Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 15 (1942)
Heft: III

Artikel: Ein Dreiphasen-Drehfeld-Sender für ultrakurze Wellen
Autor: Dieterle, Walter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-111301

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: 10.12.2025

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

Copyright 1942 by Schweizerische Physikalische Gesellschaft.
Société Suisse de Physique. — Società Fisica Svizzera.
Nachdruck verboten. — Tous droits réservés. — Printed in Switzerland.

Ein Dreiphasen-Drehfeld-Sender für ultrakurze Wellen

von **Walter Dieterle.**

(24. XII. 1941.)

Abschnitt II.

Messtechnischer Teil.

A: Der UKW-Drehfeldgenerator als Steuersender.

a) Der Nachweis des Drehfeldes.

1. Kreis-Oscillogramm mittels einer Braun'schen Röhre. Der aus drei parallelen, unten kurzgeschlossenen Rohren bestehende Dreiphasen-Anodenkreis wurde so dimensioniert (s. auch S. 22), dass in dessen zentraler Achse eine Braun'sche Röhre so eingebaut werden konnte, dass deren Kathodenstrahl genau in der Symmetrieachse des Systems verlief.

Der Leuchtschirm war nach oben gerichtet und etwa in der Höhe der Anodenanschlüsse gehalten. Die Zuführung der Betriebsspannungen erfolgte von unten durch ein ebenfalls zentral geführtes Rohr, welches an Erde lag und Nulleiter des ganzen Systems war (s. Fig. 15).

Die freien Ablenkplatten waren an Erde gelegt, da die Ablenkung ausschliesslich durch das von dem symmetrisch aufgebauten Dreiphasen-Anodensystem ausgehenden elektrischen und magnetischen Feld erfolgte.

Liegt an den drei Rohren je eine Wechselspannung

$$u_1 = U_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1)$$
$$u_2 = U_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2)$$
$$u_3 = U_3 \cdot \sin(\omega t + \varphi_3)\,,$$

dann kann man für verschiedene Schwingungszustände über die resultierende Ablenkung des Kathodenstrahles folgendes aussagen:

α) Angenommen, es würde nur ein Rohr hochfrequente Schwingungen ausführen, d. h.:

$$u_1 = U_0 \cdot \sin \omega t$$
$$u_2 = u_3 = 0\,,$$

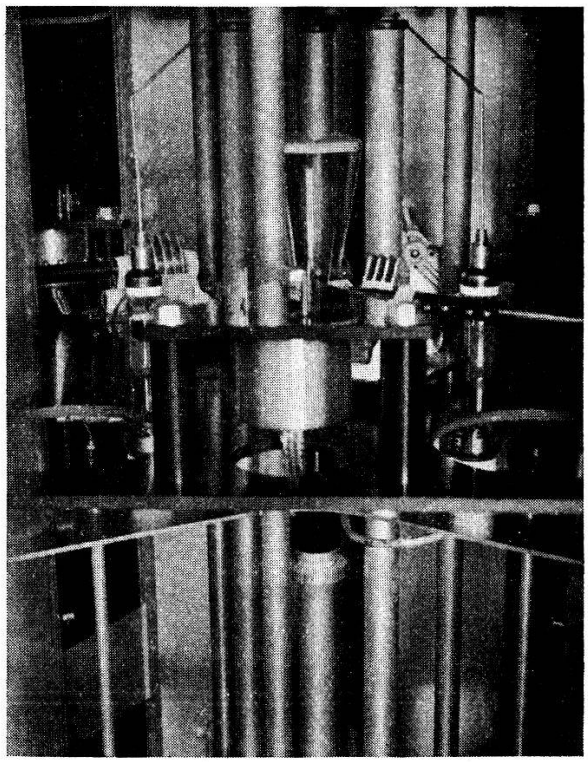


Fig. 15a.
Die im Dreiphasen-Anodensystem des Drehfeldgenerators eingebaute Hochvakuum-Kathodenstrahlröhre.

