

Charakterisierung eines Sender-Empfänger-Systems

Stichworte:

Mikrowellen, Transversalwellen, ebene Wellen, Kugelwellen, stehende Welle, Richtcharakteristik, Reflexions- und Brechungsgesetz, Brechzahl, Polarisation.

Messprogramm:

Eigenschaften eines Sender-Empfänger-Systems für Mikrowellen, Messung der Entfernungsabhängigkeit und der Richtcharakteristik, Brechzahl von PVC für Mikrowellen, Reflexion von Mikrowellen an einer Metallplatte und einem Drahtgitter, Polarisation von Mikrowellen.

Literatur:

- /1/ DEMTRÖDER, W.: „Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik“, Springer-Verlag, Berlin u. a.
 /2/ EICHLER, H. J., KRONFELDT, H.-D., SAHM, J.: „Das Neue Physikalische Grundpraktikum“, Springer-Verlag, Berlin u. a.

1 Einleitung

Im Laufe des Physikstudiums werden Sie verschiedene Sender-Empfänger-Systeme kennenlernen, wie z.B. das System Lichtquelle / Fotodetektor in der Optik oder das System Lautsprecher / Mikrofon in der Akustik. Solche Systeme werden i. Allg. durch mehrere Kenngrößen beschrieben. Ziel dieses Versuches ist es, anhand der Vermessung der Eigenschaften eines Sender-Empfänger-Systems für Mikrowellen¹ einige solcher Kenngrößen kennenzulernen. Im Einzelnen soll untersucht werden,

- ob und wenn ja wie die Intensität der abgestrahlten Welle mit zunehmender Entfernung vom Sender abnimmt (*Entfernungsabhängigkeit*),
- in welcher geometrischen Form (z.B. strahl-, kugel- oder keulenförmig) die Abstrahlung der Welle erfolgt (*Richtcharakteristik*),
- an welchen Strukturen die Welle reflektiert wird (*Reflexionsgesetz*),
- ob die Welle beim Übergang Luft → PVC gebrochen wird (*Brechungsgesetz* und *Brechzahl*),
- ob die Welle linear *polarisiert* ist.

Das System besteht aus einem Mikrowellensender und einem dazu passenden Empfänger. Beide Komponenten werden als „Black-Boxes“ behandelt, „schwarze Kästen“ also, die eine bestimmte Funktion erfüllen (Welle aussenden und Intensität der Welle detektieren), deren detaillierter Aufbau für den Versuch jedoch unbedeutend ist und auf den deshalb auch nicht weiter eingegangen wird.

Zur Auswertung einiger Teilaufgaben des Versuchs werden grundlegende Kenntnisse aus dem Bereich der Optik benötigt, die aus der Schule bekannt sein sollten: Reflexion, Brechung, stehende Welle. Im späteren Verlauf des Grundpraktikums werden diese Themen noch ausführlich behandelt, nachdem sie in der Vorlesung erarbeitet wurden.

2 Versuchsdurchführung

Zubehör:

Mikrowellensender (Typ I mit Gunn-Diode MICROSEMI MO86751A, $P \approx 10$ mW, $\lambda \approx 28,5$ mm; Typ II mit Gunn-Diode CL 8650 8927 (Hersteller unbekannt), $P \approx 15$ mW, $\lambda \approx 27,5$ mm), Mikrowellenempfänger (HEWLETT PACKARD X424A), 2 Dreieckschienen (Längen 1,5 m und 0,5 m), Gelenk für Dreieckschienen mit Winkelskala und Zeiger, Winkelsensor (TWK ELEKTRONIK PBA 12), 3 Netzgeräte (PHYWE (0 – 15 / 0 – 30) V), Multimeter (AGILENT U1272A oder U1251B), Digital-Oszilloskop TEKTRONIX TDS 1012 / 1012B / 2012C / TBS 1102B, PVC-Platte, Al-Blech, Drahtgitter, Verschiebetisch (100 mm) mit Motor und Laserdistanzsensor (BAUMER OADM 12U6460/S35), 2 Impedanzwandler, PC mit Datenerfassungsgerät (NATIONAL INSTRUMENTS myDAQ) und zugehörige BNC-Adapterbox, Metallmaßband (Länge 1 m), Stativmaterial.

2.1 Inbetriebnahme von Sender und Empfänger

Zu Beginn der Versuche muss die Handhabung von Sender und Empfänger kennen gelernt werden. Dazu wird eine Anordnung gem. Abb. 1 aufgebaut. Sender S und Empfänger E werden auf einer ca. 1,5 m langen Dreieckschiene montiert, auf gleiche Höhe eingestellt und mittig zur Achse A im Abstand $d = 5$ cm voneinander angeordnet. Als Abstand d ist die Entfernung zwischen den Vorderkanten der *Trichter* von Sender und Empfänger definiert.

