

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 27 (1936)
Heft: 26

Artikel: Ueber die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen
Autor: Zickendraht, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061535>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

len gleich 0,02 s unterbrochen, was eine dreiphasige Abschaltleistung von 620 MVA ergibt. In derselben Zeit wurde an einem 100-kV-Schalter gleicher Bauart nach dem Oszillogramm Fig. 44 der Strom von 3400 A bei 110 kV unterbrochen, entsprechend 750 MVA Abschaltleistung.

Trotz der Konkurrenz der gezeigten neuen Schalterarten haben sich die *normalen Oelschalter* immer noch behaupten können. Es ist dies darauf zurückzuführen, dass, solange keine grossen Oelstrecken und Oelmengen für die Isolation nötig sind, speziell die Bauart, wo die drei Phasen in einem Kessel untergebracht sind, immer noch den billigsten Schalter mit kleinstem Raumbedarf ergibt. Bis zu ca. 30 000 V treffen diese Verhältnisse zu und es werden daher überall da, wo nur wenige Schalter nötig und allfällige Oelbrände lokalisiert sind, immer noch Oelschalter eingebaut. Dadurch, dass die Oelschalter in einer Hochleistungsanlage geprüft werden, ist das verbleibende Risiko einer Störung durch das Oel nur äusserst gering. Auch die normalen Oelschalter haben durch die Ergebnisse in den Kurzschlussprüfanlagen verschiedene Verbesserungen erfahren. In erster Linie wurden Ausschalt- und Einschaltgeschwindigkeit auf das Mehrfache

erhöht und die Abstände im Oel auf das Minimum reduziert, so dass die Eigenblasung des Stromes früh wirksam wird. Es kann füglich behauptet werden, dass der kleinste Schalter, der die vorgeschriebene Isolation noch besitzt, am besten schaltet. Die Kessel sind von kreisrundem Querschnitt, die Böden gewölbt und die Isolation durch vertikale Flächen stets gewährleistet. Die hohen Einschaltströme werden allgemein durch adynamische Fingerkontakte bemeistert, da die Hochleistungsversuche die Nachteile der Sonderausführungen von Tastkontakten gezeigt haben, welche die Ausschaltung hemmen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Gebiet der Höchstspannungen der Druckluftschalter und der ölarme Schalter einen scharfen Kampf auszufechten haben, während bei den tieferen und mittleren Spannungen die drei Schalterarten: Druckluftschalter, Wasserschalter und Oelschalter je nach den örtlichen, technischen und finanziellen Bedingungen zur Anwendung gelangen werden. Jedenfalls wird in den nächsten Jahren eine der Hauptaufgaben der Werksleiter die Anpassung der Schalter an die heute in ihren Netzen vorhandenen Kurzschlussleistungen sein und der Ersatz veralteter Konstruktionen durch solche, die sich in der Hochleistungsanlage ausgewiesen haben.

Ueber die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen.

Vortrag, gehalten an der Hochfrequenztagung des SEV vom 9. Mai 1936 in Yverdon¹⁾,
von Prof. Dr. H. Zickendraht, Universität Basel.

621.396.11

Es wird auf die verwickelte Natur des Problems der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen über einem Erdboden von gegebener Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante in einer inhomogenen, von hochionisierten Regionen durchsetzten Atmosphäre hingewiesen. Das Feld zerfällt in Nahfeld, Zwischenfeld und Fernfeld. Die Strahlungscharakteristiken einfacher Antennengebilde lassen sich unter vereinfachenden Annahmen berechnen, bei welcher Gelegenheit man zur Theorie der Strahlwerfer und der schwundmindernden Antennen gelangt.

L'auteur expose la nature compliquée du problème de la propagation des ondes électromagnétiques au-dessus d'un sol de conductibilité et de constante diélectrique données, dans une atmosphère inhomogène parsemée de régions fortement ionisées. Le champ se décompose en champ rapproché, champ intermédiaire et champ éloigné. Les caractéristiques de rayonnement des antennes de formes simples peuvent se calculer à partir d'hypothèses simplifiées, ce qui conduit à la théorie des réflecteurs et des antennes «anti-fading».

