

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 48 (1957)

Heft: 9

Artikel: Die Entwicklung von rhombusförmigen Kurzwellenantennen zur breitbandigen Abstrahlung

Autor: Jacob, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060600>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

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

Die Entwicklung von rhombusförmigen Kurzwellenantennen zur breitbandigen Abstrahlung

Von M. Jacob, Hamburg

621.396.677.43.029.6

Das Prinzip der Arbeitsweise rhombusförmiger Kurzwellenantennen wird erklärt und auf die wichtigsten Faktoren näher eingegangen, von welchen die Wirkung der Ausstrahlungen abhängig ist. Bei der Entwicklung breitbandiger Rhombusantennen kommt man ohne die Lösung recht komplizierter Formeln im allgemeinen nicht aus. Aus diesem Grunde wurde eine Reihe von Kurvenscharen der bestimmenden Größen ausgearbeitet, die eine rasche Ermittlung aller Kombinationen gestatten. Anhand einer Reihe von Beispielen wird die Lösung zahlreicher Probleme, die beim Entwurf solcher Antennenkonstruktionen auftreten, graphisch durchgeführt.

1. Die Wirkungsweise der Rhombusantenne

Die meisten Antennenarten sind dadurch gekennzeichnet, dass sich Strom und Spannung auf den Antennenleitern in Form von stehenden Wellen ausbreiten. Daneben hat in den letzten Jahren eine andere Konstruktionsform immer mehr Bedeutung gewonnen, die aus langen, in verhältnismässig geringer Höhe über dem Erdboden ausgespannten Drähten besteht, auf denen durch entsprechenden Abschluss fortschreitende Wellen erzwungen werden. Hiezu gehört die Rhombusantenne.

Die Rhombusantenne ist eine gespreizte Doppelleitung, deren Leiter in der ersten Hälfte V-förmig auseinanderlaufen und in der zweiten mit dem Komplementwinkel wieder zusammen treffen. An einem der spitzen Winkel wird die EMK zugeführt, am anderen ein reflexionsfreier Abschlusswiderstand angeschlossen, durch den die rückläufige Welle, und damit stehende Wellen, auf den Leitern unterdrückt werden. Es bildet sich auf diese Weise praktisch nur eine vom Eingang nach dem Ende zu fortschreitende Welle aus (Fig. 1).

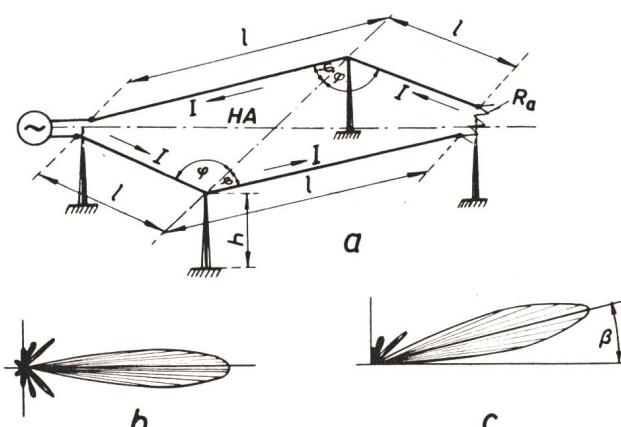


Fig. 1
Schema der Rhombusantenne
HA Hauptachse; h Höhe der Antenne
Weitere Erklärungen siehe im Text

Die Impedanz einer solchen Antenne kann weitgehend frequenzunabhängig gemacht werden.

Baut man die Rhombusantenne mit gleichbleibendem Drahtquerschnitt, so nimmt infolge der Änderung des Abstandes zwischen Hin- und Rückleitung der Wellenwiderstand bis zur Mitte zu und von der Mitte nach dem Ende ab. In der Mitte entsteht eine Reflexionsstelle. Es ist zwar möglich, durch

L'auteur explique le principe de fonctionnement des antennes rhombiques pour ondes courtes et examine plus en détail les différents facteurs dont l'action des rayonnements dépend. Pour le calcul de ces antennes à large bande passeante, il faut généralement résoudre des équations fort compliquées. L'auteur a établi une série de familles de courbes des grandeurs déterminantes, dans le but de permettre une solution rapide de toutes les combinaisons. Divers exemples montrent comment de nombreux problèmes qui se présentent lors de l'établissement de projets de ce genre d'antennes peuvent être résolus graphiquement.

die richtige Wahl des Abschlusswiderstandes die Reflexion am Ende, nicht aber an der mittleren Knickstelle zu unterdrücken. Die Impedanz am Anfang der Leitung ist komplex und frequenzabhängig; um sie reell und frequenzunabhängig zu machen, müssten am Anfang Blindwiderstände zur Komensation vorgesehen werden.

Es gibt jedoch einen einfacheren Weg, um zum Ziel zu kommen. Der Einfluss der Abstandsänderung auf den Wellenwiderstand kann durch eine entsprechende Änderung des Leiterquerschnitts ausgeglichen werden. Man erreicht dies dadurch, dass die Antennenleiter als Reusen ausgebildet werden, deren Querschnitt nach der Mitte des Rhombus hin zunimmt. Die Antenne kann auch aus mehreren senkrecht übereinander liegenden Drähten zusammengesetzt werden, die man dann nach der Mitte zu spreizt. Auf diese Weise gelingt es, den Wellenwiderstand längs der ganzen Antenne annähernd gleich zu machen und dadurch die Reflexionen sowie die Frequenzabhängigkeit der Impedanz bedeutend zu vermindern.

Als Abschlusswiderstand werden bei Rhombusantennen meist sog. Schluckleitungen verwendet. Das sind stark dämpfende Eisendraht-Doppelleitungen, deren Eingangsimpedanz bei genügender Länge der Leitungen reell und frequenzunabhängig ist. Ein gewisser Nachteil der Rhombusantenne liegt darin, dass ein grösserer Anteil der zugeführten Energie nicht mit ausgestrahlt sondern im Abschlusswiderstand verloren geht. Dadurch entsteht ein Verlust, der den Wirkungsgrad der Antenne ungünstig beeinflusst.

In der Vertikalebene, die durch die spitzen Winkel verläuft, erhält man die maximale Abstrahlung (siehe Fig. 1b). Die Rhombusantenne kann in einem breiten, kontinuierlichen Frequenzbereich verwendet werden. Sie ist daher eine *Breitbandantenne*. Darin liegt ihr grosser Vorteil.

Die geometrischen Grundgrößen der horizontalen Rhombusantenne sind ihre Seitenlänge l , der halbe stumpfe Winkel φ sowie die Höhe h über dem Erdboden. Legt man eine EMK an, so entsteht auf der Leitung eine Strom- und Spannungswelle, die sich vom Speisungspunkt zum Ende der Leitung hin fortpflanzt. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit v wird durch die Phasenkonstante α bestimmt. Bei hohen Frequenzen entspricht deren Geschwindigkeit etwa der des Lichtes. Bezeichnet man letztere mit c , so ist $v = 2\pi/\lambda$. Zur Lösung der Formel nach α können daher v und c vernachlässigt werden, so dass der Phasenfaktor $\alpha = 2\pi/l$ wird.

Der Strom tritt im magnetischen Feld, die Spannung im elektrischen Feld des Leiters auf. Dadurch entspricht die Strom- und Spannungswelle einem elektromagnetischen Feld, das sich mit der Phasengeschwindigkeit ausbreitet. Es entsteht eine elektromagnetische Welle.

Die Rhombusantenne muss im Prinzip folgenden Forderungen genügen:

1. Die Richtcharakteristik darf sich im gesamten Frequenzgebiet nicht wesentlich ändern;

2. Der Eingangswiderstand muss unter allen Betriebsbedingungen dem Wellenwiderstand der Energieleitung angepasst bleiben.