¹ Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich zwischen ca. 300 MHz und ca. 300 GHz.

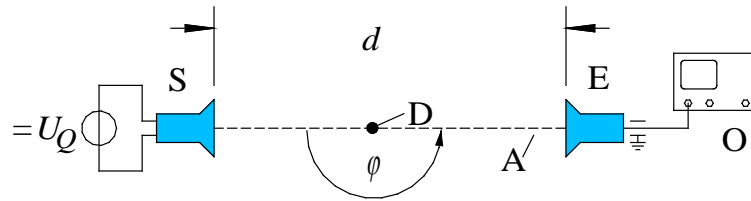


Abb. 1: Schematische Anordnung des an eine Spannungsquelle U_Q angeschlossenen Senders S und des zugehörigen Empfängers E. E wird über ein Koaxialkabel mit dem Oszilloskop O und/oder einer Messwerterfassungskarte verbunden, der Außenleiter des Kabels wird geerdet. A ist die Verbindungsachse von S und E. Für einige Versuche werden S und E auf *einer* Dreieckschiene montiert, für andere auf *zwei* Dreieckschienen, die mit einem Drehgelenk mit der Drehachse D verbunden sind. d ist der Abstand zwischen S und E, φ deren Winkelorientierung. Der Winkel φ wird mit einem Winkelsensor gemessen, der aus dem Versuch „Sensoren...“ bekannt ist.

Der Sender wird an eine Gleichspannungsquelle U_Q angeschlossen, die vorher auf 10 V Ausgangsspannung eingestellt wird (Überprüfung mit Multimeter). Er emittiert dann eine Mikrowelle konstanter Leistung P mit der Wellenlänge λ (P und λ siehe Zubehör).

Der Empfänger wird über ein Koaxialkabel mit einem Oszilloskop O (DC-Ankopplung) und/oder einem Datenerfassungsgerät verbunden. Er misst die *Intensität* I der einfallenden Mikrowelle. Darunter versteht man den *zeitlichen Mittelwert* der Energie einer Welle pro Zeit und Fläche. Die Einheit der Intensität ist also $[I] = \text{J s}^{-1} \text{m}^{-2} = \text{W m}^{-2}$. Dem hochfrequenten Verlauf des elektrischen Feldes \mathbf{E} der Mikrowelle (Frequenz ca. 10,5 GHz²) kann der Detektor nicht direkt folgen.³

Der Empfänger ist so gebaut, dass er die Intensität I der empfangenen Welle in ein *negatives* Spannungssignal U umsetzt: $I \sim -U$. Für die folgenden Versuche ist nur der Betrag $|U|$ der Spannung maßgeblich.

Hinweise:

- Um einer möglichen Zerstörung der im Empfänger enthaltenen Halbleiterdiode durch elektrostatische Entladungen vorzubeugen, wird der Außenleiter des Koaxialkabels geerdet (Verbindung mit der Erdbuchse (\perp) in der Laborzeile oder am Netzgerät (\perp)).
- Da die Mikrowellen z.T. auch an den handelnden Personen gestreut und reflektiert werden, müssen alle folgenden Messungen jeweils unter gleichen Umgebungsbedingungen (gleicher Standort der Personen usw.) durchgeführt werden.

2.2 Entfernungabhängigkeit

Zunächst wird die *Entfernungsabhängigkeit* gemessen. Dazu werden gem. Abb. 1 Sender und Empfänger auf der ca. 1,5 m langen Dreieckschiene aufgebaut und die Spannung U am Empfänger mit dem Oszilloskop in Abhängigkeit vom Abstand d gemessen ($5 \text{ cm} \leq d \leq 1 \text{ m}$). Bei Veränderung von d wird eine Oszillation des Empfangssignals auftreten, die dem entfernungsabhängigen Signalverlauf überlagert ist. Diese Oszillation (Periodenlänge $\lambda/2$) wird dadurch verursacht, dass ein Teil der abgestrahlten Welle am Empfänger reflektiert wird, mit der abgestrahlten Welle interferiert und eine stehende Welle bildet. Da die Amplitude der reflektierten Welle deutlich kleiner ist als die der abgestrahlten Welle, bildet sich eine stehende Welle mit schwacher *Modulation* aus (s. Abb. 2).

