

Angaben über Gewinn und Vertikaldiagramme von Kurzwellen-Antennen beziehen sich im allgemeinen auf den Strahler über ideal leitender Ebene. Wie weit sich die Werte von den in der Praxis auftretenden unterscheiden, wurde am Beispiel der drehbaren logarithmisch-periodischen HF-Antennenanlage AK 851 rechnerisch und meßtechnisch ermittelt. Dem Fernmeldetechnischen Zentralamt der Deutschen Bundespost sei an dieser Stelle für die Überlassung von Meßergebnissen und Berechnungen gedankt.

Einfluß des Erdbodens auf Vertikaldiagramme und Gewinn horizontaler logarithmisch- periodischer HF-Antennen

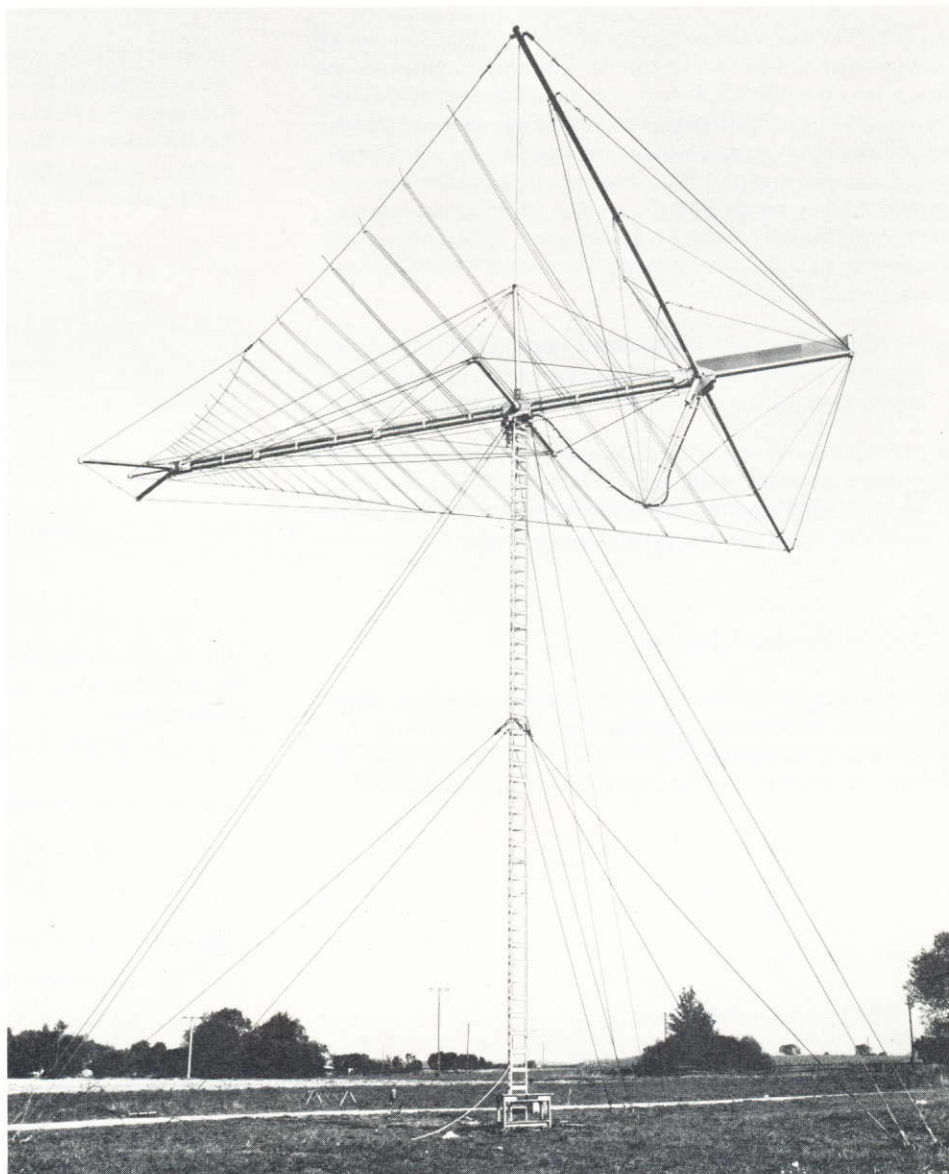


BILD 1
Drehbare
logarithmisch-
periodische
HF-Antennen-
anlage AK 851.
Foto 24 107/1