Die elementare Aufgabe, die prinzipiell durch eine rhombusförmige Antenne gelöst werden muss, verlangt die wirkungsvolle Abstrahlung eines Signals bei bestimmter Wellenlänge und Übertragungsentfernung. Diese wird unter einem bestimmten Erhebungswinkel β erreicht. Außerdem muss die Wirkung der Antenne bekannt sein, wenn die

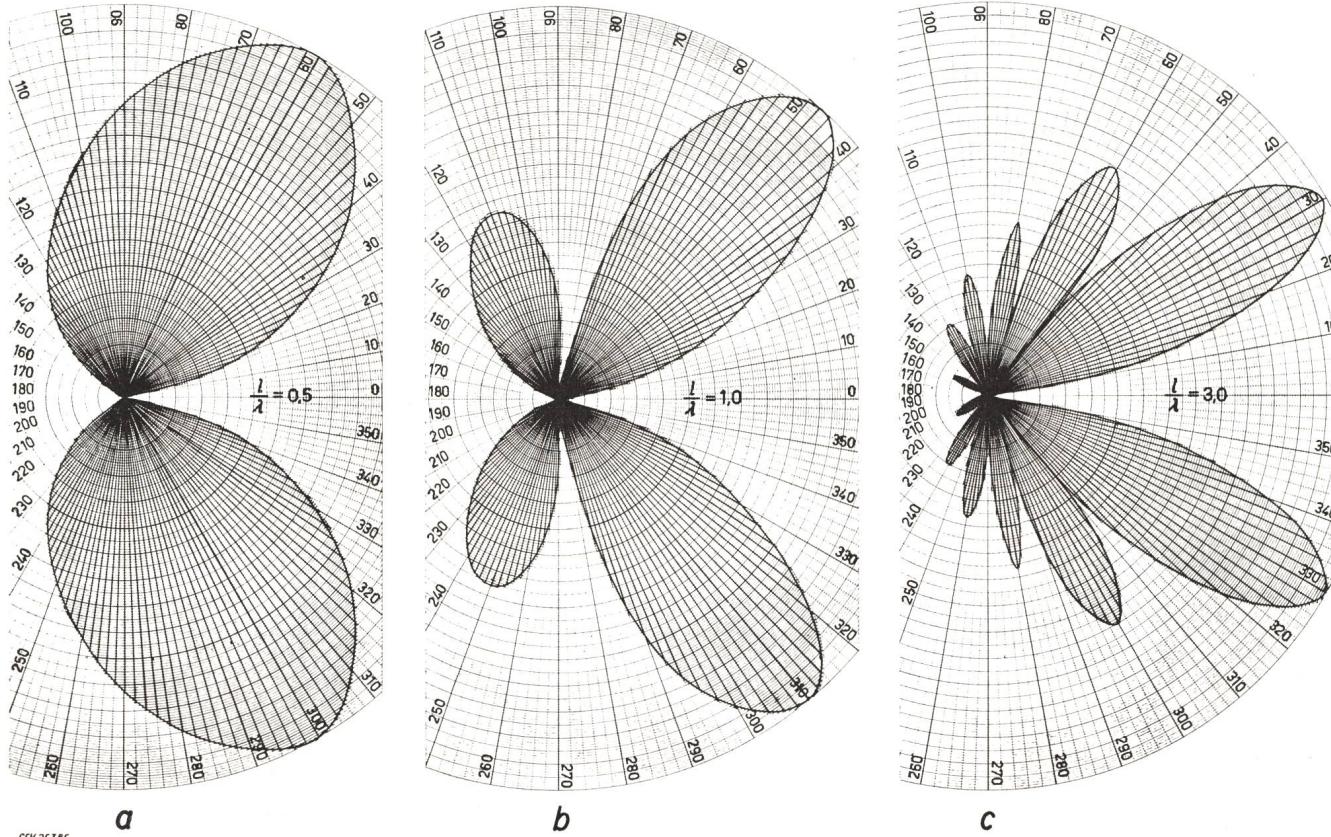


Fig. 2

Richtcharakteristik eines Einzelleiters, der von einer fortschreitenden Welle durchflossen wird

a bei einem Verhältnis von $\frac{l}{\lambda} = 0,5$ b bei einem Verhältnis von $\frac{l}{\lambda} = 1,0$ c bei einem Verhältnis von $\frac{l}{\lambda} = 3,0$

Die Anpassung des Eingangswiderstandes an den Wellenwiderstand wird erfüllt, wenn die Leitungen mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen sind und von fortschreitender Welle durchflossen werden.

Eine annähernde Konstanz der Richtcharakteristik ist gegeben, wenn die Rhombusseiten genügend lang sind. Wie aus Fig. 2a, b und c hervorgeht, ändert sich in diesem Fall die Richtung des Hauptstrahles nur wenig und ist auch vom Verhältnis l/λ fast unabhängig. Die Diagramme sind in Polarkoordinaten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kurven symmetrisch zur Strahlachse und unsymmetrisch in der dazu senkrechten Richtung liegen. Steigt das Verhältnis l/λ , so wächst in geringem Masse auch die Asymmetrie. Der Winkel zwischen Hauptachse und Längsachse wird kleiner.

Beim Entwurf einer rhombusförmigen Antenne geht man am besten von der Voraussetzung aus, dass die gesendeten oder empfangenen Signale in der Vertikalebene der Hauptachse horizontal polarisiert sind. Die Vertikalebene ist von grösserem Interesse als die durch den Azimutwinkel¹⁾ bestimmte Richtung der Übertragungsstrecke (siehe Fig. 1a).

¹⁾ Unter dem Azimutwinkel versteht man ganz allgemein denjenigen, der durch den Winkel, den der Grosskreisbogen der Übertragungsstrecke mit dem Meridian des Ortes, für den die Richtung bestimmt werden soll, bildet. Da ein Kurzwellensender in den weitaus meisten Fällen einen breiteren geographischen Sektor versorgen soll, treten unterschiedliche Azimutwinkel auf, durch deren Vielzahl keine reelle Berechnungsgrundlage gegeben ist.

Wellenlänge oder die Antennenproportionen geändert werden. Da es sehr schwierig ist, den Strahlungswiderstand einer rhombischen Antenne in allen Phasen ihrer Arbeitsweise zu berechnen, geht man zweckmässig von der Feldstärke/Stromeinheit aus.

Wie bereits erwähnt, ändert sich der Eingangswiderstand, wenn auch nur wenig, mit der Frequenz. Er wird für höhere Frequenzen kleiner und der Strom nimmt bei gegebenem Eingangswert mit der Frequenz zu. Für die Berechnung der Grundgrössen sind, ohne starke Fehlabweichungen in Kauf nehmen zu müssen, folgende drei Annahmen von Vorteil:

1. Stromkonstanz;
2. Ideale Erdleitfähigkeit;
3. Strahlung nur in der Vertikalebene der Hauptachse des Rhombus.

Die Kenntnis des Erhebungswinkels β hat ausserdem für die Konstruktion der Rhombusantenne grosse Bedeutung. Die Sendeantennen sind so auszulegen, dass ihre Richtcharakteristik die grösste Intensität derjenigen Strahlen gewährleistet, die den Empfangsort mit kleinster Dämpfung erreichen

sollen. Die Fortpflanzung der Strahlen vom Sender zum Empfangsort geschieht auf verschiedenen Wegen.