Bei der Messung der Entfernungabhängigkeit muss darauf geachtet werden, dass die Messpunkte immer bei den Abständen d_i liegen, bei denen der Betrag des Empfangssignals, $|U|$, jeweils maximal ist. Der Abstand der Messpunkte soll 2λ betragen. Ist ein Messpunkt eingestellt, kann mit Hilfe der Funktion **Messung** \rightarrow **Mittelwert** des Digital-Oszilloskops der Messwert für U abgelesen werden. Für U muss kein Fehler angegeben werden. Der Größtfehler für d_i ergibt sich aus der eingeschränkten Genauigkeit, mit der die Lage der Messpunkte bestimmt werden kann.

² Zum Vergleich die Frequenzen anderer Mikrowellen: Digital-Satelliten-TV ca. 12 GHz, Mikrowellenherd ca. 2,5 GHz.

³ Dies ist analog zu einem Fotodetektor, der ebenfalls nur *Lichtintensitäten* messen kann, nicht jedoch den zeitlichen Verlauf des elektrischen Feldes einer Lichtwelle im Frequenzbereich von 10^{14} Hz.

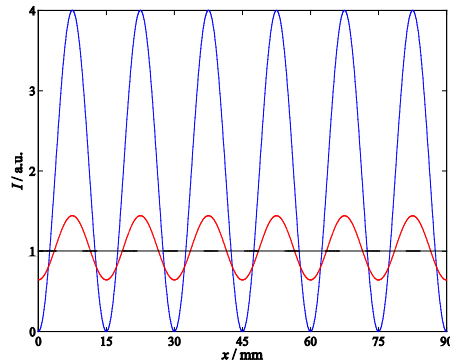


Abb. 2: Räumlicher Verlauf der *Intensität* I in einer stehenden Welle, die durch Interferenz von zwei ebenen, gegenläufigen Mikrowellen mit der Wellenlänge $\lambda = 30$ mm entsteht⁴. Blau: Intensitätsverlauf für den Fall, dass die *Amplitude* E der hinlaufenden Welle (E_a) gleich der *Amplitude* der reflektierten Welle (E_r) ist: $E_r = E_a$. Rot: $E_r = 0,2 E_a$. Schwarz: $E_r = 0$. Maxima und Minima der Intensität haben jeweils einen Abstand von $\lambda/2$. „a.u.“ steht für *arbitrary units (beliebige Einheiten)*.

Zur Auswertung wird $|U|$ über d (mit Größtfehler Δd) einmal halblogarithmisch ($|U|$ auf logarithmischer Achse) und einmal doppeltlogarithmisch aufgetragen. In die Diagramme werden zusätzlich die Kurven eingezeichnet, die sich für folgende Fälle ergeben würden:

- Der Sender emittiert einen scharf begrenzten Strahl, der zwischen S und E nicht abgeschwächt wird: $|U| = |U_0| = \text{const.}$ mit der Anfangsspannung $|U_0|$.
- Wie a), aber mit exponentieller Schwächung durch Absorption zwischen S und E: $|U| = |U_0| e^{-\alpha d}$ mit dem Abschwächungskoeffizienten α ($0,02 \text{ cm}^{-1}$ hat sich als sinnvoller Wert erwiesen).
- Der Sender emittiert eine Kugelwelle, die zwischen S und E keine Abschwächung durch Absorption erfährt: $|U| = |U_0| k / d^2$. k ist ein Skalierungsfaktor, der so gewählt werden muss, dass $|U| = |U_0|$ für $d \rightarrow 0$.

Durch Vergleich des Verlaufes der Messdaten mit den theoretisch erwarteten Verläufen nach a) bis c) soll entschieden werden, in welcher Art die Wellenausbreitung stattfindet. Für die Darstellung der theoretischen Kurven sind für α , k und $|U_0|$ passende Werte einzusetzen, so dass der jeweils erwartete Kurvenverlauf gut zu erkennen ist. Um nicht zu falschen Schlussfolgerungen zu gelangen, müssen die Messergebnisse zur Richtcharakteristik (Kap. 2.3) mit berücksichtigt werden!

2.3 Richtcharakteristik

Zur Messung der *Richtcharakteristik* wird der Sender auf der langen Dreieckschiene so montiert, dass die Vorderkante seines Trichters gerade in der Drehachse D liegt (Abb. 1). Der Empfänger wird auf einer zweiten, ca. 0,5 m langen Dreieckschiene in ca. 40 cm Abstand hinter der Drehachse angeordnet. Beide Schienen sind über ein Drehgelenk miteinander verbunden. Der Winkel φ kann auf einer Winkelskala abgelesen und gleichzeitig mit Hilfe eines Winkelsensors gemessen werden, der bereits aus dem Versuch „Sensoren...“ bekannt ist. Bei der Einstellung der Entfernung zwischen E und D muss darauf geachtet werden, dass das Empfangssignal $|U|$ bei einem Winkel von $\varphi = 180^\circ$ ein Maximum aufweist. Der Winkel $\varphi = 180^\circ$ wird eingestellt, indem die Dreieckschienen mit Hilfe eines angelegten Metallmaßbands längs der gemeinsamen Achse A ausgerichtet werden.