Das Problem der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, die sich von einer Antenne auf unvollkommen leitendem Boden abgestrahlt, in einem elektrisch inhomogenem Medium fortpflanzen, teilt das Schicksal der meisten Aufgaben angewandter Wissenschaft: Mit wachsender Erkenntnis der wirklichen Verhältnisse wachsen auch die Schwierigkeiten der exakten Behandlung. Das vorliegende Referat soll in kurzen Zügen auf die komplexe Natur des Gesamtproblems hinweisen.

Es sei eine *Antenne* mit bestimmter Stromverteilung betrachtet. Ihr unteres Ende ist geerdet, wobei man versucht, durch eingepflügte Metallmassen die meist sehr unvollkommene elektrische Leitfähigkeit des Erdbodens wenigstens unter dem Strahlensystem auszugleichen. Elektromagnetische Energie

löst sich von der Antenne ab und strahlt in den umgebenden Raum hinaus. Dabei ist es von vorneherein wichtig, drei Gebiete des bestrahlten Raumes zu unterscheiden: Im *Nahfeld* gilt für den Vektor des elektrischen Feldes \mathcal{E} das Coulombsche Gesetz, für den magnetischen Vektor \mathcal{H} das Gesetz von Laplace-Biot-Savart. Ausserdem sind \mathcal{E} und \mathcal{H} hier nicht in Phase. Dieses Nahfeld ist nun aber auf die unmittelbare Umgebung der Antenne beschränkt, da sein Bereich sich nur auf Bruchteile der ausgestrahlten Wellenlänge erstreckt. Im *Fernfeld* hingegen befindet man sich viele Wellenlängen weit vom Sender entfernt und stellt fest, dass elektrisches und magnetisches Feld räumlich aufeinander senkrecht stehen, gleiche Grösse haben und konphas schwingen. Hier nähmen die Felder, wären nicht absorbierende Einflüsse in Erdboden und Luftraum vorhanden, umgekehrt proportional der Entfernung ab. Zwischen *Nahfeld* und *Fernfeld* liegt verbindend das *Zwischenfeld*; seine mathema-

¹⁾ Vgl. den kurzen Bericht über die Veranstaltung im Bull. SEV 1936, Nr. 11, S. 312. Aus technischen Gründen musste die Veröffentlichung der Vorträge bis heute verschoben werden.

tisch formulierbaren Gesetze liefern einen kontinuierlichen Uebergang zwischen Nahe- und Fernzone²⁾.

Bedenkt man nun, dass sich jede praktisch verwendete Antenne auf oder über einem relativ schlecht leitenden Erdboden, dazu noch in einer Atmosphäre kompliziert verteilter elektrischer Leitfähigkeit befindet, so ist es klar, dass die tatsächlich vorliegenden Ausbreitungsverhältnisse elektromagnetischer Wellen meist stark von dem Bilde abweichen, das sich der Theoretiker auf Grund einer Integration der Maxwell'schen Gleichungen nach der klassischen Hertz'schen Methode zu schaffen vermag.

Bekanntlich strahlt ein gleichmässig mit sinusförmigem Wechselstrom i belegtes gerades *Stromelement* Δl senkrecht zu seiner Axe maximal, in seiner eigenen Richtung überhaupt nicht, wobei eine Strahlungscharakteristik nach Fig. 1, im Raume

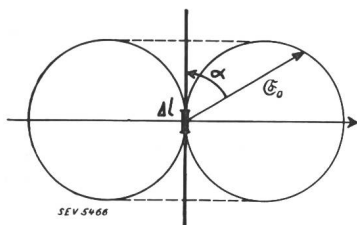


Fig. 1.
Strahlungscharakteristik eines geraden Stromelementes.

also ein rotationssymmetrischer Torus von kreisförmigem Querschnitt entsteht. Es gilt für das elektrische Maximalfeld die einfache Beziehung³⁾:

$$E_0 = \frac{2 \pi \Delta l i_0}{r \cdot \lambda} \sin \alpha$$

Etwas komplizierter wird die Charakteristik, sobald man eine Antenne mit sinusoidal auf ihr verteilter Strombelegung, also einen gewöhnlichen Dipol betrachtet. Nach *Van der Pol* erhält man in der Fernzone, d. h. in der Entfernung r für das elektrische Maximalfeld den Ausdruck:

$$E_0 = \frac{60 i_0}{r} \cdot \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2} \cos \alpha \right]}{\sin \alpha} \text{ V/cm}$$