Bei einer Übertragungsentfernung von z. B. 5000 km und einer Höhe der reflektierenden Schicht von 300 km kann der Funkstrahl zwei- oder dreimal und sogar noch häufiger reflektiert werden. Bei zweimaliger Reflexion beträgt der Erhebungswinkel etwa 7° und bei dreimaliger 10° . Das Beispiel zeigt, dass am Empfangsort die Strahlen unter verschiedenen Winkeln eindringen können. Infolge der täglichen, jahreszeitlichen und sich über längere Perioden erstreckende Schwankungen der Schichthöhen entsteht eine zeitliche Änderung der Erhebungswinkel der Funkstrahlen. Der Winkel kann auch infolge von Unebenheiten der Reflexionsschichten und durch Diffusion der Strahlen schwanken. Solche Streuungserscheinungen treten gewöhnlich nachts, insbesondere in Jahren verminderter Sonnentätigkeit auf. Zur Zeit liegen noch nicht genügend genaue Angaben über alle Erhebungswinkel vor. Die gesammelten Erfahrungen erlauben nur die Wahrscheinlichkeit des Empfangs in einem bestimmten Winkelbereich vorauszusagen. Die grösste Wahrscheinlichkeit einer zufriedenstellenden Verbindung bei einmaliger Reflexion an der F₂-Schicht besteht für Übertragungsentfernungen von etwa 200...2000 km. In Fig. 3 sind Kurven für die Beziehung

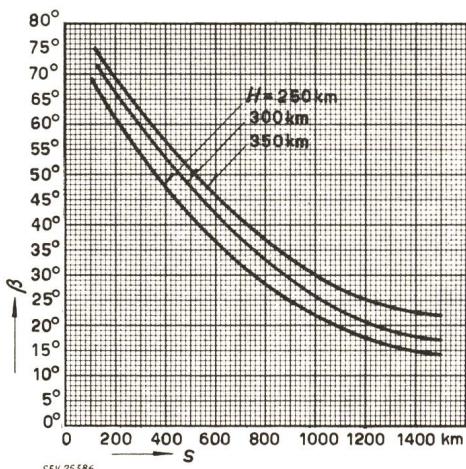


Fig. 3
Abhängigkeit des Strahlungswinkels von der Übertragungsentfernung

H Höhe der Reflexionsschicht; s Übertragungsentfernung;
β Erhebungswinkel der Antenne

zwischen dem Erhebungswinkel β und der Übertragungsentfernung s bei einmaliger Reflexion dargestellt. Für Übertragungen auf über 2000...5000 km ergeben Signale, die unter einem Erhebungswinkel β zwischen 9° ... 24° ausgestrahlt werden, die grösste Wahrscheinlichkeit für einen zufriedenstellenden Empfang. Für noch grössere Entfernen beträgt der günstigste Winkel 7° ... 20° . Es muss jedoch erwähnt werden, dass der Winkelbereich der Strahlen, die den Empfangsort erreichen können, noch erheblich grösser ist. Bei den obigen Werten ist ein gewisser Sicherheitsfaktor mit einkalkuliert. Für grosse Übertragungsstrecken kann der grösste Winkel 30° ... 40° und der kleinste zwischen 3° ... 5° liegen.

2. Berechnungsgrundlagen der Antenne

2.1 Die Feldstärke

Die einfachste Methode hat, wie erwähnt, die Feldstärke zum Ausgangspunkt. Sie ist definiert durch die Beziehung:

$$E = \frac{480 I}{s} \cdot \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi \cos \beta} \cdot \sin(\alpha h \sin \beta) \cdot \sin^2 \left[\frac{\alpha l}{2} (1 - \sin \varphi \cos \beta) \right] \quad (1)$$

Darin bedeuten:

E Feldstärke	[mV/m]
h Antennenhöhe über dem Boden	[m]
I Antennenstrom	[A]
l Länge einer Rhombusseite	[m]
s Sende- oder Empfangsentfernung	[km]
$\alpha = 2\pi/\lambda$ Phasenfaktor	
β Erhebungswinkel	[Grad]
λ Wellenlänge	[m]
φ Halber Winkel des Rhombus am Ende der kleinen Diagonale	[Grad]

Ausserdem ist es zweckmässig zwei Variable, x und y , einzuführen, die durch:

$$x = \frac{4 h \sin \beta}{\lambda} \quad (2)$$

und

$$y = \frac{2 l (1 - \sin \varphi \cos \beta)}{\lambda} \quad (3)$$

definiert sind. Die Formel für die Feldstärke wird dann:

$$E = \frac{480 I}{s} \cdot \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi \cos \beta} \cdot \sin \frac{\pi x}{2} \cdot \sin^2 \frac{\pi y}{2} \quad (4)$$

Der Faktor, welcher β und φ umschliesst, wird mit c bezeichnet.

2.2 Richtlinien für die optimale Konstruktion

Beim Entwurf der Abmessungen stehen die drei Grössen: Höhe h , Länge l und Rhombuswinkel φ zur Verfügung. Für die analytische Berechnung ist es zweckmässig, x , y und φ als unabhängige Parameter zu betrachten. Liegen die Werte für I , s , β und λ fest, so ist die einfachste Methode zur Ermittlung des Strahlungsmaximums, den Logarithmus der Feldstärke E partiell zu differenzieren. Es ergibt sich dann:

$$\frac{\partial E}{E} = \left(\frac{\cos \varphi \cos \beta}{1 - \sin \varphi \cos \beta} - \operatorname{tg} \varphi \right) \cdot \partial \varphi + \pi \operatorname{ctg} \frac{\pi y}{2} \cdot \partial y + \frac{\pi}{2} \operatorname{ctg} \frac{\pi x}{2} \partial x \quad (5)$$

Um die optimalen Bedingungen zu erhalten, müssen die Koeffizienten von ∂x , ∂y und $\partial \varphi$ verschwinden. Es werden dann

$$x = y = 1, \quad \varphi = \frac{\pi}{2} - \beta \quad (6)$$

2.3 Die Richtung des Strahlungsmaximums

Die Richtung, in welcher das Strahlungsmaximum auftritt, erhält man durch partielle Differenzierung von $\log E$ in bezug auf β :

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{\partial E}{\partial \beta} = \frac{-\sin \varphi \sin \beta}{1 - \sin \varphi \cos \beta} + \frac{2\pi l}{\lambda} \sin \varphi \sin \beta \operatorname{ctg} \frac{\pi y}{2} + \frac{2\pi h}{\lambda} \cos \beta \operatorname{ctg} \frac{\pi x}{2} \quad (7)$$

Daraus ergibt sich, dass das Maximum auftritt, wenn

$$a x \operatorname{ctg} \frac{\pi x}{2} + 2 y \operatorname{ctg} \frac{\pi y}{2} = \frac{2}{\pi} \quad (8)$$

ist. Hierin ist a ein Parameter, der bestimmt ist durch:

$$a = \frac{1 - \sin \varphi \cos \beta}{\sin \varphi \cos \beta} \cdot \operatorname{ctg}^2 \beta \quad (9)$$

Wenn φ seinen optimalen Wert hat, reduziert sich der Parameter a auf seinen Einheitswert. Wenn x und y ihren optimalen Wert haben, ist $y = 0,742$.