Durch Drehung des Armes mit dem Empfänger E wird der Winkel von $\varphi = 150^\circ$ auf $\varphi = 210^\circ$ erhöht. Während der Drehung werden die Ausgangsspannung des Winkelsensors, U_w , und die Spannung U am Empfänger gemessen und mit dem DAQ Gerät aufgezeichnet (s.u. *Hinweise zur Datenaufnahme mit der DAQ*). Anschließend wird mit Hilfe von *Origin* $|U|$ als Funktion von φ (aus U_w berechnet) in einem *Polardiagramm*⁵ dargestellt (vgl. Abb. 3). Für $|U|$ und φ müssen keine Fehler angegeben werden. Wegen

⁴ Die Intensität I einer elektromagnetischen Welle ist proportional zum Quadrat der Amplitude E des elektrischen Feldes der Welle: $I \sim E^2$.

⁵ Zur Erzeugung eines Polardiagramms mit *Origin*: → Zeichnen → Spezialisiert → Polar... (englische Version: → Plot → Specialized → Polar...).

der Vielzahl der aufgenommenen Daten wird das Polardiagramm als *Liniendiagramm* statt als *Punktogramm* dargestellt. Zusätzlich werden in das Diagramm die Kurven eingezeichnet, die sich in den Fällen a) und c) ergeben würden.

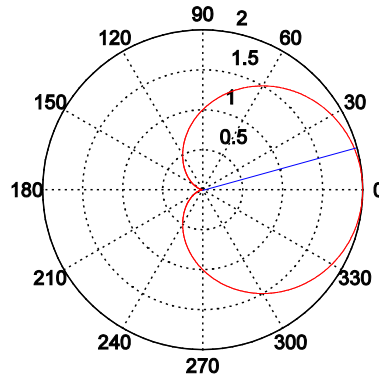


Abb. 3: Beispiel eines Polardiagramms für die Funktion $r(\alpha) = 1 + \cos \alpha$ (rote Kurve). Der Winkel α läuft gegen den Uhrzeigersinn. Für jeden Winkel α wird der Funktionswert $r(\alpha)$ als Abstand vom Zentrum des Diagramms dargestellt (für $\alpha = 15^\circ$ exemplarisch durch blauen Strich markiert).

Hinweise zur Datenaufnahme mit dem DAQ Gerät

Die Messung und Aufzeichnung der Spannung U_w des Winkelsensors und der Spannung U am Empfänger erfolgt mit Hilfe eines NI myDAQ Datenerfassungsgerätes im PC auf analoge Weise wie beim Versuch „Datenerfassung und -verarbeitung mit dem PC...“. U_w und U werden aus Gründen der Signalanpassung jeweils über einen *Impedanzwandler*⁶ an die Buchsen AI 0 und AI 1 der Anschlussbox angeschlossen. Das aus dem Versuch „Datenerfassung...“ bekannte MATLAB-m-File muss erweitert werden, um gleichzeitig beide Signale erfassen zu können und kann unter der Bezeichnung *Datenerfassung_2017b* aufgerufen werden.

Eine Abtastrate von $R = 100/s$ ist dabei ausreichend für eine sinnvolle Aufnahme der Messdaten. Die entsprechende Datei für die Messdaten wird abgespeichert und enthält die Spannungswerte aus beiden Kanälen in Form einer $(N, 2)$ -Matrix mit N Zeilen und 2 Spalten, wobei N die Zahl der eingelesenen Messwerte ist. In der ersten Spalte stehen die Messwerte von Kanal 0, also die Werte von U_w , in der zweiten Spalte die Messwerte von Kanal 1, also die Werte von U , sofern nicht anders gewählt. Die Daten für die Zeit t werden für die weitere Auswertung nicht benötigt. Die Daten für U_w und U werden in einer ASCII-Datei (hier: MD.dat) gespeichert, um sie später mit Origin weiter verarbeiten zu können. Die Struktur von dem MATLAB-m-File *Datenerfassung_2017b* wird im Anhang (Kapitel 3) dargestellt.

Hinweis zur Vermeidung von Störspannungen:

Für diesen Versuchsteil müssen die Ground-Leitungen (0 V) der Spannungsversorgungen für Impedanzwandler und Winkelsensor mit der Erdungsbuchse (⌚) der Netzgeräte verbunden werden, um Störspannungen durch sogenannte Brummschleifen zu vermeiden.

