DHBW
Duale Hochschule
Baden-Württemberg
Stuttgart

Studiengang Elektrotechnik

Labor Nachrichtentechnik

Versuch 4:

Antennen

Modul/Unit-Nr. N3002.2

Kurs-Nr. TEL….GR….

Name der/s Studierenden: .....

☐ Laborausarbeitung in Ordnung.

☐ Laborausarbeitung ungenügend.

Betreuer: …….

Ort/Datum: ..... Unterschrift: .....

1. Erläuterungen:

Antennen sind Bauelemente zum Abstrahlen (Sendeantenne) oder Aufnehmen (Empfangsantenne) von elektromagnetischen Wellen. In der Vierpoltheorie lassen sie sich als umkehrbare (reziproke) Schaltungsteile beschreiben; das bedeutet, daß sie beim Senden und Empfangen gleiche Eigenschaften zeigen.

Wellenausbreitung ist unter zwei notwendigen Bedingungen möglich:

1) Schwingungsfähige Elemente am festen Ort,
2) Kopplung dieser Elemente untereinander.

Beispiel Seilwelle: Schwingungsfähige, trägheitsbehaftete Masseelemente mit mechanischer Kopplung. Bei elektromagnetischen Wellen besteht das schwingungsfähige Element am festen Ort aus elektrischer und magnetischer Feldstärke ($\bar{E}$ und $\bar{H}$), die in Richtung und Betrag oszillieren können; die Kopplung zur Nachbarschaft geschieht gemäß den Maxwellschen Gesetzen:
Die Änderung des elektrischen Feldes ("Verschiebungsstrom") bewirkt in der Umgebung ein Magnetfeld (Durchflutungsgesetz); die Änderung des Magnetfeldes bewirkt in der Umgebung ein elektrisches Feld (Induktionsgesetz). Vergleiche dazu den Versuch "Ausbreitung elektromagnetischer Wellen".

Eine elektromagnetische Welle läßt sich also anregen durch eine oszillierende Änderung von $\bar{E}$ oder $\bar{H}$ oder $\bar{E}$ und $\bar{H}$ mit möglichst starker Kopplung zur Umgebung.

1.1 Der Dipol

1.1.1 Der Hertzsche Dipol

Als schwingungsfähige Schaltung bietet sich der Schwingungskreis an, der aber in den konzentrierten Bauelementen C und L die Felder $\bar{E}$ und $\bar{H}$ einschließt (Bild 1a).

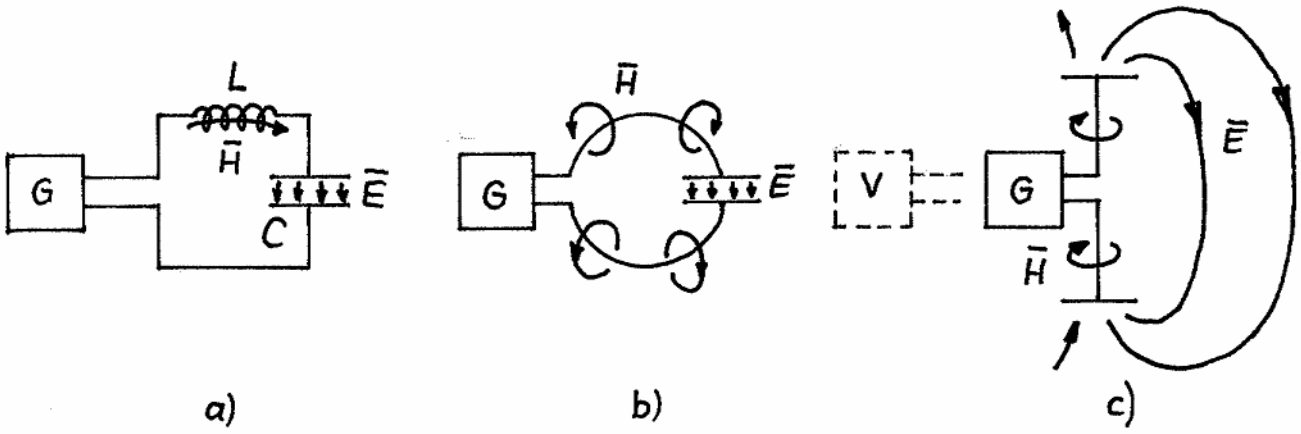
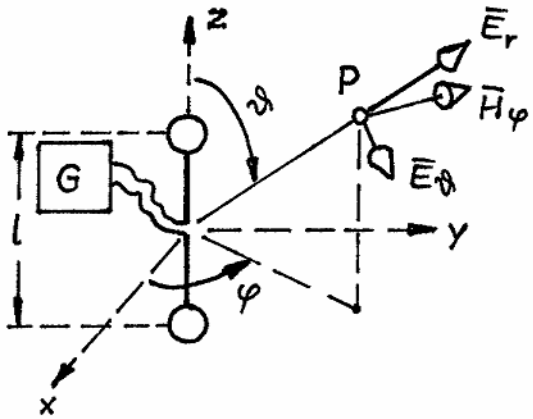


