

## Bodenpeilantennen - Systeme

W. Hasselbeck, Berlin

### A.) Einleitung.

Es ist bekannt, dass es möglich ist, unter normalen Verhältnissen, d.h. bei vertikal polarisierten oder horizontal einfallenden Wellen, mit einem Drehrahmen oder mit einem Kreuzrahmensystem in Verbindung mit einem Goniometer die azimutale Einfallrichtung einer elektrischen Strahlung zu ermitteln. Ferner ist es eine bekannte Erscheinung, dass der Rahmen bei Abweichungen der Polarisation ( $\gamma$ ) von der Vertikalen und bei von null verschiedenem Einfallswinkel  $\vartheta$  einen Peilfehler  $\psi$  zeigt, der sich aus der Gleichung

$$\operatorname{tg} \psi = \operatorname{tg} \gamma \sin \vartheta$$

errechnen lässt.

Man kennt eine Reihe von Antennensystemen, die sich unter dem Namen Adcocksysteme eingebürgert haben, die diesen Polarisationsfehler grundsätzlich nicht besitzen. Gebräuchlich ist der Dreh-H-Adcock, der 4-Mast-Goniometeradcock, der als H- oder U-Type gebaut sein kann, daneben aber auch Systeme, die aus Rahmen bestehen, und sie lösen einen grossen Teil der anfallenden peiltechnischen bzw. navigatorischen Aufgaben in mehr oder weniger vollkommener Weise.

### B. Der n-Mast - Adcock.

#### a) Grenzen des 4-Mast-Adcocks.

Bei dem normalen, aus 4 Masten bestehenden Adcocksystem wird immer stillschweigend vorausgesetzt, dass die von einem Antennenpaar aufgenommene Spannung sinusförmig mit dem Azimut variiert, während das zweite Paar eine cosinusförmige Abhängigkeit zeigen soll. Nur dann zeigt ein Goniometer, dessen Kopplung zwischen Feld- und Suchspule

einen sinusförmigen Verlauf besitzt, die Einfallerichtung des Senders richtig an. Damit diese Voraussetzung erfüllt ist, muss gefordert werden, dass die Diagonale ( $d$ ) des Antennensystems klein gegen die Wellenlänge ( $\lambda$ ) ist.

Erreicht oder überschreitet der Ausdruck  $d \cos \vartheta$  den Wert  $\lambda/4$ , wobei  $\vartheta$  den Elevationswinkel bedeutet, dann weicht die azimutale Charakteristik eines Mastpaares merklich von der Sinusform ab. In der Praxis sieht die dadurch verursachte Störung, die man als Systemfehler bezeichnet, so aus, dass für  $d \cdot \cos \vartheta = \lambda/4$  eine achteckreisige Funkbeschickung von  $\pm 1,5^\circ$  auftritt. Sie kann nicht eingeeicht werden, da sie vom Einfallswinkel abhängt. Sie wächst mit grösser werdender Diagonale rasch an.

Wird daher für das Antennensystem die Aufgabe gestellt, grosse Wellenbereiche, also etwa Variationen von 1 : 20 zu überstreichen, dann ist beim 4-Mast-System mit Rücksicht auf den Systemfehler die Diagonale durch die kürzeste Betriebswelle bestimmt. Für die längste Betriebswelle wird für die angenommene Variation von 1 : 20 die so festgelegte Diagonale nur  $\lambda/30$  betragen. Die damit erreichbare Empfindlichkeit ist meist unzureichend. Hinzu kommt, dass die Masthöhe aus mechanischen, aber auch aus noch zu besprechenden elektrischen Gründen nicht beliebig gross gemacht werden kann.

#### b) Der n-Mast-Adcock und seine Grenzen.

Einen Ausweg aus dieser Schwierigkeit stellt das Adcocksystem dar, das n-Maste besitzt, wobei  $n > 4$  ist. Die Maste sind auf den Ecken eines regelmässigen Vielecks aufzustellen. Die Durchrechnung eines derartigen Systems zeigt, dass damit grundsätzlich der Systemfehler beliebig klein gemacht werden kann, vorausgesetzt, dass hinreichend viele Maste eingesetzt werden. Dass es zu diesen Vielmastsystemen spezielle Goniometertypen gehören, um eine rich-

tige Peilung zu ermöglichen, ist ein getrenntes Problem, über das hier nicht näher berichtet werden soll.

