

ingezeichnete sein, wenn die Antenne in ihrer Eigenschwingung schwingt: an der Spitze befindet sich ein Stromknoten, die Kurve der Stromverteilung ist eine Sinuskurve. Wird die Wellenlänge der Schwingung durch Spulen, die in der Nähe des Fußpunktes eingeschaltet sind, erheblich vergrößert, so ist von der Sinuskurve nur ihr oberer, nahezu geradliniger Teil auf dem Luftleiter vorhanden [31 a]. Bei Kegel- und Harfensendern ist die Kurve der Stromverteilung keine Sinuskurve, sondern besitzt ungefähr die Gestalt der in Fig. 191 stark gestrichelten Kurve.

Bei den Schirmantennen ist das Charakteristische, daß der Strom in den absteigenden Drähten nach unten fließt, wenn er in den vertikalen Drähten nach oben strömt. Im übrigen ist die Kurve der Stromverteilung in dem vertikalen Teil ungefähr von der Form der in Fig. 192 stark gestrichelten Kurve rechts, in den absteigenden Drähten von der Form der stark gestrichelten Kurve links*), und zwar annähernd unabhängig davon, ob die Schwingungen der Antenne ihre Eigenschwingungen sind oder ob ihre Wellenlänge durch Spulen vergrößert wurde.

d. Bei einem Vergleich der verschiedenen Antennen bezüglich der Fernwirkung kommt es bei vorgegebener Höhe an [25]:

1. auf die Frequenz (Wellenlänge) der Schwingung;
2. auf die Stromamplitude im Strombauch**);
3. auf die Stromverteilung und damit den Formfaktor.

Geringere Frequenz (größere Wellenlänge) wirkt bezüglich der Strahlung ungünstig, bezüglich der Fortpflanzung der Wellen [139 f] günstig.

Vorteilhaft ist der Einfluß einer großen wirksamen Kapazität durch die größere Stromamplitude im Strombauch**) und die für die Fernwirkung günstigere Stromverteilung. Vereinzelt steht hier allerdings die Schirmantenne; die Fläche, welche für die Fernwirkung maßgebend ist (in Fig. 192 schraffiert), fällt hier verhältnismäßig klein aus, da die Ströme in den absteigenden Drähten dem Strom im vertikalen Teil entgegenwirken.

§ 2. Die Erdung.

94. Erdverbindung und Gegengewicht. Einfluß auf die Stromverteilung.

Würde man eine Antenne, z. B. Einfachantenne, unten freie endigen lassen, so würde sich am unteren Ende ein Stromknoten befinden. Es würde dann zum mindesten mit Schwierigkeiten verknüpft sein, durch Ladung oder auch durch Koppelung mit einem Primär-

*) Letztere konstruiert in der 25 d angegebenen Art.

***) Bei vorgegebener Spannungsamplitude bzw. derselben Koppelung mit demselben Primärsystem.

kreis kräftige Schwingungen auf der Antenne zu erregen*). Außerdem würden die Bedingungen auch sonst wenig günstig werden. Um das zu vermeiden, sind folgende zwei Verfahren im Gebrauch:

1. die Erdverbindung,
2. das „Gegengewicht“, d. h. man schließt an das untere Ende ein Drahtnetz an, das isoliert von der Erde parallel zu derselben ausgespannt ist⁴⁹⁾.

a. Als Resultat der Erdverbindung wurde in 33 angegeben, daß durch sie an den Fuß der Antenne ein Strombauch verlegt wird, wenn die Erde ein „sehr gutes“ Leitvermögen hat. Es trifft dies bei den Wellenlängen der drahtlosen Telegraphie sehr annähernd zu, wenn die unmittelbare und weitere Umgebung des Fußpunktes der Antenne durch Seewasser oder sehr feuchten Boden gebildet wird. Es ist aber durchaus nicht richtig, wenn die Station auf sehr trockenem, z. B. sandigem Boden oder schlecht leitendem Gestein steht**) und Grundwasser nicht oder nur in großer Tiefe vorhanden ist. In diesem Falle wird der Strombauch bei den Eigenschwingungen der Antenne um so höher über dem Fußpunkt liegen, je schlechter das Leitvermögen des Bodens ist.

