

## Versuch D 16: Mikrowellen

**1. Literatur:** Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. II: Elektrizität u. Magnetismus  
 Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik  
 Pohl, Bd. 2 u. 3: Elektrizitätslehre, Optik u. Atomphysik

**Stichworte:** elektromagn. Wellen: Wellenlängen u. Frequenzen, Phase, Phasengeschwindigkeit, Transversalwellen, Polarisation, Intensität; geometr. Optik: Brechung, Reflexion; elektr. Polarisierbarkeit, Absorption; Interferenz von Wellen: Kohärenz, stehende Wellen; Erzeugung u. Nachweis von Mikrowellen

### 2. Grundlagen

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen wie Radiowellen, Licht oder Röntgenstrahlen. Ihr Frequenzbereich  $\nu$  reicht etwa von  $10^9$  Hz bis  $10^{12}$  Hz, ihr Wellenlängenbereich  $\lambda$  von einigen Dezimetern bis unterhalb 1 mm, entsprechend  $c = \nu \lambda$  ( $c$  = Lichtgeschwindigkeit). Das Spektrum der Mikrowellen grenzt an der langwelligen Seite an den UHF-Bereich der Radio- bzw. Fernsehwellen, auf der kurzwelligen Seite an den Bereich des infraroten Lichts.

Mikrowellen breiten sich wie die kurzwelligen Radiowellen geradlinig in Luft aus und haben eine mit ihnen vergleichbare Reichweite. Sie lassen sich wegen ihrer geringen Wellenlänge leicht zu einem relativ scharfen Strahl bündeln und werden insbesondere von elektrischen Leitern, wie Metallen, stark reflektiert. Eine Nutzanwendung dieser Eigenschaften der Mikrowelle ist der Radar zur Navigation bzw. Ortung von Objekten.

Eine weitere Nutzanwendung der Mikrowelle ist der heutzutage im Haushalt verbreitete Mikrowellenherd. Die hierfür erforderlichen Mikrowellen großer Feldstärke werden mit speziellen Elektronenröhren (Klystrons, Magnetrons) erzeugt und können in Raumbereichen geringer Abmaße - vergleichbar mit der Wellenlänge - konzentriert werden (Resonatoren, Hohlleiter). Die effiziente Heizwirkung der Mikrowelle beruht auf ihrer Absorption im Volumen eines elektrisch polarisierbaren, jedoch schlecht leitfähigen Stoffes, speziell in Wasser oder Eiweiß bzw. eiweißhaltigem Gewebe.

Mikrowellen verhalten sich hinsichtlich ihrer Ausbreitung im Vakuum oder in Materie ähnlich wie sichtbares Licht. Es lassen sich mit ihnen eine Reihe von optischen Versuchen wie z.B. zur Reflexion und Brechung wie mit Licht

durchführen. Aufgrund der im Vergleich zum Licht viel größeren Wellenlänge der Mikrowellen sind jedoch Beugungs- und Interferenzerscheinungen makroskopisch, d.h. auf Distanzen ihrer Wellenlänge beobachtbar. Mikrowellen sind daher geeignet, diese Welleneigenschaften elektromagnetischer Strahlung im Laborexperiment zu untersuchen.

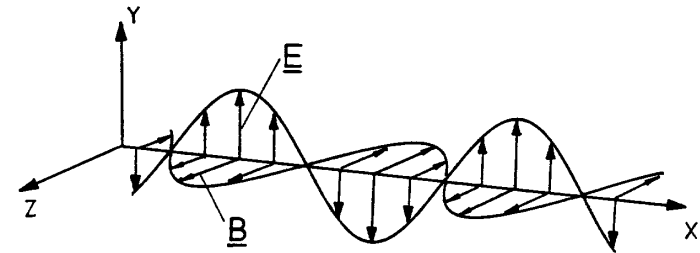
### 2.1 Elektromagnetische Wellen

#### 2.1.1 Grundbegriffe

Eine elektromagnetische Welle wird von elektrischen und magnetischen Feldern gebildet, die zeitlich oszillierend sich im Raume ausbreiten. Diese Felder sind nicht unabhängig voneinander. Ihr Zusammenhang wird durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben (J.C. Maxwell, 1831-79), welche besagen, dass ein sich zeitlich änderndes elektrisches Feld ein magnetisches Wirbelfeld und umgekehrt ein sich zeitlich änderndes magnetisches Feld ein elektrisches Wirbelfeld erzeugt.

Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen, d.h. die Vektoren der elektr. Feldstärke  $\underline{E}$  und magnetischen Induktion  $\underline{B}$  stehen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.  $\underline{E}$  und  $\underline{B}$  stehen außerdem noch senkrecht zueinander. Breitet sich eine elektromagn. Welle nur in einer Richtung, z.B. der x-Richtung aus, zeigen die  $\underline{E}$ - bzw.  $\underline{B}$ -Vektoren parallel zur yz-Ebene, z.B. in die y- bzw. z-Richtung. Eine solche ebene Welle lässt sich darstellen als:

$$\begin{aligned} \underline{E} &= \underline{E}_0 \sin(kx - \omega t) , & \underline{E}_0 &= (0, E_0, 0) \\ \underline{B} &= \underline{B}_0 \sin(kx - \omega t) , & \underline{B}_0 &= (0, 0, B_0) \end{aligned} \tag{1}$$



**Abb.1:** Momentbild der elektr. Feldstärke  $\underline{E}$  und magnetischen Induktion  $\underline{B}$  einer ebenen elektromagnetischen Welle, die sich in x-Richtung ausbreitet.

Ein Momentbild dieser Welle zeigt Abb.1. Die Größen  $E_0$  und  $B_0$  in Gln. (1) sind die *Amplituden* der Welle,  $k = 2\pi/\lambda$  ist die *Wellenzahl\** und  $\omega = 2\pi\nu$  die *Kreisfrequenz*.

Zeigen die Vektoren  $\underline{E}$  und  $\underline{B}$ , wie im obigen Beispiel, in feste Raumrichtungen, ist die Welle linear polarisiert. Die Richtung des E-Vektors gibt die Polarisationsrichtung an. Verschieden linear polarisierte Wellen können sich zu elliptisch, zirkular oder nicht polarisierten Wellen überlagern.

Das Argument der Sinusfunktionen in Gl.(1)  $\varphi = kx - \omega t$  nennt man *Phase* der Welle. Sie bestimmt die relativen Größen  $E/E_0$  und  $B/B_0$  am Ort  $x$  zur Zeit  $t$ . Wie Gln.(1) und Abb.(1) zeigen, sind  $\underline{E}$  und  $\underline{B}$  der ebenen, fortschreitenden Welle in Phase, sie sind an einem Ort zu gleicher Zeit maximal oder minimal. Die Punkte konstanter Phase bewegen sich in der Zeit  $\Delta t$  um die Strecke  $\Delta x$ :

$$\varphi = kx - \omega t = k(x + \Delta x) - \omega(t + \Delta t) \quad (2)$$

also mit der *Phasengeschwindigkeit*

$$v_{ph} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Big|_{\varphi = \text{const.}} = \frac{\omega}{k} = v\lambda \quad (3)$$

Aus den Maxwell'schen Gleichungen folgt mit Gln. (1):

$$v_{ph} = \frac{E_0}{B_0} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (4)$$

$\epsilon$  und  $\mu$  sind die *Dielektrizitäts-* bzw. *Permeabilitätskonstante* des Stoffes, in dem sich die Welle ausbreitet,  $\epsilon_0$  und  $\mu_0$  die *Influenz-* bzw. *Induktionskonstante*. Im Vakuum ( $\epsilon = \mu = 1$ ) ist die Phasengeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle gleich der Lichtgeschwindigkeit  $c$ . In Materie ist die Phasengeschwindigkeit (und die Wellenlänge, s. Gl.(3)), um den Faktor  $1/\sqrt{\epsilon \mu}$  geändert. I. a. sind  $v_{ph}$  und  $\lambda$  in Materie kleiner als die entsprechenden Größen im Vakuum.

\*) Der Vektor  $\underline{k} = (k_x, k_y, k_z)$  vom Betrag der Wellenzahl wird *Wellenvektor* genannt. Er gibt zugleich die Ausbreitungsrichtung einer beliebigen Welle im Raume an:  $\underline{E}(\underline{r}) = \underline{E}_0(\underline{r}) \sin(\underline{k} \underline{r} - \omega t)$ ; Im obigen Beispiel ist  $\underline{k} = (k, 0, 0)$ ;  $\underline{k} \underline{r} = kx$ .

Die *Intensität*  $I$  einer elektromagn. Welle entspricht ihrer mittleren Strahlungsleistung pro Flächeneinheit bzw. dem Mittelwert ihrer Energiestromdichte  $S$ . Für eine ebene elektromagn. Welle ist

$$S = \underline{E} \times \underline{H} \quad (5)$$

( $H$  = magn. Feldstärke). Mit Gl. (4) folgt nach zeitl. Mittelung von  $S$ :

$$I = \overline{S} = \overline{\underline{E} \times \underline{H}} \sim \overline{E^2} \sim E_0^2 \quad (6)$$

d.h. die Intensität der Welle ist proportional zum Amplitudenquadrat der elektr. oder magn. Feldstärke bzw. Induktion.

### 2.1.2 Wellenausbreitung in Materie

Trifft eine elektromagn. Welle auf einen Festkörper, wird ein Teil ihrer Intensität an seiner Oberfläche reflektiert, der andere dringt, i.a. unter Brechung, in ihn ein. Die Intensität dieser Welle wird wiederum durch Absorption und Streuung vermindert. Der verbleibende Rest wird z.T. an der rückseitigen Oberfläche reflektiert, z.T. tritt er, i.a. wieder unter Brechung, aus dem Körper aus.

Die Ausbreitung der Welle im Volumen des Stoffes ist von seinem *Brechungsindex*  $n$  und seiner *Absorptionskonstanten*  $K$  abhängig. (Die Steuerung sei hier nicht betrachtet). Die Reflexion hängt darüber hinaus von der Beschaffenheit der Oberfläche und vom Einfallswinkel (sowie der Polarisation) der Welle ab (s. z.B. Totalreflexion). Allgemein gilt: Eine elektromagn. Welle wird an den Stellen bzw. in dem Maße reflektiert, wo bzw. wie stark sich  $n$  und  $K$  ändern. Die Größe der Konstanten  $n$  und  $K$  ist von der Wechselwirkung des elektromagn. Feldes mit der Materie abhängig. Ihre exakte theoretische Beschreibung ist z.T. recht schwierig. Im folgenden hierzu nur einige wesentliche Gesichtspunkte:

Der Brechungsindex  $n$  (s. Brechungsgesetz von Snellius) gibt das Verhältnis der Phasengeschwindigkeiten bzw. Wellenlängen der Welle im Vakuum zu den entsprechenden Größen im Stoff an. Mit Gln. (3), (4) und  $\mu \approx 1$  für nicht ferromagnetische Stoffe ist:

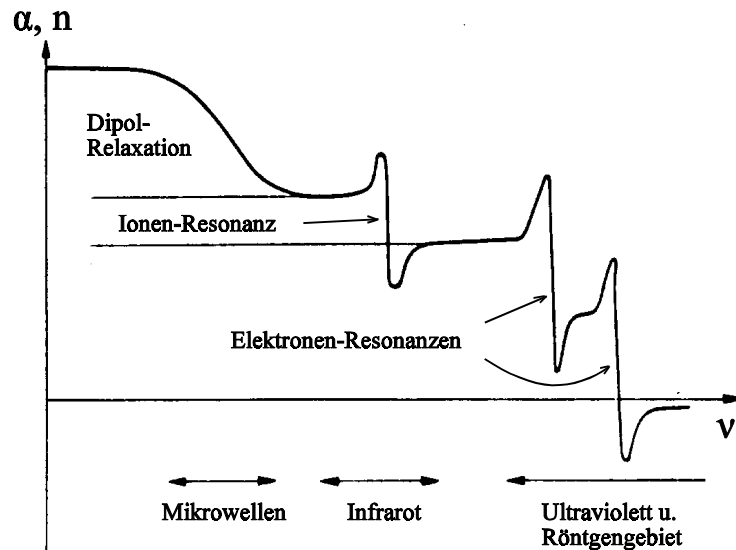
$$n = \frac{c}{v_{ph}} = \frac{\lambda}{\lambda_n} = \sqrt{\epsilon} \quad (7)$$

Die Absorptionskonstante  $K$  beschreibt die Schwächung der Intensität einer elektromagn. Welle, wenn sie einen Stoff mit der Dicke  $x$  durchdringt.

$$I(x) = I_0 \exp(-Kx) \quad (8)$$

Hierbei ist  $I_0$  die Intensität der Welle vor,  $I(x)$  die nach Durchlaufen des Stoffes.

Sowohl Brechung als auch Absorption sind von der Frequenz der elektromagn. Welle abhängig:  $n = n(\omega)$  bzw.  $\epsilon = \epsilon(\omega)$  und  $K = K(\omega)$ . Die Frequenzabhängigkeit der Brechung nennt man *Dispersion* (s. z.B. die spektrale Zerlegung des sichtbaren Lichts durch ein Prisma, Versuch D 5). Dispersion und Absorption sind nicht unabhängig voneinander. Sie werden von der frequenzabhängigen *elektrischen Polarisierbarkeit*  $\alpha$  der Moleküle oder Atome eines Stoffes im Feld der Welle bestimmt. Den typischen Frequenzgang von  $\alpha$  oder  $n$  eines nichtmetallischen Festkörpers zeigt Abb. 2 schematisch.



**Abb.2:** Elektr. Polarisierbarkeit bzw. Brechungsindex als Funktion der Frequenz für einen nichtmetallischen Festkörper (schematisch)

Mit steigender Frequenz nehmen  $\alpha$  und  $n$  von ihren statischen Werten zunächst stetig ab, da sich permanente oder induzierte elektrische Dipole im Wechselfeld

der Welle nicht mehr schnell genug ausrichten können. Diese für einen Festkörper i.a. im Mikrowellenbereich liegende sog. Dipolrelaxation hat zugleich eine erhöhte Absorption der Welle zur Folge. Hierbei wird Feldenergie in Wärme umgewandelt.

Bei größeren Frequenzen (IR- bis UV-Bereich) zeigen  $\alpha$  bzw.  $n$  neben ihrer Abnahme mit der Frequenz zusätzlich ausgeprägte Maxima und Minima, die von Resonanzen der Ionenrümpfe oder gebundener Elektronen des Festkörpers mit der elektromagn. Welle herrühren. Auch in der Nähe dieser Resonanzen tritt erhöhte Absorption auf.

Für sehr hochfrequente elektromagn. Wellen, wie die Röntgenstrahlen, ist die elektr. Polarisierbarkeit der Materie sehr gering, der Brechungsindex ist nahezu 1. (Zur Absorption von Röntgenstrahlen s. Versuch B 10: Röntgenstrahlen).

In Metallen können sich elektromagn. Wellen i.a. nicht ausbreiten. Dies liegt an der großen Zahl ihrer quasi frei beweglichen Elektronen, welche das elektromagn. Wechselfeld zu stark dämpfen. Metalle absorbieren daher elektromagn. Wellen nur in einer dünnen Oberflächenschicht, der größte Teil wird reflektiert. Oberhalb einer charakteristischen Frequenz im UV-Bereich, der sog. *Plasmafrequenz*  $\omega_p$ , werden jedoch auch Metalle für elektromagn. Strahlung durchlässig, da die Leitungselektronen infolge ihrer Masse dem elektr. Wechselfeld nicht beliebig schnell folgen können.

### 2.1.3 Interferenz

Wenn zwei oder mehrere elektromagnetische Wellen sich durch Brechung, Reflexion oder Beugung überlagern, können sie interferieren, d.h. ihre Felder können sich so überlagern, dass sie sich verstärken, schwächen oder sogar aufheben. Notwendig für die Fähigkeit zur Interferenz von Wellen ist ihre *Kohärenz*. Zwei Wellen sind kohärent zueinander, wenn ihre Felder die gleiche Zeitabhängigkeit besitzen; sie können jedoch eine feste Phasendifferenz haben.

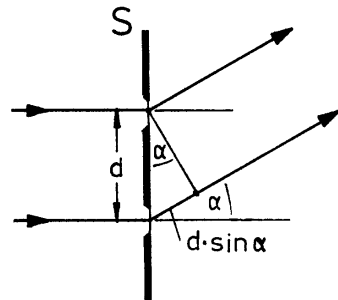
Für den einfachen Fall zweier ebener Wellen gleicher Amplitude und Polarisation, die sich wie in Gl.(1) angegeben ausbreiten aber einen Phasenunterschied  $\Delta\varphi$  haben, folgt z.B. für das elektrische Feld  $\underline{E}_r$  der aus der Überlagerung resultierenden Welle

$$\begin{aligned} \underline{E}_r &= \underline{E}_0 \sin(kx - \omega t) + \underline{E}_0 \sin(kx - \omega t + \Delta\varphi) \\ \underline{E}_r &= 2\underline{E}_0 \sin(kx - \omega t + \frac{\Delta\varphi}{2}) \cos(\frac{\Delta\varphi}{2}) \end{aligned} \quad (9)$$

Je nach Größe der Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  ist der Interferenzterm  $\cos(\Delta\varphi/2)$  in Gl.(9) maximal ( $\Delta\varphi = 2\pi n$ ) oder verschwindet ( $\Delta\varphi = (2n - 1)\pi$ ); die resultierende Welle wird verstärkt oder ausgelöscht. Der Phasenunterschied entspricht einer relativen Verschiebung (Gangunterschied) der Teilwellen um die Strecke  $\Delta x = \Delta\varphi\lambda/2\pi$ , d.h. ein Gangunterschied  $\Delta x = n\lambda$  ergibt Verstärkung,  $\Delta x = (2n - 1)\lambda/2$  Auslöschung.

**Doppelspalt:**

Trifft z.B. eine ebene elektromagn. Welle auf einen Metallschirm mit zwei schmalen senkrecht gerichteten Spalten, breiten sich aufgrund der Beugung hinter ihnen die auslaufenden Teilwellen auch seitlich zur Richtung der einlaufenden Welle aus (s. Huygensches Prinzip). Diese Teilwellen interferieren miteinander (s. dazu Abb.3). Für Licht ist die Spaltbreite praktisch immer größer als dessen Wellenlänge, so dass Interferenz schon innerhalb eines Spaltes auftritt und sich im Beugungsbild der Interferenz zwischen den Spalten überlagert. Bei Mikrowellen, etwa im cm-Bereich, kann die Spaltbreite bequem so gewählt werden, dass nur Interferenz zwischen den Teilwellen der Spalte auftritt.



**Abb.3:**

Interferenz am Doppelspalt S mit Spaltabstand d:

Verstärkung falls:  
 $d \sin\alpha = n \lambda,$

Auslöschung falls:  
 $d \sin\alpha = (2n - 1) \lambda/2$

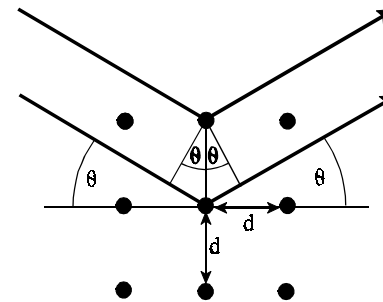
**Bragg-Reflexion:**

Eine vertikal polarisierte Mikrowelle ( $\underline{E}$  senkrecht) trifft auf eine Reihe von Metallstäben, die ebenfalls vertikal im Nachbarabstand d so angeordnet sind, dass sie ein quadratisches Gitter bilden (s. Abb.4). Infolge der Reflexion der Mikrowelle bildet jeder Stab das Zentrum einer sich kreisförmig ausbreitenden Welle. Die unter dem (auf die Richtung der einfallenden Welle bezogenen) Winkel  $2\theta$  reflektierten Teilwellen interferieren konstruktiv, d.h. verstärken sich, wenn der Weglängenunterschied der Wellen benachbarter Stäbe ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$  ist:

$$2 d \sin\theta = n \lambda, \quad n = 1,2,3,\dots \quad \text{Braggsche Gleichung} \quad (10)$$

Die Schärfe der unter den verschiedenen Winkeln auftretenden Intensitätsmaxima sowie das Auftreten weiterer Nebenmaxima hängt von der Anzahl der Metallstäbe ab (vergl. Versuch D7: Beugung am Gitter; Auflösungsvermögen bei der Beugung an optischen Gittern sowie Beugung am Mehrfachspalt, Abb.4).

Die Bragg-Reflexion wird vor allem bei Röntgenstrahlen (mit viel kleinerer Wellenlänge) beobachtet, wenn sie an (vielen) Atomen von Kristallgittern (mit viel kleinerem Atomabstand) "gebeugt" unter scharfen *Glanzwinkeln*  $\theta$  zur konstruktiven Interferenz gelangen. Aus der Lage der Beugungsreflexe lässt sich Kristallstruktur und Gitterabstand der Atome bestimmen (s. Versuch B10: Versuch mit Röntgenstrahlen).



**Abb.4:**

Bragg-Reflexion am quadratischen Gitter von Metallstäben mit Abstand d:

Konstruktive Interferenz falls:  
 $2 d \sin\theta = n \lambda$

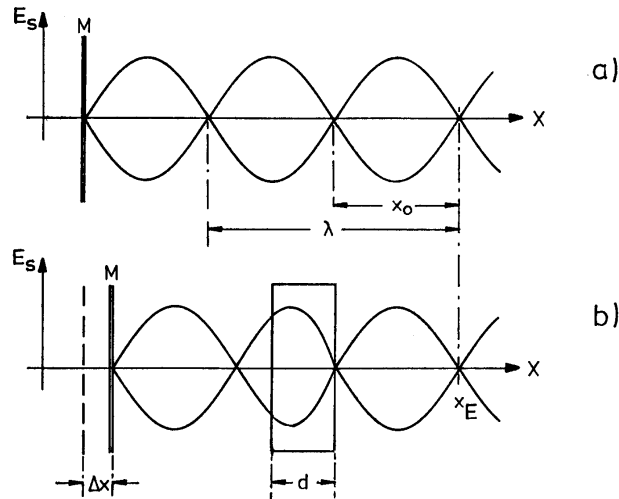
**2.1.4 Stehende Wellen**

Trifft eine ebene elektromagn. Welle, (s. Gl.(1)), senkrecht auf eine ebene Metallfläche, wird sie in sich selbst reflektiert. Es überlagern sich zwei Wellen, die sich im Vorzeichen der Wellenzahl und i.a. in ihrer Phase unterscheiden. Die elektr. Feldstärke der resultierenden Welle ist:

$$\underline{E}_s = 2 \underline{E}_0 \sin(\omega t) \cos(kx + \Delta\varphi) \quad (11)$$

Die Phasengeschwindigkeit dieser Welle ist Null, da sich z.B. die Lage der Maxima von  $\underline{E}_s$  ( $\cos(\dots) = 1$ : Schwingungsbäuche), bzw. Minima ( $\cos(\dots) = 0$ : Knoten) mit der Zeit nicht ändert. Man erhält eine *stehende* Welle. Der

Phasenfaktor  $\Delta\phi$  wird durch die Bedingung festgelegt, dass die elektr. Feldstärke auf der Metalloberfläche verschwindet. Der Abstand  $x_0$  der Minima (bzw. Maxima) von  $\underline{E}_s$  auf der x-Achse ist:



**Abb.5:** a) Elektr. Feldstärke  $E_s$  einer stehenden Welle durch Reflexion an einer Metallplatte M  
b) Stehende Welle mit verkürzter Wellenlänge im Körper mit Dicke  $d$  und Brechungsindex  $n > 1$

$$x_0 = \frac{\pi}{k} = \frac{\lambda}{2} \quad (12)$$

Die Strecke  $x_0$  und somit die Wellenlänge  $\lambda$  lassen sich für stehende Mikrowellen direkt durch Messung der Lage der Feldstärkemaxima oder -minima bestimmen (s. Abb. 5a).

Führt man einen Körper der Dicke  $d$  mit Brechungsindex  $n > 1$  in das stehende Wellenfeld (s. Abb. 5b), ist die Wellenlänge im Volumen des Körpers verkürzt. Die Schwingungsbäuche und -knoten verschieben sich. Damit an der Stelle  $x_E$  (etwa der Stelle eines Detektors) z.B. ein Minimum der Feldstärke bestehen bleibt, muss die Metallfläche des Reflektors um die Strecke  $\Delta x$  verschoben werden. Aus der Verschiebung des Reflektors lässt sich der Brechungsindex des Körpers

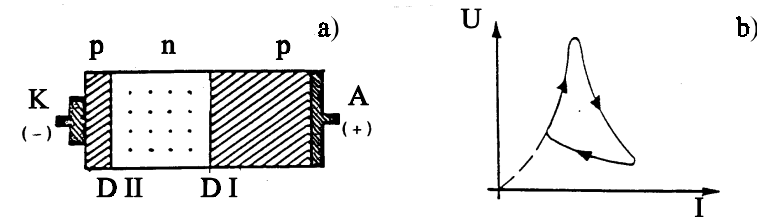
bestimmen ( $n_{\text{Luft}} = 1$ ). Mit  $d/\lambda_n = (d + \Delta x)/\lambda$  folgt:

$$n = \frac{\lambda}{\lambda_n} = 1 + \frac{\Delta x}{d} \quad (13)$$

Hierbei ist vorausgesetzt, dass  $n$  und  $d$  nicht zu groß sind ( $d/\lambda_n < 1/2$ ).

## 2.2 Erzeugung und Nachweis von Mikrowellen: Versuchsanordnung

Zur Erzeugung von Mikrowellen geringer Leistung werden, wie im vorliegenden Versuch, spezielle Halbleiterdioden, sog. *Gunn-Dioden* benutzt. Die hier verwendete Gunn-Diode (s. Abb. 6a) besteht aus einem GaAs-Halbleiter mit zwei p-dotierten und einem dazwischenliegenden schwach n-dotierten Bereich. Er bildet damit zwei gegengeschaltete Dioden DI u. DII. DI ist in Durchlass-, DII in Sperrichtung geschaltet (s. auch Versuch C11: HI-Diode und Transistor). Die positiven Raumladungswolken der p-Gebiete, die ohne äußere Spannung weit in das n-Gebiet hineinragen, werden beim Anlegen einer Spannung auf die Grenzschicht von DII getrieben, wo sie bei genügend hoher Feldstärke zum Durchbruch der Sperrschicht führen. Ein mit der Diode in Reihe liegender Widerstand bewirkt gleichzeitig den Abfall der Diodenspannung und damit des Feldes an der Sperrschicht: DII ist wieder gesperrt. Der Vorgang wiederholt sich zyklisch (s. Abb. 6b), wobei Mikrowellen abgestrahlt werden.

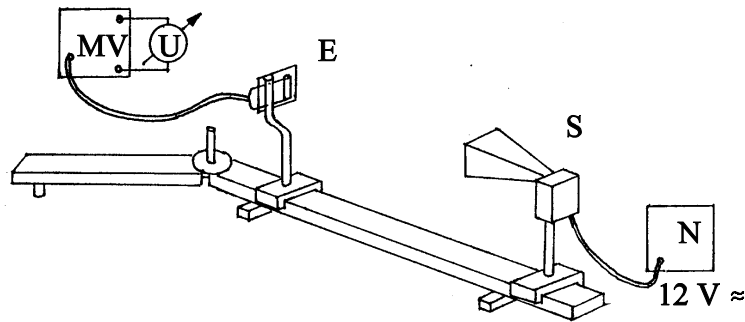


**Abb.6:** a) Aufbau einer Gunn-Diode: p,n: p-, n-dotierte Bereiche; A, K: Metallelektroden b) Diodenkennlinie

Die Diode des Mikrowellensenders befindet sich in einem metallischen Hohlkörper geeigneter Größe (Resonator), in dem sich die von ihr ausgehende Strahlung zu einem Wellenfeld bestimmter Wellenlänge aufschaukeln kann (Hohlraumresonanz). Über einen Hornstrahler an einer Öffnung des Resonators tritt die Mikrowelle mit einer Strahlungsleistung von ca. 10 mW linear polarisiert in den Außenraum..

Zum Empfang der Mikrowelle dient eine zylindrische Hochfrequenz-Diode als Dipol. Wird die Diode parallel zum Vektor der elektr. Feldstärke der Welle gehalten, entsteht an ihr eine Gleichspannung bzw. ein Gleichstrom proportional zum mittleren Betrag der Feldstärke. Bei schräger Stellung der Diode ist die Gleichspannung entsprechend der Projektion auf die Feldrichtung geringer. Zur Vergrößerung der Feldstärke am Ort der Diode kann hinter sie eine kleine Metallplatte als Reflektor montiert werden. Der Gleichstrom wird über ein Koaxialkabel einem Messverstärker zugeführt. Ein nachgeschaltetes Voltmeter dient als Anzeige.

Abb. 7 zeigt die Versuchsanordnung. Sender und Empfänger sind auf einer optischen Bank mit mm-Skala montiert. Die Bank besteht aus einer langen feststehenden und kurzen schwenkbaren Schiene. Der Sender steht auf der langen, der Empfänger je nach Versuch auf der langen oder kurzen Schiene.



**Abb.7:** Versuchsanordnung: S Sender, N Netzgerät, E Empfänger mit Reflektor, MV Messverstärker, U Spannungsmesser

### 3. Aufgabenstellung

- 1. Aufgabe:** Prüfen Sie die Abstrahlcharakteristik und Polarisationsrichtung des Mikrowellensenders sowie das Absorptions- und Reflexionsvermögen verschiedener Materialien.
- 2. Aufgabe:** Bestimmen Sie Wellenlänge und Frequenz der Mikrowelle durch Ausmessen der Abstände von Maxima und Minima einer

stehenden Welle.

- 3. Aufgabe:** Bestimmen Sie den Brechungsindex von PVC durch Messung der Wellenlänge in diesem Material.
  - 4. Aufgabe:** Bestimmen Sie den Brechungsindex von Plexiglas durch Messung der Brennweite einer Zylinderlinse aus Plexiglas.
  - 5. Aufgabe:** Bestimmen Sie den Verlauf der elektr. Feldstärke der Mikrowelle hinter einem Doppelspalt in Abhängigkeit vom Winkel zur einlaufenden Welle.
- alternativ dazu:** Bestimmen Sie den Verlauf der elektrischen Feldstärke hinter einem Gitter aus Metallstäben in Abhängigkeit vom Winkel zur einlaufenden Welle.

### 4. Versuchsdurchführung

#### 4.1 Strahlung des Senders, Absorption und Reflexion

Montieren Sie den Sender S etwa auf der Position 90 cm der langen Schiene (Höhe ca. 22 cm über der Schiene) mit dem Trichter zur kurzen Schiene zeigend. Dies ist die Position von S für die Versuche 4.1 bis 4.4. Schließen Sie S an die Stromversorgung (12 V $\approx$ ) an, den Empfänger E an den Messverstärker MV (Bereich:  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  A), an dessen Ausgang das Voltmeter U (Bereich: 3 oder 10 V; nicht aber 30V, da U auf ca. 13V begrenzt ist!).

**Vorsicht** beim Hantieren mit dem Empfänger-Dipol! Die HF-Diode ist sehr empfindlich gegen Überspannung und kann beim Berühren infolge statischer Aufladung zerstört werden. Vermeiden Sie direkten Kontakt mit den Zuleitungen ohne sicherzustellen, dass diese kurzgeschlossen sind!

Halten Sie E ohne Reflektorplatte am Isolierstab senkrecht so in der Hand, dass die Zuleitungen zum Dipol senkrecht zu Wellenrichtung liegen. Führen Sie nun E in verschiedenen Abständen von S vor den Trichter und beobachten Sie die Anzeige des Voltmeters. Ermitteln Sie qualitativ die Abstrahlcharakteristik von S durch horizontale und vertikale Verschiebung von E.

Drehen Sie E in fester Entfernung von S um die Verbindungsachse von E und S und beobachten Sie das Voltmeter. Welche Richtung hat der Vektor der elektr. Feldstärke? Montieren Sie E (in gleicher Höhe wie S) auf der Position 30 cm so auf der langen Schiene, dass seine Leitung zum Verstärker senkrecht zur Wellenrichtung zeigt. (MV:  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  A). Führen Sie nun ein Metallgitter in

verschiedener Orientierung zwischen E und S. Bei welchen Stellungen des Gitters wird die Anzeige von U minimal bzw. maximal und warum?

Führen Sie verschiedene Körper wie Metall, Glas, Holz, PVC und die Hand zwischen S und E und schließen Sie aus der Anzeige auf ihr unterschiedliches Absorptionsvermögen.

Montieren Sie eine Metallplatte (20 x 20 cm<sup>2</sup>) auf der Position 60 cm der langen Schiene im Winkel von etwa 45° zu S und führen Sie E mit der Hand zur Prüfung des Reflexionsvermögens der Platte im Abstand von ca. 30 cm seitlich an ihr vorbei. Prüfen Sie qualitativ das Reflexionsgesetz. Wiederholen Sie den Versuch mit der Glasplatte. Vergleichen Sie Reflexions- und Absorptionsvermögen von Glas- und Metallplatte.

Achten Sie bei den folgenden Versuchsteilen darauf, dass möglichst wenige störende Reflexionen durch Sie selbst (Körper und Hände) sowie evtl. abgestellte Gegenstände auftreten!

Bestimmen Sie die Absorptionskonstante von Schaustoffplatten. Messen Sie die Intensität der Mikrowelle am Empfänger dipol (MV:10<sup>-7</sup>A-B.; U: 1-3-10V-B.), wobei Sie nacheinander n = 0, 1,..5 Schaumstoffplatten (Dicke d = 1cm) etwa mittig zwischen S und E halten. Verfahren Sie so, dass Sie dabei jeweils eine weitere Platte vom bereitgelegten Stapel nehmen und empfängerseitig an den Absorberstapel halten. Wiederholen Sie die Messung nach Umkehrung der Stapelfolge.

Bilden Sie in der Auswertung die Mittelwerte U<sub>m</sub> aus beiden Messreihen und tragen Sie ln(U<sub>m</sub>) über der Gesamtdicke x des Absorbers auf. Bestimmen Sie aus der Ausgleichsgeraden mit Gl.(8) die Konstante K.

#### 4.2 Stehende Wellen

Montieren Sie die Metallplatte gegenüber S genau auf der Position 30 cm so, dass die Welle senkrecht auftrifft. Verschieben Sie E auf einem Stativ langsam zwischen S und der Platte auf der Schiene und beobachten Sie das Voltmeter. Stellen Sie einen günstigen Messbereich am Verstärker und Voltmeter ein und bestimmen Sie die Abstände der Positionen von E für jeweils 10 aufeinanderfolgende Maxima und Minima der Anzeige. Wiederholen Sie diesen Versuch. Bestimmen Sie aus dem mittleren Abstand mit Gl. (12) die Wellenlänge der Mikrowelle sowie deren Frequenz (n<sub>Luft</sub> = 1). Schätzen Sie den Fehler bei der Bestimmung von λ ab. Überprüfen Sie, ob der aus den Messungen extrapolierte Verlauf der elektr. Feldstärke an der Position der Metallplatte ein Maximum oder Minimum ergibt.

#### 4.3 Brechungsindex von PVC

Benutzen Sie die Versuchsanordnung wie in 4.2 und justieren Sie E etwa bei der Position 45 cm so, dass er ein Minimum der Feldstärke anzeigt (s. Abb. 5a). Stellen Sie nun die 2 cm dicke PVC-Platte auf einem Stativ zwischen E und die Metallplatte und beobachten Sie das Voltmeter. Durch geringfügiges Verschieben der PVC-Platte auf der Schiene kann eine *maximale* Anzeige des Voltmeters erreicht werden. In dieser Position liegt ein Minimum der elektr. Feldstärke gerade auf der empfängerseitigen Oberfläche der PVC-Platte (s. Abb. 5b), so dass den Versuch störende Reflexionen durch die Platte selbst minimal werden. Schieben Sie nun die Metallplatte auf E zu, bis das Voltmeter wieder ein Minimum anzeigt. Wiederholen Sie den Versuch. Bestimmen Sie aus der Verschiebung der Metallplatte mit Gl. (13) den Brechungsindex von PVC für die Frequenz der Mikrowelle. Schätzen Sie den Fehler ab!

#### 4.4 Brechungsindex von Plexiglas

In diesem Versuch wird der Brechungsindex einer Zylinderlinse aus Plexiglas bei der Mikrowellenfrequenz über die Bestimmung ihrer Brennweite f ermittelt. Dabei wird die Position der Linse L ermittelt, bei der S über L auf E abgebildet wird.

Stellen Sie dazu E *mit* montiertem Reflektor an der Position 10 cm der kurzen, geradegestellten Schiene, also im fast maximalen Abstand gegenüber S auf und bestimmen Sie den Abstand E-S, indem Sie die Schienenlücke am Drehgelenk ausmessen. Stellen Sie die Linse zwischen S und E so auf die lange Schiene, dass die gewölbte Seite zu E zeigt. Die Position der empfängerseitigen Linsenkante kann leicht auf der Schiene abgelesen werden; sie wird näherungsweise als (bild- und gegenstandsseitige) Hauptebene der Linse angenommen (s. Versuch D1; Brennweite von Linsen und Linsensystemen). Verändern Sie den Abstand der Linse zu S, L-S = g (Gegenstandsweite) indem Sie L im Bereich zwischen g = 30 und ca. 80 cm (Pos. 69 - ca. 10 cm) in Schritten von 2 cm verschieben. Notieren Sie jeweils die Anzeige des Voltmeters (U:3-10 V-Bereich, MV: 10<sup>-7</sup>A). Lassen Sie sich hierbei etwas Zeit und schätzen Sie den zeitlichen Mittelwert der schwankenden Anzeige ab.

Tragen Sie in der Auswertung des Versuchs die Spannungsanzeige als Funktion der Gegenstandsweite g = L-S auf Millimeterpapier auf. Ermitteln Sie über eine Ausgleichskurve die Lage des Maximums und damit die Bildweite b (= E-S - L-S) der Versuchsanordnung. Bei genügend großem Abstand E-S gibt es zwei Gegenstandsweiten (Maxima der Spannung U), für die S auf E abgebildet wird (s. Versuch D1, Besselverfahren). Bei einer Gegenstandsweite von etwa dem halben Abstand E-S sollte daher ein Minimum der Spannung U zu beobachten sein. Prüfen

Sie diesen Zusammenhang und schätzen Sie den Fehler bei der Bestimmung der Lagen von Maximum und Minimum ab. Ermitteln Sie aus dem Zusammenhang

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

sowie der Linsenformel für die Brennweite einer plankonvexen Zylinderlinse

$$f = \frac{R}{n - 1}$$

den Brechungsindex  $n$ .  $R = 15$  cm ist hierbei der Krümmungsradius der Zylinderfläche. Berechnen Sie den relativen Maximalfehler von  $n$  unter Beachtung der Fehlerfortpflanzung mit der Annahme der folgenden maximalen Einzelfehler:

$$\Delta R = \pm 0,5 \text{ cm}; \Delta b = -\Delta g = \pm 1,5 \text{ cm}.$$

#### 4.5 Doppelspalt

Stellen Sie S im Abstand von ca. 35 cm vom Drehgelenk der optischen Bank auf der langen Schiene auf, E mit Reflektor ca. 30 cm vom Drehgelenk entfernt auf der kurzen Schiene. Montieren Sie die schmale Metallplatte mit der Querstange senkrecht zur langen Schiene über der Drehachse, die breiten Metallplatten an der Querstange seitlich neben die schmale. In dieser Anordnung entsteht ein Doppelspalt mit Spaltbreite 2,5 cm und Spaltabstand 8,5 cm. (MV:  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  A; U: 3 - 10 V- Bereich).

Verändern Sie den Winkel des Drehgelenks  $\alpha$  von  $-10^\circ$  (hintere Seite zur Raumwand) bis  $+70^\circ$  in Schritten von  $2^\circ$  und notieren Sie jeweils die Anzeige des Voltmeters und den MV-Bereich. Tragen Sie das Ergebnis auf Millimeterpapier auf und verbinden Sie die Messpunkte mit einer Kurve. Vergleichen Sie die Lage der Maxima u. Minima mit den entsprechenden theoretischen Werten gemäß Abb. 3 für parallele (ebene) Wellen (S u. E sehr weit vom Spalt entfernt). Diskutieren Sie das Messergebnis sowie mögliche Fehlerquellen im Rahmen dieses Vergleichs.

#### 4.6 Bragg-Reflexion am Gittermodell

Montieren sie S an der Position 70cm der langen Schiene und E (mit Reflektor) an der Position 20cm der kurzen Schiene (also etwas mehr als 30cm vom Drehgelenk entfernt). Montieren Sie die Doppelspaltbleche ohne den zentralen Steg unmittelbar neben das Drehgelenk auf der langen Schiene. Diese Bleche wirken

als Blende. Sie verhindern, dass der vom Gitter reflektierte Strahl mit dem Direktstrahl des Senders interferiert.

Bestimmen Sie zunächst den Intensitätsverlauf  $U(2\theta)$  der Mikrowelle am Empfänger (MV:  $10^{-7}$ - $10^{-8}$ A; U: 3-10V) in Abhängigkeit des am Drehgelenk eingestellten Winkels  $2\theta$  im Bereich  $2\theta = 0^\circ$  bis  $80^\circ$  in Schritten von  $4^\circ$ ; ermitteln sie also lediglich den Abschattungseffekt der Blende.

Stellen Sie nun das Gittermodell mit neuen Stäben entweder mit Abstand  $d = 3$ cm oder  $d = 4,2$ cm so auf das Drehgelenk, dass der  $\theta$ -Zeiger auf die Nullmarke zeigt. Justieren Sie die Feststellschrauben so, dass das Modell sich leicht genug auf der Achse drehen lässt aber nicht wackelt.

Im folgenden zweiten Messdurchgang wird der Intensitätsverlauf  $U(2\theta)$  von  $2\theta = 0^\circ$  bis  $80^\circ$  in Schritten von  $2\theta = 4^\circ$  bestimmt, indem das Modell auf den Winkel  $\theta$  und die Schiene auf den Winkel  $2\theta$  gestellt wird.

Tragen Sie in der Auswertung  $U(2\theta)$  über  $2\theta$  sowohl für die Blende allein als auch mit dem Gittermodell auf. Stellen Sie fest, in welchem Winkelbereich der Direktstrahl mit dem reflektierten Strahl sich überlagert, und in welchem lediglich die Interferenz der reflektierten Teilwellen beobachtet wird. Bestimmen Sie für diesen Bereich den Winkel  $\theta$ , bei dem ein Maximum auftritt und vergleichen Sie diesen Winkel mit dem aus der Bragg-Gleichung Gl.(10) berechneten.

#### 6. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Durch welche Größen wird eine *elektromagnetische Welle* charakterisiert?
- 2) Welche Wellen gehören zum Spektrum der elektromagn. Wellen und in welcher Größenordnung liegen ihre jeweiligen Wellenlängen und Frequenzen?
- 3) Was ist die *Phasengeschwindigkeit* einer Welle? Wie groß ist sie für elektromagn. Wellen a) im Vakuum und b) in Materie?
- 4) Was ist eine linear polarisierte elektromagn. Welle?
- 5) Wie ist der *Brechungsindex* eines Stoffes definiert? Von welchen Materialeigenschaften hängt er ab?
- 6) Was versteht man unter *Beugung*, was unter *Interferenz* von Wellen? Nennen Sie Beispiele!
- 7) Wie kann man Mikrowellen erzeugen, wie kann man sie oder elektromagn. Wellen größerer Wellenlänge nachweisen bzw. ausmessen?