Derartige Vielmastadcocksysteme wurden von<sup>x)</sup> Dr. A. Stöhr 1940 (Telefunken EB-Bericht Nr.21) und Dr.H.W. Breuninger 1942 (Hochfrequenz-Technik u. Elektroakustik 59,S.50) ausgiebig rechnerisch untersucht. Dabei ergibt sich folgende Gesetzmässigkeit: Das Antennensystem mit gerader Mastzahl (n) besitzt als Systemfehler erster Ordnung einen Peilfehler von 2ntelkreisigem Verlauf. Adcocksysteme mit ungerader Mastzahl hingegen besitzen als Fehler erster Ordnung eine 2ntelkreisige Trübung. Wie sich dieser Peilfehler bzw. die Trübung bei vorgegebener Mastzahl als Funktion von  $d/\lambda$  ändert, zeigt Abb. 1.

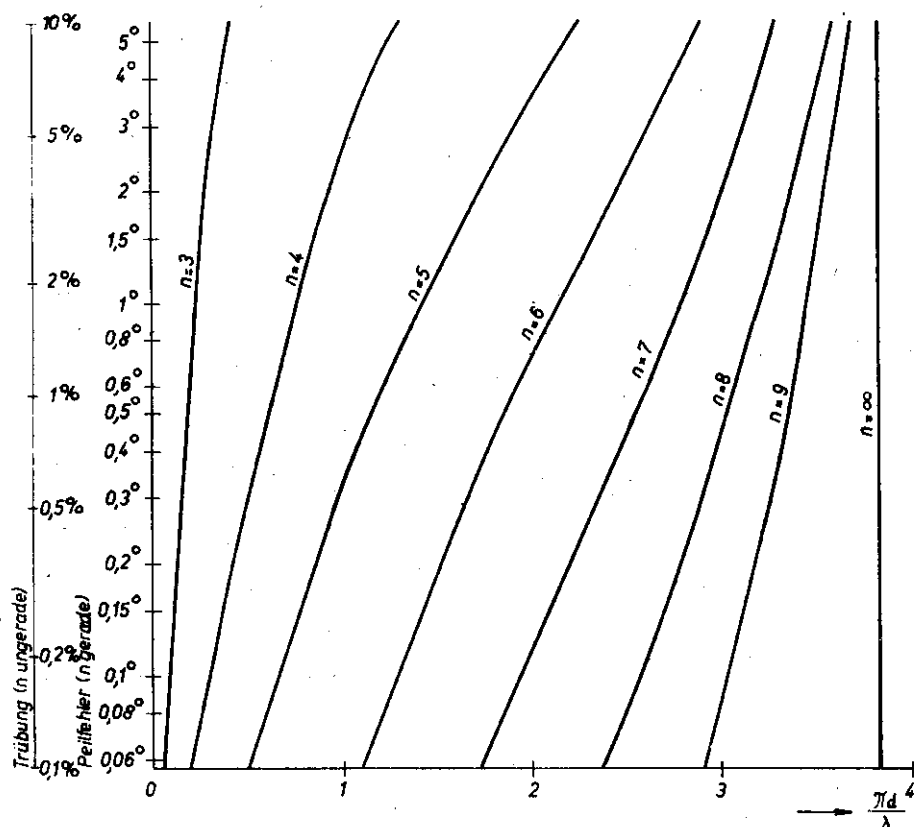


Abb. 1 Systemfehler beim n-Mast - Adcock als Funktion von  $\pi d / \lambda$  (d = Adcockdurchmesser,  $\lambda$  = Wellenlänge).

x) Der mehrpaarige Adcock, ein Vorschlag zur Kurzwellenpeilung. (27.11.39)

Die experimentelle Bestätigung für das Auftreten einer Systemtrübung bei Adcocksystemen mit ungerader Mastzahl ist aus Abb. 2 zu entnehmen.