b. Die Wirkung des Gegengewichts auf die Stromverteilung in der Antenne ist von derjenigen der Erdverbindung nicht wesentlich verschieden, gleichgültig, wie der Boden beschaffen ist. Man hat drei Fälle zu unterscheiden:

1. der Boden ist sehr gut leitend;
2. die Oberfläche des Bodens ist sehr schlecht leitend, aber in geringer Tiefe darunter ist ein gut leitender Grundwasserspiegel vorhanden;
3. der Boden ist sehr schlecht leitend, Grundwasser nicht oder nur in sehr großer Tiefe vorhanden.

Man ist zu der Anschauung berechtigt, daß im ersten Fall das Gegengewicht zusammen mit dem gegenüberliegenden Teil der Erdoberfläche, im zweiten Fall das Gegengewicht zusammen mit dem gegenüberliegenden Teil des Grundwasserspiegels einen Kondensator von ziemlich beträchtlicher Kapazität bildet. Man kann also die Sache so ansehen, daß in die geerdete Antenne ein Kondensator von ziemlich großer Kapazität eingeschaltet ist. Durch das Einschalten eines solchen Kondensators wird aber die Stromverteilung entweder nicht geändert oder der Strombauch etwas höher gelegt [30].

*) Man müßte die Funkenstrecke [102 a] bzw. den Primärkreis [53 b] in ziemlicher Höhe über dem Erdboden anbringen.

***) Man braucht nur daran zu denken, daß in der Starkstromtechnik bis zu mehreren 100 Volt Spannung Marmor und Schiefer als gutes Isolationsmaterial gebraucht wird.

Der dritte Fall ist identisch mit dem in 29 besprochenen: an das Ende der Antenne wird ein isolierter Leiter von großer Kapazität angeschlossen.

c. Die technische Ausführung der Erdverbindung ist besonders einfach bei Schiffen, die fast ausschließlich aus Metall hergestellt sind. In den meisten Fällen genügt hier Anschluß an irgend einen Teil des Schiffskörpers. Bei Landstationen sind zwei Anordnungen üblich:

1. es wird eine Metallplatte oder -zylinder (z. B. von einem oder einigen wenigen Quadratmetern Fläche) in die Erde oder in das Grundwasser eingesenkt;

2. es wird ein sehr großes kreisförmiges oder quadratisches Drahtnetz auf oder in die Erde gelegt*).

Als Gegengewicht benutzt man bei festen, zum Teil auch bei beweglichen Stationen quadratische oder kreisförmige Drahtnetze oder strahlenförmig ausgehende Drähte, die auf Pfählen etwa $\frac{1}{2}$ —1 m über dem Boden isoliert befestigt sind. Bei tragbaren Stationen besteht zum Teil das Gegengewicht aus einem langen rechteckigen Streifen von Drahtnetz, das zusammengerollt mitgeführt und beim Gebrauch abgerollt und auf Pfählen befestigt wird.

95. Energieverbrauch durch die Erdströme¹⁵⁰⁾.

Das elektrische Feld in der Umgebung der Antenne verläuft nicht nur in der Luft, sondern zum Teil auch in der Erde. Infolge davon müssen dort Ströme entstehen, welche Energie verbrauchen. Allgemeine Angaben über die Größe dieses Energieverbrauchs zu machen, ist nicht möglich, weil dabei die Form der Antenne, die Frequenz der Schwingung und Beschaffenheit des Bodens eine ausschlaggebende Rolle spielen. Die Gesichtspunkte, die für die Beurteilung der Verhältnisse in erster Linie in Betracht kommen, sind wohl die folgenden.

a. In den Fig. 193—199**) sind eine Reihe von Fällen schematisch dargestellt unter der Annahme, daß am Fußpunkt der Antenne ein Strombauch vorhanden ist. Vergleicht man die Fälle, in denen ein Netz als Erdleitung oder als Gegengewicht verwendet wird, Fig. 195

*) Bei der Station Nauen besaß früher das kreisförmige Drahtnetz einen Durchmesser von 400 m; es war 0,25 m tief in die Erde eingepflügt.