In Datenblättern und Beschreibungen von Kurzwellen-Antennen werden die Angaben über Vertikaldiagramme und Gewinn üblicherweise auf den Strahler über ideal leitender Ebene bezogen. Dies geschieht vor allem aus zwei Gründen:

1. Die Ermittlung der Antennendaten unter Berücksichtigung realer Bodeneigenschaften ist zeitaufwendiger.
2. Ohne entsprechend ausführliche Erläuterung könnte der über realem Boden niedrigere Gewinn beim Vergleich mit anderen Fabrikaten ungünstig wirken, wenn dort entsprechende Daten fehlen und nur die höheren idealisierten Werte angegeben werden.

Am Beispiel der drehbaren logarithmisch-periodischen HF-Antennenanlage AK 851 (BILD 1) werden die Abweichungen dargestellt, die sich ergeben, wenn man den in der Praxis auftretenden Einfluß des Erdbodens berücksichtigt. Die Antennenanlage AK 851 – ein horizontal polarisierender Breitbandrichtstrahler – ist für Sendebetrieb im Frequenzbereich 5 bis 30 MHz ausgelegt und kann im Empfangsfall schon bei Frequenzen ab 2 MHz eingesetzt werden [1].

Berechnungsgrundlagen

Die Bezeichnung „Vertikaldiagramm“ ist nur mit dem Boden als Bezugsebene sinnvoll. Im Kurzwellenbereich sind Antennen mit so starker vertikaler Bündelung, daß der am Boden reflektierte Energieanteil vernachlässigbar ist, wegen der außerordentlich großen Bauhöhe praktisch kaum realisierbar. Bei der Dimensionierung wird deshalb der Boden bewußt in die Gestaltung der Vertikaldiagramme einbezogen. Für die **Antennenanlagen der Typenreihe AK 7.. und AK 8..** [2] wurde dabei sehr genaue Anpassung an statistische Kenngrößen der KW-Übertragungswege erreicht:

- Die Maxima der Vertikaldiagramme liegen abhängig von der Frequenz jeweils bei den Erhebungswinkeln, die nach Ausbreitungsstatistiken mit der größten Häufigkeit auftreten.
- Die vertikalen Halbwertsbreiten sind so bemessen, daß der Elevationsbereich erfaßt wird, in dem auf Grund der Übertragungseigenschaften der Ionosphäre 80% der optimal ausgesendeten oder empfangenen Signale liegen.

Ideal leitende Ebene

Betrachtet man den anschaulicheren Sendefall bei ideal leitendem Boden, so setzt sich die resultierende Feldstärke \underline{E} im fernerem Empfangspunkt nach BILD 2 aus zwei Vektoren \underline{E}_D und \underline{E}_R mit gleichem Betrag zusammen; die Phasenverschie-

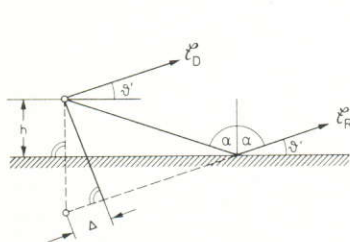
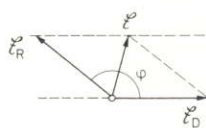


BILD 2 Feldstärke am Empfangsort bei ideal leitender Ebene.



bung φ zwischen ihnen ergibt sich aus dem Wegunterschied Δ und dem bei horizontaler Polarisierung auftretenden Phasensprung um 180° bei der Reflexion:

$$\varphi = 180^\circ + 360^\circ \cdot \frac{\Delta}{\lambda}$$

$$\text{mit } \Delta = 2h \cdot \sin \vartheta'$$

Die Summenfeldstärke hängt also – ohne Berücksichtigung des Freiraumdiagramms der Antenne – nur von dem einfach beschreibbaren Zusammenhang zwischen Erhebungswinkel ϑ' und Wegdifferenz Δ ab:

$$\underline{E} = \underline{E}_D + \underline{E}_R,$$

$$E = 2E_D \cdot \cos \frac{\varphi}{2}.$$

Das Freiraumdiagramm von Antennen ist im allgemeinen mindestens in einer Ebene richtungsabhängig. Die auf dem direkten Weg zum Empfangsort gelangende Feldstärke \underline{E}_D kann daher eine Funktion des Erhebungswinkels ϑ' sein; bei logarithmisch-periodischen Antennen ist dies der Fall.