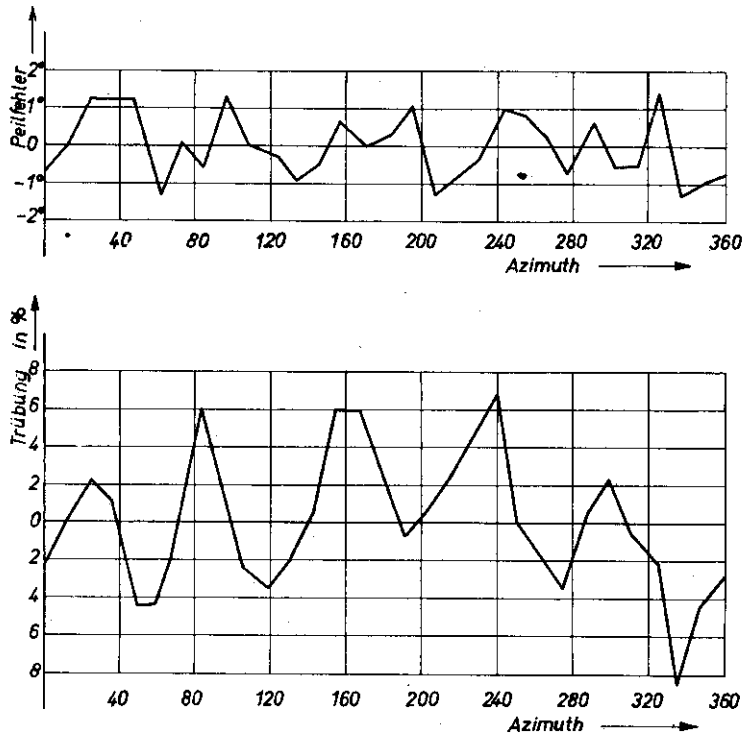


Abb. 2 Peilfehler und Trübung eines 5 Mast-Adcocks als Funktion des Azimuths.

Hieraus könnte man schliessen, wenn man nur den Systemfehler betrachtet, dass die Diagonale eines Adcocks beliebig gross gemacht werden kann, wenn sich nur auf dem Kreis eine genügend grosse Anzahl von Antennen befindet. Es ergibt sich aber eine neue Grenze. Betrachtet man den Verlauf der Empfindlichkeit eines Antennensystems mit beliebig grosser Mastzahl, so zeigt sich, dass das System in die im Peilmaximum befindliche Goniometersuchspule eine

Spannung induziert, deren Verlauf proportional dem Ausdruck

$$E n j J_1 \left( \frac{\pi d \cos \vartheta}{\lambda} \right)$$

ist. Hierin bedeuten  $n$  die Mastzahl,  $E$  die vertikal polarisierte Feldstärke,  $d$  die Diagonale,  $\vartheta$  der Einfallswinkel und  $\lambda$  die Wellenlänge.  $J_1$  ist die erste Besselfunktion und  $j = \sqrt{-1}$ . Der Verlauf dieser Funktion lässt erkennen, dass die Empfindlichkeit bei fester Frequenz mit wachsender Diagonale zunächst ansteigt, ein Maximum erreicht und endlich für  $(\pi d \cos \vartheta) / \lambda = 3,83$  eine Nullstelle hat. Das bedeutet, dass dann die Antenne überhaupt keine Peilspannung mehr an das Goniometer abgibt. Eine Peilung ist unmöglich. An dieser Stelle ist für horizontalen Einfall  $d/\lambda$  ungefähr 1,2.