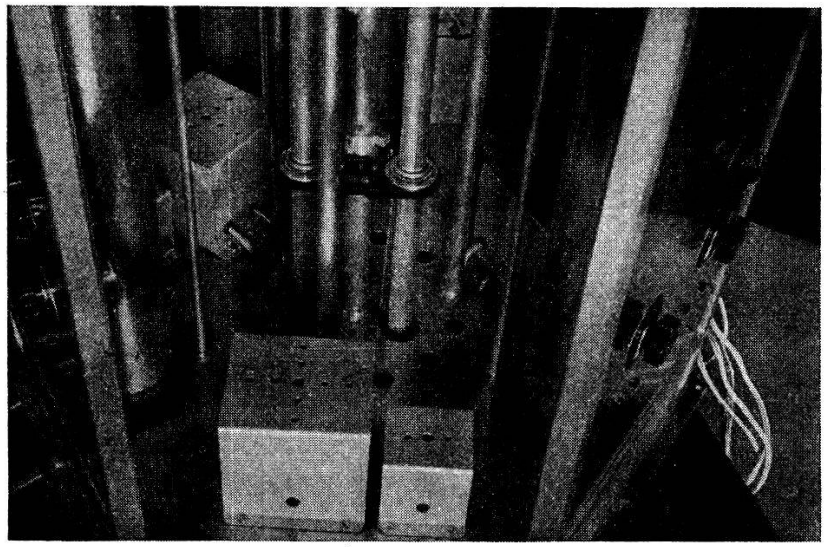


Fig. 15b.
Der dreiphasige Parallel-Rohr-Kreis des Drehfeld-Generators mit verschiebbarer Kurzschlussbrücke. Die (dicken) Rohre der Gitterkreise sind gerade noch sichtbar.

dann würde eine Ablenkung in Richtung der Verbindungslinie von Rohr 1 zum Mittelpunkt des Systems erfolgen (s. Fig. 16, *o*).

β) Je zwei Phasen erregen sich im Gegentakt, d. h. z. B.:

$$u_1 = U_0 \cdot \sin \omega t$$
$$u_2 = U_0 \cdot \sin (\omega t + \pi)$$
$$u_3 = o$$

Dieser Schwingungszustand konnte durch Ausserbetriebsetzen der dritten Oscillatorröhre und Entkopplung deren Gitterkreises jederzeit realisiert werden. Die dabei resultierende Ablenkung ergab das zur Verbindungslinie der beiden Betriebsphasen parallel laufende Oscillogramm (s. Fig. 16, *p*).

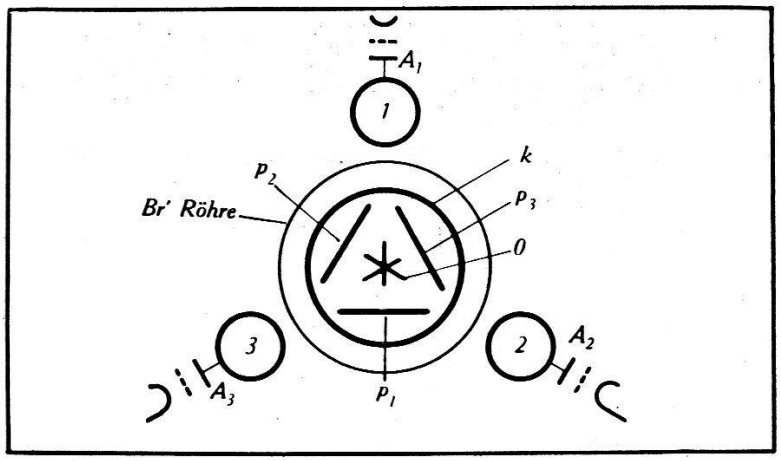


Fig. 16.