Realer Boden

Die Summenfeldstärke im Empfangspunkt wird auch über realem Boden analog Bild 2 gebildet, wobei jedoch die Erweiterungen zu beachten sind, die sich aus BILD 3 ergeben:

Da eine Teilwelle in den Boden eindringt, hat der Feldstärkevektor \underline{E}_R des am Boden reflektierten Anteils einen geringeren Betrag als \underline{E}_D . Weiterhin beträgt die Phasenverschiebung durch die Reflexion am Boden normalerweise nicht 180° , sondern hängt – wenn auch in geringerem Maß als der Betrag – ab von der Bodenart, dem Einfallswinkel der Welle und der Frequenz.

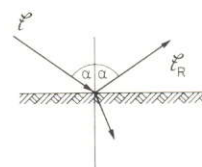


BILD 3 Reflexion am realen Boden.

Die Beeinflussung der elektrischen Feldstärke durch den Boden wird durch den komplexen Reflexionskoeffizienten \underline{R} beschrieben:

$$\underline{E}_R = \underline{E} \cdot \underline{R}.$$

Für horizontale Polarisierung ist

$$\underline{R}_H = \frac{\cos \alpha - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \alpha}}{\cos \alpha + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \alpha}}.$$

Dabei sind α der Einfallswinkel der Welle (zum Einfallslot) und $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ die relative komplexe Dielektrizitätskonstante des Bodens. BILD 4 zeigt ein Beispiel für die Abhängigkeit des komplexen Reflexionskoeffizienten von Einfallswinkel und Betriebsfrequenz.

Die komplexe Dielektrizitätskonstante ϵ_r setzt sich aus dem im Kurzwellenbereich praktisch konstanten ϵ_r und einem von Fre-

quenz f beziehungsweise Wellenlänge λ abhängigen Anteil zusammen, der die Leitfähigkeit σ enthält:

$$\epsilon_r = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} = \epsilon_r - j 60 \sigma \lambda.$$

Beide Komponenten hängen stark vom Wassergehalt des Bodens ab (TABELLE 1 und [3]). Welche Reflexionskoeffizienten dabei auftreten, ist aus BILD 5 ersichtlich.

TABELLE 1: Dielektrizitätskonstante und elektrische Leitfähigkeit (mittlere Werte)

	ϵ_r	$\sigma / \frac{1}{\Omega m}$
Meerwasser	80	4
Feuchter Wiesenboden	10	10^{-2}
Trockener Boden	4	10^{-3}
Trockener Wüstenboden	4	10^{-4}

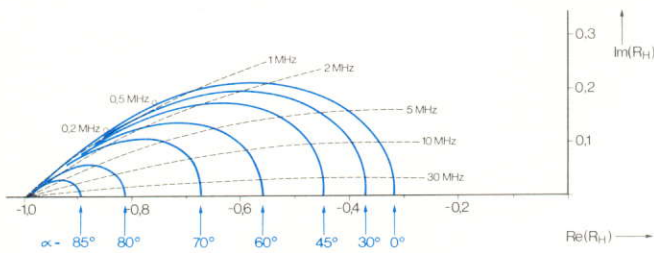


BILD 4 Reflexionskoeffizient B_H des Erdbodens bei horizontaler Polarisation ($\epsilon_r = 4$, $\sigma = 10^{-3} \frac{1}{\Omega m}$).

