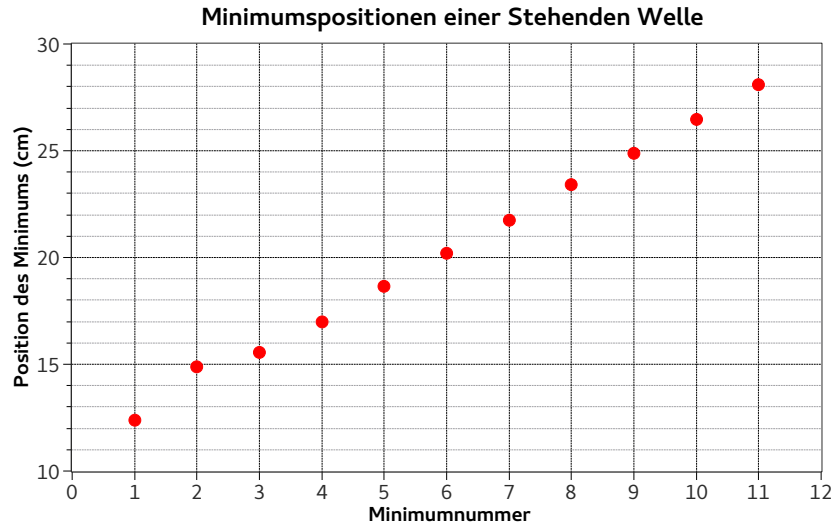


Abbildung 7: Hier sind die gemessenen Positionen der Knoten der stehenden Welle dargestellt. Die Unsicherheiten sind kleiner als die Symbolgröße.

3.1.4 Bestimmung des Brechungsindex von PVC

Der Brechungsindex von PVC für Mikrowellen wurde auf zwei Arten bestimmt. Zuerst wurde die runde Seite des Halbzylinders in verschiedenen Winkeln bestrahlt und der Winkel des Maximums der transmittierten Strahlung gemessen. Die Messergebnisse sind in Abb. 8 aufgeführt. Das Snelliusschen Brechungsgesetz lautet:

$$n_i \cdot \sin(\vartheta_i) = n_t \cdot \sin(\vartheta_t) \quad (3)$$

Somit kann der Brechungsindex n_{PVC} mit

$$n_{\text{PVC}} = \frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} n_{\text{Luft}} \quad (4)$$

bestimmt werden. Da n_{Luft} ungefähr 1 ist, ist die Steigung des linearen Fits in Abb. 8 gleich $n_{\text{PVC}} = 1,56 \pm 0,05$.

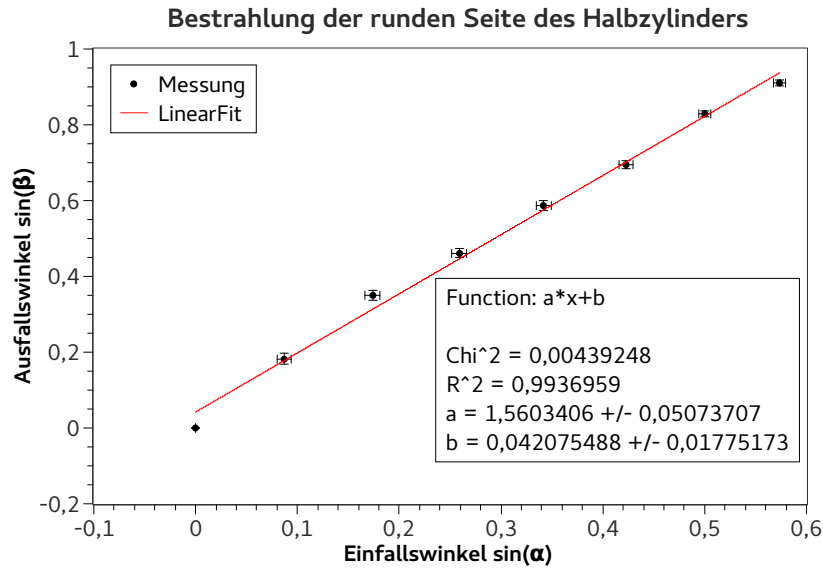


Abbildung 8: Der Sinus des Ausfallwinkels ist gegen den Sinus des Einfallswinkels beim Bestrahlen der runden Seite des Halbzylinders aus PVC aufgetragen.

Als zweite Messmethode wurde die flache Seite des Halbzylinders bestrahlt. Die Rechnung erfolgt analog zur vorherigen, jedoch ist das Verhältnis der Sinusse der Winkel invertiert. Das heißt, die Steigung ist der Kehrwert des Brechungsindex von PVC. Aus der Steigung a in Abb. 9 von $0,634 \pm 0,020$ folgt $n_{\text{PVC}} = 1,57 \pm 0,05$.

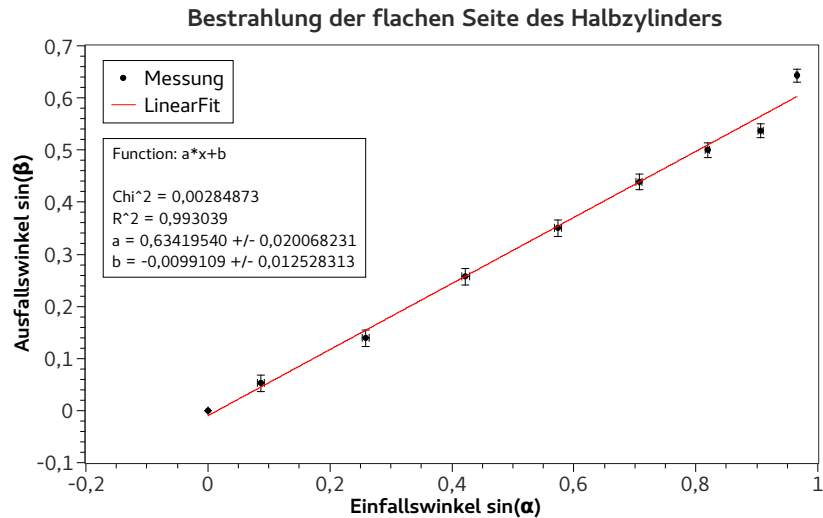


Abbildung 9: Der Sinus des Einfallswinkels α ist gegen den Sinus des Ausfallwinkels β , beim Bestrahlen der flachen Seite des Halbzylinders aus PVC, aufgetragen.

3.1.5 Frustrierte Totalreflexion

Es wurde die Intensität der transmittierten Strahlung als Funktion der Lückenbreite gemessen und in Abb. 10 abgebildet.

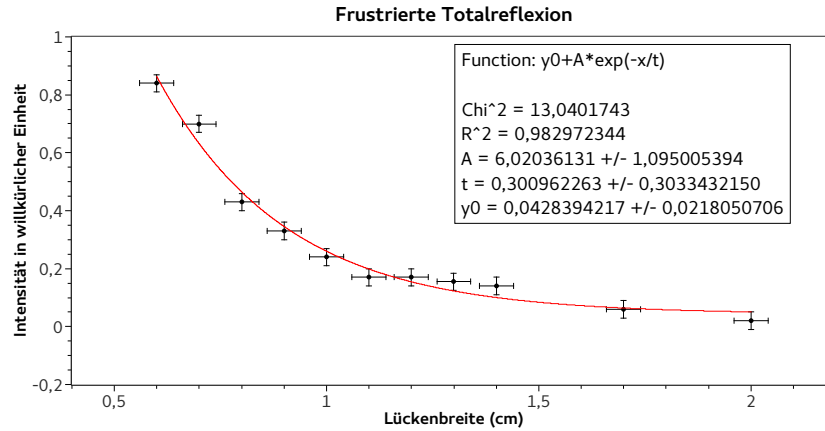


Abbildung 10: Gemessene Intensität der transmittierten Strahlung nach zwei Halbzylindern bei variiertem Lückenabstand.

3.1.6 Bragg-Reflexion

Die Braggsche Reflexionsbedingung lautet:

$$2d \sin(\alpha) = n\lambda \quad (5)$$

Wobei $n = 1, 2, \dots$ ist. In Abb. 11 wird die Reflexion bei einem Winkel von $(55,0 \pm 0,1)^\circ$ maximal. Folglich ist

$$\frac{\lambda}{2\sin(\alpha)} = (1,93 \pm 0,06) \text{ cm.}$$

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass für kleinere α ein Maximum existiert. Deshalb ist eine Bestimmung der Gitterkonstante nicht möglich. Beim direkten Messen der Abstände der Kugeln im Schaumstoff ergab sich ein Abstand d von $(3,875 \pm 0,200) \text{ cm}$, woraus ersichtlich ist, dass das Maximum bei 55° dem bei $n = 2$ entspricht, da $2 \cdot 1,93 \text{ cm} \approx d$.

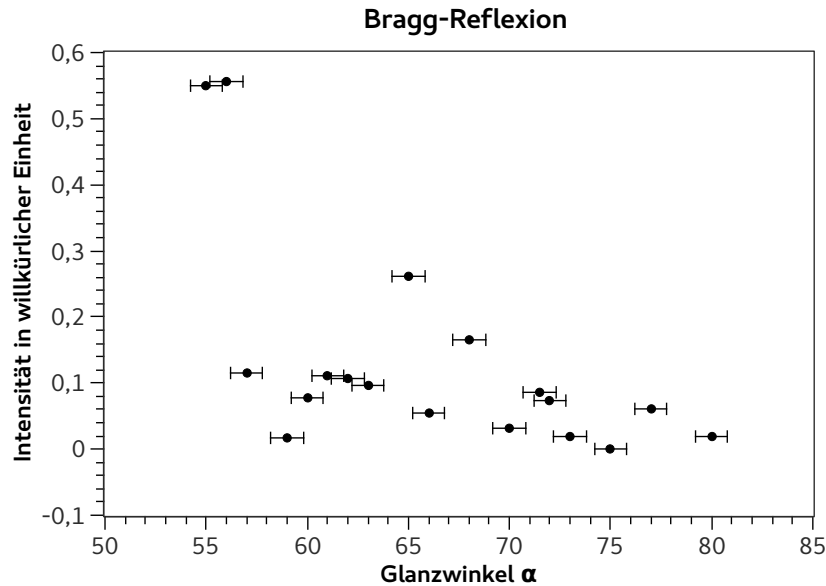


Abbildung 11: Gemessene Intensität der Reflexionsstrahlung im Ausfallswinkel 2α bei einem Einfallswinkel von α .

3.2 Diskussion

Wie in Abb. 2 bis 5 zu erkennen ist, lassen sich die Strahlenprofile durch eine Gauß-Kurve beschreiben. Auf Grundlage dessen lässt sich bestätigen, dass der Strahl dem Konzept des Gauß-Strahls entspricht, das Strahlen, die näherungsweise linear von der Quelle aus in der Breite wachsen, beschreibt. Die daraus folgende zur Strahlrichtung orthogonale Abweichung des Quellpunkts ist für die kleineren drei Entfernungen von Sender zu Empfänger (Tabelle 1) kleiner als der Fehler, weshalb angenommen werden kann, dass in dieser Richtung keine messbare Verschiebung der Quelle gegenüber der Position des Senders vorliegt. Dies wäre auch aufgrund der Symmetrie des Aufbaus in dieser Richtung nicht zu erwarten gewesen. Die etwas größere Abweichung von ca. 3 mm bei großem Abstand in X-Richtung lässt sich durch die wackelnde Halterungen von Sender und Empfänger erklären. Dass der Fokus vor dem Sender liegt, lässt sich durch die Geometrie des Senders erklären. Dieser hatte sich zur Antenne verjüngende Metallwände, die die Strahlung reflektieren können. Durch die Interferenz dieser Wellen liegt der Fokus des Gauß-Strahls im Bereich der Öffnung der Mikrowellenquelle.

Gemäß [1] wird der Brechungsindex von PVC bei 1,54 erwartet. Dies liegt innerhalb der Messfehler der Messwerte für Bestrahlung der runden Seite des Halbzylinders ($156,0 \pm 0,5$) und für Bestrahlung der flachen Seite ($1,57 \pm 0,05$). Da diese Messwerte aus dem Einfallswinkel und Ausfallswinkel größter Intensität gemäß des Snelliusschen Brechungsgesetzes bestimmt wurden, lässt sich hier das Snelliussche Brechungsgesetz als nicht widerlegt ansehen.

In Abb. 11 lässt sich erkennen, dass die Intensität der durch beide Halbzylinder transmittierten Strahlung die bei frustrierter Totalreflexion erwartete exponentielle Abnahme

mit der Breite der Lücke zwischen den beiden Hohlzylindern widerspiegelt. Insofern lässt sich sagen, dass hier das Phänomen der frustrierten Totalreflexion beobachtet werden konnte.

Bei der Bragg-Reflexion konnte nicht das Maximum für $n = 1$ gemessen werden, aber das für $n = 2$. Da dieser Wert des Gitterabstandes aber mit dem durch direkte Messung mit einem Geodreieck innerhalb der Unsicherheiten übereinstimmt, kann die Vermutung, dass Bragg-Reflexion aufgetreten ist, bestätigt werden.

4 Schlussfolgerung

Die Hypothesen konnten vollständig bestätigt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Strahldivergenz der vorliegenden Mikrowellenquelle durch das Konzept des Gauß-Strahls beschrieben werden kann und daraus konnte die Position des Fokus relativ zum Sender bestimmt werden. Hierbei wurde festgestellt, dass der Fokus des Gaus-Strahls vor dem Ausgang der Quelle liegt. Der gemessene Brechungsindex von PVC gemäß des Snelliusschen Brechungsgesetzes schloss den gemäß der Literatur erwarteten Wert in seinen Unsicherheiten ein, weshalb das Snelliussche Brechungsgesetz für Mikrowellen nicht widerlegt werden konnte. Außerdem ließ sich der exponentielle Abfall der Intensität mit dem Abstand zwischen zwei Hohlzylindern bei frustrierter Totalreflexion experimentell nachweisen, was die Annahme, dass hier frustrierte Totalreflexion zu beobachten ist, bestätigen. Zuletzt ließ sich ein Maximum durch Bragg-Reflexion auflösen und zeigen, dass der daraus berechnete Gitterabstand im Schaumstoffblock mit dem direkt gemessenen übereinstimmt. Eine Auflösung von weiteren Maxima hätte einen Messarm (die Schiene mit dem Empfänger) mit weniger Spiel vorausgesetzt, da dies die Messung stark beeinträchtigt hat.

Literatur

- [1] Goodfellow GmbH. *Polyvinylchlorid - unplastifiziert (UPVC) Materialinformationen*. URL: <http://www.goodfellow.com/G/Polyvinylchlorid-unplastifiziert.html> (besucht am 17.06.2018).