2.4 Brechung

Ziel des Teilversuchs ist die Bestimmung eines Orientierungswertes für die Brechzahl n_{PVC} von PVC für die verwendete Mikrowelle⁷. Dazu folgender theoretischer Hintergrund:

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen hängt von der Brechzahl n des Mediums ab, das die Wellen durchlaufen. Im Vakuum ist $n = 1$; die Wellen breiten sich hier mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c aus. c ist eine Naturkonstante (vgl. hintere Umschlagseite dieses Skriptes). In Medien (Index M) mit $n > 1$ ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit geringer. Es gilt:

⁶ Aufbau und Funktion von Impedanzwandlern werden im späteren Versuch „Operationsverstärker“ (SoSe) behandelt.

⁷ In der folgenden Beschreibung wird vorausgesetzt, dass sich die Mikrowelle wie eine ebene Welle ausbreitet. Dies ist nach den Ergebnissen aus Kap. 2.3 jedoch nicht der Fall. Außerdem wird die Messung durch Streuung und Reflexion der Mikrowelle an umgebenden Materialien beeinflusst. Deshalb ist eine präzise Bestimmung von n_{PVC} mit der verwendeten Versuchsanordnung nicht möglich. Die Messung liefert jedoch einen brauchbaren Orientierungswert.

$$(1) \quad c_M = \frac{c}{n_M}$$

Im Vakuum gilt folgender Zusammenhang zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit c , der Wellenlänge λ und der Frequenz ν einer elektromagnetischen Welle:

$$(2) \quad c = \lambda \nu$$

In einem Medium mit $n_M > 1$ gilt analog:

$$(3) \quad c_M = \lambda_M \nu$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlänge werden im Medium kleiner, die Frequenz der Welle bleibt unverändert. Die Kombination von Gl. (1) bis (3) ergibt:

$$(4) \quad \frac{c}{n_M} = \lambda_M \nu = \frac{\lambda}{n_M} \nu$$

Für Luft ist $n_M \approx 1$ und damit $c_M \approx c$ und $\lambda_M \approx \lambda$.

Die Verkürzung der Wellenlänge in einem Medium mit $n_M > 1$ kann man ausnutzen, um die Brechzahl n_M zu messen. Dazu betrachten wir gem. Abb. 4 oben einen Ausschnitt der bereits aus Kap. 2.2 bekannten stehenden Welle. Zwischen S und E befindet sich Luft mit $n_{\text{Luft}} \approx 1$. Auf einer Strecke der Länge L bilden sich M Intensitätsmaxima, die jeweils den Abstand $\lambda/2$ voneinander haben. Es gilt also:

$$(5) \quad L = M \frac{\lambda}{2}$$

Nun bringen wir gem. Abb. 4 unten eine Platte der Dicke D zwischen S und E ein. Die Brechzahl des Plattenmaterials sei $n_M > 1$. Dadurch wird die Wellenlänge in der Platte verringert:

$$(6) \quad \lambda_M = \frac{\lambda}{n_M}$$

und die Zahl der Intensitätsmaxima längs der Strecke L um m erhöht. Es gilt:

$$(7) \quad \frac{D}{\frac{\lambda_M}{2}} + \frac{a}{\frac{\lambda}{2}} = M + m$$

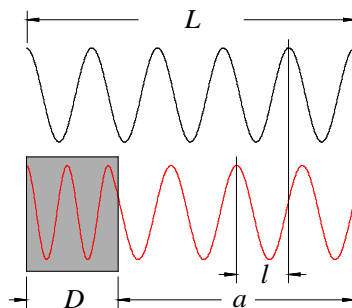


Abb. 4: Stehende Wellen zwischen S und E. Oben für den Fall, dass sich zwischen S und E Luft befindet. Unten für den Fall, dass in die Luft zwischen S und E eine Platte der Dicke D mit der Brechzahl n_M eingebracht wird, wodurch die Intensitätsmaxima im Bereich a zur Platte hin verschoben werden. Übrige Bezeichnungen siehe Text.