Hängt man nun so, wie es Franklin von der Marconi-Company wohl als erster getan, p solcher Dipole senkrecht übereinander auf und denkt man die störende Erde zunächst ganz weg, so entsteht ein System mit rotationssymmetrischer Charakteristik vom Querschnitte folgender Form (Fig. 2):

$$E_0 = \frac{60 i_0}{r} \cdot \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2} \cos \alpha \right]}{\sin \alpha} \cdot \left[\frac{\sin \frac{p \pi}{2} \cos \alpha}{\sin \frac{\pi}{2} \cos \alpha} \right]$$

Der erste Term der Gleichung stellt die Dipolcharakteristik, der zweite die «Reihencharakteri-

²⁾ H. Zickendraht, Helvetica Physica Acta. V. 3 (1931).

³⁾ E. Siegel und J. Labus, Ztschr. f. Hochfrequenztechnik. 39. 86. (1932).

stik» der Dipole dar. Vier Dipole übereinander ergeben schon eine ausgesprochene Richtwirkung senkrecht zur Axe, allerdings mit einem kleinen Nebenmaximum, das einer schief nach oben gerichteten Strahlung entspricht.

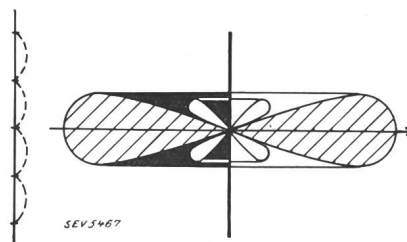


Fig. 2.
Strahlungscharakteristik von p übereinander angeordnete Dipolen.

Anders liegen nun die Verhältnisse, wenn man eine freie Antenne in der zweiten Harmonischen schwingen lässt. (Die erste Harmonische ist bekanntlich identisch mit der Grundschwingung.) Dann wird weder in Richtung der Antenne, noch senkrecht zu ihr Energie abgestrahlt; das Maximum der Strahlung weist vielmehr nach oben oder unten unter 55,5 Grad zur Antennenaxe, steht also schief zur Senkrechten. In Fig. 3 ist der Querschnitt der so entstehenden räumlichen Strahlungscharakteristik dargestellt.

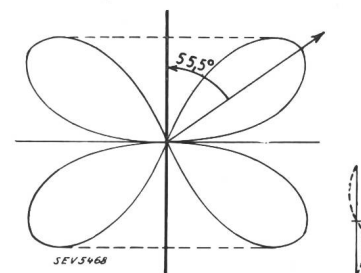


Fig. 3.
Strahlungscharakteristik einer freien, in der zweiten Harmonischen schwingenden Antenne.

Bei den bekannten englischen oder deutschen *Strahlwerfern*, die z. B. in der Völkerbundsstation in Prangins Verwendung finden, sind vertikale oder horizontale Dipole zu strahlenden Flächen vereinigt. Zur Reihencharakteristik fügt sich dann noch die *Gruppencharakteristik*, von der der Vollständigkeit halber ein Beispiel gegeben sei: q in Abständen von je $\lambda/4$ einander parallel angeordnete Dipole

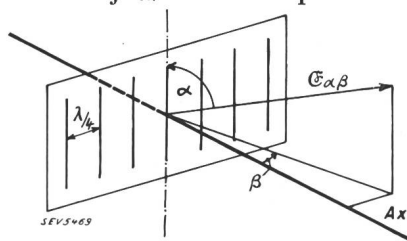


Fig. 4.
Strahlwerfer mit q parallelen Dipolen, in einem Abstand von je $\lambda/4$.