Der Nachweis des „Drehens". Das Dreiphasen-Anodensystem des Drehfeldgenerators mit zentraler Braun'scher Röhre. Man sieht schematisch die verschiedenen möglichen Ablenkungen des Kathodenstrahles:
es ist: *o* das Oscillogramm, das entsteht, wenn nur eine Phase schwingt.
p das Oscillogramm, das entsteht, wenn zwei Phasen im Gegentakt schwingen.
k das Oscillogramm, das entsteht, wenn alle drei Phasen mit einer Phasendifferenz von je $\pm 2\pi/3$ schwingen, d. h. wenn der Generator „dreht".

γ) Die drei Generatoren sind mit einer Phasendifferenz von je $\pm 2\pi/3$ erregt, d. h. der Sender „dreht".

Es sind also z. B.:

$$u_1 = U_0 \cdot \sin \omega t$$
$$u_2 = U_0 \cdot \sin (\omega t + {}_2/_3\,\pi)$$
$$u_3 = U_0 \cdot \sin (\omega t + {}^4/_3\,\pi).$$

Dann lässt sich leicht zeigen, dass — vollständige Symmetrie der elektrischen und konstruktiven Grössen vorausgesetzt — die resultierende Ablenkung des Kathodenstrahles auf einem Kreis erfolgt. Die Grösse des Durchmessers dieses Kreis-Oscillogrammes

hängt von der Schwingungsintensität (u, i) und den Betriebsgrössen der Braun'schen Röhre ab. Die praktisch erzielten Oscillogramme zeigten Durchmesser von 5—50 m/m.

Diese Oscillogramme waren vollständig sauber und klar gezeichnet, solange die Generatorstufe einwandfrei arbeitete. (Vollständiges Synchronisieren, d. h. nur eine Frequenz!) — Wurde aber dieser Zustand infolge eines groben Eingriffes in die Symmetrie des Generators, verursacht durch die Änderung mindestens einer Betriebsgrösse, gestört, so dass als Folge der Sender „ausser Tritt fiel", dann war kein sauberes Oscillogramm, sondern ein nicht mehr zu lösendes Durcheinander und Gewirr von mehreren linien- und flächenhaften Oscillogrammen zu sehen.

Der Übergang vom „Drehen" zum „Aussertrittfallen" und umgekehrt erfolgte stets sprunghaft, wobei gewisse dem „Ziehen" zweier gekoppelter Kreise ähnliche Erscheinungen auftreten (s. Fig. 17).

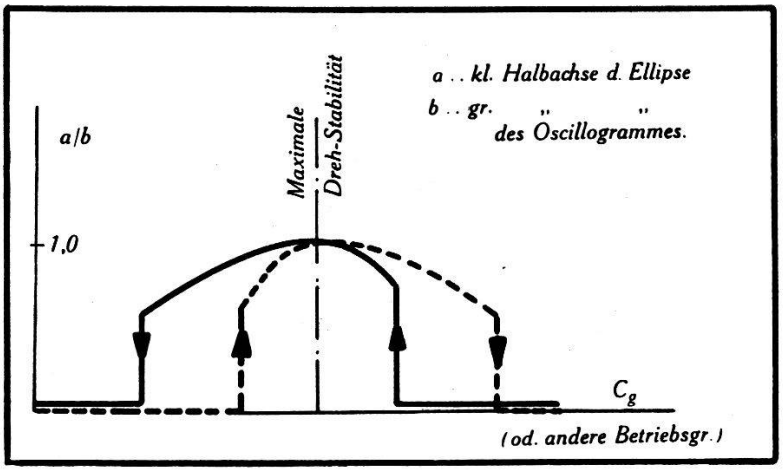


Fig. 17.