Die Erhöhung der Zahl der Intensitätsmaxima um m geht außerhalb der Platte mit einem Versatz der Maxima um die Strecke l einher, für den gilt:

$$(8) \quad l = m \frac{\lambda}{2}$$

Außerdem gilt gem. Gl. (5):

$$(9) \quad L = D + a = M \frac{\lambda}{2}$$

Durch Einsetzen von M aus Gl. (9) in Gl. (7) und mit Gl. (6) und (8) folgt:

$$(10) \quad \frac{2 n_M D}{\lambda} + \frac{2 a}{\lambda} = \frac{2(D + a)}{\lambda} + \frac{2 l}{\lambda}$$

Damit folgt für n_M :

$$(11) \quad n_M = \frac{D + l}{D}$$

Durch Messung von D und l lässt sich also n_M bestimmen. Die beschriebene Methode ist allerdings nur eindeutig, solange $m < 1$. Dies ist gleichbedeutend mit $l < \lambda/2$. Gem. Gl. (11) bedeutet dies:

$$(12) \quad l = D(n_M - 1) < \frac{\lambda}{2}$$

und damit

$$(13) \quad D < \frac{\lambda}{2(n_M - 1)}$$

In diesem Versuch soll die Brechzahl von PVC, n_{PVC} , für eine Mikrowelle mit $\lambda \approx 28,5$ mm bzw. $\lambda \approx 27,5$ mm mit Hilfe von Gl. (11) bestimmt werden. Sie liegt in der Größenordnung von $n_{\text{PVC}} \approx 1,6$. Damit folgt für beide Werte von λ : $D < 23$ mm. Gearbeitet wird mit $D \approx 10$ mm.

Zur Messung von l gehen wir wie folgt vor: S und E werden auf den beiden Dreieckschienen symmetrisch zur Drehachse D in $d_0 = 500$ mm Entfernung voneinander aufgebaut. Der Empfänger wird auf einen motorgetriebenen Verschiebetisch V montiert, mit dem er längs der Achse A um 100 mm in Richtung S verschoben werden kann (Abb. 5). Der Motor wird mit einer Gleichspannung betrieben. Die Höhe der Spannung (maximal 24 V) steuert die Geschwindigkeit der Verschiebung, die Polarität ihre Richtung (vor / zurück). An beiden Enden des Verschiebetisches befinden sich Mikroschalter, die den Motor stoppen, sobald der jeweilige Anschlag erreicht ist.

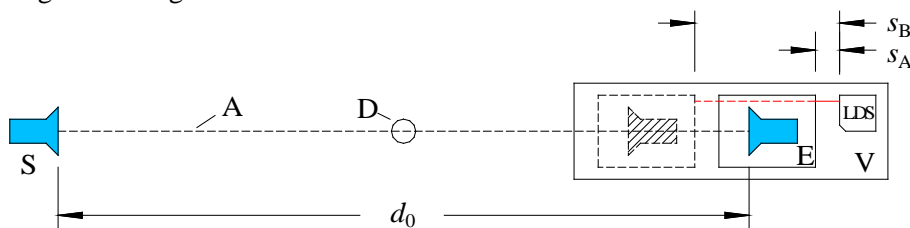


Abb. 5: Anordnung von Sender S und Empfänger E, der sich auf einem Verschiebetisch V befindet. Mit dem Tisch kann E von der rechten bis zur linken Anschlagposition vorgefahren oder von der linken bis zur rechten Anschlagposition zurückgefahren werden. s_A und s_B sind in den Anschlagpositionen die jeweiligen Abstände zwischen dem LDS und der Grundplatte, auf der E montiert ist.

An dem Verschiebetisch ist ein Laser-Distanzsensor LDS montiert, der bereits aus dem Versuch „Sensoren...“ bekannt ist. Seine Ausgangsspannung U_L ändert sich linear mit Verschiebung von E. Der Sensor wird kalibriert, indem für beide Anschlagpositionen die Abstände s_A und s_B (Definition gem. Abb. 5) und die zugehörigen Ausgangsspannungen U_{LA} und U_{LB} gemessen werden. Befindet sich E während der Verschiebung an beliebiger Position zwischen den beiden Anschlagpositionen, so gilt für den momentanen Abstand s des Empfängers von der rechten Anschlagposition:

$$(14) \quad s = \left(U_L(s) - U_{LA} \right) \frac{s_B - s_A}{U_{LB} - U_{LA}}$$

und damit für den maßgeblichen Abstand d zwischen S und E:

$$(15) \quad d = d_0 - s$$

Der Motor wird an der rechten Anschlagposition gestartet und bis zur linken Anschlagposition in Richtung S vorgefahren. Während der Verschiebung werden die Spannung U_L und die Spannung U an E mit Hilfe der Messwerterfassungskarte gemessen und gespeichert (analog zum Vorgehen wie bei den Messungen zu Kap. 2.3).