gemäss Fig. 4 geben in der Fernzone folgende, nun nicht mehr rotationssymmetrische räumliche Charakteristik:

$$E_{\alpha\beta} = \frac{60 i_0}{r} \cdot \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2} \cos \alpha \right]}{\sin \alpha} \cdot \left[\frac{\sin \left[\frac{q \pi}{2} \sin \alpha \sin \beta \right]}{\sin \left[\frac{\pi}{2} \sin \alpha \sin \beta \right]} \right]$$

Der erste Term gibt die Dipol-, der zweite aber die *Gruppencharakteristik* wieder. Aus Dipol-, Reihen-

und Gruppencharakteristik zusammen gewinnt man die Charakteristik einer aus $p \cdot q$ Dipolen zusammengesetzten Strahlwerferfläche:

$$\mathcal{E}_{\alpha\beta} = \frac{60 i_0}{r} \cdot \frac{\sin \left[\frac{\pi}{2} \cos \alpha \right]}{\sin \alpha} \cdot \frac{\sin \left[\frac{p \pi}{2} \cos \alpha \right]}{\sin \left[\frac{\pi}{2} \cos \alpha \right]} \cdot \frac{\sin \left[\frac{q \pi}{2} \sin \alpha \sin \beta \right]}{\sin \left[\frac{\pi}{2} \sin \alpha \sin \beta \right]}$$

Die Feldstärke in der Axe ist im Fernfelde:

$$\mathcal{E}_{Axe} = p \cdot q \frac{60 i_0}{r}$$

Die Öffnung des Hauptstrahlungskegels in der Vertikalebene:

$$2 \varphi = 2 \cdot \arcsin \frac{2}{p}$$

in der Horizontalebene:

$$2 \psi = 2 \cdot \arcsin \frac{2}{q}$$

Je grösser also p und q , um so schärfer ist die Bündelung des Strahlwerfers.

Alle diese Ergebnisse gelten aber nur entweder im freien, nicht elektrisch leitenden Raume, fern von jeder leitfähigen Erde oder aber, wenn eine vollkommen leitend gedachte Erde unsere Modelle als Hauptsymmetrieebene halbiert. Solches aber entspricht nicht den tatsächlich vorliegenden Verhältnissen, weshalb nun versucht werden soll, die Theorie der Wirklichkeit anzupassen.

Praktisch verwendete Antennen pflegen auf dem Erdboden oder über Meerwasser zu stehen. Nur die Antennen der Luftfahrzeuge sind einigermaßen weit vom Erdboden entfernt; trotzdem erreichen auch deren Wellen bald die elektrisch unvollkommen leitende Erde. Hier ist nun zu bedenken, dass zwei Grössen, die *Dielektrizitätskonstante* ϵ und die *spezifische Leitfähigkeit* κ von Erde oder Meerwasser von ausschlaggebender Bedeutung sind. Neue Messungen haben einwandfrei die Abhängigkeit beider Grössen von der ausgestrahlten Wellenlänge ergeben. So steigt insbesondere das Leitvermögen des Erdbodens mit wachsender Frequenz zunächst ziemlich stark, später langsamer, bei ganz kurzen Wellen unter 10 Meter aber ganz unerwartet rasch an. Die Dielektrizitätskonstante dagegen weist bedeutend geringere Frequenzabhängigkeit auf.

Die räumliche Charakteristik eines Dipols, der im Abstände von $\lambda/4$ über einer leitfähigen Ebene (Erde) steht, bietet zwei ganz verschiedene Bilder, je nachdem die Erde als unendlich gut leitend oder als unvollkommen leitfähig gedacht wird. Fig. 5, nach einer schönen Arbeit von *M. J. O. Strutt*⁴⁾ gezeichnet, zeigt derartige Verhältnisse. Im Falle einer schlecht leitenden Erde von der Dielektrizitätskonstante 4 erhält man statt der horizontal gerichteten Strahlung eine schräg nach oben gerichtete Strahlungscharakteristik, bei der die Linien

gleicher Feldstärke als eigentümliche Schleifen teils dem Erdboden entlang, teils in der Höhe umkehrend verlaufen. Bekanntlich verwendet man solche

Antennen bei gewissen Blindlande-Verfahren der Luftfahrt, wobei ein Flugzeug längs einer Linie konstanter Feldstärke fliegend aus der Höhe dem Boden zugeführt wird.

