

400 - Mikrowellen

1. Aufgaben

- 1.1 Überzeugen Sie sich qualitativ von der Richtstrahlcharakteristik des Hornstrahlers. Messen Sie die Abhängigkeit der empfangenen Mikrowellenleistung vom Abstand zum Sender [Entfernungscharakteristik $I(x)$] des Mikrowellensenders. Kommentieren Sie diese Abhängigkeit!
- 1.2 Prüfen Sie qualitativ folgende Strahleigenschaften von elektromagnetischen Wellen:
 - Reflexion an Metall- und Kunststoffplatten
 - Brechung am gleichseitigen Kunststoffprisma
 - Totalreflexion am 90° Prisma
 - Mikrowellenabsorption von trockenem und angefeuchtetem Papier!
- 1.3 Es ist der Polarisationszustand des Mikrowellenfeldes zu bestimmen.
- 1.4 Ermitteln Sie die Wellenlänge mit einem Michelson-Interferometer!
- 1.5 Bestimmen Sie die Brechzahl von Paraffin!
- 1.6 Messen Sie die Mikrowellentransmission beim Fabry-Perot-Interferometer!
- 1.7 Untersuchen Sie den Tunneleffekt an zwei, durch einen Luftspalt variabler Dicke voneinander getrennter Prismen!
- 1.8 Für interessierte Studenten - und wenn es die Zeit erlaubt - sind mit dem vorhandenen Versuchsaufbau noch weitere Experimente möglich:
 - Wellenlängenbestimmung durch stehende Wellen
 - Beugung an Spalt und Doppelspalt
 - Messung der Brennweite einer Zonenplatte.

2. Grundlagen

Stichworte:

Elektromagnetisches Spektrum, Eigenschaften elektromagnetischer Wellen, Brechung, Totalreflexion, Tunneleffekt, Interferenz, Michelson-Interferometer, Fabry-Perot-Interferometer, Mikrowellenerzeugung mit Reflex-Klystron, Zonenplatte

2.1 Das elektromagnetische Spektrum

Elektromagnetische Wellen sind sich ausbreitende Schwingungen des elektromagnetischen Feldes. Hierbei stehen elektrisches und magnetisches Feld bei linear polarisierten Wellen senkrecht und in einem festen Größenverhältnis aufeinander. Im freien Raum handelt es sich um Transversalwellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen umfasst einen Frequenzbereich von ca. 20 Größenordnungen (vgl. Tab.1). Entsprechend unterschiedlich sind Wirkung, Anwendung und Erzeugung in den einzelnen Spektralbereichen.

Im vorliegenden Versuch sollen am Beispiel der Mikrowellen die allgemeinen physikalischen Eigenschaften elektromagnetischer Wellen wie Polarisation, Reflexion und Brechung sowie Beugung und Interferenz untersucht werden. Der Vorteil beim Arbeiten mit Mikrowellen besteht darin, dass die zu benutzenden Experimentieranordnungen (deren relevante Abmessungen in der Größenordnung der Wellenlänge liegen) gut zu handhaben sind und dass die physikalischen Vorgänge somit sehr anschaulich verfolgt werden können.

Tab.1: charakteristische Spektralbereiche des elektromagnetischen Spektrums.

Spektralbereich	Frequenzbereich Hz	Wellenlänge in Luft	Strahlungsquellen
Radiowellen	$10^5 \dots 10^9$	km (LW), m (UKW)	elektr. Schwingkreis + Hertzscher Dipol
Mikrowellen	$10^{10} \dots 10^{12}$	cm, mm	Magnetron, Klystron
Licht	$10^{13} \dots 10^{16}$	μm (IR), nm (VIS, UV)	atomare Dipolschwingungen
Röntgenstrahlen	$10^{17} \dots 10^{21}$	pm	hochenergetische Elektronen
Gammastrahlen	$10^{20} \dots 10^{24}$	fm	radioaktiver Zerfall

2.2 Mikrowellensender und -empfänger

Der Mikrowellensender ist mit einem **Reflex-Klystron** als Schwingungserzeuger ausgerüstet. Der Sender strahlt die Wellen zur Bündelung über einen Hornstrahler mit rechteckigem Querschnitt ab. Die Schwingungsrichtung des elektrischen Vektors der polarisierten Mikrowelle liegt vertikal..

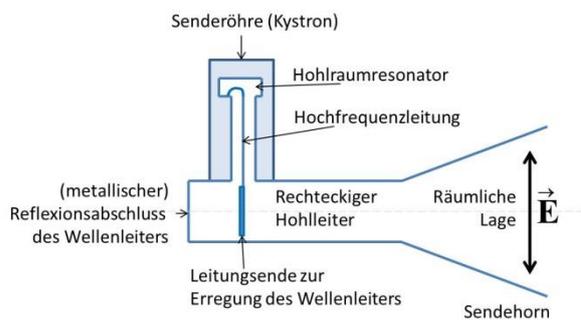
Zur Funktion des Reflex-Klystrons:

Bild 1 zeigt das Prinzip des Reflexklystrons. Die aus der Kathode K austretenden Elektronen werden durch ein zwischen der Kathode und dem toroidförmigen Hohlraumresonator H liegendes elektrisches Feld beschleunigt. An den Gittern des Resonators H denken wir uns eine hochfrequente Spannung, die von einem sich bereits im Resonator befindenden elektrischen Feld herrührt. Dieses Feld beschleunigt oder verzögert die ankommenden Elektronen zusätzlich. Die Elektronen fliegen dann auf einen gegenüber der Kathode negativen Reflektor R zu, so dass sie gebremst und zur Umkehr gezwungen werden. Die durch das Hochfrequenzfeld des Resonators H zusätzlich beschleunigten Elektronen laufen tiefer in das Reflektorfeld hinein und legen dabei einen längeren Weg zurück als die durch das Hochfrequenzfeld verzö-

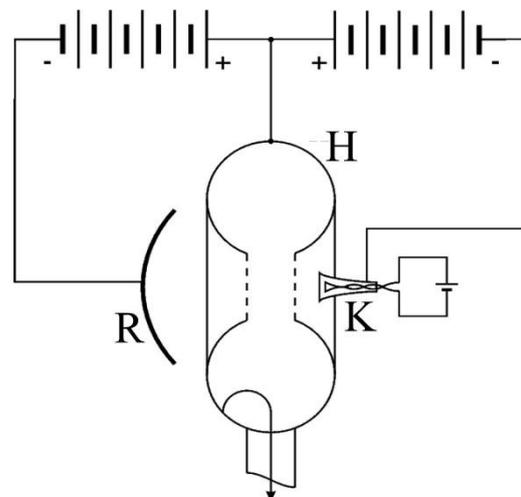
gerten. Die verlangsamteten Elektronen können auf diese Weise gleichzeitig mit den beschleunigten in den Hohlraumresonator zurückkehren, so dass gewissermaßen stoßweise Elektronenpakete zurückkommen. Ist die Laufzeit der Elektronen durch geeignete Einstellung der Reflektorspannung so abgestimmt, dass die Elektronenpakete dann am Hohlraumresonator H antreffen, wenn sie durch das dort vorhandene elektrische Wechselfeld abgebremst werden, geben sie ihre Energie an das Feld ab. Die Verstärkung des Feldes in H wird bis zur Selbsterregung getrieben (vgl. Selbsterregung durch rückgekoppelte Verstärker). Die im Resonator erzeugte Hochfrequenzenergie wird über eine Schleife ausgekoppelt und über einen Hohlleiter einem Hornstrahler als Antenne zugeführt.



(a) Mikrowellennetzgerät und Sendehorn



(b) Prinzipskizze



(c) Reflexklystron

Bild 1: Aufbau eines Mikrowellensenders mit Reflexklystron.

Mikrowellenempfänger

Zum Empfang der Mikrowellen stehen wahlweise der Mikrowellen-Empfangsdipol und der Mikrowellen-Richtempfänger zur Verfügung. Beide verwenden als Empfangsantenne eine Siliziumdiode. An dieser wird die von den Mikrowellen erzeugte Spannung direkt oder über einen Verstärker gemessen. Zum Anschluss sind die Empfänger mit einer BNC-Buchse bestückt.

Mit Hilfe des Empfangsdipols können Wellenfelder annähernd punktförmig ausgemessen werden, während der Richtempfänger die Strahlung über einen größeren Winkelbereich erfasst und somit gegenüber dem Dipol bei gleichem Senderabstand eine höhere Spannung liefert.

Übrigens: Im Mikrowellenherd werden die Mikrowellen in einer Magnetfeldröhre (Magnetron, siehe Internet) erzeugt.

3. Versuchsdurchführung

- 3.1 Für die entfernungsabhängige Messung wird der Empfänger einfach mit der Hand schrittweise (Abstand typisch 3...5 cm) verschoben. In dem Entfernungsbereich 25cm – bis 35cm ist alle 0,5 cm ein Datenpunkt aufzunehmen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist auf Feinheiten wie z.B. das Auftreten von stehenden Wellen zu achten. Bei der Auswertung ist die richtige funktionelle Abhängigkeit mit einem Fit und Angabe der Funktionsgleichung zu belegen! Für die winkelabhängige Messung der Strahlungsintensität wird das Empfangshorn seitwärts zur Ausbreitungsachse (Winkelmessung) verschoben.
- 3.2 Reflexion und Brechung werden überprüft und in Form einfacher Skizzen protokolliert. Zur Untersuchung der Wasserabsorption wird die Transmission beim Durchgang durch trockenes und angefeuchtetes Papier (jeweils mehrere Blatt) gemessen.
- 3.3 Zur Untersuchung des Polarisationszustandes benutzen Sie einen Drahtpolarisator. Diskutieren Sie die Ergebnisse auf der Grundlage der Theorie des Hertzschen Dipols und bedenken Sie, dass Absorption nur dann auftritt, wenn die Feldstärkeoszillationen (elektrisches Feld) in den Drähten Ladungsverschiebungen hervorrufen. Diese Messung veranschaulicht den Effekt des **Dichroismus!**
- 3.4 Der Aufbau des **Michelson-Interferometers** ist in Bild 2 skizziert. Dabei sind A und B Metallspiegel (B auf Kreuzschlitten montiert), H ist eine Kunststoffplatte, die für Mikrowellen teildurchlässig ist. Die vom Sendehorn SH ausgehende Strahlung wird zum Teil von H reflektiert (Bündel 1) und z.T. hindurch gelassen (Bündel 2). Bündel 1 trifft auf den Spiegel A, wird wieder nach H reflektiert und dort teils reflektiert und teils als Bündel 1' zum Empfangshorn EH weiter gelassen. Bündel 2 trifft auf B, wird nach H reflektiert und dort teils durchgelassen und teils als Bündel 2' nach EH reflektiert. Mit dem verstellbaren Spiegel B lässt sich die Weglänge des Bündels $2+2'$ ändern. Die Bündel 1' und 2' kommen zur Interferenz, und man misst (je nach Stellung von B) an EH Verstärkung bzw. Auslöschung. Da sowohl 1' als auch 2' je einmal an H reflektiert werden und einmal durch H hindurchgehen, fällt das Verhältnis von Reflexionsvermögen und Durchlässigkeit des Halbspiegels nicht ins Gewicht. Die ankommenden Amplituden von 1' und 2' sind bei guter Justierung ziemlich gleich, und das Interferometer liefert scharfe Minima von fast völliger Auslöschung. Der Abstand zweier benachbarter Minima ist gleich einer halben Wellenlänge. Messen Sie möglichst viele Minima aus und mitteln Sie in geeigneter Weise.

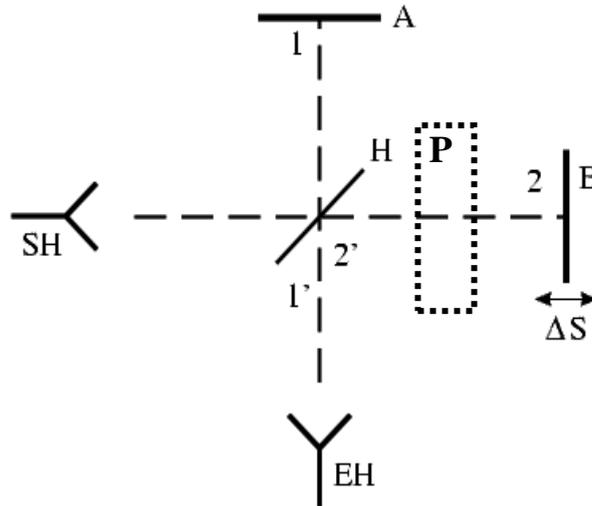
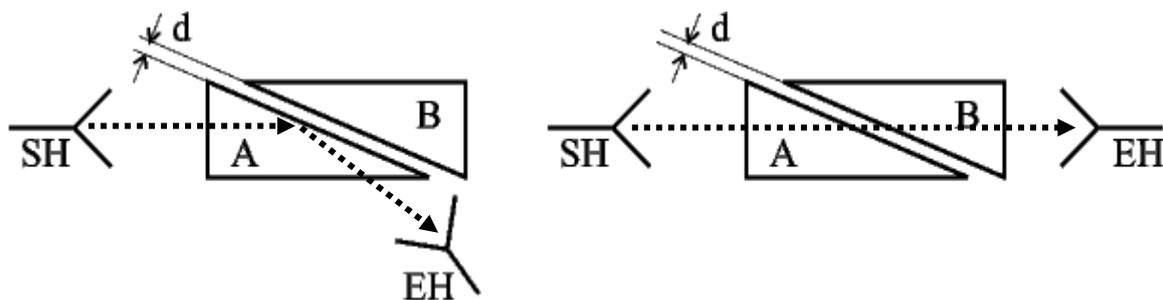


Bild 2: Michelson-Interferometer, H Strahlteiler, A und B Spiegel, P Paraffinblock (bei 3.5).

- 3.5 Zur Bestimmung der Brechzahl mit Hilfe des Michelson-Interferometers (gleicher Aufbau; Bild 2) wird eine planparallele Paraffinprobe der Dicke d in den Strahlengang zwischen H und B gebracht, nachdem das Interferometer auf ein Transmissionsminimum eingestellt wurde. Infolge der um $2d \cdot (n - 1)$ vergrößerten optischen Weglänge wird diese Minimalstellung durch das Paraffin verstimmt. Für eine erneute Abstimmung auf das Transmissionsminimum muss der Abstand HB um $2 \cdot \Delta s = 2d \cdot (n - 1)$ verkleinert(!) werden. Ist die Probendicke d so gewählt, dass $2d \cdot (n - 1) \leq \lambda$ ist, so ergibt sich die Brechzahl aus $d \cdot (n - 1) = \Delta s$. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Tabellenwert für Paraffin (siehe Internet)!
- 3.6 Zwei ebene, parallele und teildurchlässige Platten im Mikrowellenstrahlengang wirken wie ein ebenes **Fabry-Perot-Interferometer**. Dessen Transmission wird maximal, sobald sich stehende Wellen zwischen den Platten ausbilden können. Das ist der Fall, wenn der Plattenabstand D ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge ist. Misst man die Transmission in Abhängigkeit vom Plattenabstand, so kann daraus die Wellenlänge bestimmt werden.
- 3.7 Zur Untersuchung des optischen Tunneleffekts setzen Sie gemäß Bild 3 zwei durch einen parallelen Luftspalt getrennte Kunststoffprismen in den Strahlengang. Messen Sie bei unterschiedlicher Spaltbreite d ($0 \dots 30$ mm, Spalt muss parallel sein) die durchgelassene und die totalreflektierte Strahlungsleistung. Vor Beginn der Messung ist eine saubere Justierung erforderlich, so dass (insbesondere bei Totalreflexion) möglichst die gesamte Strahlungsintensität auch tatsächlich im Empfänger registriert wird. Es wird der Anteil der durchgelassenen Strahlung (EH hinter dem Prisma) sowie der totalreflektierten Strahlung (EH seitlich) für unterschiedliche Abstände d zwischen den beiden Prismen gemessen und bei der Auswertung gegenübergestellt. Stehen zwei identische Empfänger zur Verfügung, so können Sie natürlich simultan messen. Ziel dieses Experimentes ist es zu zeigen, dass ein Teil der Strahlung trotz Luftspalt von Prisma A nach Prisma B gelangt, wenn der Abstand deutlich kleiner ist als eine halbe Wellenlänge. Erklären Sie diesen Effekt!
- 3.8 Führen Sie diese Aufgaben (Wellenlängenbestimmung durch stehende Wellen, Beugung an Spalt und Doppelspalt, Messung der Brennweite einer Zonenplatte, ...) nach Rücksprache mit dem Betreuerassistenten durch!



SH... Senderhorn; EH... Empfangshorn; A, B... Kunststoffprismen

Bild 3: Versuchsanordnung zur Totalreflexion, links: Reflexion, rechts: Transmission

Literatur:

Siehe:

http://www.uni-jena.de/Literatur_p_131600.html