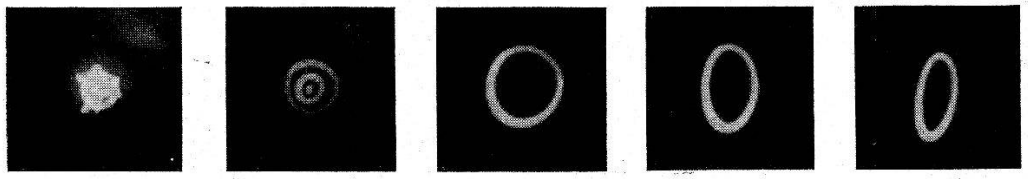
„*Zieherscheinung*" beim Übergang vom Drehen zum „Aussertrittfallen" und umgekehrt in Funktion einer Betriebsgrösse *nur* einer Phase (z. B. C_g, U_a, U_g).

Diese hier angeführte Methode erlaubte mir während sämtlichen Messungen und der ganzen Dauer des Sendebetriebes den Schwingungszustand des Drehfeld-Generators in bezug auf Amplitude und Phase qualitativ rasch zu überblicken.

2. Nachweis des Drehfeldes mittels *dreier* Kathodenstrahl-Oscillographen.

Zwischen je zwei Rohren (Phasen) des Anoden-Systems wurde über eine kleine Ankopplungskapazität die freie Platte des horizontalen, bzw. vertikalen Plattenpaares angeschlossen (s. Fig. 19).

Besteht zwischen den beiden Rohren eine Phasendifferenz, dann erfolgt die Ablenkung des Kathodenstrahles auf einer Ellipse. Aus ihrer Lage kann der Drehsinn des umlaufenden elektrischen



a b c d e

Fig. 18, a) bis e).

Photographische Aufnahmen einiger Oscillogramme.

a) Die Ablenkung des Kathodenstrahles bei verschiedenen Schwingungsarten des Generators. Die Oscillogramme sind zeitlich getrennt, jedoch auf dasselbe Negativ nacheinander aufgenommen. Man sieht: Die von je zwei im Gegentakt schwingenden Phasen erzeugte Ablenkung auf einer Geraden entsprechend Fig. 16, p und die vom Drehfeld erzeugte Ablenkung auf einem Kreis entsprechend Fig. 16, k.

b) Kreis-Oscillogramme, aufgenommen bei verschiedenen Schwingintensitäten des Generators, und zwar für

$$U_a = 1000 \text{ Volt}$$
$$U_a = 600 \text{ Volt}$$
$$U_a = 0 \text{ Volt}$$

c) Kreis-Oscillogramm, bei gleicher Anodenspannung aller drei Phasen von $U_a = 800$ Volt.

d) Der Übergang vom Kreis-Oscillogramm zum elliptischen Oscillogramm (immer innerhalb des „Drehzustandes") durch Reduktion der Schwingungsintensität einer Phase (d. h. Reduktion deren Anodenspannung)

$$U_{a-1} = U_{a-2} = 800 \text{ Volt}$$
$$U_{a-3} = 600 \text{ Volt}$$

e) Entsprechend d), jedoch wurde die Anodenspannung U_a der Phase 3 weiter reduziert:

$$U_{a-1} = U_{a-2} = 800 \text{ Volt}$$
$$U_{a-3} = 400 \text{ Volt}$$

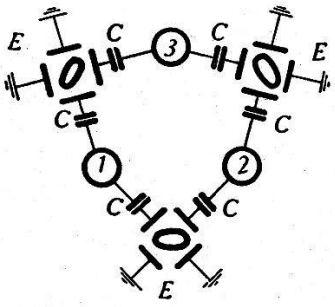


Fig. 19.

Der Nachweis des „Drehens" durch Messung des Phasenwinkels zwischen je zwei sich folgenden Vektoren der Spannungen oder Ströme im Anodenkreis des Generators oder des Verstärkers.

Bei gleicher Empfindlichkeit in horizontaler, wie auch in vertikaler Richtung der Ablenkplatten, wird das Verhältnis der Ellipsenachsen wie $\sqrt{3} : 1$.

Wenn die Phase von $+ 2\pi/3$ auf $- 2\pi/3$ übergeht, ändert sich die Lage der Ellipse und der Umlaufsinn des Kathodenstrahles.