Schief zur Erdoberfläche empor gerichtete Strahlungen durchheilen die Atmosphäre und geraten so in die seit *Heavisides* und *Kennellys* berühmt gewordenen Vermutungen experimentell erforschten wichtigen Gebiete der *Ionosphäre*. Messungen zahlreicher Autoren, unter denen vor allem der Engländer *E. V. Appleton* und die Amerikaner *Breit* und *Tuве* hervorgehoben seien, haben wertvolle Aufschlüsse über den Ionisationszustand in jener

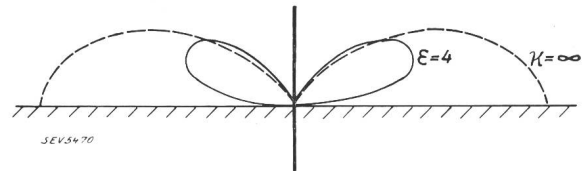


Fig. 5.
Strahlungscharakteristik eines Dipols, $\lambda/4$ über einer leitfähigen Ebene (Erde),
1. für eine Dielektrizitätskonstante von 4 und
2. für eine ∞ leitfähige Erde.

Höhe gegeben. In rund 100 Kilometer Höhe findet man 1 bis $2 \cdot 10^5$ Elektronen im cm^3 , in rund 275 Kilometer Höhe 6 bis $8 \cdot 10^5$ Elektronen im cm^3 vor, ein Zustand, der der Atmosphäre eine so hohe elektrische Leitfähigkeit, gleichzeitig aber unter Umständen Werte der Dielektrizitätskonstanten verleihen kann, die unter die Einheit herabsinken. *D. R. Hartree* modifizierte 1929 die bekannte Eccles-Salpetersche Gleichung für die Dielektrizitätskonstante eines ionisierten Mediums in Abhängigkeit von der Ionenzahl N beim Verhältnis Ladung zu Masse e/m und der Kreisfrequenz ω und fand

$$\epsilon = \nu^2 = 1 - \frac{4 \pi N e^2}{m \omega^2 + \frac{4}{3} \pi N e^2}$$

Wird hier der zweite Term bei bestimmter kritischer Ionen-(bzw. Elektronen-)zahl N gleich 1, so sinkt der Brechungsindex ν der Ionosphärenschicht, der jene Ionisierung zukommt, auf Null herab und ein hinaufgesandter Wellenstrahl kann daselbst seine Richtung zur Erde zurück umkehren. So entsteht ein in hohen Ionosphärengebieten zur Erde zurückgebogener Strahl, der mit einem dem Erdboden folgenden zweiten Strahle zur Interferenz kommen und Schwächungen und Verstärkungen veranlassen kann. Will man solche vermeiden, so muss der strahlenden Antenne eine derart bemes-

⁴⁾ M. J. O. Strutt, Annalen der Physik (5). 9. 67. (1931).

sene Richtcharakteristik gegeben werden, dass etwa die *Bodenstrahlung* bevorzugt, die *Steilstrahlung* aber benachteiligt wird. Dies geschieht neuerdings zur Vermeidung des sogenannten «*Nahefadings*», indem man, wie z. B. nach dem Vorbilde der Antenne von *Breslau* die Stromverteilung längs der Antenne so wählt, dass ein Stromminimum ungefähr im untern Siebentel der Antennenhöhe, ein Strombauch aber ungefähr in fünf Siebentel der geometrischen Antennenhöhe erzwungen wird. Die Strahlungscharakteristik liefert dann ein ausgesprochenes Maximum in horizontaler Richtung mit weitgehender Unterdrückung der Steilstrahlung im Winkelraume von $\alpha = 0$ bis 25 Grad. Nimmt man die Grenze des Nahefadings ungefähr da an, wo die Feldstärken der Raum- und der Bodenwelle gleich gross sind, so kann durch Benachteiligung der Steilstrahlung und damit der Raumwelle die Grenze des Nahefadings nicht unbeträchtlich hinausgeschoben werden. Man spricht bei *Breslau* von einer Erweiterung von 80 Kilometern auf 106 Kilometer Zonenradius.