Für die Lösung von Gl. (9) ist es zweckmässig, eine Tabelle der Funktion $x \operatorname{ctg}(\pi x/2)$ anzufertigen. Es ist dann möglich y als eine Funktion von x zu bestimmen und eine entsprechende Kurve zu zeichnen. Um die effektiven Werte von x und y zu erhalten, ist es erforderlich, das Verhältnis von x/y zu ermitteln. Wenn x_0, y_0 die speziellen Werte sind, die der Bedingung φ gleich Komplementwinkel von β entsprechen, ist

$$x_0 = \frac{4 h \cos \varphi}{\lambda}, \quad y_0 = \frac{2 l \cos^2 \varphi}{\lambda} \quad (10)$$

und hieraus

$$\frac{x_0}{y_0} = \frac{2 h}{l \cos \varphi} \quad (11)$$

Allgemein ist:

$$\frac{x}{y} = \frac{2 h \sin \beta}{l(1 - \sin \varphi \cos \beta)} = \frac{x_0 \cos \varphi \sin \beta}{y_0 (1 - \sin \varphi \cos \beta)} \quad (12)$$

Diese Gleichung kann geschrieben werden:

$$\frac{x}{y} = \frac{x_0}{b y_0} \quad (13)$$

worin b ein Parameter ist, der durch die Formel

$$b = \frac{1 - \sin \varphi \cos \beta}{\cos \varphi \sin \beta} = a \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \beta \quad (14)$$

ausgedrückt ist. Für einen beliebigen Wert des Strahlungswinkels β können daraus a und b bestimmt werden. Die Größen x und y findet man als Schnittpunkte einer geraden Linie mit einer Kurve.

2.4 Die optimale Wellenlänge

Um die Wellenlänge zu ermitteln, die das maximale Signal ergibt, müssen die Bedingungen bekannt sein, unter welchen die Ausstrahlungen stattfinden sollen.

Eine rhombische Antenne wird im allgemeinen für Kurzwellen-Übertragungen zwischen dem Senderstandort und einem genau bestimmten fernen geographischen Sektor verwendet. Die Ausbreitungsbedingungen kurzer Wellen sind bekanntlich in besonderer Masse von den ionosphärischen Verhältnissen abhängig. Der günstigste Wert ist daher am besten aus einer Empfangsstatistik zu ermitteln. Meistens liegen aber derartige Unterlagen nicht vor, und der Wahrscheinlichkeitswert muss durch eine Vorausberechnung festgestellt werden. Es ist dabei vorteilhaft, den gewünschten Erhebungswinkel β als unabhängig von der Wellenlänge anzusehen, und diese dann für das Signalmaximum bei gegebenem Stromwert zu bestimmen. Um ausführlichere Unterlagen für die Arbeitsweise der Antenne zu erhalten, ist es zweckmässig, auch diejenigen beiden Wellenlängen zu ermitteln, bei welchen das Signalmaximum auf die Hälfte reduziert wird. Diese beiden Frequenzen sind jedoch nicht als die Grenzwellen der Ausstrahlung unter den vorhandenen Antennenbedingungen zu betrachten.

Um die Wellenlänge für das *maximale Signal* λ_{opt} zu erhalten, setzt man für den Phasenfaktor $2\pi/\lambda$ die Winkelgrösse α ein und führt eine partielle Differenzierung von $\log E$ in Bezug auf λ durch. Das Maximum ergibt sich dann mit:

$$x \operatorname{ctg} \frac{\pi x}{2} + 2 y \operatorname{ctg} \frac{\pi y}{2} = 0 \quad (15)$$

Da dieses Ergebnis nicht mit der Gleichung (8) für den Fall $a = 1$ übereinstimmt, kann man erkennen, dass der Entwurf zur Bestimmung der Richtung des Strahlenmaximums (siehe Abschnitt 2.3) nicht den maximalen Wert ergibt, wenn unter gleichen Bedingungen die Wellenlänge geändert werden würde. Für einen feststehenden Wert von β bleibt das Verhältnis x/y konstant, und die gesuchte Wellenlänge kann ermittelt werden.

Um die Werte des halben Maximums zu erhalten, braucht man lediglich

$$\sin \frac{\pi x}{2} \sin^2 \frac{\pi y}{2}$$

auf der Kurve auszuwerten, die durch Gl. (15) dargestellt wird, und für das geeignete Verhältnis x/y die Werte von x und y zu bestimmen. Obige Funktion ergibt dann den Halbwert des Strahlungsmaximums.

Tritt das Problem auf, die Seitenlänge des Rhombus zu ermitteln, so bedient man sich der Gleichung

$$l = \frac{\lambda y}{2 b \sin \beta \cos \varphi} \quad (16)$$

die aus den Gl. (2) und (3) abgeleitet ist.

3. Die graphische Darstellung des Rhombuswertes

3.1 Beschreibung der Kurvenscharen

Da die Berechnung der bestimmenden Grössen einer Rhombusantenne recht zeitraubend und kompliziert ist, wurde unter Zugrundelegung der in den Abschnitten 2.1...2.4 beschriebenen Formeln die Kurvenschar in Fig. 4 entwickelt, welche die Lösung der erwähnten Probleme in verhältnismässig einfacher Weise gestattet.

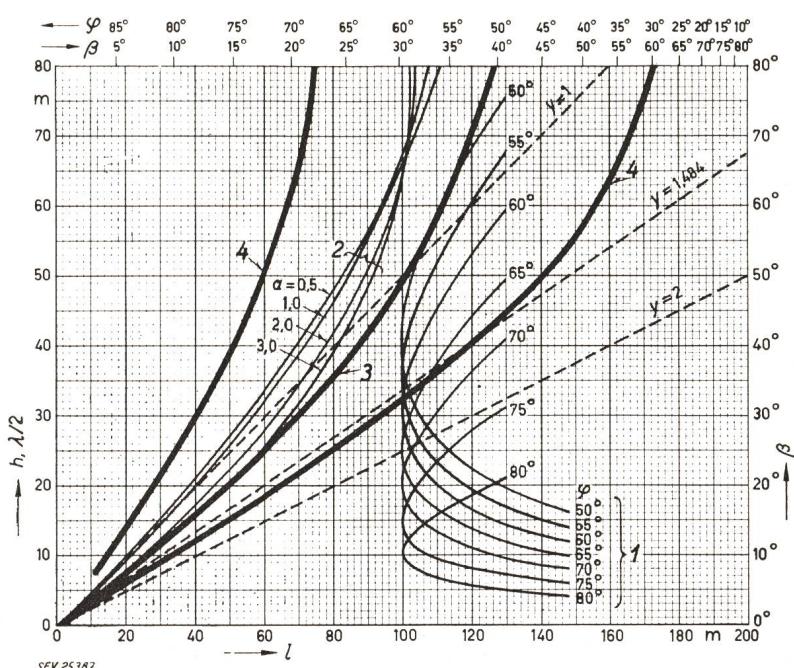
Betrachtet man die Abszisse als reinen Zahlenwert und die Ordinate als Erhebungswinkel β , kann man den Parameter b der Gl. (14) der Kurvenschar 1 entnehmen. Diese Kurven sind für Werte des Winkels φ gezeichnet, die jeweils um 5° auseinanderliegen. Nimmt man x als Abszisse und das Verhältnis x/y als Ordinate an, so stehen die vier Kurven 2 zur Verfügung, welche Gl. (8) für eine Reihe von Werten für a zu lösen gestatten. Unter den gleichen Bedingungen für Abszisse und Ordinate können der Kurve 3 für λ_{opt} die Werte für Gl. (15) entnommen werden. Zwei weitere Kurven 4 zeigen den Wert für λ an, bei welchem das ausgestrahlte Signal das halbe Maximum erreicht.

Die Werte für x und x/y sind nicht eingetragen, da sie zusammengesetzte Grössen sind. Die untere Abszissenlinie gibt die Länge der Rhombusseite an. Die obere enthält die Erhebungswinkel β sowie deren Komplementwinkel φ ; sie ist in der Grössen-

ordnung $2 \sin \beta$ gezeichnet. Die linke Ordinate entspricht einerseits der Antennenhöhe h und anderseits der halben Wellenlänge $\lambda/2$. Die rechte Ordinate entspricht dem Erhebungswinkel β und ermöglicht die Bestimmung des Parameters b . Drei weitere gerade Linien, von Punkt 0 ausgehend, ergeben die Werte für $y/2 = 1$, $y/2 = 0,742$ und $y = 1$. Der Parameter a ist in Fig. 4 nicht dargestellt, dafür aber getrennt in Fig. 5 wiedergegeben.