Vertikaldiagramme

Die Vertikaldiagramme der drehbaren logarithmisch-periodischen HF-Antennenanlage AK 851 wurden für folgende Bodenkonstanten ermittelt:

- $\sigma \rightarrow \infty$ **idealer Boden,**
- $\sigma = 10^{-2} \frac{1}{\Omega m}$; $\epsilon_r = 10$ **feuchte Wiese,**
- $\sigma = 10^{-4} \frac{1}{\Omega m}$; $\epsilon_r = 4$ **trockene Wüste.**

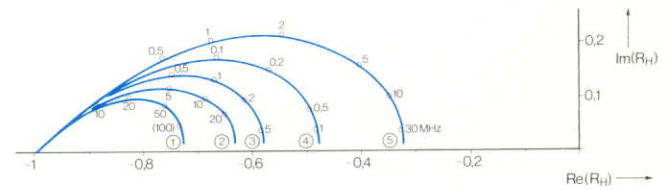


BILD 5 Reflexionskoeffizient B_H für verschiedene Bodenarten:

- ① Ton $\epsilon_r = 40$, $\sigma = 10^{-1} \frac{1}{\Omega m}$
 - ② Tonige Sande $\epsilon_r = 20$, $\sigma = 10^{-2} \frac{1}{\Omega m}$
 - ③ Sand, Kies $\epsilon_r = 15$, $\sigma = 10^{-3} \frac{1}{\Omega m}$
 - ④ Kristalline Gesteine $\epsilon_r = 8$, $\sigma = 10^{-4} \frac{1}{\Omega m}$
 - ⑤ Mischboden bei trockener Witterung $\epsilon_r = 4$, $\sigma = 10^{-3} \frac{1}{\Omega m}$
- Frequenzangaben in MHz, $\alpha = 0^\circ$.

BILD 6 zeigt als Beispiel für vier Frequenzen die als Ausgangspunkt dienenden Diagramme über ideal leitender Ebene. Für die Lösung funktechnischer Aufgaben ist es interessant zu wissen, wie weit sich die Kenngrößen der Vertikaldiagramme – abhängig von den Bodenkonstanten – vom Idealfall unterscheiden.

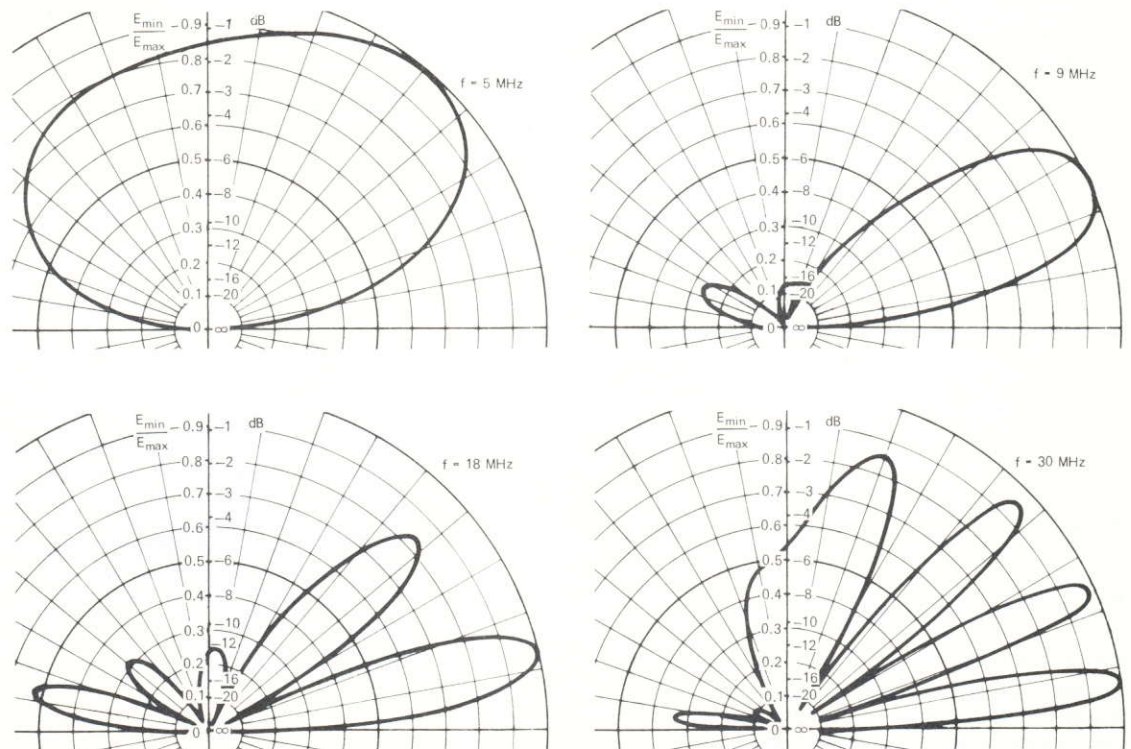


BILD 6 Vertikaldiagramme der logarithmisch-periodischen HF-Antennenanlage AK 851 bei verschiedenen Frequenzen.