Dies praktische Beispiel allein zeugt schon von der ungeheuren Wichtigkeit der elektromagneti-

schen Zustände der Ionosphäre für die Radiotelegraphie. Es kann hier nicht der Ort sein, einen Ueberblick über die Erforschung der Ionosphäre mit elektromagnetischen Wellen zu geben. Dies hat der Verfasser an anderer Stelle getan⁵⁾; doch sei abschliessend zusammengestellt, dass der Nachrichtentechnik heute genaue Daten über die Schwankungen der Ionenzahlen der *Heaviside*- und der *Appleton-Schicht* während längerer Perioden zur Verfügung stehen, dass man die *Doppelbrechung in der Ionosphäre* unter Einfluss des erdmagnetischen Feldes genau erforscht, die *Drehungen der Schwingungsebenen* polarisierter elektromagnetischer Strahlen gemessen und sorgfältige Beobachtungen über *diffuse Strahlungen* aus der Ionosphäre angestellt hat. In dieses Gebiet gehören auch die eigentümlichen Erscheinungen der «*Modulation*» der Ionosphäre, die beim *Luxemburgeffekt*⁶⁾ erstmals zutage trat, ferner die noch nicht ganz geklärten *Echos langer Laufzeit*.

⁵⁾ H. Zickendraht, *Annales Guébard-Séverine*. 11. 35. (1935).

⁶⁾ Siehe Bull. SEV 1936, Nr. 10, S. 268.

Diskussion.

Unter dem Vorsitz von Herrn Prof. Dr. F. Tank, Eidg. Techn. Hochschule, Zürich, welcher das interessante Referat

angelegentlich verdankt, entspinnt sich eine Diskussion, aus der hier folgendes wiedergegeben sei:

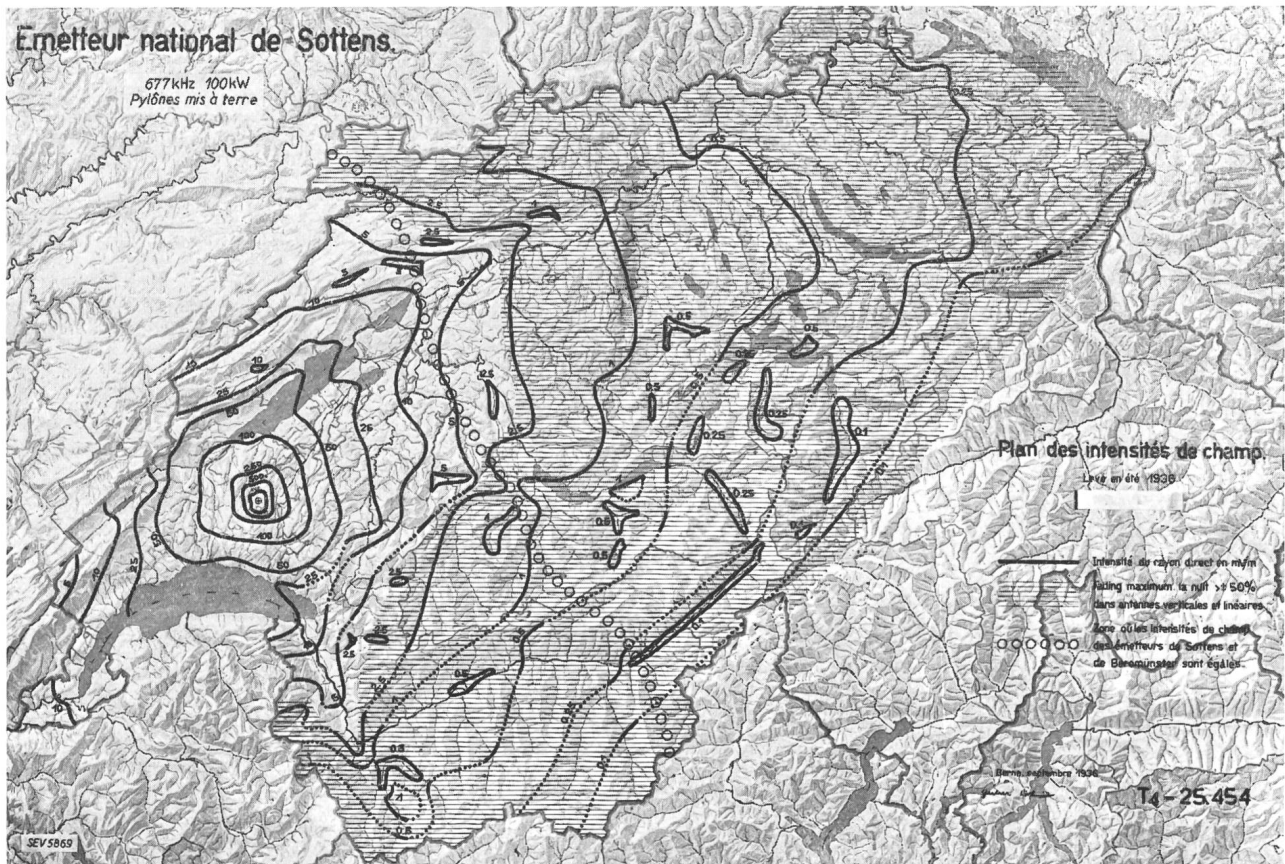


Fig. 1.

Ausbreitung der Bodenwellen des Landessenders Sottens, 677 kHz, 100 kW. Maßstab 1 : 2 000 000. Sommer 1936.

- Kurve gleicher Feldstärke der Bodenwelle.
- ==== Bei Nacht max. Fading > ± 50% in vertikalen Linearantennen.
- ooooo Feldstärkegleichheit zwischen den Feldern von Beromünster und Sottens.

Herr Dr. W. Gerber, Generaldirektion der PTT, Bern, zeigt mehrere Feldstärkenpläne über die Wellenausbreitung schweizerischer Rundspruchsender. Im Zusammenhang mit der Exkursion nach dem Landessender Sottens¹⁾ ist hier ein

Herr Dr. J. Dürrwang, Basel, erkundigt sich über die Konstanz der Bodenwellenintensität.

Herr Dr. W. Gerber: Die Feldstärkenschwankungen der Bodenwellen unserer Landessender betragen in den Service-