Da jeder Adcock eine Seitenkennung benötigt und dazu in der Regel aus der Richtspannung und einer Rundspannung, die dem Antennensystem entnommen wird, eine kardioidenähnliche Richtcharakteristik gebildet wird, muss man sich auch für den Verlauf der Rundspannung interessieren. Die Entnahme der Rundspannung aus einer besonderen Hilfsantenne ist meist aus baulichen Gründen unerwünscht. Die der Adcockantenne zu entnehmende richtungsunabhängige Spannung zeigt bis auf unwesentliche Konstanten eine Abhängigkeit, die durch

$$E n J_0 \left( \frac{\pi d \cos \vartheta}{\lambda} \right)$$

bestimmt ist.  $J_0$  ist die Besselfunktion nullter Ordnung. Sie hat ihre Nullstelle bei  $(\pi d \cos \vartheta) / \lambda = 2,2$  d.h. praktisch ist eine Seitenkennung oder eine Enttrübung bei horizontalem Einfall nur bis  $d/\lambda = 0,6$  möglich, wenn man nicht für diesen Zweck eine besondere Hilfsantenne zur Verfügung stellt.

Hält man an der Forderung auf Entnahme der Rundspannung aus dem System fest, dann hat es wenig Sinn, einem Adcock mehr als 5 oder 6 Maste zu geben, da bei der höchstzulässigen Diagonale schon mit dieser Mastzahl der System-

fehler hinreichend klein ist. Ob die Zahl 5 oder 6 gewählt wird, wird sich im wesentlichen danach richten, ob man eine Enttrübung einsetzt oder nicht und ob man auf gewisse Bequemlichkeiten beim Aufbau Wert legen muss.

### C. Die Vertikalcharakteristik.

#### a) Die Gruppencharakteristik.

Neben den soeben erwähnten Punkten darf bei der Planung eines Adcoocksystems die Vertikalcharakteristik nicht unberücksichtigt bleiben. Da immer grosse Empfindlichkeit angestrebt wird, bemüht man sich, die Maste im Hinblick auf die längst zu peilende Welle möglichst hoch zu machen. Dann besteht am kurzwelligen Ende die Gefahr, dass der einzelne Mast grösser als eine halbe Wellenlänge wird und die bekannten Nullstellen im Vertikaldiagramm auftreten. Ein Peiler mit derartigen Nullwinkeln ist unbrauchbar, da er unter gewissen Elevations-Winkeln erhebliche Empfindlichkeitslöcher aufweist.

Es sei  $f(\vartheta)$  die Vertikalcharakteristik des einzelnen Mastes. Dann kann man nachweisen, dass die Vertikalcharakteristik des gesamten Adcoocksystems durch

$$\text{Konstante} \cdot f(\vartheta) \cdot J_1\left(\frac{\pi d \cos \vartheta}{\lambda}\right)$$

gegeben ist. Der zweite Ausdruck ist wieder die Besselfunktion erster Ordnung und für die praktisch vorkommenden Werte von  $d/\lambda$  immer von Null verschieden, solange  $\cos \vartheta \neq 0$  ist. Somit ist die Charakteristik des gesamten Systems im wesentlichen in Übereinstimmung mit der Charakteristik des einzelnen Mastes. Lediglich im Zenith ( $\vartheta = \pi/2$ ) erhöht sich die Ordnung der Nullstelle, was aber praktisch uninteressant ist. Neue Nullstellen treten durch das Zusammenschalten zur Gruppe nicht auf.

#### b) Der Einzelmast.

Daher kommt es darauf an, die Charakteristik des Einzelmastes so zu gestalten, dass sie keine Nullstelle

aufweist. Dieses Problem ist theoretisch recht schwierig zu behandeln. Daher wurde die Lösung empirisch durch Modellversuche mit ultrakurzen Wellen gewonnen und durch Messungen am Originalmast bestätigt.