Fig. 4
Kurvenblatt zur Berechnung einer Rhombusantenne

- 1 Kurvenschar zur Bestimmung des Parameters b
- 2 Kurvenschar zur Bestimmung des Faktors a/y
- 3 Kurve zur Bestimmung von λ_{opt}
- 4 Kurven zur Bestimmung von λ für halbes Maximum bei gegebenem Erhebungswinkel β



3.2 Anwendung der Kurvenscharen

Eine Reihe von Beispielen zur Lösung verschiedener Dimensionierungsprobleme wird die Anwendung der Kurvenscharen in Fig. 4 deutlich machen. Zur Verdeutlichung der graphischen Konstruktionen wurden diese in die vereinfachten Diagramme in Fig. 6a...f eingetragen.

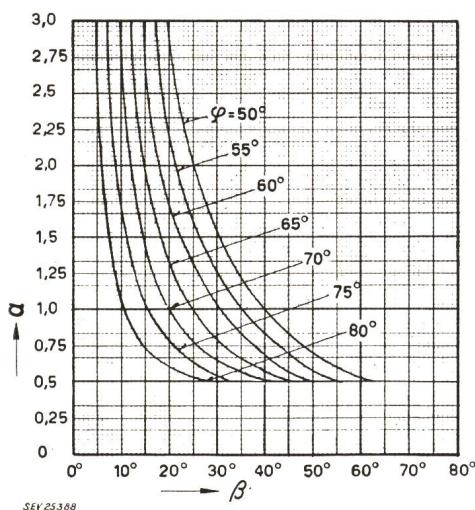


Fig. 5
Wert des Parameters a als Funktion des Erhebungswinkels β und des Rhombuswinkels φ

- a) Ermittlung der Höhe h und der Seitenlänge l einer Rhombusantenne (Fig. 6a).

Der optimale Entwurf in Abschnitt 2.2 ergab die Wellenlänge λ und den Erhebungswinkel β . Man errichtet dann in Fig. 6 die Senkrechte $AB = \lambda/2$ auf der Abszisse. Die Länge wird aus Fig. 4 unter Verwendung der oberen waagrechten Skala für den Winkel φ ermittelt. Der Punkt O wird mit A verbunden, und die Linie bis zur mittleren Senkrechten (Abszisse 100 in Fig. 4) verlängert. Man erhält dann den Punkt C . Die

Strecke MC ist die optimale Antennenhöhe entsprechend dem Wert auf der linken Ordinate. Die Waagrechte CD ist die Verbindung, welche die Verlängerung von BA über A in D schneidet. Der Schnittpunkt E auf der rechten Ordinate ergibt

sich durch die Verlängerung von OD über D . Die Strecke EN ist die halbe gesuchte optimale Seitenlänge l_{opt} des Rhombus.

Bezüglich der Dimensionen der beiden gefundenen Größen sei erwähnt, dass $CM = \lambda/4 \sin \beta$ und $NE = \lambda/4 \sin^2 \beta$ sind.

- b) Änderung des Rhombuswinkels φ unter Beibehaltung der Rhombushöhe h auf ihrem optimalen Wert h_{opt} (Fig. 6b).

Der Punkt C wird wie bei der Konstruktion in Fig. 6a ermittelt. Dann wählt man die Kurve für den Parameter b , der dem Winkel φ entspricht. Auf dieser Kurve wird der Punkt D für den gewünschten Erhebungswinkel β festgelegt. In D errichtet man eine Senkrechte.

Wenn der Spitzenzwert im vertikalen Polardiagramm bei gegebenem Erhebungswinkel β verlangt wird, wählt man den Punkt E auf der Linie $y/2 = 0,742$, dessen Lage durch die Abszisse des Rhombuswinkels φ bestimmt ist. Von E zieht man eine Waagrechte, welche die senkrechte Mittellinie in F schneidet. Die Verlängerung von OF über F trifft die Senkrechte, die in D errichtet wurde, im Punkt G . Von G zieht man eine waagrechte Linie zur mittleren Senkrechten und erhält J . K ist dann der Schnittpunkt auf der Waagrechten durch C und der Verbindungsline von J in Richtung O . Geht man von K senkrecht nach unten, so kann der Wert für die gesuchte Rhombuslänge l abgelesen werden.

Ist die Aufgabe gestellt, die Rhombuslänge l' zu finden, welche bei gegebenem Erhebungswinkel β das Signalmaximum ergibt, wählt man nach demselben Verfahren auf der Linie $y/2 = 1$ den Punkt E' . Alle anderen Punkte werden in gleicher Weise gefunden. Die ermittelte Rhombuslänge l' ist grösser als l .

Um die Beziehung zwischen diesen beiden Fällen deutlicher zu machen, sei darauf hingewiesen, dass im ersten Fall das Signalmaximum durch Änderung des Erhebungswinkels β , im zweiten dagegen durch Änderung der Länge l ermittelt worden ist.

Da das Diagramm auf den Koordinaten x und x/y basiert, ist die Ordinate von E gleich $\cos \varphi / y$ und die von G gleich $b \cos \varphi / y$.

In Übereinstimmung mit Gl. (16) ist die Seitenlänge l die Differenz des horizontalen und vertikalen Skalenwertes; formelmässig ausgedrückt:

$$l = \frac{2 h y}{b \cos \varphi} = \frac{\lambda y}{2 b \sin \beta \cos \varphi}$$

- c) Änderung der optimalen Konstruktion (Abschnitt 2.2) durch Wechsel der Rhombushöhe h , unter Beibehaltung des Winkels φ auf seinem optimalen Wert (Fig. 6c).

Gesucht wird die Seitenlänge l des Rhombus, die bei gegebenem Erhebungswinkel β einen Spitzenwert im vertikalen Polardiagramm ergibt.

Man legt wieder die Strecke CM auf der senkrechten Mittellinie nach dem in Abschnitt 4.1 dargestellten Verfahren fest und zieht die Waagrechte SF in einem Abstand, welcher der optimalen Höhe h entspricht. Die Verbindungsstrecke OC schneidet SF in G . Die Senkrechte GJ erhält man dann durch den Schnittpunkt auf der Kurve $a = 1$. Der Punkt K entsteht als Schnittpunkt einer Waagrechten zwischen J und der rechten Ordinate. Auf der Verbindungsstrecke OK liegt der Punkt P , der durch den oberen Abszissenwert des Rhombuswinkels φ bestimmt wird. Die Waagrechte von P schneidet CM in Q . Dann zieht man eine Linie von O über Q und erhält den Schnittpunkt R auf der Verlängerung von SF über F .

Die Abszisse des Punktes R ergibt die gesuchte Rhombuslänge.

hält man einen Wert für die Länge l , bei welchem unter dem gegebenen Erhebungswinkel β das Signalmaximum erreicht wird.

- d) Ermittlung der Wellenlänge, für eine gegebene Antenne und gegebenen Erhebungswinkel β , die im vertikalen Polardiagramm den Spitzenwert ergibt (Fig. 6d).