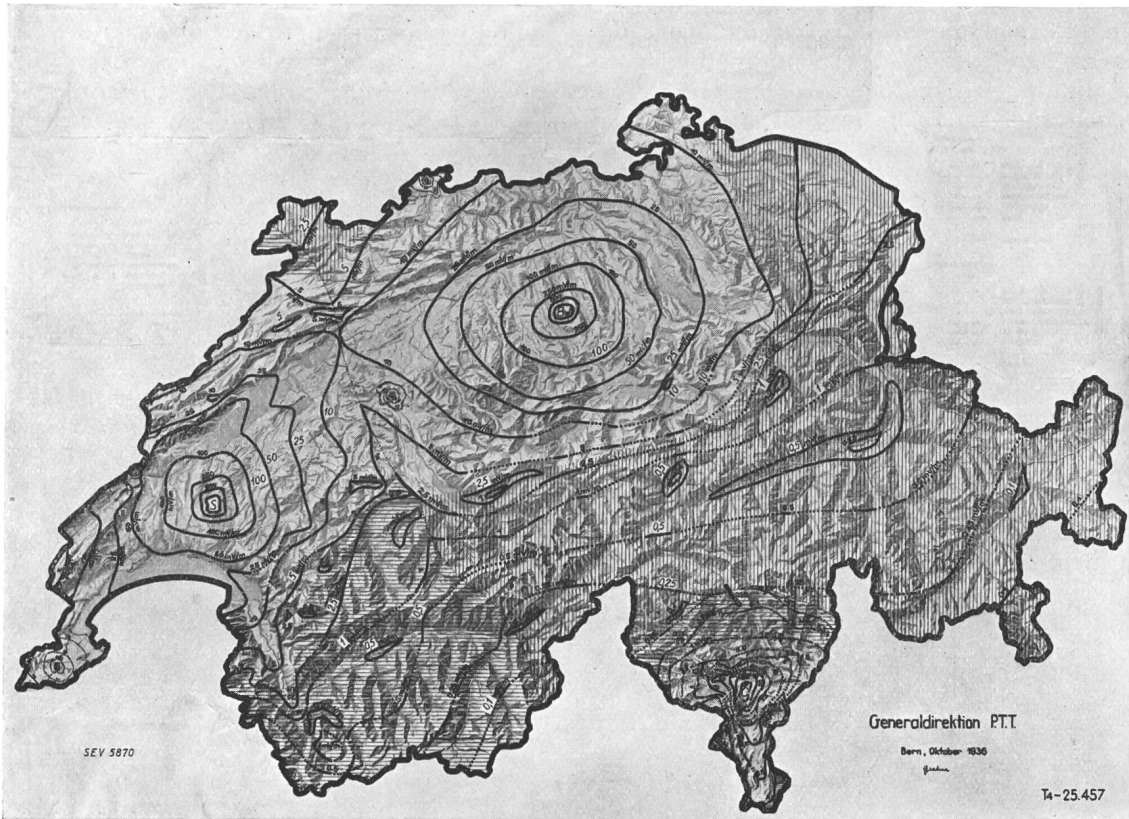


Fig. 2.

Feldstärkenversorgung unseres Landessenders durch das gegenwärtige Sendernetz.

Landessender: Beromünster (B) 556 kHz, 100 kW. Lokalsender: Basel 1375 kHz, 0,5 kW.
 Sottens (S) 677 kHz, 100 kW. Bern 1375 kHz, 0,5 kW.
 Monte Ceneri (C) 1167 kHz, 15 kW. Genève 401 kHz, 1,3 kW.

— Kurven gleicher Feldstärke der Bodenwelle.
 - - - - - Feldstärkegleichheit zwischen benachbarten Sendern.
 ||||| Bei Nacht max. Fadings > ± 50% in vertikalen Linearantennen.
 Die Feldstärkenzahlen verstehen sich in mV/m.

Feldstärkenplan dieses Senders reproduziert; ein ausführliches Referat unter dem Titel: «Wellenausbreitung der schweizerischen Rundspruchsender», erschien in den Technischen Mitteilungen der TT-Verwaltung, Heft 4, 1936. Ausser-

bereichen bei normalem Wetter etwa ± 10%. In den Gebieten sehr schwacher Bodenwellen von ca. 0,1 mV/m kann jedoch besonders im Winter die Tagesintensität der indirekten Strahlung die gleiche Grössenordnung erreichen, so dass

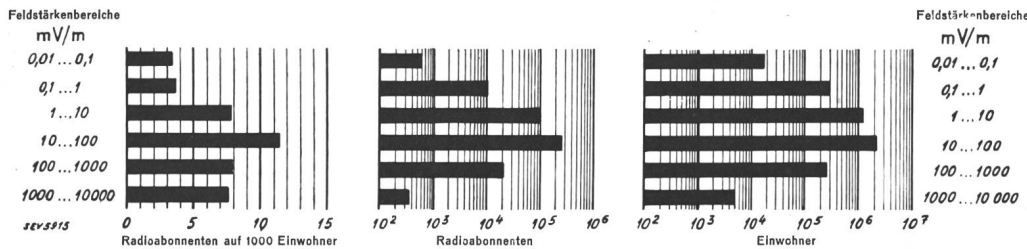


Fig. 3.
 Statistische Auswertung der Fig. 2.

dem ist hier, in Fig. 3, ein Plan reproduziert, welcher die Feldstärkenversorgung unseres Landes durch das gegenwärtige Sendernetz zeigt, während Fig. 3 die Resultate einer statistischen Auswertung der Fig. 2 wiedergibt.

die Tagesfeldstärken mit den Feldstärken der Bodenwellen nicht mehr identisch sind. Aus diesem Grunde hat auch das CCIR 3 die standardisierten Dämpfungskurven der Bodenwellen im Bereich kleiner Restfeldstärken als nicht eindeutig bezeichnet.

¹⁾ Die Beschreibung des Senders folgt später.