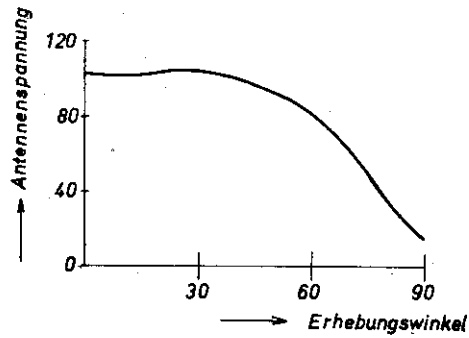
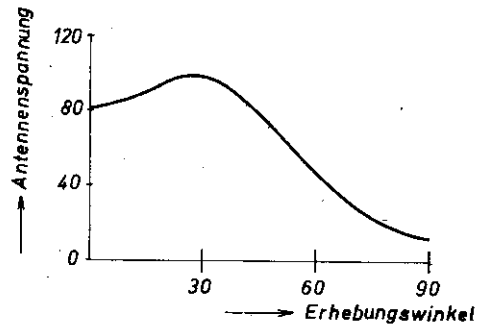
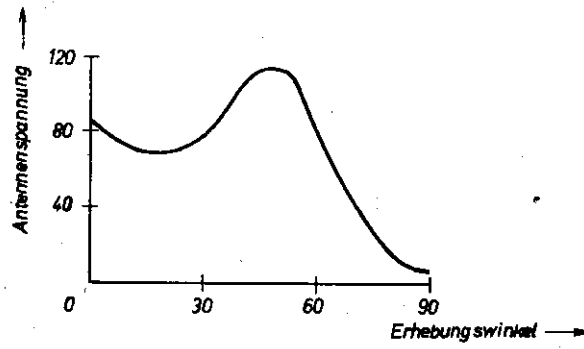
Die Aufgabe lautet: Es soll ein Antennenmast geschaffen werden, der für die längste Betriebwelle einen hinreichend kleinen Innenwiderstand und grosse effektive Höhe besitzt. Für den gesamten Frequenzbereich soll die Vertikalcharakteristik möglichst wenig von der cos-Form abweichen.

Die Lösung besteht für den Wellenbereich von 12 - 200 m aus einem 15 m hohen Mast, der aus drei Metallrohren zusammengesetzt ist. Die einzelnen Rohrstücke von etwa 5 m Länge sind durch 2 Isolatoren voneinander getrennt und an den Trennstellen durch L-R-Kombinationen verbunden. In den Abbildungen 3 a - c sind die erreichten Vertikalcharakteristiken gezeigt. Wie weit es gelungen ist, die cos-Form anzunähern, ist aus den Abbildungen zu entnehmen. Gegenüber der angestrebten Form treten maximale Abweichungen von  $\pm 20\%$  auf, die praktisch bedeutungslos sind.

#### D. Verfahren zur Minderung der Polarisationsanfälligkeit.

##### 1. Langwellensysteme.

Das beste und sicherste Mittel, ein Adcocksystem geringerer Polarisationsanfälligkeit zu erhalten, besteht im Aufbau auf einem homogenen Boden guter Leitfähigkeit. Darunter sind Böden mit einer Leitfähigkeit  $\sigma$  von  $10^{-12}$  bis  $10^{-13}$  EME zu verstehen. Man hat aber auch Mittel, den Langwellenadcock auf Boden mit geringerer Leitfähigkeit polarisationsmässig zu beherrschen. Es ist bekannt, dass man beim H-Adcock den Polarisationsabgleich durch Aenderung der Dipollängen erzwingen kann. Als Regel gilt, dass bei nachteilendem Fehler der untere Dipol gekürzt wird. Leider ist dieser Abgleich bodenabhängig.



**Abb. 3 a - c** Vertikalcharakteristik eines 2fach unterteilten Mastes von 15 m Länge für  $\lambda = 12$  m, 18 m, 28 m.

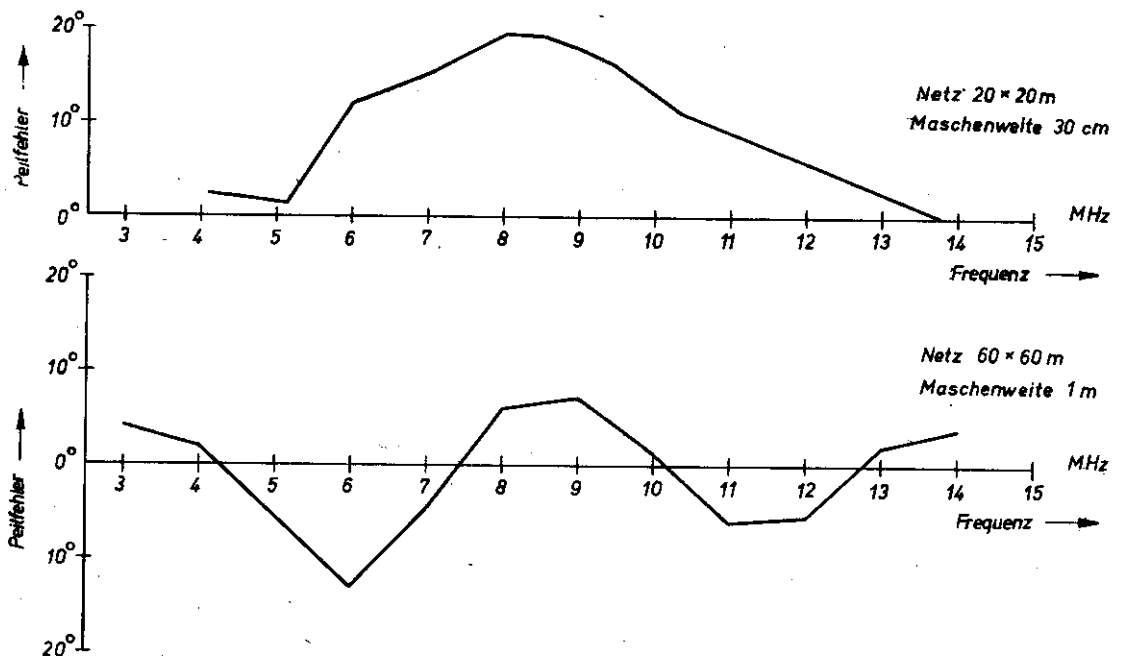
Bei U-Adcockanlagen können die Ausgleichsbänder zum Abgleich benutzt werden und hier hat ein empirisch entwickeltes Verfahren die Regel ergeben, dass bei nachteiligem Fehler die Bänder verlängert werden müssen. Man hat heute so viel Erfahrungen, dass man die in der Praxis vorkommenden Fälle tabellenmässig zusammenstellen und mit Angleichanweisungen versehen kann. Technisch sieht diese Lösung so aus, dass der Aussenmantel des Kabels durch ein Band verlängert wird, das stellenweise durch die Verlegung in Schleifen in die Nähe der Erdoberfläche geführt wird. Auf diese Weise entstehen leicht zugängliche Trennstellen.

Eine weitere oft eingesetzte Möglichkeit, die Polarisationsanfälligkeit zu verbessern, ist im Bau von U-Adcockanlagen mit Kompensation gegeben. Die grundsätzliche Schaltung ist bekannt. Bei auftretenden Polarisationsfehlern gilt, dass bei nachteiligem Fehler die Kompensationskapazität verkleinert werden muss.

## 2. Kurzwellenanlagen.

Für Kurzwellen sind neben H-Adcocksystemen in grösserem Umfang U-Adcockanlagen gebräuchlich, die genau wie bei Langwellen Boden guter Leitfähigkeit zur einwandfreien Funktion voraussetzen. Daneben sind kompensierte Anlagen in Betrieb.

Es wurde weiter der interessante Versuch unternommen, einen gewöhnlichen U-Adcock durch Aufbau auf einem Metallnetz polarisationsmässig zu stabilisieren. In Abb. 4 ist gezeigt, wie sich die Polarisationsanfälligkeit durch ein technisch realisierbares Netz mit den Abmessungen 20 x 20 m bei 30 cm Maschenweite auf Sandboden vermindern lässt. Trotz der noch grossen Peilfehler hat sich eine merkliche Verbesserung ergeben, da auf dem vorliegenden schlechten Gelände der Adcock sich nur unwesentlich vom Rahmen unterschied.



**Abb. 4** Peilfehler eines Adcocksystems als Funktion der Frequenz bei  $70^\circ$  Polarisierung und  $18^\circ$  Einfallswinkel über Metallnetzen.

Durch Einsatz noch grösserer Netze ist, wie aus derselben Abbildung zu ersehen ist, eine weitere Verbesserung zu erzwingen. Die Wirksamkeit des Verfahrens ist durch die Eigenschwingungen des Netzes grundsätzlich begrenzt. Diese können bei tragbaren Abmessungen nicht ausreichend gedämpft werden.

### 3. Ultrakurzwellenanlagen.

Für ultrakurze Wellen sind in grösserem Umfang H-Adcocksysteme im Einsatz. Zur Erzwingung der Polarisationsunabhängigkeit ist es wichtig, dass Resonanzerscheinungen an Metallteilen des Traggerüstes oder der eingesetzten Kabel durch elektrische Auftrennung vermieden werden. Wie bei jedem H-Adcock werden zweckmässig die Längen der Dipole zum Abgleich variiert. Darüber hinaus hat sich empirisch als wirkungsvoll herausgestellt, eini-

ge der in den Gerüstteilen vorhandenen elektrischen Trennstellen durch Widerstände zu überbrücken. Welche Polarisations-eigenschaften auf diese Weise erzwungen werden können, ist aus den Abb. 5 u. 6 zu entnehmen.

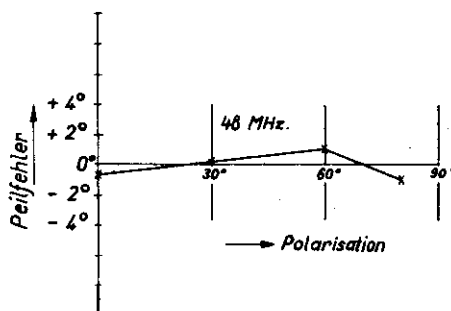
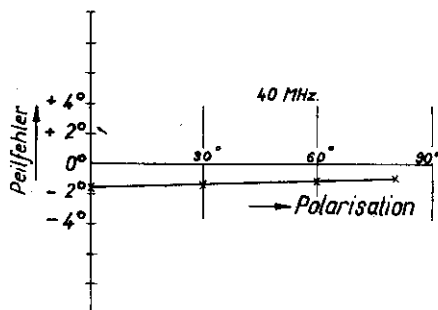


Abb. 5 u. 6 Peilfehler eines Dreh- H-Adcocks als Funktion der Polarisation bei  $20^\circ$  Einfallswinkel.

Es ist aber notwendig darauf hinzuweisen, dass der Langwellen- und besonders der Kurzwellen-Adcock trotz aller Verbesserungen kein ideales Instrument ist. Er besitzt die hinreichend bekannte Eigenschaft, bei 2 einfallenden Strahlen, die im Azimut nur wenig unterschieden sind, unter ungünstigen Umständen beliebig grosse Peilfehler zu erge-

ben. Es besteht begründeter Anlass zu der Vermutung, dass die Mehrzahl der besonders bei Kurzwellen-Anlagen zu beobachtenden Peillauswanderungen nicht auf unzureichende Polarisationsfreiheit, sondern auf den Einfall mehrerer Strahlen aus verschiedenen Azimuten zurückgehen.

Und hier wird die zukünftige Arbeit einzusetzen haben. Es sind Verfahren zu finden, die es gestatten, die Peilgenauigkeit wesentlich höher zu treiben. Dass daneben das Problem besteht, auch grosse Entfernungen mit ausreichender Genauigkeit zu überbrücken, braucht kaum besonders erwähnt zu werden.

Zusammenfassung:

Es werden Adcock-Antennen behandelt. Die Grenzen des 4-Mast-Adcocks werden dargestellt, die in einem achteckreisigen Systemfehler bestehen. Die Vorteile des Mehrmast-Adcocks, der diesen Fehler vermeidet, werden diskutiert und die grundsätzlichen Grenzen gezeigt, die durch einen Nulldurchgang der Peilspannung und der Antenneneffektspannung bedingt sind. Das Problem bei grossen Frequenzbereichen eine einwandfreie Vertikal-Charakteristik zu erzwingen, wird durch eine spezielle Masttype gelöst.

Es werden die zur Zeit zur Verfügung stehenden Methoden diskutiert, um die Anfälligkeit des Antennensystems auf horizontale Polarisation zu vermindern (Boden guter Leitfähigkeit, Kompensation, Netze).