Der Punkt A wird entsprechend der Länge und Höhe der Rhombusantenne festgelegt. Die Verbindungsstrecke von O über A schneidet die senkrechte Mittellinie in Punkt B . Von B zieht man eine Waagrechte bis C , dessen Lage durch die Abszisse des Rhombuswinkels φ bestimmt wird. OC wird über C hinaus verlängert und man erhält auf der rechten Ordinate den Punkt D . Aus dem Diagramm wird diejenige Kurve für b gewählt, die dem Rhombuswinkel φ am nächsten kommt. Auf dieser Kurve wird der Punkt E entsprechend dem Erhebungswinkel β festgelegt. Dann zieht man die Senkrechte EF . F erhält man als Schnittpunkt mit einer waagrechten Linie durch D . Die Verbindung OF schneidet die senkrechte Mittellinie in G . Aus Fig. 5 entnimmt man den Parameter a und zieht die Waagrechte GP . In Punkt P wird

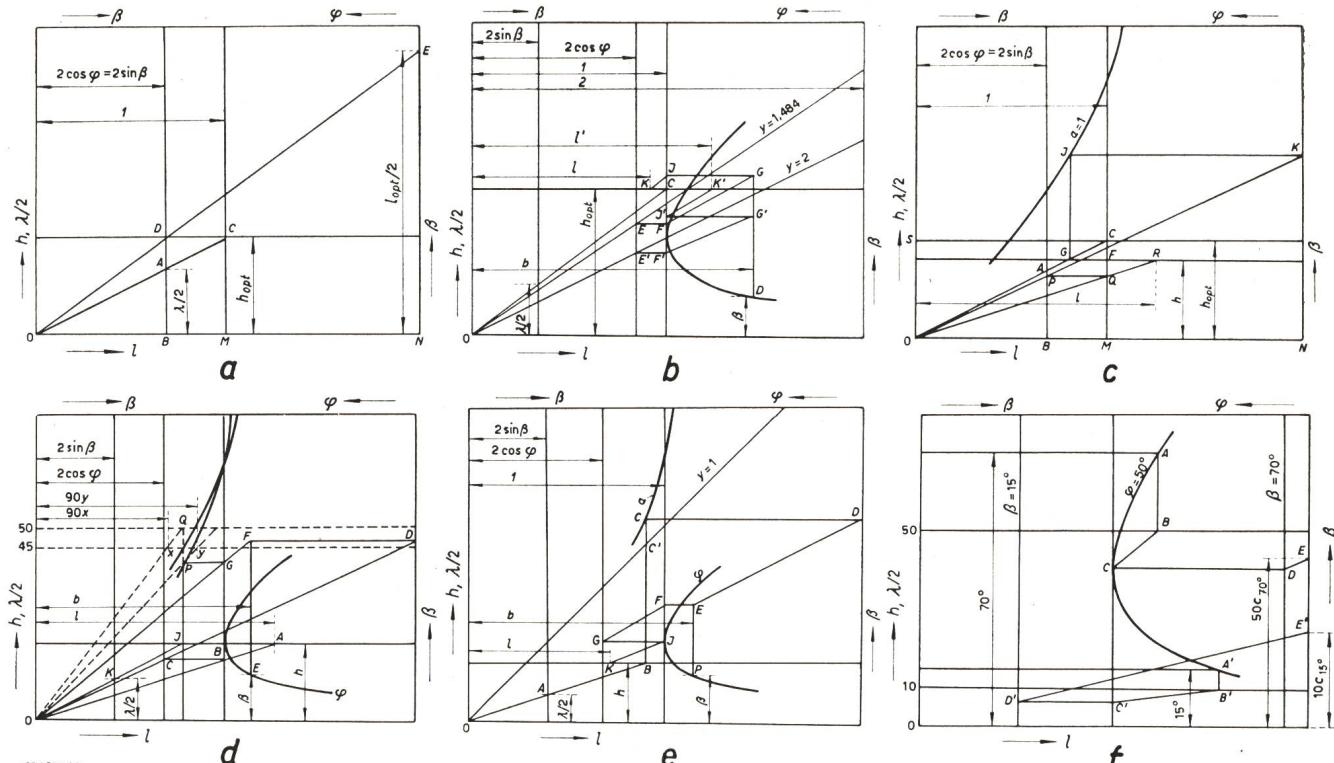


Fig. 6
Anwendung der Kurvenscharen von Fig. 4

- a) Ermittlung des optimalen Entwurfs
- b) Wirkung auf die Rhombuslänge l bei Änderung des Winkels φ
- c) Wirkung auf die Rhombuslänge l bei Änderung der Höhe des optimalen Wertes. Die ermittelte Länge ergibt den Spitzenwert im vertikalen Polardiagramm bei gewünschtem Erhebungswinkel unter Beibehaltung des Rhombuswinkels auf seinem optimalen Wert
- d) Bestimmung der Wellenlänge, bei der eine gegebene Antenne unter dem geforderten Erhebungswinkel den Spitzenwert im vertikalen Polardiagramm ergibt
- e) Bestimmung der erforderlichen Rhombuslänge l , die im vertikalen Polardiagramm bei einem beliebigen Erhebungswinkel β und gegebener Wellenlänge den Spitzenwert ergibt
- f) Bestimmung des Faktors c

Da der Winkel φ seinen optimalen Wert hat, reduzieren sich beide Parameter a und b auf ihren Einheitswert, in Übereinstimmung mit Gl. (9) und (14). Die Abszisse von C ist 1 und die von G ist x , entsprechend Gl. (2). Betrachtet man die Ordinate von J als x/y , ist die von P gleich $x \cos \varphi / y$. Die Länge von l ergibt sich in Übereinstimmung mit Gl. (16), da $b = 1$, zu

$$l = \frac{2hy}{x \cos \varphi} = \frac{\lambda y}{2 \cos \varphi \sin \beta}$$

Ermittelt man nach dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen Verfahren an Stelle von J den Punkt J' auf der Linie $y = 1$, so er-

ein Lot auf die Abszisse gefällt, das die waagrechte Linie durch A in J schneidet. O wird mit J verbunden und der Punkt K markiert, dessen Lage in Fig. 4 aus der oberen Abszissen Skala für den Erhebungswinkel β zu ermitteln ist. Die Ordinate von K ergibt, an der linken Skala abgelesen, den gesuchten Wert für die halbe Wellenlänge.

Da die Abszisse von A gleich $hy/bx \cos \varphi$ gemäß der Skala für h ist, wird die Ordinate von B gleich $b x \cos \varphi / y$. Die Ordinate von D ist $b x/y$, und die von G gleich x/y . Schliesslich ist die Abszisse von P oder J gleich x , und die Ordinate von K entspricht der Skala auf der linken Seite des Kurvenblattes $\lambda/2$.

Fig. 4 gestattet die Lösung mehrerer ähnlicher Konstruktionen, durch Änderung der Lage des Punktes P auf der Linie PG . Legt man diesen auf der Kurve 3 für λ_{opt} fest, erhält man die Wellenlänge, die bei gegebenem Erhebungswinkel β , in diesem Fall infolge Änderung der Wellenlänge, das maximale Signal ergibt. Ausserdem sind in Fig. 4 Kurven zur Ermittlung der Wellenlängen gezeichnet, bei welchen das ausgestrahlte Signal die halbe Intensität unter optimaler Wellenlänge erreicht.

e) Ermittlung der Werte von x und y für beliebige Arbeitsbedingungen (Fig. 6d, gestrichelte Kurven).

Da die wichtigen Grössen der Feldstärke E , Gl. (4), Winkel sind, die in der Formel als Sinus vorkommen, ist es zweckmässig, die Grössen x und y durch Multiplikation mit 90 in Winkelgrade umzuformen. Hiezu bestimmt man den Punkt P wie in Abschnitt 3.2d), ignoriert jetzt aber die a -Kurven. Dann zieht man PQ senkrecht bis zur Ordinate 50 und verbindet O mit Q . Im Schnittpunkt der Linie OQ mit der Waagrechten, die durch die Ordinate 45 bestimmt ist, liegt der Punkt X . Die Abszisse von X , unten abgelesen, ergibt den Wert $90x$. Man verbindet OP und verlängert bis zum Schnittpunkt Y auf der Ordinate 45. Die Abszisse von Y , ebenfalls unten abgelesen, hat die Grösse $90y$. Diese Konstruktion beruht auf der Tatsache, dass die Koordinaten von P gleich x und x/y sind.