Bild 1: Antenne als Grenzfall des Schwingungskreises (Hertzscher Dipol)

Eine erste Öffnung erreicht Bild 1b durch die Reduktion der Spule auf 1 Windung, die eine magnetische Kopplung zur Umgebung ermöglicht; sie wird verstärkt durch das Öffnen des Kondensators in Bild 1 c, das die Anordnung des Hertzschen Dipols ergibt: Zwei Elektroden sind verbunden durch einen dünnen Leiter, der in der Mitte über einen Generator führt (Fall Senden) oder über einen Verbraucher (Fall Empfangen).

Eine Berechnung der Felder $\bar{E}$ und $\bar{H}$ am festen Ort führt beim wechselstromerregten Hertzschen Dipol auf die in Bild 2 skizzierten Ergebisse: Es zeigt sich - wie bei elektromagnetischen Wellen -,



$$\bar{H}_r = \bar{H}_\vartheta = \bar{E}_\varphi = 0$$

$$|\bar{E}_\vartheta| = f_1\left(\frac{1}{r}, \frac{1}{r^2}, \frac{1}{r^3}\right)$$

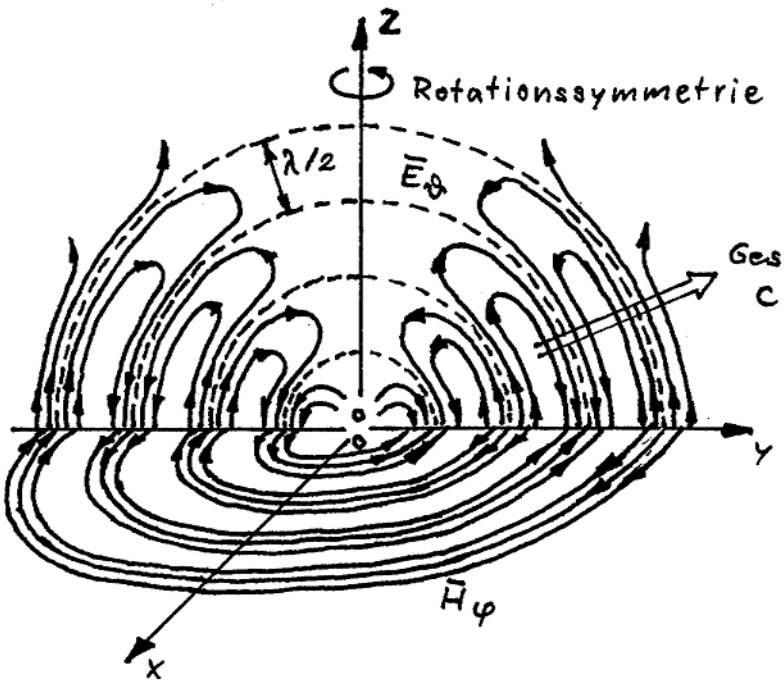
$$|\bar{E}_r| = f_2\left(\frac{1}{r^2}, \frac{1}{r^3}\right)$$

$$|\bar{H}_\varphi| = f_3\left(\frac{1}{r}, \frac{1}{r^2}\right)$$

(ohne Beweis)

keine Abhängigkeit von l !

Bild 2a



Im Fernfeld:
($r \gg \lambda$)

$\bar{E} \approx \bar{E}_\vartheta \approx f_4 \ (\frac{1}{r})$

$\bar{H} = \bar{H}_\varphi \approx f_5 \ (\frac{1}{r})$

Bild 2b

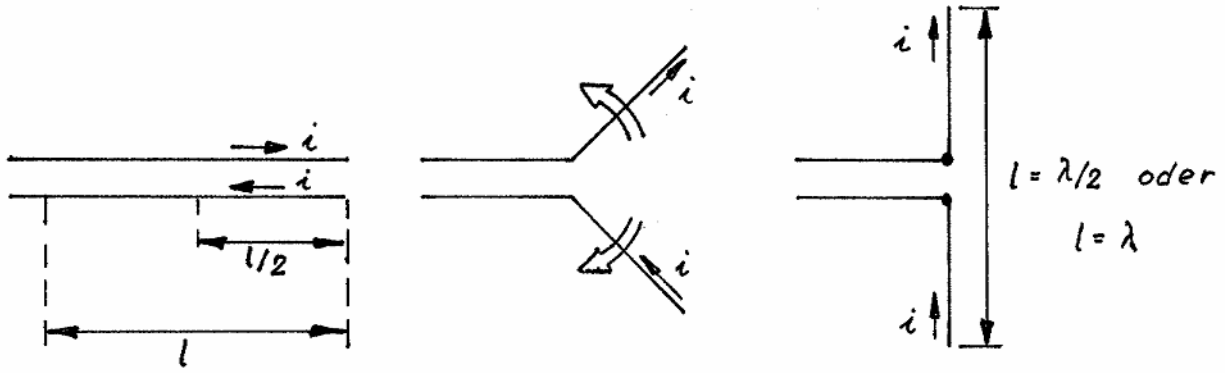
Bild 2: Feld des Hertzschen Dipols

daß $\bar{E}$ und $\bar{H}$ immer senkrecht zueinander stehen. Beide Felder sind rotationssymmetrisch zur z-Achse. Orientiert man sich an den Polarkoordinaten Entfernung r, "Azimut" φ und "Neigungswinkel" ϑ , so zeigt $\bar{H}$ nur eine Tangentialkomponente $\bar{H}_\varphi$, $\bar{E}$ eine Radialkomponente $\bar{E}_r$ und eine Tangentialkomponente $\bar{E}_\vartheta$. Alle Feldkomponenten setzen sich additiv aus mehreren Anteilen zusammen, die in unterschiedlichen Phasenlagen zueinander der Schwingung im Dipol folgen. Im sogenannten Fernfeld sind nur mehr die mit 1/r kleiner werdenden Anteile $\bar{E}_\vartheta$ und $\bar{H}_\varphi$ von Bedeutung, die phasengleich schwingen, aber räumlich um $\pi/2$ gegeneinander verdreht sind.

In der nächsten Umgebung des Dipols herrschen Verhältnisse wie beim Schwingungskreis (vgl. Bild 1c). "Spulen"-Strom im Leiter und "Kondensator"-Spannung zwischen den Elektroden wechseln sich ab. Mit ihnen wird Energie zwischen magnetischer und elektrischer Erscheinungsform hin und her geschoben. Dieser Energieanteil trägt nicht zur Abstrahlung bei. In dem Maß, in dem die elektromagnetische Kopplung zur Umgebung gelingt, entfernt sich ein anderer Anteil der Generatorenergie mit Lichtgeschwindigkeit. In der Momentaufnahme des Bildes 2b zeigt sich dann ein Feldlinienbild, das die periodische zeitliche Änderung der Feldstärken in die periodische räumliche Änderung mit der Wellenlänge $\lambda = c.f_o$ umgesetzt hat.

1.1.2 Der stabförmige Dipol

Verzichtet man auf die Elektroden an den Dipolenden, so entsteht aus dem Hertzschen Dipol der einfache, stabförmige Dipol. Die Eigenschaften beider sind verwandt, doch die Kopplung zur Umgebung ist jetzt stark abhängig von der Länge l des Doppelstabes.

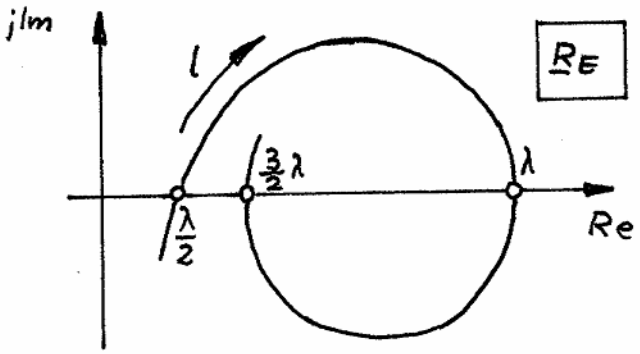


geringe Kopplung zur Umgebung starke Kopplung

Bild 3: Antenne als gespreizte Doppelleitung

Dies wird plausibel, wenn man sich die Dipolantenne aus einer gespreizten Doppelleitung entstanden denkt (vgl. Bild 3) und sich an die Strom- und Spannungsverteilung entlang der Leitung vom Ende her erinnert.

Gute Abstrahlung stellt sich ein bei l = λ/2



(ohne Beweis)

Bild 4: Ortskurve des Eingangswiderstands einer Stab-Dipolantenne in Abhängigkeit von der Dipollänge l

und bei $l = \lambda$. Dies sind gleichzeitig die Längen l, bei denen der Eingangsiwderstand $\underline{R}_E$ reell wird (vgl. Ortskurve in Bild 4). Beide Antennenarten unterscheiden sich vor allem im Eingangswiderstand R_E. Am häufigsten findet die Länge $l = \lambda/2$ mit $R_E \approx 70\,\Omega$ Verwendung.

Das Fernfeld des stabförmigen Dipols entspricht qualitativ dem des Hertzschen Dipols. $\bar{H}$ und $\bar{E}$ sind dort zueinander proportional, so daß es

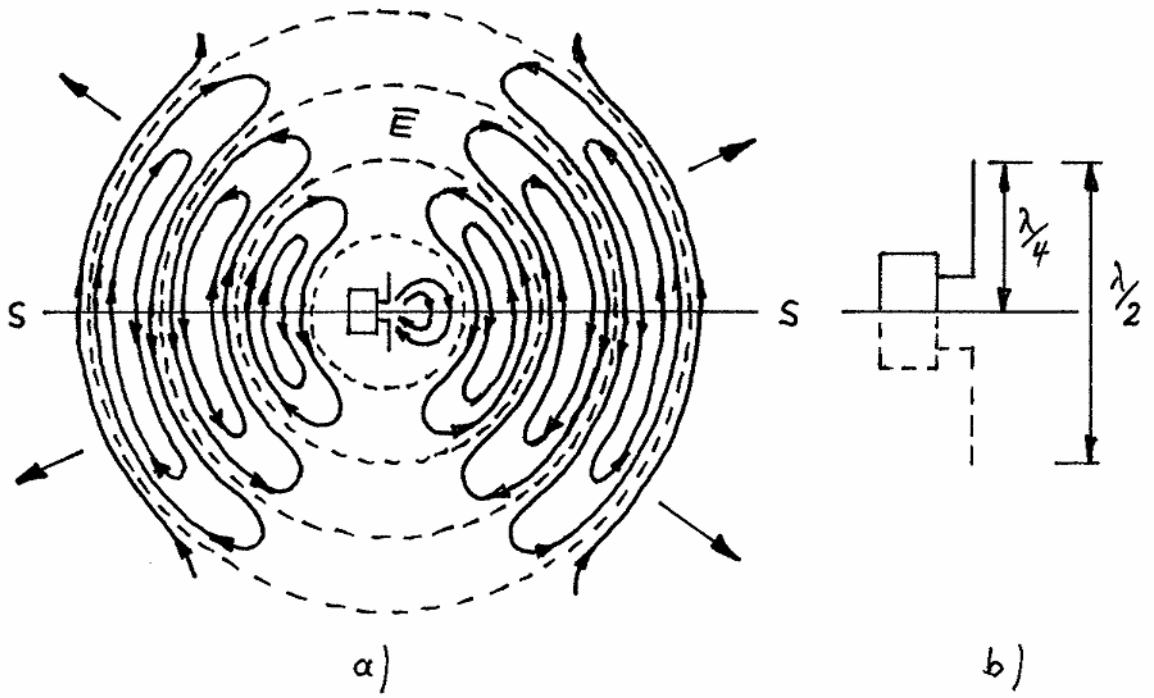


Bild 5: Elektrisches Dipolfeld

ausreicht, das elektrische Feld $\bar{E}$ zu betrachten. Bild 5a wiederholt das Feldbild für den senkrechten Dipol mit $l = \lambda/2$ im freien, ungestörten Raum. Dabei fällt auf, daß alle Feldlinien auf der Symmetrieebene S senkrecht stehen. Daher ändern sich das Bild und damit die Ausbreitungseigenschaften nicht, wenn man in S eine leitende Ebene einführt und als Antenne, wie im Bild 5b angedeutet, eine Stabantenne der Länge $l/2 = \lambda/4$ verwendet.

Die Übereinstimmung der Felder gilt nur bei ideal leitender Ebene. Diese Voraussetzung erfüllt die Erdoberfläche nur unvollkommen; abhängig von der Bodenbeschaffenheit dringt das Feld in den Untergrund ein und erleidet Verluste.

Aufgabe 1:

a) Auf einer leerlaufenden Doppelleitung seien stehende Wellen erregt. Welchen Verlauf nehmen die Schwingungsamplituden von Strom i und Spannung u entlang der Leitung, vom Leitungsende an rückwärts über eine Strecke von etwa einer Wellenlänge λ betrachtet ?

b) Nun werde die Leitung im Abstand $\lambda/4$ zu einem Stabdipol aufgespreizt, so daß $l = \lambda/2$ entsteht. Wie groß sind qualitativ Strom und Spannung und damit der Widerstand am Knickpunkt, dem Antenneneingang ?

c) Spreizt man die Leitung im Abstand $\lambda/2$ vom Ende auf, so entsteht ein Stabdipol mit $l = \lambda$. Wie groß ist jetzt im Vergleich zu b) der Eingangswiderstand der Antenne ?

Aufgabe 2:

Bild 4 zeigt für eine Dipollänge $l = \lambda/2$ einen reellen Antenneneingangswiderstand R_E. Wie ändert sich die Phasenlage des Antennenstromes gegenüber der erregenden Spannung bei $l < \lambda/2$ und bei $l > \lambda/2$?

Aufgabe 3:

a) Bei $\lambda/4$-Bodenantennen nach Bild 5b werden in der Umgebung häufig Gitternetze aus Kupfer ausgelegt. Warum ?

b) Antennen für hohe Frequenzen, d. h. für kleine Wellenlängen, werden häufig auf hohen Masten oder Türmen montiert.
Warum ? (2 Gründe)

1.2 Ergänzungen der Dipolantenne mit Richtwirkung

Senkrecht stehende Dipole empfangen oder strahlen im horizontalen Blickwinkelbereich (Azimut) gleichmäßig; sie sind Rundstrahler. Häufig wird jedoch eine Richtwirkung gewünscht, die durch Zusammenspiel von aktiven Dipolen oder durch Ergänzung von passiven Hilfsmitteln erreicht werden kann. Dabei ist die Vielfalt der Anordnungen sehr groß; bei ihrer Entwicklung spielen empirische Untersuchungen oft eine wichtige Rolle.

Mehrere aktive Dipole lassen sich als Quellen von Elementarwellen verwenden, die bei linearer oder flächenhafter Anordnung vielerlei Arten von Wellenfronten erzeugen können, wenn Amplitude und Phasenlage variiert werden.

Einfache Ergänzungen für Einzeldipole oder Dipolarrays sind metallische Spiegelflächen aller Art: eben, gewinkelt, paraboloidförmig.

Stabförmige, metallische Elemente lassen sich ebenfalls einsetzen (Bild 6). Sie werden vom Feld angeregt, schwingen wie Dipole mit und strahlen die empfangene Energie fast vollständig wieder ab. Dabei läßt sich die Phasenlage des Stroms im Stab und damit der ausgestrahlten Welle durch die Stablänge l beeinflussen: Nach Bild 4 erzeugt ein $l > \lambda/2$ Nacheilung, ein $l < \lambda/2$ Voreilung.

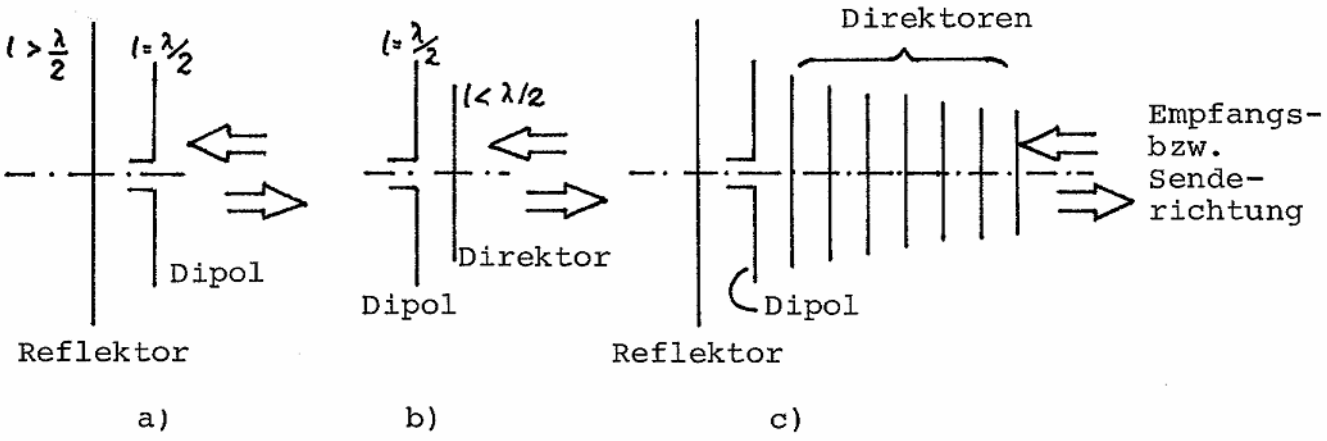


Bild 6: a) Reflektor, b) Direktor, c) Yagi - Antenne

Stäbe mit $l > \lambda/2$ haben in der Nähe des Dipols Reflektorwirkung: Durch geeignete Wahl von Abstand und Stablänge erzielt man für den Empfang aus Richtung Dipol ein Zusammenwirken von Reflektor und Dipol, für den Empfang aus Richtung Reflektor ein Gegeneinanderwirken.

Stäbe mit $l < \lambda/2$ haben in der Nähe des Dipols entgegengesetzte Wirkung ("Direktor"). Durch geeignete Wahl von Abstand und Stablänge wirken Direktor und Dipol zusammen bei Empfang aus Richtung Direktor, gegeneinander bei Empfang aus Richtung Dipol.

Mehrere Reflektoren und Direktoren erhöhen gemeinsam die Richtwirkung der Antenne (Beispiel: Yagi-Antenne für Fernsehempfang).

Dielektrisches Material verzögert die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Ein dielektrischer Keil vor einem Dipol (oder auch vor einer anderen Antenne) erzielt daher eine ähnliche Richtwirkung wie eine Anordnung von Direktoren (vgl. Bild 7).

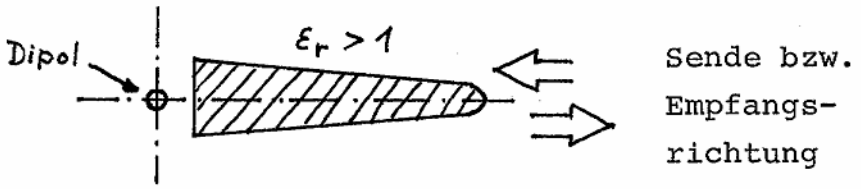
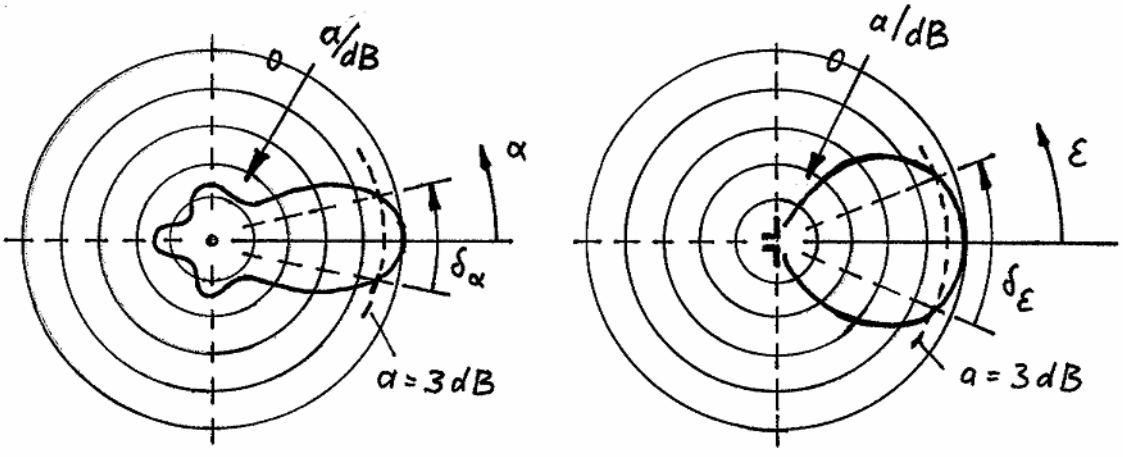


Bild 7: Dipol und dielektrischer Keil

1.3 Antennendiagramm, Antennengewinn und Halbwertsbreite

Richtantennen haben zwei wesentliche Eigenschaften:
1) Bevorzugung einer Sende- bzw. Empfangsrichtung.
2) Erhöhung der abgestrahlten bzw. empfangenen Leistung in der Vorzugsrichtung.

Die erste Eigenschaft zeigt sich im Antennendiagramm. Dabei wird in Abhängigkeit vom Raumwinkel bei sendender Antenne die Leistung der elektromagnetischen Welle in konstanter Entfernung zur Antenne gemessen. Die Zahlenangabe erfolgt in der Regel in dB, bezogen auf die maximale Leistung in der Vorzugsrichtung. Zur Darstellung der Meßergebisse



von oben gesehen
α = "Azimut"

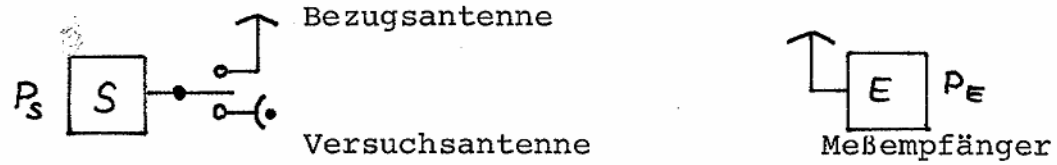
von der Seite gesehen
ε = "Elevation"

Bild 8: Antennendiagramm

wählt man in der Regel die horizontale Ebene mit horizontalem Blickwinkel α ("Azimut") und die vertikale Ebene mit vertikalem Blickwinkel ε ("Elevation").

Die Richtschärfe wird durch die Halbwersbreite (auch Öffnungswinkel) δ beschrieben, die dem Antennendiagramm entnommen wird (vgl. Bild 8). Sie ist definiert durch den Winkel, unter dem die Schnittpunkte der Antennenkeule mit dem 3-dB-Kreis (halbe Leistung !) erscheinen. Im allgemeinen ergeben sich unterschiedliche Werte in Azimut und Elevation.

Die zweite Eigenschaft wird durch den Antennengewinn G beschrieben. Seine Definition ist für die Sendeantenne in Bild 9a angegeben, für die Empfangsantenne in Bild 9b. Dabei ist zu beachten, daß wegen der Reziprozität der Antenne beide Meßarten bei störungsfreier Messung den gleichen Wert G erzielen.

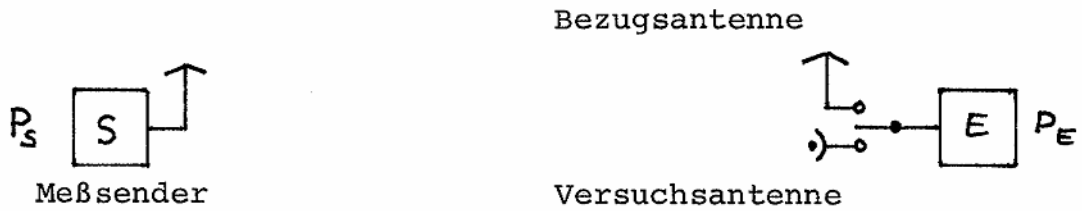


$$\text{Definition:} \quad G = \frac{P_{EV}}{P_{EB}}$$

P_{EB} : gemessene Empfangsleistung bei Verwendung einer Bezugsantenne

P_{EV}: gemessene Empfangsleistung bei Verwendung der Versuchsantenne

Bild 9a: Antennengewinn der Sendeantenne



$$\text{Definition:} \quad G = \frac{P_{SV}}{P_{SB}}$$

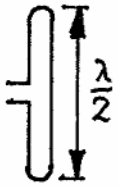
P_{SB}: Sendeleistung eines Meßsenders, der über eine Bezugsantenne im Empfänger eine Leistung P_E erzeugt.

P_{SV}: Sendeleistung eines Meßsenders, der über die Versuchsantenne im Empfänger die nämliche Leistung P_E erzeugt.

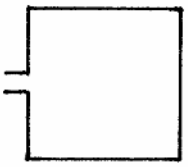
Bild 9b: Antennengewinn der Empfangsantenne

Als Bezugsantenne dient bei experimentellen Untersuchungen die Dipolantenne mit $l = \lambda/2$, bei theoretischen Untersuchungen die (nicht realisierbare) Kugelstrahlantenne. Die $\lambda/2$-Dipolantenne hat gegeyüber dem Kugelstrahler einen Antennengewinn von $G = 1{,}64 \mathrel{\hat{=}} 2{,}15$ dB, der Hertzsche Dipol $G = 1{,}5 \mathrel{\hat{=}} 1{,}76$ dB.

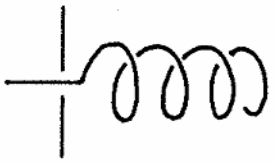
1.4 Andere Grundformen von Antennen



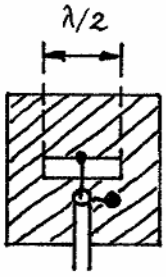
Faltdipol



Rahmen-antenne

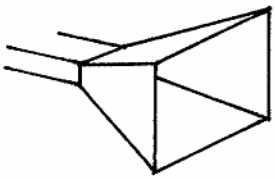


Wendelantenne mit Reflektor-platte

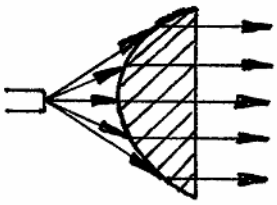


Schlitz-antenne

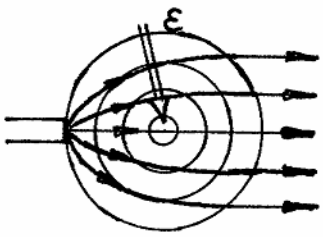
offener Hohlleiter



Hohlleiter mit Hornstrahler



Hohlleiter mit keramischer Sammellinse



Hohlleiter mit Luneberg-Linse

2. Prinzipieller Aufbau der Meßanordnung

Mit dem Antennenmeßplatz können die Richtwirkungen der wichtigsten Antennentypen, die für Rundfunk-, Fernseh- oder Richtfunkzwecke verwendet werden, meßtechnisch erfaßt werden.

Damit diese Messungen im Labor durchgeführt werden können, wird eine Betriebswellenlänge λ von etwa 3 cm benutzt. Alle Versuchsantennen sind deshalb sehr klein und leicht auswechselbar. Es können sowohl horizontale (Azimut) als auch vertikale (Elevation) Richtwirkungen untersucht werden.

Alle Ergebnisse sind auch für längere Wellen bei entsprechend vergrößerten Antennenabmessungen gültig.

Im Zentrum der Grundplatte (Antennenzentrum) befindet sich das Sendeantennensystem, welches über eine Drehkupplung und einen Hohlleiter an den Sender angeschlossen ist. Der Sender besteht aus einem Gunn-Oszillator mit einer Frequenz von 9,35 GHz (entsprechend 3,2 cm Wellenlänge), dem eine Modulatordiode nachgeschaltet ist. Das Signal wird durch eine Spannung mit einer Frequenz von etwa 1 kHz getastet. Die mittlere Ausgangsleistung ist etwa 5 mW. Die Versorgungsspanunng für den Oszillator ist -7 V, seine Stromaufnahme etwa 150 mA. Die Tastspannung für die Modulatordiode ist $\pm$ 1 V. Sämtliche Spannungen sind also ungefährlich.

An der einen Ecke der Grundplatte befindet sich die 8 mm lange Empfangsantenne, hinter der ein parabolischer Reflektor angeordnet ist. Diese Antenne dient zur Messung der Strahlungscharakteristik in der Ebene der Grundplatte, des Horizontaldiagramms. Sie ist an einen Hohlleiterresonator angekoppelt, der unter der Grundplatte befestigt ist. Eine Detektiordiode ist über eine Steckerfassung zugänglich. An der Diode wird die getastete Mikrowellenspannung demoduliert, und es entsteht, je nach Empfangsfeldstärke, eine Ausgangsspannung von 0 bis etwa 100 mV mit einer Frequenz von 1 kHz.

Eine zweite Empfangsantenne in Form eines offenen Hohlleiters kann mit einem Rohrbügel über der Grundplatte zwecks Messung der vertikalen Richtcharakteristik geschwenkt werden. Auch in diesem Hohlleiter ist eine Demodulationsdiode angeordnet. Wahlweise kann die eine oder andere Empfangsantenne an den Meßverstärker angeschlossen werden, der ein sinusförmiges Ausgangssignal von 1 kHz mit einer Amplitude von maximal 20 V oder eine entsprechende Gleichspannung als Ausgangsgröße von 10 V- liefert.

Bei dem Abschwächer des zugehörigen Verstärkers ist die quadratische Abhängigkeit der NF-Spannung vom hochfrequenten Eingangssignal bereits berücksichtigt. Steigert man durch entsprechenden Knopfdruck die Verstärkung um 10 dB, so kann man dadurch eine Abnahme der Empfangsfeldstärke um ebenfalls 10 dB kompensieren; die Anzeige bleibt unverändert. Die Verstärkung innerhalb des Verstärkers ist dabei jedoch um den Faktor 10 erhöht worden (nicht um 3,16, wie normalerweise 10 dB entspricht. Dies ist zu berücksichtigen, wenn mit anderen als dem zugehörigen Verstärker gearbeitet wird.

Am drehbaren Zentrum der Grundplatte können verschiedene Sendeantennen angebracht werden, um bestimmte Richtcharakteristiken zu erzeugen. Es empfiehlt sich, den Meßplatz nicht von reflektierenden Wänden, sondern möglichst frei im Labor aufzustellen, um Fehlmessungen infolge Reflexionen zu vermeiden. Der Bedienende und Zuschauer sollten möglichst hinter dem Parabolreflektor der Empfangsantenne stehen, da dann die geringsten Störreflexionen auftreten.

3. Meßaufgaben

3.1 Stabantenne ($^{l}/_{2} = \lambda/4$) über leitender Ebene

Messen Sie das Antennendiagramm in der Horizontalebene. Gibt es eine Richtcharakteristik ?

3.2 Zwei Stabantennen über leitender Ebene im Abstand $d = \lambda/2$

Messen Sie das horizontale Antennendiagramm bei

3.2.1 gleichphasiger Ansteuerung ($\varphi = 0$)
3.2.2 gegenphasiger Ansteuerung ($\varphi = 180°$)
3.2.3 Ansteuerung mit $\varphi = 90°$

Die Abstrahlrichtung der Zwei-Dipol-Antenne kann auf zwei Arten verändert werden. Welche sind das ?

3.3 Stabantenne über leitender Ebene mit Ergänzungen zur Richtwirkung

Messen Sie horizontale Antennendiagramme der folgenden Anordnungen:
3.3.1 Stabantenne mit Reflektorwand im Abstand $\lambda/4$
3.3.2 Stabantenne mit Reflektorwand im Abstand $\lambda/2$
3.3.3 Stabantenne mit Parabol-Reflektor
3.3.4 Stabantenne mit Reflektorstab
3.3.5 Stabantenne mit Reflektor und Direktor
3.3.6 Yagi-Antenne
3.3.7 Stabantenne und dielektrischer Keil

Wie groß ist die Halbwertsbreite (der Öffnungswinkel) δ der Yagiantenne ?

Wie groß ist der Antennengewinn der Yagiantenne im Vergleich zur Stabantenne und im Vergleich zum Kugelstrahler ?