

Labor Nachrichtentechnik

Versuch 3:

Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Modul/Unit-Nr. N3002.2

Kurs-Nr. TEL....GR....

Name der/s Studierenden:

-
- Laborausarbeitung in Ordnung.
 - Laborausarbeitung ungenügend.

Betreuer:

Ort/Datum:

Unterschrift:

1. Vorbereitende Fragen

1. Für welche Größen des elektrischen Feldes stehen die Bezeichnungen \vec{E} und \vec{D} ? In welcher Beziehung stehen sie zueinander ?
2. Für welche Größen des magnetischen Feldes stehen die Bezeichnungen \vec{H} , \vec{B} und \oint ? In welcher Beziehung stehen sie zueinander ?
3. Wie lauten die grundlegenden Gesetze (Axione) der Elektrotechnik, die den Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld beschreiben ?

2. Erläuterungen

2.1 Verschiebungsstrom i_V , magnetischer Fluß \oint :

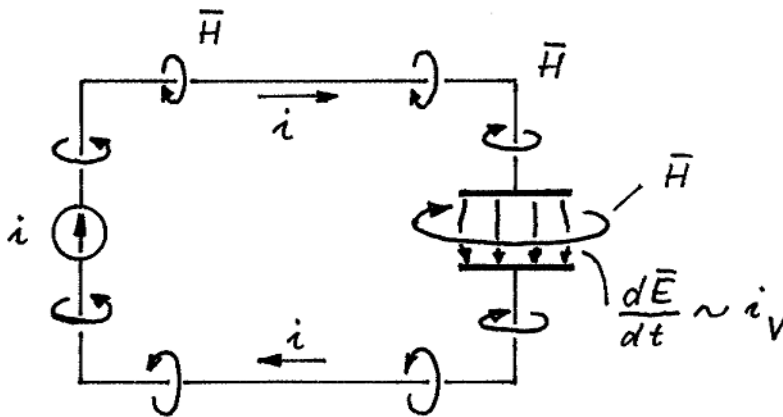
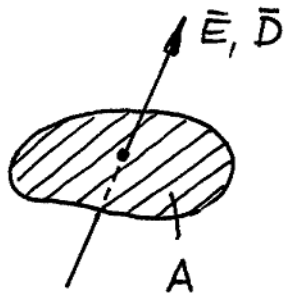


Bild 1: Zum Verschiebungsstrom

Im Stromkreis nach Bild 1 lädt eine Stromquelle i einen Kondensator und baut dort ein elektrisches Feld mit der Feldstärke \vec{E} auf. Dabei zeigt sich neben dem ringförmigen Magnetfeld der Stärke \vec{H} um die Zuleitung auch eine entsprechende Feldstärke \vec{H} um das anwachsende elektrische Feld \vec{E} . Dies legt die Einführung eines Stromes i_V nahe, der den Stromkreis schließt und als Ursache für das Magnetfeld im Feldgebiet angesehen werden kann.

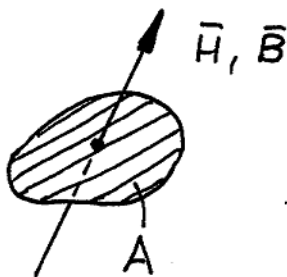
Bezeichnung: i_V = Verschiebungsstrom



$$i_v = \frac{d}{dt} \left\{ \int_A \bar{D} \, d\bar{A} \right\} = \epsilon \frac{d}{dt} \left\{ \int_A \bar{E} \, d\bar{A} \right\}$$

also: $\frac{d\bar{E}}{dt} \hat{=} i_v$

Bild 2a: Zusammenhang zwischen Verschiebungsstrom und elektrischem Feld



$$\phi = \int_A \bar{B} \, d\bar{A} = \mu \int_A \bar{H} \, d\bar{A}$$

also: $\bar{H} \hat{=} \phi$

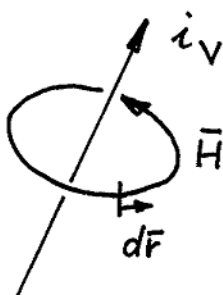
Bild 2b: Zusammenhang zwischen dem magnetischen Fluß und den magnetischen Feldgrößen

Bild 2a nennt die Definition des Verschiebungsstroms i_v (Beachte die Dimension von D, A, t !), Bild 2b die des magnetischen Flusses ϕ . ϕ und i_v sind die Ursachen für Induktion und Durchflutung gemäß den Maxwell'schen Gleichungen.

2.2 Elektromagnetische Kopplung zwischen benachbarten Punkten im freien Raum

Kennzeichen des freien Raums:

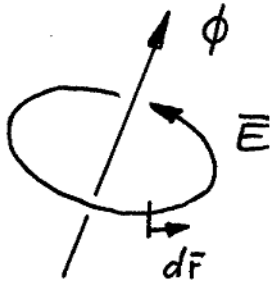
- keine Raumladung,
- keine Leitfähigkeit.



$$\oint \bar{H} \, d\bar{r} = i_v = \epsilon \frac{d}{dt} \left\{ \int_A \bar{E} \, d\bar{A} \right\}$$

also: $\frac{d\bar{E}}{dt}$ bewirkt \bar{H} in der Umgebung

Bild 3a: Durchflutungsgesetz im freien Raum



$$\oint \bar{E} \, d\bar{r} = - \frac{d\phi}{dt} = - \mu \frac{d}{dt} \left\{ \int_A \bar{H} \, d\bar{A} \right\}$$

also: $\frac{d\bar{H}}{dt}$ bewirkt \bar{E} in der Umgebung

Bild 3b: Induktionsgesetz im freien Raum

Die Maxwell'schen Gleichungen zeigen, daß benachbarte Punkte des freien Raumes durch die elektrischen und magnetischen Feldgrößen miteinander gekoppelt sind (vgl. Bild 3a, b), so daß eine örtliche Feldänderung von \bar{E} oder \bar{H} oder \bar{E} und \bar{H} sich ausbreitet.

2.3 Denkmodell für die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle

Bild 4 stellt die Ausbreitung einer mechanischen Welle (Zugseilwelle) der Ausbreitung einer ebenen elektromagnetischen Welle gegenüber. Dabei sind modellhaft die Ausbreitungsmedien in Elemente aufgeteilt: bei der Zugseilwelle in bewegliche Masseelemente und elastische Kopplungen, bei der elektromagnetischen Welle in Nachbarbereiche, in denen nur \bar{H} oder \bar{E} auftreten. Dabei entsprechen sich \bar{E} und Federspannung wie auch \bar{H} und bewegte Masse. Das Gedankenexperiment beschränkt sich auf einen einzelnen Impuls und seine eindimensionale Ausbreitung: kurzzeitiges Spannen des ersten Federelements bzw. kurzzeitiges Einprägen einer elektrischen Feldstärke im ersten \bar{E} -Element. Von oben nach unten wechseln sich in Bild 4 rein statische (Federspannung bzw. \bar{E}) und rein dynamische (bewegte Masse bzw. \bar{H}) Momentanzustände ab.

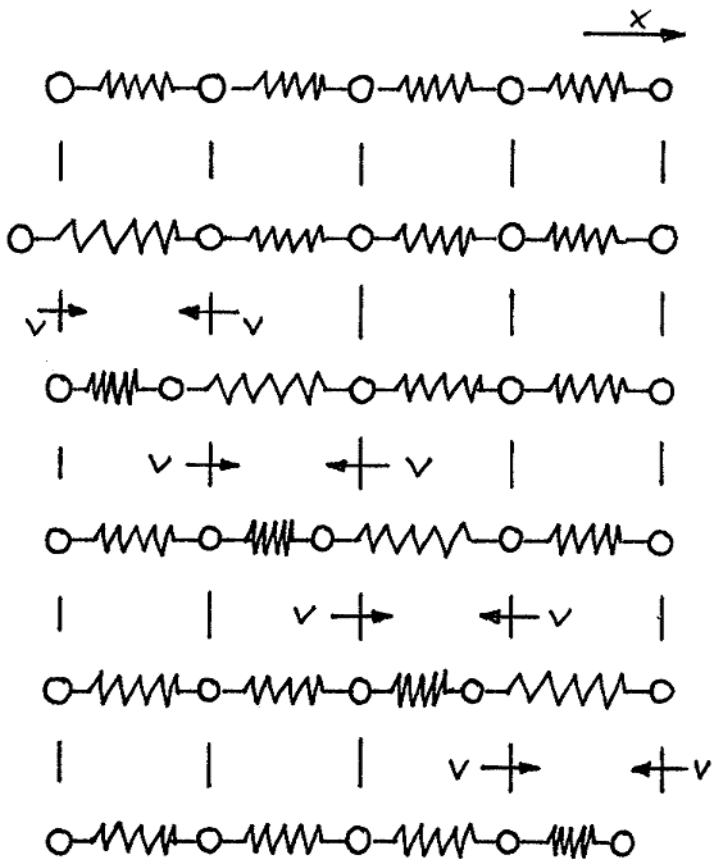
Gegenüberstellung:

Zugseilwelle (1 Impuls)

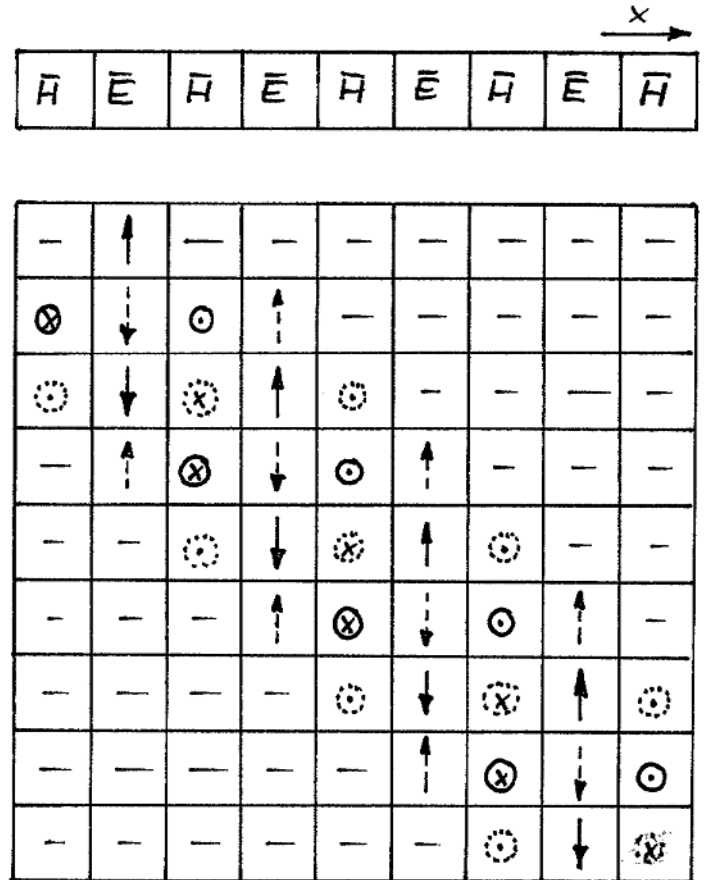
Ebene elektromagnetische Welle (1 Impuls)

Gedankliche Auflösung in benachbarte Elemente mit

Massenpunkten und Verbindungsfedern



Magnetfeld \vec{H} und Elektrischem Feld \vec{E}



Wechselwirkung:

Bewegte Masse - Federspannung
 Federspannung bewirkt Bewegung
 Bewegung bewirkt Federspannung

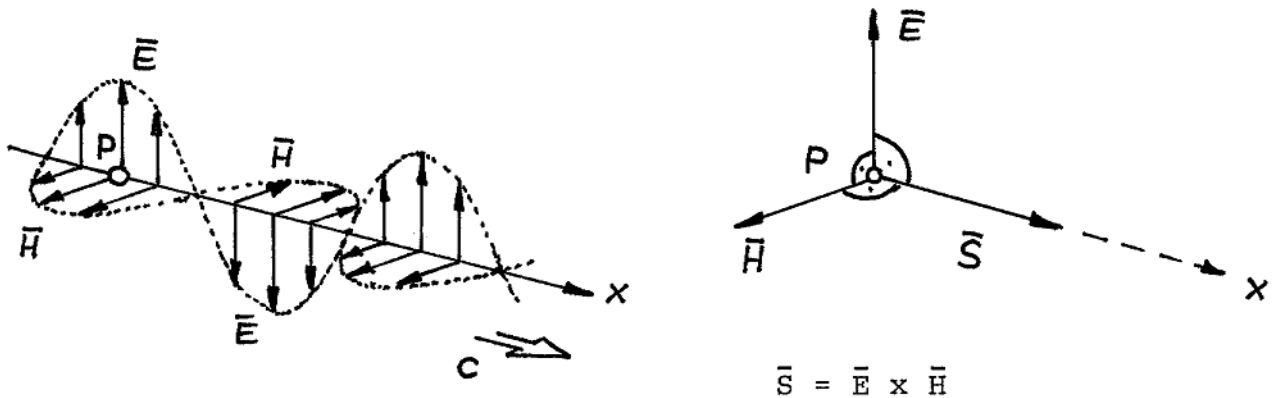
\uparrow, \odot Vektoren; \downarrow, \otimes zeitliche Änderung von Vektoren

Wechselwirkung:

Elektrisches Feld - Magnetfeld
 $d\vec{E}/dt$ bewirkt \vec{H}
 $d\vec{H}/dt$ bewirkt \vec{E}

Bild 4: Modell für die Wellenausbreitung

2.4 Kenngrößen der elektromagnetischen Wellen



\vec{S} = Poyntingscher Vektor

$$|\vec{E}| = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot |\vec{H}| = Z \cdot |\vec{H}| ;$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$$

Bild 5: Ebene elektromagnetische Welle im freien Raum bei sinusförmiger Erregung

Die Auswertung der Maxwell'schen Gleichungen für den freien Raum (hier nicht vorgestellt) bestätigt, was die Bilder 3a, b und 4 bereits andeuteten: \vec{E} und \vec{H} sind auf immer gleiche Weise miteinander verknüpft (Bild 5):

- \vec{E} und \vec{H} stehen senkrecht aufeinander;
- dreht man \vec{E} auf \vec{H} , so ergibt sich im Sinne einer Rechtsschraube die Ausbreitungsrichtung x der Welle;
- die Beträge verhalten sich wie

$$\frac{E}{H} = Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (= 377 \Omega \text{ für } \epsilon = \epsilon_0, \mu = \mu_0 \\ = \text{Wellenwiderstand des freien Raumes});$$

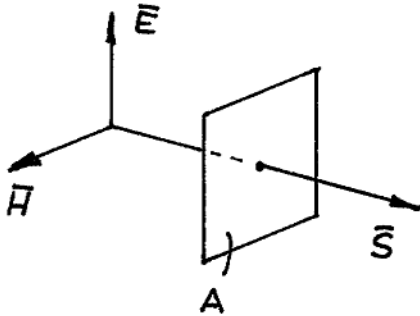
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt

$$c = 1 / \sqrt{\epsilon \cdot \mu} \quad (= 3 \cdot 10^8 \text{ m/s für } \epsilon = \epsilon_0, \mu = \mu_0 \\ = \text{Lichtgeschwindigkeit})$$

- c legt bei vorgegebener Erregungsfrequenz f die Wellenlänge fest:

$$c = \lambda \cdot f$$

Die Tabelle "Elektromagnetisches Spektrum" faßt die technisch wichtigsten Wellenbereiche zusammen.



$$n = |\vec{S}| \cdot A = |\vec{E}|^2 \cdot \frac{1}{Z} \cdot A$$

n = Augenblicksleistung der Welle

Bei sinusförmiger Erregung:

$$|\vec{E}| = E \cdot \cos \omega t$$

$$N = n_{\text{mittel}} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \frac{E^2}{Z}$$

Bild 6: Leistung der elektromagnetischen Welle

Der Poyntingsche Vektor $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ zeigt die Richtung der Wellenausbreitung an. Sein Betrag ist ein Maß für die Leistungsdichte der Welle (Bild 6): Mit einer Durchschnittsfläche A multipliziert ($A \perp \vec{S}$) ergibt sich die Leistung, die in A der Welle entnommen werden kann.