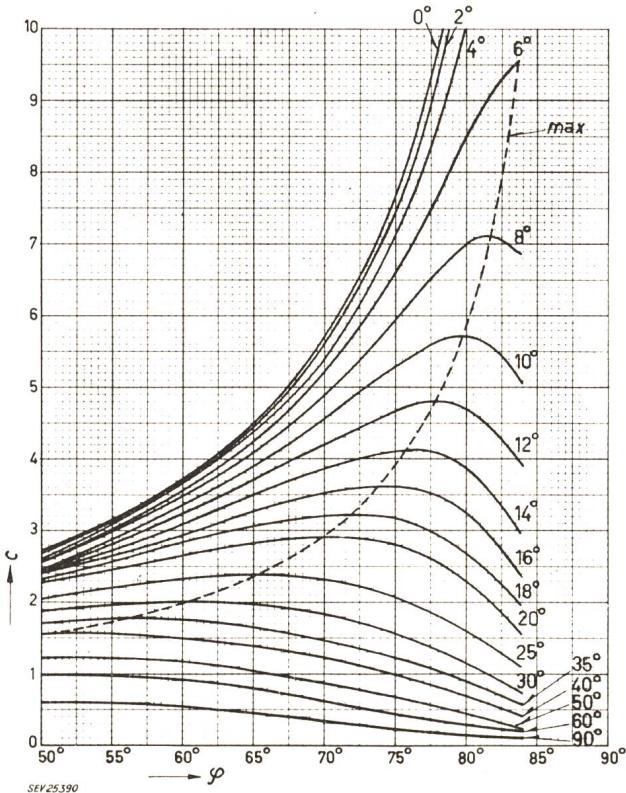


Fig. 7
Wert des Faktors c

f) Ermittlung der Seitenlänge l des Rhombus, die bei gegebenem Erhebungswinkel β den Spitzenwert ergibt (Fig. 6e).

Die Lösung dieses Problems ist ähnlich wie in Abschnitt 3.2c), mit der Einschränkung, dass dort die Kurve des Rhombuswinkels φ nicht in Erscheinung tritt. Zunächst markiert man den Punkt A entsprechend der Ordinate $\lambda/2$ und der Abszisse des Erhebungswinkels β . Im Abstand der Antennenhöhe h wird dann eine Waagrechte gezogen, die die Verlängerung OA in Punkt B schneidet. In B errichtet man ein Lot und erhält auf der Kurve a den Punkt C . Der Wert für a wird der Kurvenschar in Fig. 5 entnommen. Dann zeichnet man eine Waagrechte, die die rechte Ordinate in Punkt D trifft. Auf der Kurve b ergibt sich der Punkt P . Seine Lage entspricht dem Rhombuswinkel φ und dem Ordinatenwert des Erhebungswinkels β . In P wird eine Senkrechte errichtet, welche die Verbindungslinie OD in E schneidet. Die Waagrechte durch E

ergibt auf der senkrechten Mittellinie den Punkt F . Auf der Verbindungslinie von FO liegt der Punkt G , entsprechend dem Abszissenwert des Rhombuswinkels φ . Eine Waagrechte durch G schneidet die mittlere Senkrechte in J . Der Punkt J wird mit O verbunden, und man erhält den Schnittpunkt K auf einer Waagrechten durch B . Die Abszisse von K ist die gesuchte Seitenlänge l der Rhombusantenne.

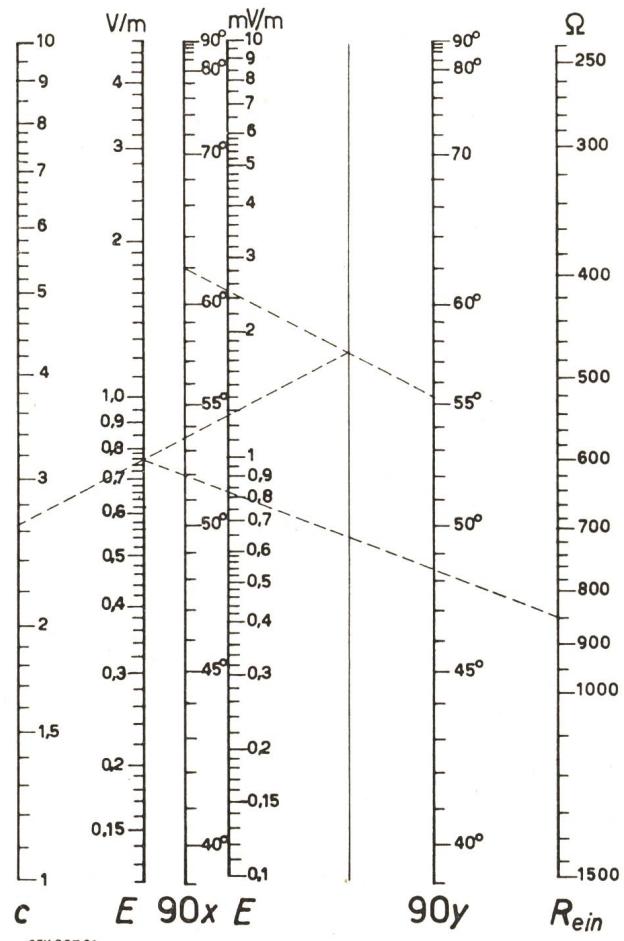


Fig. 8

Nomogramm zur Bestimmung der Feldstärke E
 c Parameter des Rhombuswinkels: $c = \cos \varphi / (1 - \sin \varphi \cos \beta)$
 E Feldstärke
 $90x$ Parameter der Höhe der Rhombusantenne:
 $90x = (360 h \cdot \sin \beta) / \lambda$
 $90y$ Parameter der Seitenlänge des Rhombus:
 $90y = 180 l (1 - \sin \varphi \cos \beta) / \lambda$
 R_{ein} Eingangswiderstand der Antenne

Um das Maximum durch Änderung der Länge l an Stelle einer Änderung von β zu erhalten, wähle man C' auf der Linie $y = 1$.

Diese Konstruktion ergibt x als Abszisse von B und das Verhältnis x/y als Ordinate von C . Die Ordinate von E ist $b x/2y$ und von J , $(b x \cos \varphi)/y$. Die Länge l ist ausgedrückt durch $2 h y/b x \cos \varphi$.

g) Ermittlung des Wertes für den Faktor c in Gl. (4) (Fig. 6f).

Man wähle den Punkt A auf der Kurve l (Fig. 4) für den gegebenen Rhombuswinkel φ . Die Lage von A ist durch die Ordinate des Erhebungswinkels β bestimmt. Von A fällt man ein Lot auf die Ordinate 50 und erhält den Punkt B . B wird mit O verbunden. Diese Verbindung schneidet die mittlere Senkrechte in C . Den Punkt D ermittelt man aus dem Abszissenwert des Erhebungswinkels β und einer Waagrechten durch C . Die Verlängerung der Linie OD ergibt auf der rechten Begrenzungsordinate den Punkt E . Die Ordinate entspricht dann 50 c.