Anschließend wird die Messung mit eingebrachter PVC-Platte der Dicke D_0 (mit Messschieber messen) zwischen S und E wiederholt. Die Platte wird mittig zur Drehachse D montiert. Um zu verhindern, dass Signalreflexionen an der Platte die Messung stören, wird die Platte unter einem Winkel von $\alpha = 45^\circ$ zur Achse A ausgerichtet. Die Mikrowelle legt dann in dem PVC die Strecke

$$(16) \quad D = D_0 / \cos(\alpha)$$

zurück⁸. Danach wird der Motor an der linken Anschlagposition gestartet und zur rechten Anschlagposition zurückgefahren. Während der Verschiebung werden wiederum U_L und U aufgezeichnet und anschließend gespeichert.

Aus beiden Datensätzen werden mit Hilfe von Origin und den Gleichungen (14) und (15) zunächst die Abstände d berechnet. Anschließend wird für beide Datensätze jeweils $|U|$ über d in einem Diagramm dargestellt. Mit Hilfe des Origin-Tools „Datenkoordinaten / Data Reader“⁹ kann in beiden Kurven die Position eines ausgewählten Intensitätsmaximums und daraus deren Versatz l bestimmt werden. Aus den Werten für l und D wird schließlich die Brechzahl n_{PVC} bestimmt.

Hinweis zur Vermeidung von Störspannungen:

Für diesen Versuchsteil müssen die Ground-Leitungen (0 V) der Spannungsversorgungen für Impedanzwandler und Laser-Distanzsensor mit der Erdungsbuchse (TT) der Netzgeräte verbunden werden, um Störspannungen durch sogenannte Brummschleifen zu vermeiden.

2.5 Polarisation

In einer linear polarisierten Mikrowelle oszilliert das elektrische Feld \mathbf{E} der Welle in nur einer Raumrichtung (z.B. in y -Richtung, s. Abb. 6). Trifft eine solche Welle auf ein Drahtgitter, dessen Stäbe in gleicher Richtung angeordnet sind, werden Ströme in den Stäben induziert, die wie HERTZsche Dipolstrahler wirken. Die von diesen Dipolen abgestrahlte Welle ist gegenüber der einlaufenden Welle um 180° phasenverschoben. Hinter dem Gitter kommt es deshalb zu destruktiver Interferenz zwischen der durchgehenden Ursprungswelle und der abgestrahlten Welle. Ein hinter dem Gitter platzierter Empfänger wird also allenfalls ein sehr schwaches Signal messen.

Vor dem Gitter interferiert die von den Dipolen nach hinten abgestrahlte Welle mit der einlaufenden Welle. Steht das Gitter wie beim Versuch zur Reflexion (Kap. 2.6.2) schräg zur einfallenden Welle, so kann sich die nach hinten abgestrahlte (reflektierte) Welle ohne Interferenz mit der einfallenden Welle ausbreiten.

⁸ Näherung für eine ebene Welle.

⁹ Das grafische Symbol des Tools Datenkoordinaten / Data Reader ist .

Trifft die linear polarisierte Welle auf ein Gitter, dessen Stäbe senkrecht zur Polarisationsrichtung der Welle angeordnet sind, können wegen des geringen Durchmessers der Stäbe keine nennenswerten Ströme induziert werden. In diesem Fall tritt also keine von HERTZschen Dipolen abgestrahlte Welle auf, so dass die ursprüngliche Welle das Gitter nahezu ungestört durchdringen kann.

Zur Untersuchung der Polarisations-eigenschaften der im Versuch verwendeten Mikrowelle werden S und E im Abstand $d \approx 5 \text{ cm}$ ($\varphi = 180^\circ$) voneinander aufgebaut. Zwischen S und E wird ein Drahtgitter gehalten, dessen Stäbe einmal vertikal und einmal horizontal ausgerichtet sind. Für jede Staborientierung wird die Spannung U am Empfänger mit dem Oszilloskop gemessen.

Frage 1:

- Ist die Welle linear polarisiert? Wenn ja: in welcher Richtung?

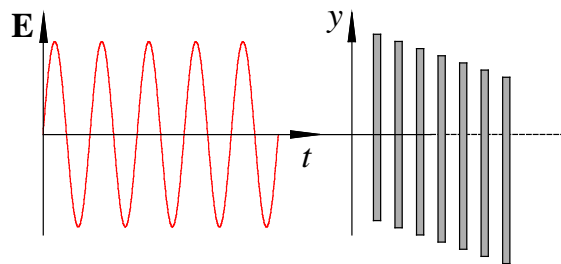


Abb. 6: Wechselwirkung einer linear polarisierten Welle E mit einem Drahtgitter, dessen dünne Stäbe in Richtung der Polarisationsrichtung der Welle orientiert sind.

2.6 Reflexion

2.6.1 Reflexion an einer Metallplatte

Zur Messung der *Reflexion* an einer Metallplatte MP (Al-Blech) werden S und E jeweils in ca. 20 cm Abstand von der Drehachse montiert und der Winkel zwischen S und E auf $\varphi = 90^\circ$ eingestellt (Abb. 7). Die Metallplatte wird so montiert, dass die Drehachse D in ihrer Oberfläche liegt. Der Winkel γ wird nun in acht Schritten von je 3° beginnend bei $\gamma = 35^\circ$ erhöht und für jeden Winkel die Spannung U am Empfänger mit dem Oszilloskop gemessen. Für U muss kein Fehler angegeben werden. Der Größtfehler für γ ergibt sich aus der eingeschränkten Genauigkeit, mit der γ eingestellt werden kann. $|U|$ wird über γ (mit Größtfehler $\Delta\gamma$) aufgetragen und mit Hilfe einer Ausgleichskurve durch die Messdaten der Winkel maximaler Reflexion bestimmt. Als Ausgleichskurve dient ein Polynom 2. Grades, das mit Hilfe von *Origin* berechnet und gezeichnet wird.¹⁰

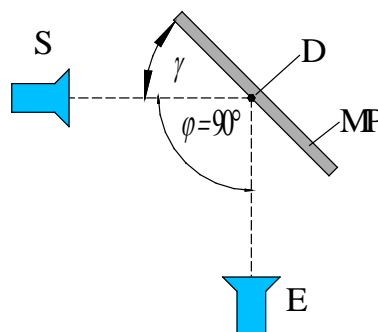


Abb. 7: Anordnung zur Messung der Reflexion an einer Metallplatte MP. S und E sind unter dem Winkel $\varphi = 90^\circ$ angeordnet, der Winkel γ wird variiert.

Frage 2:

- Gilt das Reflexionsgesetz?

¹⁰ Polynomfit mit *Origin*: → Analyse → Anpassen → Polynomieller Fit... (englische Version: → Analysis → Fitting → Fit Polynomial ...).

2.6.2 Reflexion an einem Drahtgitter

Die gleiche Messung wie unter 2.6.1 wird mit einem Drahtgitter wiederholt, dessen Stäbe senkrecht orientiert sind. Die Messdaten $|U(\gamma)|$ werden mit in das unter Kap. 2.6.1 erstellte Diagramm eingetragen. Zur Interpretation der Messergebnisse wird auf die Anmerkungen zur Polarisation im Kap. 2.5 verwiesen.

3. Anhang

Struktur vom MATLAB-m-File *Datenerfassung_2017b*, die **zusätzlichen Befehle zur Einbindung und Auslesens des zweiten Kanals**, sowie zum **Speichern und zur grafischen Darstellung der Daten** sind in **gelb** markiert¹¹:

```
clear
close('all','hidden')
s = daq.createSession('ni'); % Erzeugung eines AnalogInput (AI) Objekts
CH0 = input('Eingang für U_w - AI: '); % Abfrage des Eingangskanals für
Spannung U_w des Winkelsensors
CH1 = input('Eingang für U - AI: '); % Abfrage des Eingangskanals für
Spannung U des Empfängers
addAnalogInputChannel(s,'myDAQ1',CH0,'Voltage'); % Eingangskanal des DAQ-
Gerätes mit AI verbinden
addAnalogInputChannel(s,'myDAQ1',CH1,'Voltage'); % Eingangskanal des DAQ-
Gerätes mit AI verbinden
s.Rate = input('Abtastrate R in Hz: '); % Abfrage der Abtastrate
(Abtastfrequenz)
s.NumberOfScans = input('Anzahl der Abtastpunkte: '); % Abfrage der Anzahl
der Abtastpunkte (Messwerte)
startForeground(s); % Start der Messung
[U,t]=s.startForeground; % Messwerte werden eingelesen
Daten(:,1)=U(:,1); % Datenspeicherung in der (N,2) Matrix 'Daten'
Daten(:,2)=U(:,2);
Name = input('Dateiname mit der Endung .dat: ', 's'); % Abfrage zur
Benennung der Matrix
save(Name,'Daten','-ascii'); % Speicherung der Matrix
plot(U(:,1),U(:,2)); % Messwerte werden geplottet
xlabel('\it t\rm / s','FontName','times','FontSize',16) % Schrifttyp
(FontName, times) und Schriftgröße
ylabel('\it U\rm / V','FontName','times','FontSize',16) % (FontSize, 16 pt),
\it für kursiv und \rm für normal
delete(s);
clear s;
```

¹¹ Kommentare für jede Befehlszeile erscheinen nach dem „%“ Zeichen in grün und haben keine weitere Funktion, sollen aber dem Nutzer zur besseren Übersicht über die Struktur des Programms dienen.