**) Diese Figuren sind nicht auf Grund von genauen Rechnungen, sondern von allgemeinen Überlegungen gezeichnet worden und können deshalb keinen Anspruch auf vollkommene Richtigkeit machen. — Für einige Fälle sind von H. Truе¹⁵⁰⁾ Versuche über den Verlauf der Stromlinien im Erdboden gemacht worden. Bei sehr schlecht leitendem Boden können die elektrischen Induktionslinien unmittelbar oberhalb der Erdoberfläche schief zu derselben verlaufen [139 e].

und 197 einerseits, Fig. 196 und 198 andererseits, so sieht man, daß es für den Verlauf der Stromlinien keinen qualitativen Unterschied ausmacht, ob man das Netz als Erdleitung oder als Gegengewicht benutzt*).

Beide Fälle stehen aber in ausgesprochenem Gegensatz zu dem Fall der Erdung durch eine Metallplatte (Fig. 193 und 194). Hier verlaufen alle elektrischen Induktionslinien von der Antenne zur Erde und geben also sämtlich Anlaß zu Stromlinien im Erdboden. Bei den Netzen dagegen verläuft ein großer Teil der Induktionslinien zwischen Antenne und Netz ganz oder fast ausschließlich in Luft ohne jeden Energieverbrauch**). Nur derjenige Teil der Induktionslinien, der außerhalb des Netzes die Erde trifft, ruft Stromlinien im Boden hervor. In dieser Beziehung sind die Netze bei weitem günstiger als eine Erdleitung durch eine verhältnismäßig kleine Metallplatte, und zwar um so mehr, je größer die Ausdehnung des Netzes ist.

Ganz besonders günstig liegen die Verhältnisse in dieser Hinsicht bei den Schirmantennen (Fig. 199). Wenn man hier das Netz so groß macht, daß es über die Endpunkte der absteigenden

*) Quantitative Unterschiede sind aber vorhanden.

**) Wenn von den Strömen im Netz und bei geerdetem Netz (Fig. 195) von den Strömen zwischen Netz und Erdoberfläche und der dadurch entwickelten Wärme abgesehen wird.

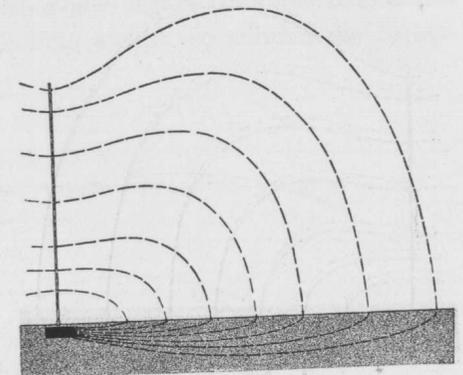


Fig. 193.

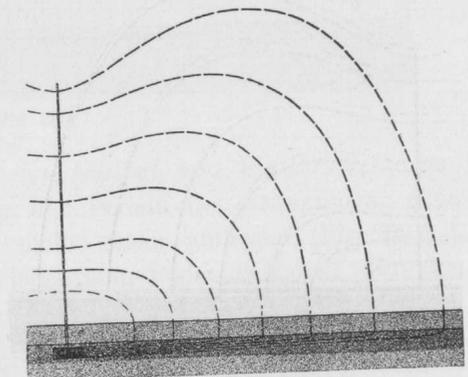


Fig. 194.

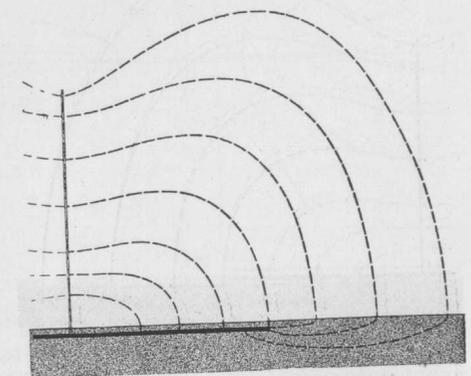


Fig. 195.

Drähte noch ziemlich weit hinausragt, so werden fast alle Induktionslinien zwischen Antenne und Netz, nur verhältnismäßig sehr wenige zwischen Antenne und dem Boden außerhalb des Netzes verlaufen.

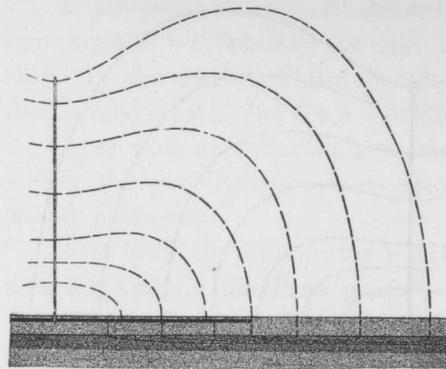


Fig. 196.

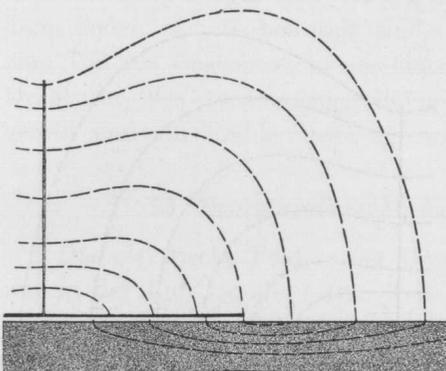


Fig. 197.

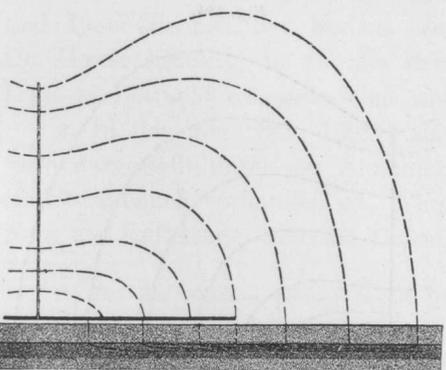


Fig. 198.

b. In den Fig. 193, 195 und 197 ist angenommen, daß der Boden homogen und von schlechtem Leitvermögen*), in den Fig. 194, 196 und 198 dagegen, daß eine verhältnismäßig gut leitende Grundwasserschicht in geringer Tiefe unter einer schlecht leitenden Oberflächenschicht vorhanden ist. Der Unterschied ist hauptsächlich der, daß die Stromlinien den größten Teil ihres Weges in der gut leitenden Grundwasserschicht, nur einen verhältnismäßig kleinen Teil in der schlecht leitenden Oberflächenschicht zurücklegen. Bei der Erdung durch eine verhältnismäßig kleine Metallplatte ist aber wesentlich, daß dieselbe wirklich bis zum Grundwasserspiegel versenkt wird (Fig. 194).

c. Wichtig ist es, daß die Stromlinien an keiner Stelle auf einen sehr engen Raum zusammengedrängt werden. Damit ist stets ein verhältnismäßig großer Energieverbrauch verbunden.

Nimmt man z. B. an, daß die Antenne durch einen einfachen vertikalen Draht geerdet ist, so würde das Stromfeld an demselben von oben gesehen die Gestalt von Fig. 200 haben. Ersetzt man den Erddraht, so wie es tatsächlich geschieht, durch eine

*) Das heißt: Grundwasser nicht oder nur in sehr großer Tiefe vorhanden.

Metallplatte, so nimmt das Stromfeld ungefähr die bei weitem günstigere Form von Fig. 201 an.

Wenn man das Erdnetz auf den Boden legt, so daß alle Drähte mit dem Erdboden in leitender Verbindung stehen, so würden die Strom-

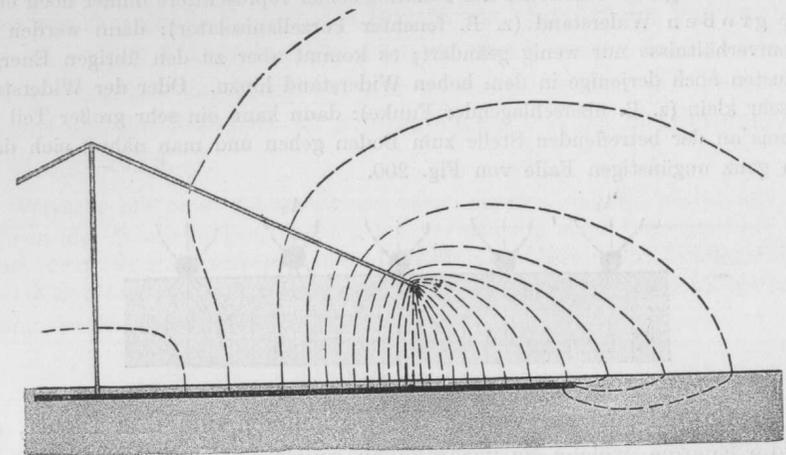


Fig. 199.

linien im Querschnitt ungefähr den Verlauf von Fig. 202 A₁ zeigen. Nicht wesentlich geändert würde der Verlauf der Stromlinien, wenn einzelne Teile auf dem Boden nicht genau aufliegen (Fig. 202 A₂), sondern sich nur in sehr großer Nähe vom Boden befinden. Für den

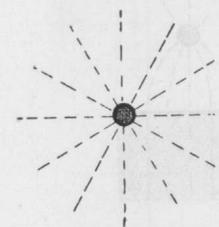


Fig. 200.

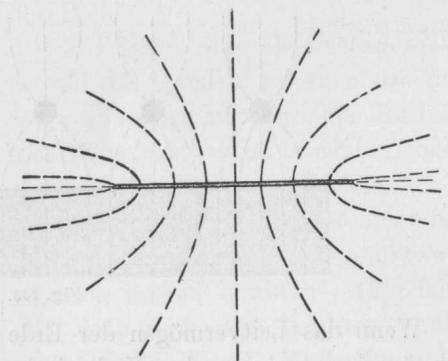


Fig. 201.

Fall, daß das Netz nicht als Erdleitung, sondern als Gegengewicht verwendet wird, ist in Fig. 203 der ungefähre Verlauf der elektrischen Induktionslinien und Stromlinien dargestellt. Er ist entschieden günstiger: die Strömung im Erdboden erfolgt ungefähr so, wie wenn das Netz durch ein überall mit dem Boden leitend verbundenes Blech

gleicher Größe ersetzt wäre. Ein Zusammendrängen der Stromlinien findet nirgends statt.

Wesentlich ist dabei aber, daß das Netz wirklich vom Boden isoliert ist. Ist an irgendeiner bestimmten Stelle ein Isolationsfehler vorhanden, so sind zwei Fälle möglich. Entweder der Isolationsfehler repräsentiert immer noch einen sehr großen Widerstand (z. B. feuchter Porzellanisolator): dann werden die Stromverhältnisse nur wenig geändert; es kommt aber zu den übrigen Energieverlusten noch derjenige in dem hohen Widerstand hinzu. Oder der Widerstand ist sehr klein (z. B. überschlagender Funke): dann kann ein sehr großer Teil des Stroms an der betreffenden Stelle zum Boden gehen und man nähert sich dann dem ganz ungünstigen Falle von Fig. 200.

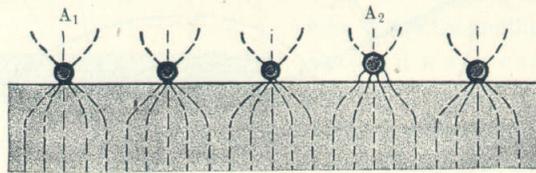


Fig. 202.

d. Sowohl für den Verlauf der Stromlinien und ihre Dichte, als für die Energie, welche sie verbrauchen, spielt das Leitvermögen des Erdbodens eine wichtige Rolle. Es existiert im allgemeinen immer ein kritischer Wert des Leitvermögens, der bei vorgegebener Antennenform und Frequenz einen maximalen Energieverlust ergibt. Ist das Leitvermögen besser oder auch schlechter als dieser kritische Wert, so ist der Energieverbrauch geringer.

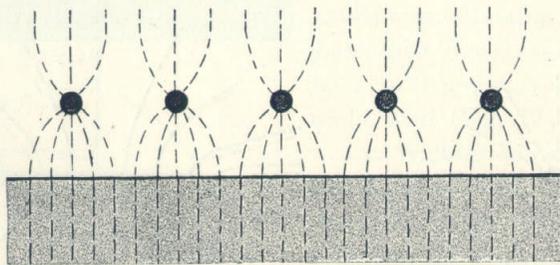


Fig. 203.

Wenn das Leitvermögen der Erde z. B. durch Witterungseinflüsse sich ändert, kann der Verlauf der Stromlinien in der Erde, die Dämpfung und unter Umständen auch die Frequenz der Schwingung eine Änderung erfahren. Die Erde stellt also ein variables Element in der ganzen Anordnung dar, und zwar gleichgültig, ob es sich um eigentliche Erdung oder Gegengewicht handelt. Nur wo die Erde immer ein sehr gutes Leitvermögen besitzt (Seewasser, sehr nasser Boden), wird ein Einfluß der Witterung unmerklich sein.

e. Führt man einen äquivalenten Widerstand \mathfrak{R}_e ein durch die Bedingung, daß $\mathfrak{R}_e J^2_{\text{eff}}$ der sekundliche Energieverbrauch durch die Erdströme ist, wenn J den Strom am Fußpunkte der Antenne bedeutet, so ist nach **a** und **b** ohne weiteres klar, daß dieser „Erdwiderstand“ \mathfrak{R}_e außer von der Beschaffenheit des Bodens und der Art der Erdung von allen denjenigen Faktoren abhängen muß, durch welche das elektrische Feld in der Erde bestimmt ist, also insbesondere von der Form der Antenne und der Frequenz der Schwingungen. — Über die Bestimmung von \mathfrak{R}_e vgl. **100 d**.

Versuche mit einer Schirmantenne haben gezeigt, daß \mathfrak{R}_e wächst mit der Frequenz der Schwingungen, dagegen bei Verwendung eines Gegengewichts abnimmt, wenn die Höhe desselben über der Erde vergrößert wird. In allen Fällen war der Erdwiderstand bei Verwendung eines Gegengewichts kleiner als bei einer Erdung der Form Fig. 193 (H. True¹⁵⁰).

96. Ungeerdete Antennen für Luftschiffe¹⁵¹).

a. Für Luftschiffe, bei denen jede Form der Erdung ausgeschlossen ist, sind unter anderen folgende Antennenformen versucht worden:

1. Die Antenne, ein aus der Gondel heraushängender Draht, als Gegengewicht die Gondel mit ihren Metallteilen (Motoren), davon isoliert der Ballon.

2. Ebenso, aber als Gegengewicht sowohl die Gondel, als auch das damit verbundene Metallgerippe des Ballons (Zepplinluftschiff) oder eine leitende Hülle des Ballons.

3. Die Antenne besteht aus einer Art Lecher'schen Systems mit zwei ungleich langen Drähten*) (Fig. 204) (H. Beggerow): der eine Draht ($a_1 b_1$) wird z. B. $= \frac{1}{4}$ Wellenlänge der Schwingungen, der andere $a_2 D = \frac{3}{4}$ Wellenlängen gemacht. Die Schwin-

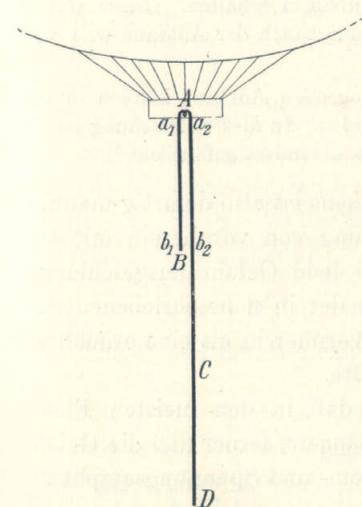


Fig. 204.

gungen werden bei A in der Gondel erregt, bei A und C sind Spannungsknoten (vgl. **72 c 2** und **24 a**). Für die Strahlung kommt nur der Teil

*) Die durch isolierende Stücke in demselben Abstand voneinander gehalten werden.