Für kleinere Erhebungswinkel wählt man zweckmässig die Ordinate 10 anstelle 50 der Kurvenschar (Fig. 4). Man erhält so den Wert 10 c. Für diesen Fall ist in Fig. 6f ebenfalls ein

Fortsetzung von Seite 428

Die Entwicklung von rhombusförmigen Kurzwellenantennen zur breitbandigen Abstrahlung (Fortsetzung)

Beispiel wiedergegeben. Das Verfahren ist dasselbe wie vorher. Zur Unterscheidung sind den einzelnen Punkten ein Index (') hinzugefügt. Die Lösung der Konstruktion beruht auf der Beziehung $c = 1/b \sin \beta$. Die Ermittlung wird durch die Kurvenschar in Fig. 7 erleichtert, da der Wert von c dort unmittelbar abgelesen werden kann.

3.3 Bestimmung der Feldstärke

Die Feldstärke E an irgendeinem Punkt der Hauptebene, die in der Diagonale der spitzen Winkel des Rhombus liegt, ist durch die Formel

$$E = \frac{480 I}{s} c \sin 90^\circ x \cdot \sin^2 90^\circ y$$

bestimmt.

Das Ergebnis erscheint in mV/m, wenn der Antennenstrom I in A und die Entfernung s in km eingesetzt werden. Zur Lösung dieses Ausdrucks wurde das Nomogramm in Fig. 8 entwickelt. Es enthält log-sin-Skalen für x und y , und das Produkt der entsprechenden Faktoren kann auf der unbeschrifteten senkrechten Linie, die etwa in der Mitte des Nomogramms verläuft, durch einen Punkt markiert werden. Der Faktor c ist auf der äussersten linken Skala eingetragen, und die Feldstärke E in

A/km wird auf der zweiten Skala von links in (V/m) abgelesen.

Für den Fall, dass die Feldstärke für 1-kW-Eingangsleistung festgestellt werden soll, sind zwei zusätzliche Skalen vorgesehen. Da die Eingangsleistung durch das Quadrat des Stromes multipliziert mit der Widerstandskomponente der Antennen-Eingangsimpedanz bestimmt ist, kann die Feldstärke für ein Kilowatt Eingangsleistung aus der Feldstärke/Ampère und dem Widerstand ermittelt werden.

Das im Nomogramm gezeichnete Beispiel soll noch kurz erklärt werden.

Man zieht eine Linie, die je einen Punkt auf der x - und der y -Skala verbindet. Den Wert von x und y findet man entsprechend der gestrichelten Konstruktion in Fig. 6d. Die Verbindungsline zwischen x und y ergibt einen Schnittpunkt auf der unbeschrifteten Senkrechten. Dieser Punkt wird mit dem Wert von c , zu ermitteln aus der Kurvenschar in Fig. 7, verbunden. Die Linie schneidet die 2. Nomogramm-Senkrechte (von links) in dem Punkt, der dem Wert der Feldstärke/Ampère in einem Kilometer Entfernung entspricht. Wenn der Eingangswiderstand der Antennenkonstruktion geschätzt oder gemessen worden ist, kann außerdem durch eine dritte gerade Linie die Grösse der Feldstärke für ein Kilowatt Eingangsleistung, wiederum in einem Kilometer Entfernung (auf der 4. Skala des Nomogramms), abgelesen werden:

Adresse des Autors:

M. Jacob, Ingenieur, Gertigstrasse 14, Hamburg 39 (Deutschland).

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Ein neues Hochspannungs-Scheitelwert-Voltmeter

621.317.726

[Nach W. P. Baker: A Novel High-Voltage Peak Voltmeter. Proc. Instn. Electr. Engrs. Bd. 103(1956), Part A, Nr. 11, S. 519...522]

In der Hochspannungstechnik wird besonders auf die Messung des Scheitelwertes einer Spannung Wert gelegt, vor allem zur Prüfung von Isolierstoffen. Die Methode zur Messung von Scheitelspannungen hat demzufolge verschiedene Entwicklungsstufen durchgemacht, von denen jede das Ziel verfolgte, die Messgenauigkeit zu verbessern.

Neben dem Chubb-Fortesque-Voltmeter und der Kugelfunkenstrecke beruhen die meisten Hochspannungsvoltmeter auf der Aufladung eines Kondensators auf eine Gleichspannung, die möglichst dem Wert der zu messenden Scheitelspannung entspricht. Bei kleinen Spannungen tritt infolge des Anodenullstromes der zur Gleichrichtung verwendeten Diode ein weiterer Fehler auf. Für Spannungen von einigen hundert Volt kann aber dieser Effekt vernachlässigt werden. Das Messen hoher Spannungen stellt weitere Anforderungen an die Gleichrichter, da der Sperrspannung der Ventile Grenzen gesetzt sind. So treten neben den Fehlern der zu messenden Gleichspannung auch Ungenauigkeiten auf, die infolge der erforderlichen Spannungsteiler entstehen.

Die Nachteile obiger Geräte seien kurz zusammengefasst: Spannungsniedrigung wegen der Welligkeit; Nullspannungs-Anodenstrom der Gleichrichter; Kathodentemperatur der Diode; Verfälschung des Übersetzungsverhältnisses der Spannungsteiler infolge schlechterer Anpassung; Streukapazitäten.

Um das Problem der Anpassung zu lösen, kann zwischen Teilarausgang und Gleichrichter ein Verstärker gesetzt werden, der die notwendige Ein- und Ausgangsimpedanz aufweist und bei Gegenkopplungsschaltung eine Verstärkung von 1,00 besitzt. Da der Verstärker aber im Klasse-A-Betrieb eine Spannung von nur ca. 100 V (Scheitelwert) abgibt, so lässt dies das Problem des Nullspannungs-Anodenstroms der Gleichrichter unberücksichtigt.

Das neue Hochspannungs-Scheitelvoltmeter knüpft an diese Entwicklungsstufe an und ist frei von den üblichen, in

ähnlichen Instrumenten auftretenden Fehlern. Seine Arbeitsweise soll anhand der Fig. 1 kurz beschrieben werden.

Ein am Verstärkereingang auftretendes Signal wird nach dem Verstärker durch eine Spannungsverdopplerschaltung in eine Gleichspannung verwandelt und dem Kondensator C zugeführt. Im Gegenkopplungspfad des Verstärkers liegen die Eingangsdioden D_1 und D_2 . Demzufolge arbeitet der Verstärker bei einer Differenz der Ausgangs-Gleichspannung des

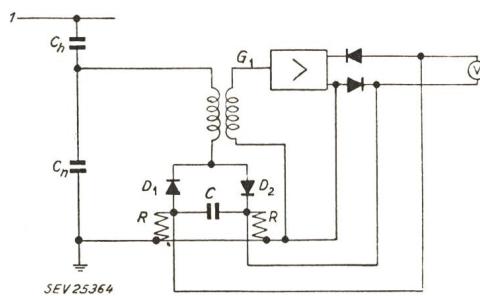


Fig. 1
Prinzipschema

1 Hochspannung; C Speicher- und Messkapazität; C_h Teilerkapazität; C_n Teilerkapazität; D_1, D_2 Eingangsdioden; G_1 Verstärkereingang; R Ladewiderstand

Verstärkers und dem doppelten Spannungsscheitelwert des Teilers. Definiert man den Verstärkungsfaktor A als das Verhältnis der Ausgangsgleichspannung zum Doppelscheitelwert (DSW) der Eingangsspannung, so wird die zu messende Ausgangsgleichspannung:

$$U_- = \left(1 - \frac{1}{A}\right) \cdot U_\sim$$

Fig. 2 zeigt das vollständige Schema des Hochspannungs-Scheitelvoltmeters, aus dem der Aufbau des Verstärkerteils ersichtlich ist. Das Schema benötigt aber noch einige Erläuterungen: