

1. Totalreflexion

Ein Lichtstrahl, der aus Glas heraus in Luft eintritt, wird an der Grenzfläche zwischen den beiden Medien so abgelenkt, dass der Winkel zum Einfallslot nach der Brechung, also in der Luft, größer ist als im Glas – er wird „vom Einfallslot weg gebrochen“. Wie man weiß, gilt das allgemein beim Übergang von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium. Ein Teil des Lichts wird aber auch in das Glas zurückgeworfen („reflektiert“). Da der gebrochene, in Luft austretende Strahl vom Lot weg gebrochen wird, tritt bei einem gewissen Einfallswinkel der Fall ein, dass er parallel zur Grenzfläche verläuft. Ist der Einfallswinkel größer, findet nur noch Reflexion statt – die heißt dann *Totalreflexion*.

Der Winkel θ_{Gr} , bei dem die Totalreflexion einsetzt, heißt Grenzwinkel der Totalreflexion. Für ihn gilt¹

$$(1) \quad n \cdot \sin \theta_{Gr} = 1 .$$

Dabei ist n der Brechungsindex des optisch dichteren Mediums, der des optisch dünneren Mediums wird zu $n = 1$ angenommen. Für Glas mit $n = 1,52$ ist beispielsweise $\theta_{Gr} = 41,2^\circ$.

Wir beschäftigen uns mit dem Fall Totalreflexion. Er ist deswegen interessant, weil eine elektromagnetische Welle auch bei Totalreflexion noch teilweise in das optisch dünnere Medium eindringt. Die Eindringtiefe wird üblicherweise mit δ bezeichnet und ist gegeben durch¹

$$(2) \quad \delta = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}} .$$

Sie ist definiert als die Entfernung vom dichteren Medium, in der die Energiedichte der Welle auf den e -ten Teil des Wertes an der Grenzfläche abgefallen ist. In der Gleichung ist θ der Winkel, unter dem die Welle auf die Grenzfläche trifft. Mit n wird, wie oben, der Brechungsindex des dichteren Mediums bezeichnet, und das optisch dünnere Medium hat wiederum den Brechungsindex $n = 1$. Dieser Wert ist in sehr guter Näherung der Brechungsindex der Luft, die in den meisten Experimenten als dünneres Medium fungiert.

2. Mikrowellen

Im Fall des Lichts beträgt die Eindringtiefe nur einen Bruchteil der Wellenlänge. Bei Glas und einem Einfallswinkel von 45° sind das für grünes Licht ungefähr $0,2 \mu\text{m}$. Solch kleine Längen zu messen ist aufwändig. Einfacher sind Experimente mit elektromagnetischen Wellen von größerer Wellenlänge, beispielsweise Mikrowellen. Mit diesen soll hier experimentiert werden. Das Gerät unserer Physiksammlung² erzeugt Mikrowellen der Wellenlänge $\lambda = 3,2 \text{ cm}$, die von einer Hornantenne abgestrahlt werden. Man kann davon ausgehen, dass der Strahl auf seiner gesamten Breite ebene Wellenfronten besitzt und so dem Idealfall der ebenen Welle nahe kommt. Das ist von Vorteil, da in unserem Experiment Winkel eine Rolle spielen.

An Stelle von Glas benutzen wir als (wellen-)optisch dichteres Medium Paraffin, das dünnere Medium ist wie beim Glas die Luft. Das Paraffin hat die Form eines gleichseitigen Prismas mit einer Kantenlänge von etwa 30 cm . Um den Übergang der Mikrowelle vom Paraffin in Luft zu untersuchen, müssen wir den Einfallswinkel variieren. Dieser lässt sich aber nicht direkt messen, da der Hornstrahler nicht in das Innere des Paraffins gebracht werden kann. Wir bringen den Strahler also außerhalb des Paraffin-Prismas an und richten ihn so aus, dass sein Strahl nach der Brechung beim Eintritt in das Paraffin mit ausreichender Intensität auf die Grenzfläche zwischen Paraffin und Luft

trifft, an der die Totalreflexion stattfindet. Abbildung 1 zeigt den Durchgang des (Mikrowellen-) Strahls durch das Paraffin-Prisma. Aus der Skizze geht hervor, dass der Winkel θ , unter dem der Strahl

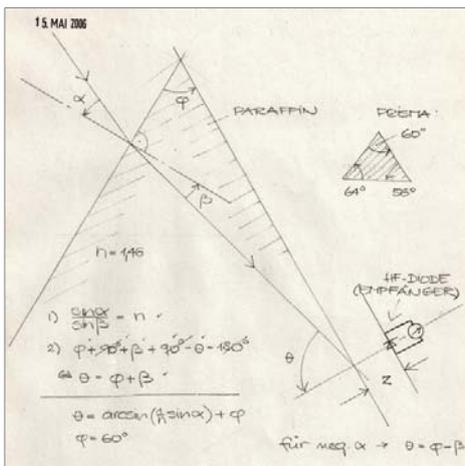


Abbildung 1 Strahlengang der Mikrowelle durch das Paraffin-Prisma: Der Strahl tritt links oben in das Paraffin ein (Winkel α gegenüber dem Einfallslot), wird gebrochen (Winkel β) und trifft dann innerhalb des Paraffins unter dem Winkel θ auf die Grenzfläche zur Luft. Dort wird er (total-)reflektiert. Ein Teil der Welle tritt jedoch in das optisch dünnere Medium Luft ein. Der Empfänger (HF-Diode) misst die Intensität der Mikrowelle hinter der Grenzfläche in Luft, und zwar als Funktion des Abstands z .

auf die Grenzfläche zwischen Paraffin und Luft trifft, gegeben ist durch

$$(3) \quad \theta = \left| \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin \alpha\right) + \varphi \right|.$$

Dabei ist α der Winkel, unter dem der Strahler auf das Prisma gerichtet wird, φ der Winkel der brechenden Kante des Prismas ($\varphi = 60^\circ$) und $n = 1,46$ der Brechungsindex des Paraffins (für cm-

Tabelle 1 Winkel in der Versuchsanordnung Abbildung 1. Aus α und $\varphi = 60^\circ$ wird nach Gleichung (3) der Winkel θ berechnet (siehe Text).

Winkel α /Grad	Winkel θ /Grad
15	70,2
10	66,8
5	63,4
0	60,0
- 5	56,6
- 10	53,2
- 15	49,8
- 20	46,5

Wellen). Die nach Gleichung (3) berechneten und hier benutzten Werte für θ sind in Tabelle 1 aufgeführt. Sie sind alle größer als $43,2^\circ$, dem Grenzwinkel für Totalreflexion – pardon für diesen Hinweis.

3. Messung

Für jeden der in Tabelle 1 aufgeführten Winkel α bzw. θ wurde mit einer HF-Diode die Intensität der Welle in der Luft (im optisch dünneren Medium) als Funktion des Abstands z von der Paraffin-Oberfläche gemessen. In Abbildung 2 sind die Messwerte auf halblogarithmischem Papier

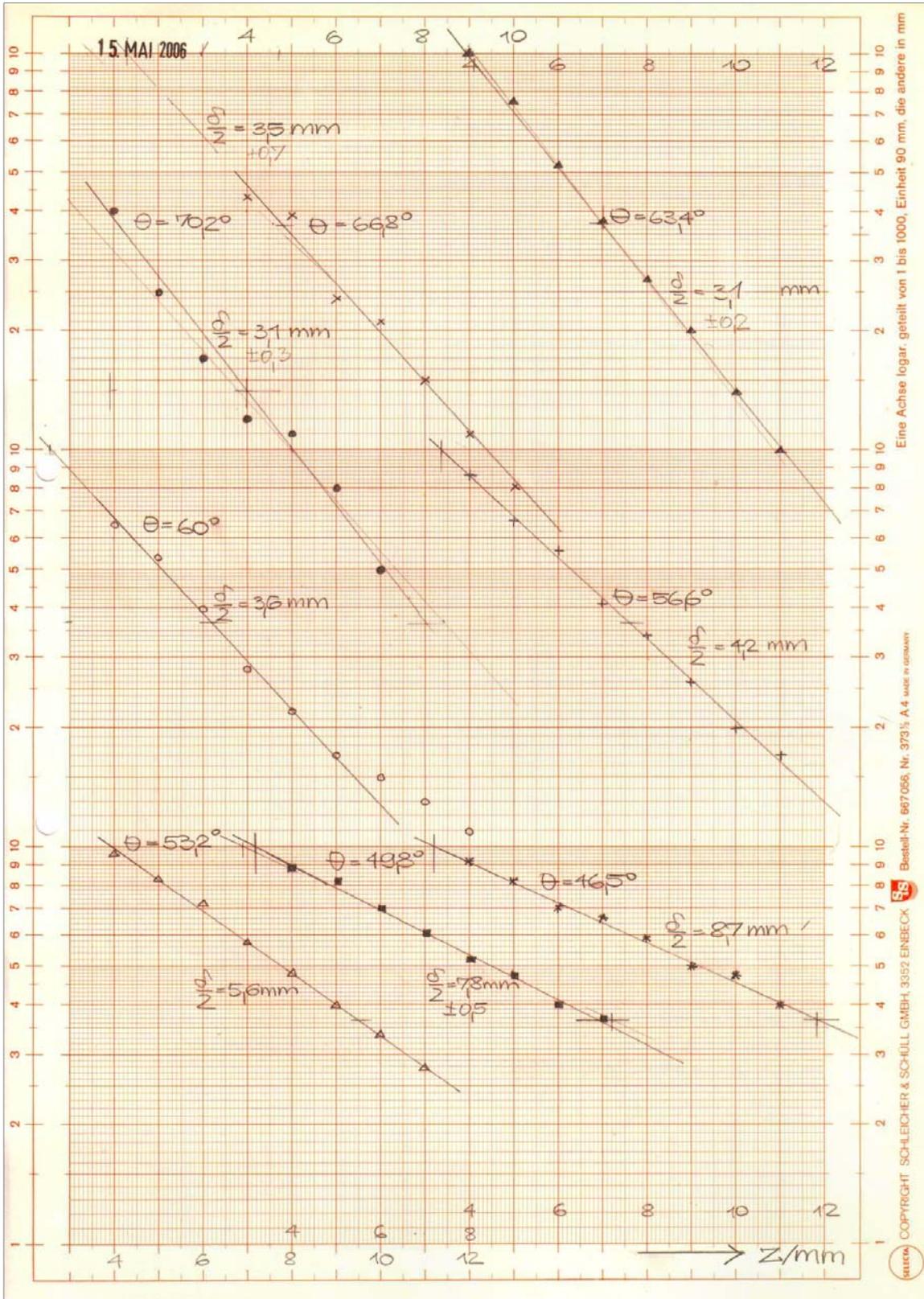


Abbildung 2 Energiedichte der Mikrowelle (relative Einheiten) in der Luft (optisch dünneres Medium) als Funktion des Abstands z von der Grenzfläche zwischen Paraffin und Luft

aufgetragen. Der exponentielle Abfall mit wachsendem Abstand z ist deutlich zu sehen: die Messpunkte liegen bei nur geringer Streuung auf Geraden mit negativer Steigung. Theoretisch sollte die Intensität proportional sein zu $\exp(-2z/\delta)$. Deshalb lässt sich aus der Steigung der Geraden die Eindringtiefe δ bestimmen. Man wählt zwei Punkte der Geraden, deren (y -)Werte sich um den Faktor $1/e = 0,3679$ unterscheiden. Die Differenz der zugehörigen Stellen z ist gleich der Hälfte der Eindringtiefe δ . Abbildung 3 zeigt die so bestimmten Werte von δ als Funktion des Einfallswinkels θ . Das ist, wie oben beschrieben, der Einfallswinkel, mit dem die Welle im Paraffin in Richtung

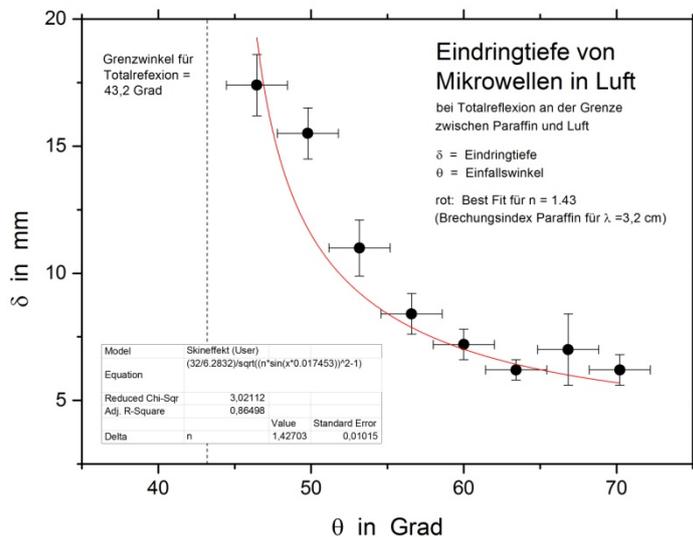


Abbildung 3 Eindringtiefe der Mikrowelle in das optisch dünnere Medium Luft bei Totalreflexion an der Grenzfläche Paraffin-Luft. Die Anpassung einer Kurve nach Gleichung (2) ergibt als Brechungsindex des Paraffins $n = 1,43$. Literaturwert $n = 1,46$.

auf die Grenzfläche zur Luft trifft. Da die Werte von θ nicht direkt gemessen, sondern aus den Winkeln α nach Gleichung (3) berechnet wurden, sind sie nur mit beschränkter Genauigkeit angebar. Sie wurden deshalb mit einem (grob abgeschätzten) Fehler von $\pm 2^\circ$ versehen – in der Abbildung durch die horizontalen Fehlerbalken dargestellt. An die Messpunkte wurde ein Graph nach Gleichung (2) mit n als Parameter angepasst. Die beste Anpassung ergab $n = 1,43$ mit einem Fehler von $\pm 0,01$, der jedoch nur die Streuung der Messpunkte wiedergibt. Ein systematischer Fehler ist schwer abzuschätzen. Als Literaturwert des Brechungsindex von Paraffin für cm-Wellen wird $n = 1,46$ angegeben – der hier gemessene Wert ist also nicht völlig falsch.

Das Experiment ist aus dem Schulunterricht entstanden – als wieder einmal Mikrowellenversuche an der Reihe waren. Berichte oder Beschreibungen von derartigen oder ähnlichen Messungen habe ich im Internet und in der Literatur nicht gefunden. Zu wenig recherchiert? – ich hoffe nicht. Jedenfalls kann ich meine Daten nicht mit denen anderer (Schulphysik-)Experimente vergleichen. Offenbar gibt es keine. Das wundert mich, schließlich ist das Eindringen von Wellen in den „verbotenen“ Bereich, beispielsweise beim Tunneleffekt, ein grundlegendes physikalisches Phänomen.

Anmerkungen

¹ siehe beispielsweise J. S. Crawford: *Berkeley Physics Course*, Volume III (Waves), New York: McGraw-Hill (1965)

² Klystron-Sender mit Hornstrahler als Antenne und Betriebsgerät – PHYWE 6871.93 .