Strahlungsmaximum

Voraussetzung für hohe Übertragungssicherheit ist zunächst, daß die maximale Leistung bei Erhebungswinkeln abgestrahlt wird, die zum Aufbau der Funkverbindung optimal sind. TABELLE 2 zeigt für die genannten Bodenarten die Elevationswinkel für maximale Strahlungsleistung.

TABELLE 2: Erhebungswinkel für das Strahlungsmaximum der Antennenanlage AK 851

Frequenz/MHz	5	7	9	12	18	24	30
Idealer Boden	50°	33°	26°	20°	13°	10°	8°
Feuchte Wiese	45°	31°	25°	19°	13°	10°	8°
Wüste	41°	30°	24°	19°	13°	10°	8°

Deutliche Abweichungen treten nur bei tiefen Frequenzen auf. Dies hat vor allem zwei Ursachen:

1. Die Abstrahlung muß wegen der Übertragungseigenschaften der Ionosphäre mit steigender Frequenz immer flacher erfolgen; der zum Strahlungsmaximum gehörende Einfallswinkel der am Boden reflektierten Welle wird daher zu höheren Frequenzen immer größer, wodurch auch der Betrag des Reflexionskoeffizienten ansteigt (siehe Bild 4).
2. Die erforderliche Absenkung der Vertikaldiagramme mit steigender Frequenz hat zur Folge, daß der auf die Wellenlänge bezogene Bodenabstand an der unteren Frequenzgrenze am kleinsten ist; die im Boden auftretenden Verluste sind daher größer als bei hohen Frequenzen.

Vergleicht man die Abweichung der Strahlungsmaxima mit den entsprechenden Halbwertsbreiten, so zeigt sich, daß die Änderung durch unterschiedliche Bodenkonstanten auf die Übertragungssicherheit keine Auswirkungen hat: Der Feldstärke-rückgang bleibt unter 0,2 dB.

Halbwertsbreite

Die benötigten Elevationswinkel hängen bei HF-Funkverbindungen vor allem von folgenden Randbedingungen ab:

- Tages- und Jahreszeit,
- Zu überbrückende Entfernung,
- Geografische Lage von Sende- und Empfangsort.

Die Antenne muß deshalb einen bestimmten Bereich des Elevationswinkels erfassen. TABELLE 3 zeigt jeweils für die Hauptkeule, daß sich die Halbwertsbreiten (Winkel zwischen den -3-dB-Punkten) der Vertikaldiagramme bei unterschiedlichen Bodenkonstanten praktisch nicht verändern. Es tritt also keine vom Aufstellungsort oder vom Wassergehalt des Bodens abhängige Einschränkung auf.

TABELLE 3: Halbwertsbreiten der Vertikaldiagramme der Antennenanlage AK 851

Frequenz/MHz	5	7	9	12	18	24	30
Idealer Boden	113°	40°	29°	21°	13°	10°	8°
Feuchte Wiese	118°	38°	28°	21°	13°	10°	8°
Wüste	118°	40°	29°	21°	13°	10°	8°

Diagramm-Einzüge

Bei der Konzipierung der Antennenanlage AK 851 wurde statistisches Material aus einer Vielzahl von Funkstrecken-Analysen verwendet. Es gestattet eine fundierte Aussage darüber, welche Bereiche des Erhebungswinkels, abhängig von der Frequenz,

wichtig sind. Dabei zeigt sich, daß die Antenne bei den oberen Frequenzen des HF-Bereiches flach abstrahlen muß. Damit das Diagramm-Maximum bei geringen Erhebungswinkeln liegt (zum Beispiel 8° bei 30 MHz), muß der Bodenabstand der strahlenden Zone in der Größenordnung der Wellenlänge sein. Es erfolgt dann allerdings zwangsläufig eine Aufspaltung in mehrere Strahlungskeulen. Der Einzug zwischen zwei Keulen darf natürlich nicht in einem benötigten Bereich des Elevationswinkels liegen.

Da bei realem Boden der Phasensprung bei der Reflexion im allgemeinen von 180° abweicht, ist gegenüber idealer Leitfähigkeit mit einer Änderung der Lage der Einzüge zu rechnen. Wie TABELLE 4 zeigt, sind die Abweichungen aber so gering, daß sie durch die Rundung auf ganzzahlige Werte praktisch nicht mehr in Erscheinung treten. Eine störende Verschiebung der Einzüge durch wechselnden Wassergehalt des Bodens oder durch Aufstellung an Orten mit unterschiedlichen Bodenarten tritt also nicht auf.

TABELLE 4: Erhebungswinkel für die ersten Einzüge des Vertikaldiagramms (AK 851)

Frequenz/MHz	9	12	18	24	30
Idealer Boden	69°	44°	28° 68°	20° 44°	16° 34° 56°
Feuchte Wiese	64°	43°	27° 66°	20° 43°	16° 34° 56°
Wüste	kein ausgepr. Minimum	44°	27° 68°	20° 44°	16° 34° 56°

Bei erheblich unter 9 MHz liegenden Frequenzen tritt im Elevationsbereich bis 90° kein Diagramm-Einzug mehr auf.

Die Tiefe der Einzüge hängt von den Bodenkonstanten ab. Da die Minima jedoch in den funktechnisch wenig interessierenden Elevationsbereichen liegen, soll hier nur kurz erwähnt werden, daß die bei idealem Boden vorhandenen Nullstellen mit abnehmender Leitfähigkeit immer stärker aufgefüllt werden; dies ist aus den Bildern 2 und 3 leicht ableitbar.

Antennengewinn

Der Antennengewinn ist über die Strahlungsflußdichte S im Fernfeld definiert [4]. Mit dem Wellenwiderstand des freien Raumes $Z_0 = 120 \pi [\Omega]$ ist die Strahlungsleistung mit der elektrischen Feldstärke E durch

$$S = \frac{E^2}{Z_0}$$

verbunden. Eine Verringerung des Anteils E_R durch verlustbehaftete Reflexionen am Boden wirkt sich also zwangsläufig auch in einem Gewinnrückgang aus. TABELLE 5 stellt gegenüber, welche Gewinnwerte über unterschiedlichen Bodenarten auftreten.

TABELLE 5: Gewinn der Antennenanlage AK 851 in dB (Bezug: isotroper Strahler)

Frequenz/MHz	5	7	9	12	18	24	30
Idealer Boden	9,5	11,3	13,0	12,1	12,5	12,1	12,1
Feuchte Wiese	8,5	10,7	12,3	11,6	12,1	11,7	11,8
Wüste	6,5	9,1	11,1	10,7	11,5	11,3	11,5

Aus dem Absinken des Gewinns bei geringer Bodenleitfähigkeit kann natürlich nicht geschlossen werden, daß hier eine Richtantenne keine Vorteile mehr bietet. Definitionsgemäß sind im Antennengewinn die in der Umgebung der Antenne auftretenden Bodenverluste berücksichtigt. Diese Verluste reduzieren auch bei der rundstrahlenden Antenne die ohnehin schon kleinere Feldstärke am Empfangsort, bei vertikal polarisierenden Antennen sogar in erhöhtem Maß.

Meßergebnisse

Die bisher aufgeführten Daten beziehen sich auf die rechnerische Ermittlung der Vertikaldiagramme. Es soll abschließend kurz gegenübergestellt werden, wie weit Übereinstimmung zwischen den theoretischen Ergebnissen und den bei Flugvermessungen aufgezeichneten Diagrammen festgestellt werden konnte.

Vom Fernmeldetechnischen Zentralamt der Deutschen Bundespost wurden die Strahlungsdiagramme der horizontalen logarithmisch-periodischen Antennen AK 226/446 (BILD 7) gemessen [5]. Diese Anlage ist in ihren Diagrammeigenschaften vergleichbar mit der Anlage AK 851, die für universellen Einsatz zur Überbrückung relativ geringer, mittlerer und weltweiter Entfernungen bemessen ist [2], während die Antenne AK 226/446 vorzugsweise für Weitverkehr eingesetzt wird und deshalb stärker abgesenkte Vertikaldiagramme hat. Dies ist jedoch für den Vergleich zwischen den rechnerisch und meßtechnisch erhaltenen Ergebnissen von untergeordneter Bedeutung.



BILD 7 Drehbare logarithmisch-periodische Antennenanlage AK 226/446.
Foto 10 362

BILD 8 zeigt anhand der Lage der Maxima des Vertikaldiagramms, daß die Ergebnisse der Flugvermessung [6; 7] sehr gut mit den theoretischen Werten übereinstimmen; zu berücksichtigen ist hierbei noch, daß das Gelände in der Umgebung teilweise Höhenunterschiede bis zu 20 m aufweist und in beiden Fällen eine Vielzahl von anderen horizontal polarisierenden Antennen in so geringem Abstand steht, daß Veränderungen des Strahlungsdiagramms der vermessenen Antenne auftreten.

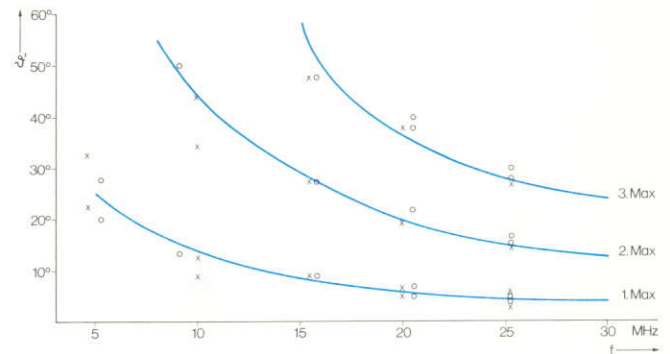


BILD 8 Vergleich Rechnung/Messung für den Erhebungswinkel θ' der Strahlungs-Maxima der log.-per. Antenne AK 226/446. Blaue Kurve: berechnet für ideal leitenden Boden. Kreuze: Meßwerte der Antennenanlage LP 33, Kreise: Meßwerte der Anlage LP 41 (LP 33 und LP 41 sind die bei der Sendestelle Usingen verwendeten Bezeichnungen für zwei der logarithmisch-periodischen Antennen AK 226/446).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die in den Unterlagen üblicherweise aufgeführten Angaben für die Antenne über ideal leitender Ebene zur Beurteilung des Verhaltens im Kurzwellenfunksystem im allgemeinen ausreichen; bei ungünstigen Bodenverhältnissen sollte in funktechnischen Planungen der Gewinnrückgang berücksichtigt werden.

Axel Stark

LITERATUR

- [1] Stark, A.: Drehbare logarithmisch-periodische HF-Antennen in Leichtbauweise. Neues von Rohde & Schwarz (1976) Nr. 72, S. 8-10.
- [2] Datenblatt N 2-260: Drehbare logarithmisch-periodische HF-Antennenanlagen.
- [3] Großkopf, J.: Wellenausbreitung I, BI-Hochschultaschenbücher.
- [4] NTG 1301 (Entwurf 1969): Begriffe aus dem Gebiet der Antennen.
- [5] Henß, P.: Messungen von Richtdiagrammen und Gewinnkurven an Sende- und Empfangsantennen im Kurzwellenbereich mittels eines Hubschraubers. Der Fernmelde-Ingenieur (1972) Nr. 2.
- [6] Gemessene Richtdiagramme und Gewinnkurven von Sende- und Empfangsantennen im Kurzwellenbereich. Fernmeldetechnisches Zentralamt Darmstadt, August 1970.
- [7] Gemessene Richtdiagramme und Gewinnkurven von Sendeantennen im Kurz- und Mittelwellenbereich. Ausgabe 2. Fernmeldetechnisches Zentralamt Darmstadt, August 1971.

NÄHERES ÜBER AK 7, AK 8 KENNZIFFER 75/4