Frequenz in Hertz	Wellenlänge in Metern			
$3 \cdot 10^1$	10^7		elektrotechnisch erzeugte Wellen	
$3 \cdot 10^2$	10^6	aus techn. Wechselströmen		
$3 \cdot 10^3$	10^5	aus Wechselströmen in Tonfrequenzen		
$3 \cdot 10^4$	10^4			
$3 \cdot 10^5$	$10^3 = 1\text{km}$	Langwellen		
$3 \cdot 10^6$	10^2	Mittelwellen		
$3 \cdot 10^7$	10	Kurzwellen		
$3 \cdot 10^8$	1m	Ultrakurzwellen		
$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	Dezimeterwellen		
$3 \cdot 10^{10}$	$10^{-2} = 1\text{cm}$	Mikrowellen		Licht
$3 \cdot 10^{11}$	$10^{-3} = 1\text{mm}$			
$3 \cdot 10^{12}$	10^{-4}	fernes Infrarot		
$3 \cdot 10^{13}$	10^{-5}			
$3 \cdot 10^{14}$	$10^{-6} = 1\mu\text{m}$	nahes Infrarot		
$3 \cdot 10^{15}$	$10^{-7} = 100\text{nm}$	sichtbares Licht		
$3 \cdot 10^{16}$	$10^{-8} = 10\text{nm}$	Ultraviolett		
$3 \cdot 10^{17}$	$10^{-9} = 1\text{nm}$	sehr weiche weiche		
$3 \cdot 10^{18}$	$10^{-10} = 1\text{Å}$	harte sehr harte	Röntgenstrahlen	
$3 \cdot 10^{19}$	10^{-11}			
$3 \cdot 10^{20}$	10^{-12}		γ-Strahlen	
$3 \cdot 10^{21}$	10^{-13}			
$3 \cdot 10^{22}$	10^{-14}		Höhenstrahlung	
$3 \cdot 10^{23}$	10^{-15}	elektromagnet. Wellen in der		
$3 \cdot 10^{24}$	10^{-16}	Höhenstrahlung		

Elektromagnetisches Spektrum

Da \vec{E} und \vec{H} fest verknüpft sind, ist es üblich, nur die elektrische Feldstärke \vec{E} als Repräsentanten der Welle zu beschreiben.

Da die Feldstärken senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen, ist die elektromagnetische Welle eine Transversalwelle, und die Ausrichtung der erzeugenden Vektoren, ihre sogenannte Polarisation ist neben Amplitude, Frequenz und Phasenwinkel der Erregung ein weiterer freier Parameter.

Bei ungestörter Ausbreitung schwingt \vec{E} in einem Durchlaufpunkt der Welle auf einer Geraden: lineare Polarisation. Zufällige oder gezielte Störungen bewirken räumliche Drehung und zeitliche Verzögerung bei der Wellenausbreitung. Kommt es zur Überlagerung zweier gleichfrequenter Wellen, die gegeneinander gedreht und verzögert sind, verläßt \vec{E} seine konstante Ausrichtung und dreht sich in der Ebene senkrecht zu \vec{S} bzw. X . Die Vektorspitze beschreibt dabei im allgemeinen Fall eine Ellipse: elliptische Polarisation, im Spezialfall einen Kreis: zirkuläre Polarisation. Links- und rechtsdrehender Umlaufsinn sind möglich.

2.5 Geführte elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen lassen sich durch alle Materialien beeinflussen, die auch \vec{E} oder \vec{H} oder beide beeinflussen: Dielektrika mit $\epsilon_r > 1$, Ferromagnetika mit $\mu_r > 1$ und metallische Leiter können Feldlinien in sich sammeln, dadurch Wellenenergie konzentrieren und bei geeigneter Gestaltung gezielt führen. Die wichtigsten Beispiele: Doppelleitungen, Koaxialleitungen, Streifenleiter, Hohlleiter, dielektrische Leiter. Die Ausbreitungsmechanismen im einzelnen bedürfen einer umfangreichen Erörterung, die hier nicht möglich ist.

2.6 Ebene Wellen und Materie; Grenzflächen

Grenzflächen sind Übergänge zwischen Materialien mit unterschiedlichen Bedingungen für die Wellenausbreitung. Dabei sind die folgenden Themengebiete von Interesse:

Spezielle Polarisationseigenschaften,
Unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit,
Absorption in dielektrischen, ferromagnetischen und halbleitenden Materialien,
Beugung von Wellen und
Interferenzerscheinungen.

Im Versuch werden davon behandelt:

Absorption in unterschiedlichen Materialien, Reflexion an leitender Oberfläche (Reflexionsgesetz) und Interferenz durch Zwei-Wege-Ausbreitung.

Bei der Reflexion an einer leitenden Oberfläche ist zu beachten, daß die elektrische Feldstärke \vec{E} am Auftreffpunkt nur senkrecht zur Oberfläche stehen kann; eine parallele Komponente von \vec{E} wird durch die Leitfähigkeit verhindert. Dies entspricht der transversalen Seilwelle mit fest eingespanntem Ende, das bei der Reflexion einen Phasensprung um 180° verursacht (vgl. Bild 7).

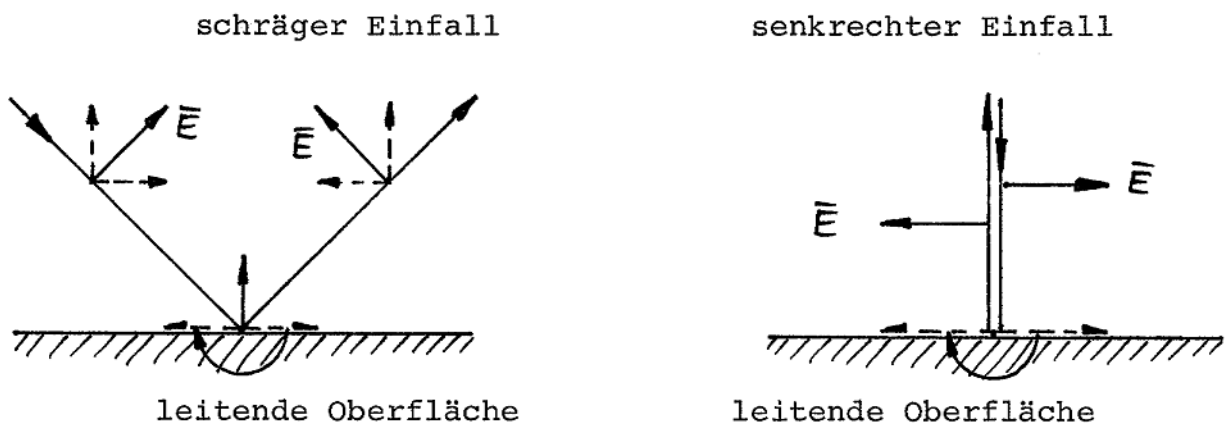
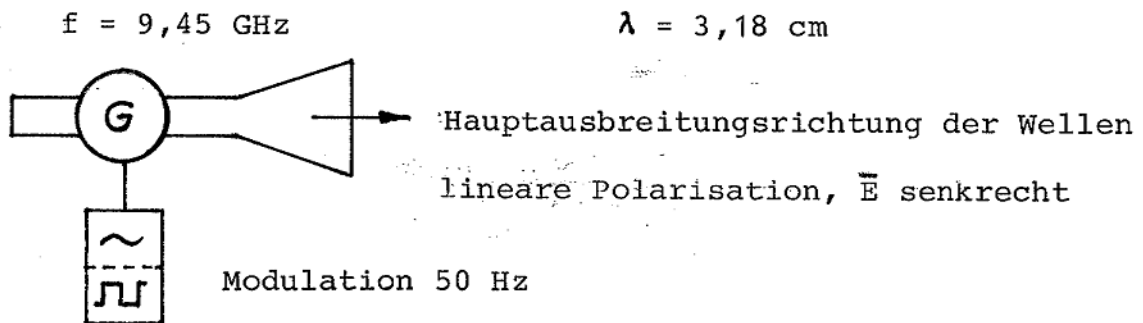


Bild 7: Reflexion an leitender Oberfläche

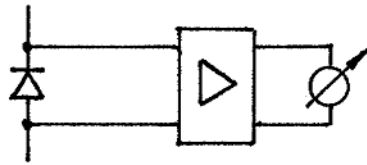
3. Bemerkungen zum Meßaufbau

3.1. Sendeeinrichtung

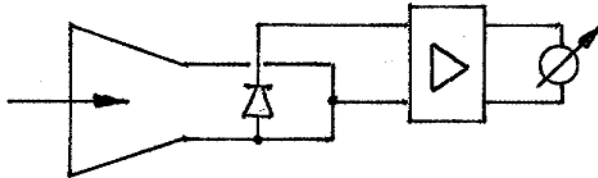


Die Sendeeinrichtung besteht aus einem HF-Generator (Klystron), der über einen Hohlleiter eine Trichterantenne speist. Sie sorgt in der schmalwinkligen Hauptausbreitungsrichtung für eine annähernd ebene Welle. Die hochfrequente Schwingung wird wahlweise rechteckförmig oder sinusförmig mit einer Frequenz von 50 Hz moduliert.

3.2 Empfangseinrichtung



mit Dipolantenne



mit Trichterantenne

Hauptempfangsrichtung

Die Empfangseinrichtung besteht aus Antenne, Demodulator, Meßverstärker und Anzeige. Zwei Antennen stehen zur Verfügung: Dipol und Trichterantenne. Die Trichterantenne empfängt mit großer Richtwirkung und hohem Antennengewinn. Die Dipolantenne erlaubt näherungsweise punktförmiges Abtasten des Feldgebiets ohne große Störung der Wellenausbreitung. Dioden besorgen die Demodulation.

4. Meßaufgaben

4.1. Durchlässigkeit für Wellen

Sender und Empfänger sind gemäß Bild 1 im Abstand von ca. 1 m aufzustellen, so daß ihre Achsen (Hauptstrahlrichtungen) zusammenfallen. Die zu untersuchenden Werkstoffproben bringe man dicht vor den Empfänger, so daß sie dessen Trichteröffnung praktisch abschließen. Die Empfangsverstärkung ist so einzustellen, daß ohne Probe im Strahlengang am Instrument Vollausschlag auftritt.

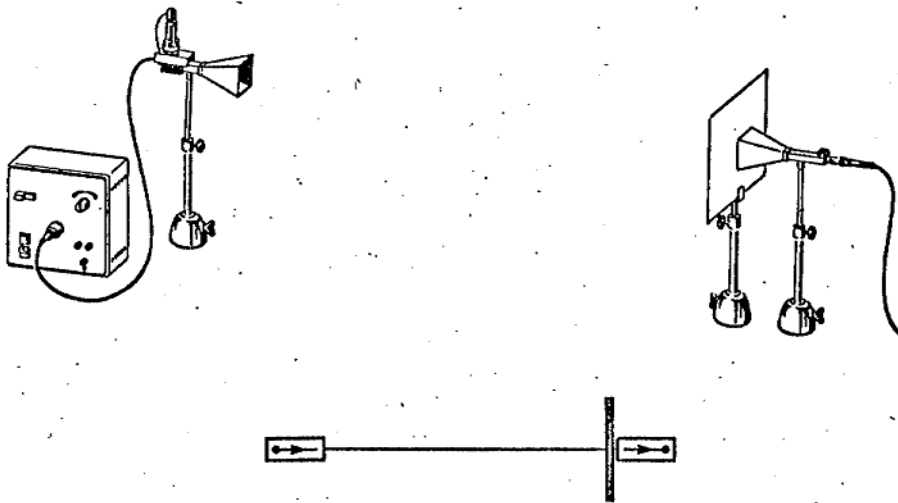


Bild 1

Man messe den Transmissionsgrad

$$T = \frac{\text{ausretender Strahlenfluß}}{\text{einfallender Strahlenfluß}}$$

für folgende Materialien:

- a) Metallschirm
- b) Aluminiumfolie
- c) Holz
- d) Papier
- e) Kartonblatt, trocken
- f) Kartonblatt, mit Wasser getränkt.
- g) Glasplatte

Die Ergebnisse sind zu vergleichen und zu diskutieren.

4.2. Reflexion von Wellen

Untersucht werden soll die Reflexion von Wellen an einem Metallschirm. Hierzu stelle man den Sender und Empfänger gemäß Bild 2 auf. Dreht man den Metallschirm um seine Achse, so ergibt sich bei einem bestimmten Reflexionswinkel β ein Empfangsmaximum (Reflexionsgesetz).

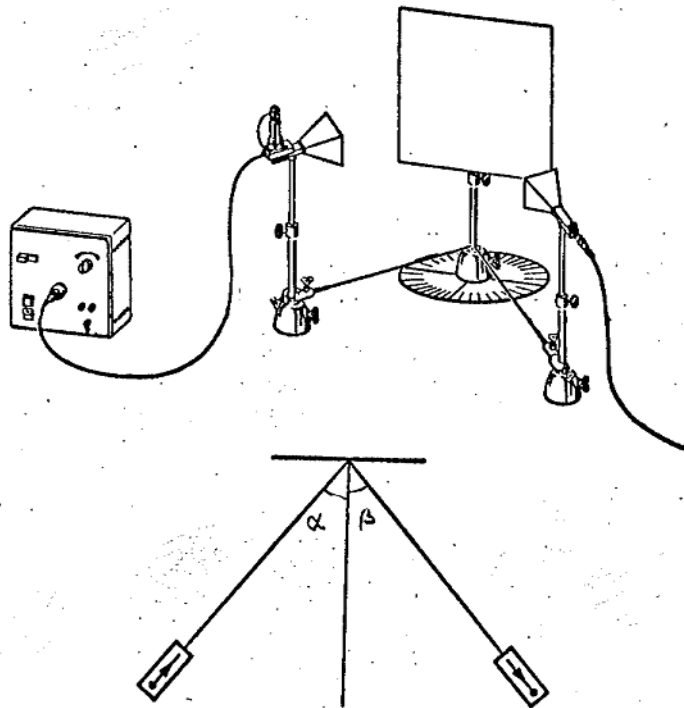


Bild 2

Folgende Messungen sind durchzuführen:

- Man bestimme den Reflexionswinkel β für die Einfallswinkel $\alpha = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$.
- Man ersetze den Metallschirm durch eine Spiegelglasscheibe und wiederhole die Messungen.
- Man vergleiche die Empfangsstärke bei Reflexion am Metallschirm mit derjenigen, die sich bei Empfang direkter Strahlung ergibt.

Beim Empfang direkter Strahlung ist zu beachten, daß Sender und Empfänger so einzuordnen sind, daß ihre Achsen zusammenfallen und der Strahlungsweg die gleiche Länge wie bei der Reflexion hat.

Die gewonnenen Ergebnisse sind zu diskutieren.

4.3. Empfang durch indirekte, reflektierte Strahlung

Kann die direkte Strahlung eines Senders (Bodenwelle) nicht zum Empfänger gelangen - sei es wegen undurchlässiger Medien im Strahlengang (z. B. Gebirge) oder bei sehr großen Entfernungen wegen der Erdkrümmung -, so ist ein Empfang dennoch möglich, wenn die an leitenden Schichten der Atmosphäre reflektierte Raumwelle zum Empfänger gelangt. Dieser Fall liegt etwa für elektromagnetische Wellen im KW-Bereich vor, die in der hohen Atmosphäre an einer ionisierten Luftschicht (Heaviside-Schicht) reflektiert werden. Nur diese Reflexion ermöglicht die großen Reichweiten der Kurzwellen-Richtstrahlensysteme.

Man stelle gemäß Bild 3 zwischen Sender und Empfänger einen Metallschirm, so daß kein direkter Empfang möglich ist.

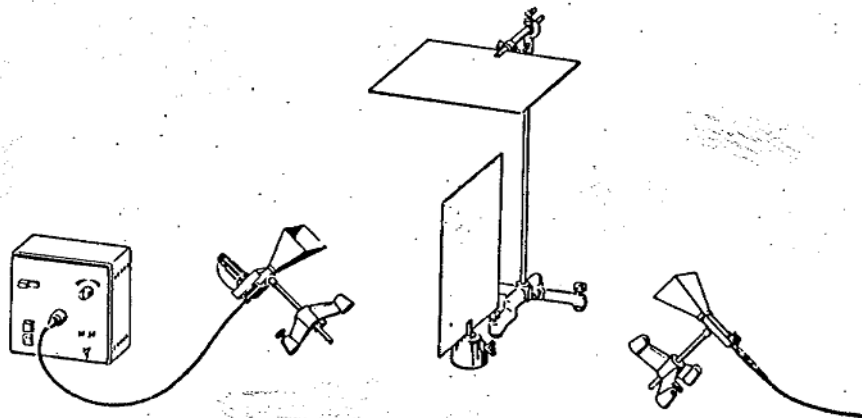


Bild 3

Man zeige, daß durch Reflexion trotzdem ein Empfang zu erzielen ist. Hierzu neige man die Achsen von Sender und Empfänger in etwa gleichem Winkel gegen die Horizontale und lasse die Strahlen an einem horizontalen Metallschirm reflektieren.

4.4. Interferenz durch Umwegempfang

Gelangen elektromagnetische Wellen von einem Sender auf zwei verschiedenen langen Wegen zum Empfänger, so kann es zu Interferenzen, d. h. zu Überlagerung von Wellchen gleicher Frequenz aber unterschiedlicher Nullphase am Empfangswert kommen, was zur Auslöschung bzw. Verstärkung eines Empfangssignal führen kann. Ein Beispiel für diese Interferenzen ist die als Fading bekannte Schwunderscheinung bei Rundfunkwellen, und zwar interferieren dabei die Bodenwelle des Senders und die an einer Ionosphärenschicht reflektierte Raumwelle. Da sich der Abstand dieser Schicht von der Erde örtlich mit dem Einfallswinkel der Sonnenstrahlen ändert (besonders zur Zeit des Sonnenaufgangs und des -untergangs), ändert sich auch der Phasenunterschied zwischen den beiden Wellen, und es treten die charakteristischen Schwankungen der Feldstärke am Empfangsort auf.

Messaufbau:

S... Sender (Trichterantenne)

E... Empfänger (Germaniumdiode ohne Trichter)

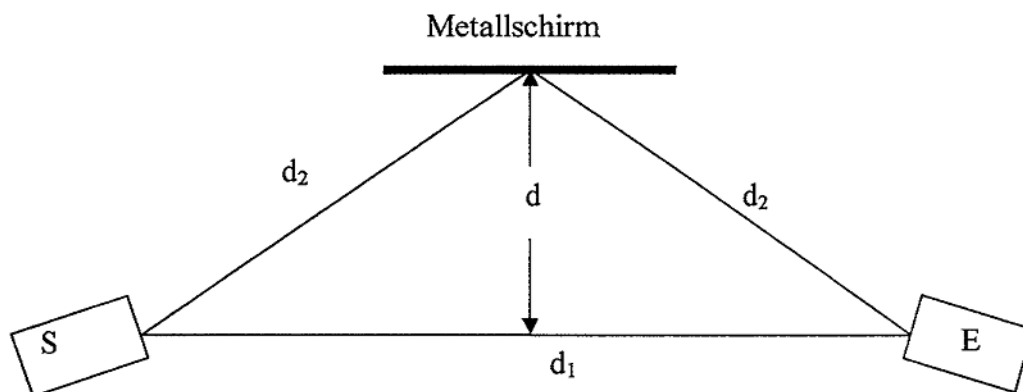


Bild 4a

Man wähle $d_1 = 60 \text{ cm} = \text{konst.}$

Durch Verschieben des Metallschirms (Änderung von d) entstehen unterschiedliche Wegdifferenzen zwischen der direkt empfangenen Welle und der am Spiegel reflektieren Welle
 $d_{\text{diff}} = 2d_2 - d_1$.

Aufgaben:

- a) Geben Sie d_{diff} als Funktion von d an bei symmetrischem Aufbau. (Pythagoras). Es sei $d_1 = \text{konst.}$
- b) Füllen Sie Tabelle 4 mit Messwerten aus und skizzieren Sie dann die Spannung U am Empfänger als Funktion von d_{diff} . Beginnen Sie mit $d = 6 \text{ cm}$ und vergrößern Sie d bis Sie das erste Minimum/Maximum gefunden haben. Suchen Sie dann nach weiteren Nullstellen von $U'(d)$. Berechnen Sie zu jedem d das zugehörige d_{diff} .

d/cm	d_{diff} /cm	U/mV	Min/Max

Tabelle 4

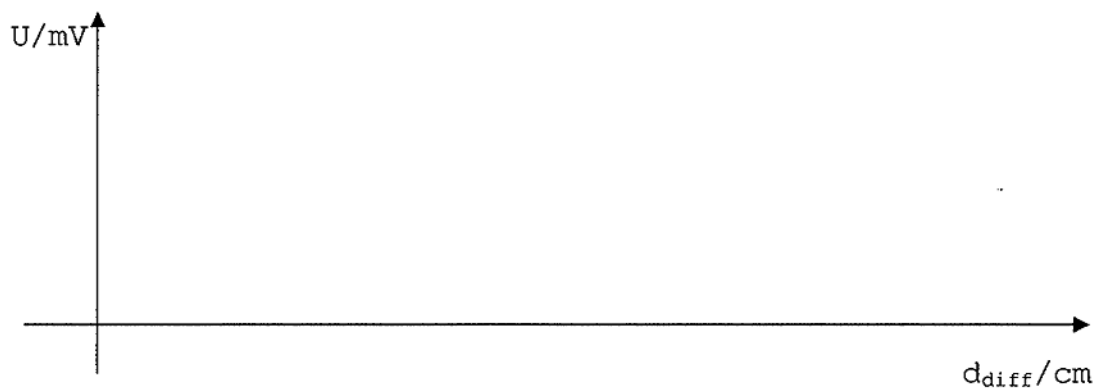


Bild 4b

- c) Welche Phasenlage müssen die beiden überlagerten Wellen beim Empfänger gegeneinander haben für ein Minimum?
- d) Wie groß muß d_{diff} sein bei einem Minimum in Abhängigkeit der Wellenlänge?

4.5. Stehende Wellen

Die Überlagerung (Interferenz) zweier ebener Wellen gleicher Wellenlänge, Polarisation und Amplitude aber entgegengesetzter Fortpflanzungsrichtung ergibt stehende Wellen mit Interferenzmaxima (Wellenbäuchen) und Interferenzminima (Wellenknoten). Die beiden gegenläufigen Wellen werden im vorliegenden Fall durch die vom Sender ausgestrahlte und die von einem Metallschirm reflektierte Welle (Bild 5) gegeben, deren Wellenfronten in einer hinreichend engen Umgebung der Hauptstrahlachse als eben angesehen werden können.

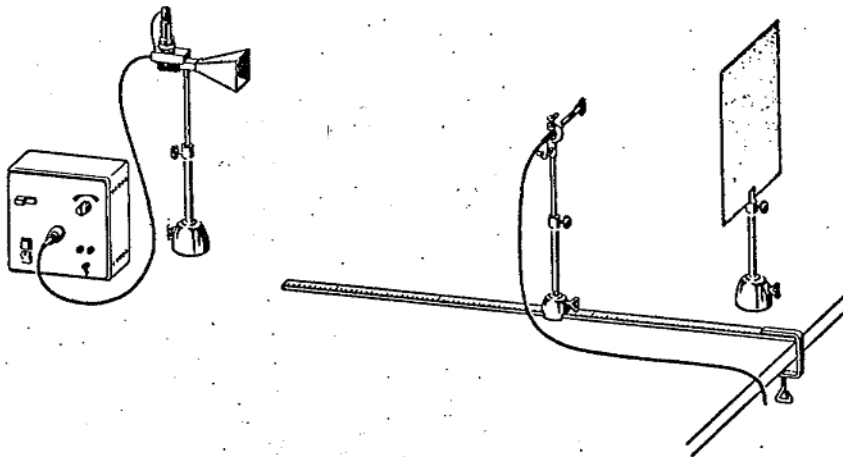


Bild 5

Man stelle gemäß ^{Bild} 5 in etwa 1 m Entfernung vom Sender - senkrecht zur Senderachse (Hauptstrahlrichtung) - einen Metallschirm auf. Tastet man mit der Germaniumdiode das Feld längs der Senderachse ab, so ergeben sich Empfangsmaxima und -minima, die durch Interferenz der hinlaufenden Welle mit der am Schirm reflektierten rücklaufenden Welle entstehen.

Folgende Aufgaben sind auszuführen:

- a) Man messe den Verlauf der elektrischen Feldstärke (Ausschlag des Meßinstrumentes) am Empfänger als Funktion des Ortes.
- b) Wie groß ist der Abstand zweier Maxima bzw. Minima der stehenden Welle ?
Wie ergibt sich hieraus die Wellenlänge ?
- c) Man bestimme etwa, aus dem gemessenen Abstand zwischen 5 aufeinanderfolgenden Maxima, die Wellenlänge und die Frequenz.