Vektors und, bei bekannter Empfindlichkeit in beiden Richtungen, die Phasendifferenz bestimmt werden.

Diese, ebenfalls für den Nachweis des Drehfeldes dienende Messung wurde parallel zu der vorher genannten Methode am Anodenkreis des Generators oder des Verstärkers durchgeführt.

3. Nachweis des Drehfeldes mittels Strommessung in künstlichen, zu Stern- oder Dreieckschaltung angeordneten Belastungswiderständen.

Es ist bekannt, dass drei zu einem Stern oder im Dreieck geschaltete Widerstände R von gleicher Grösse dann und nur dann von gleichen Wechselströmen durchflossen werden, wenn entweder zwischen diesen Strömen oder den sie erzeugenden Spannungen der Phasenwinkel $\pm 2\pi/3$ beträgt. Demzufolge wurde der Generator, unter Zwischenschaltung einer vollständig symmetrischen und lose angekoppelten Dreiphasenleitung durch Widerstände in Stern- oder Dreieckschaltung belastet. Als Widerstände wurden Soffittenlampen verwendet; die entsprechenden Widerstandswerte liessen sich in jeder notwendigen Grösse durch Kombinationen darstellen. Ein solcher kombinierter Widerstand wurde vor dessen Einbau in bezug auf Strom- und Widerstandswert, unter Zuhilfenahme eines Pyrometers, geeicht, so dass während des Drehbetriebes sich die ganze Messung auf den Vergleich der Helligkeitswerte der Soffittenlämpchen beschränkte. Die grösste Differenz einer Messung der in den drei Belastungswiderständen gemessenen Ströme bei optimaler Einstellung des Generators auf „Drehen" betrug 6%.

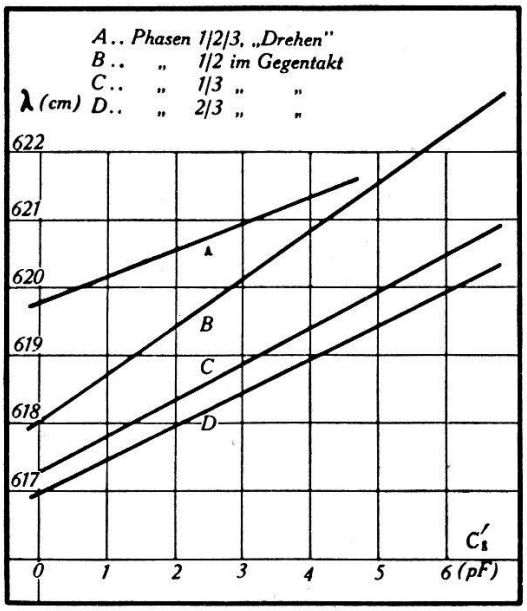


Fig. 20.

Wellenlänge des Drehfeldgenerators in Funktion der Kopplung C_g' der Gitterkreise.

b) Die Stabilität der Frequenz.

Änderung der Frequenz durch Variation der Kopplung C_g' der Gitterkreise.

Die Messung der Wellenlänge erfolgte an einem besonderen Lechersystem (Genauigkeit $\pm$ 0,2%) und wurde durchgeführt für den Gegentaktbetrieb von je zwei Phasen des Generators und für den „Drehzustand", wobei die Kopplungskapazitäten C'_{g-1} bis C'_{g-3} zwischen den einzelnen Phasen von gleicher Grösse waren. Zudem wurde durch eine Überlagerungsmethode die Kontrolle auf Einwelligkeit durchgeführt.

Änderung der Frequenz mit variabler Betriebsspannung.

Dank der Einführung guter Gitter- und Anodenkreise (Concentric Line Circuit, Linear Oscillator Circuit) für den Generator wurde die durch eine Spannungsänderung verursachte Frequenzverschiebung klein, so dass sie durch Vergleich mit einer festen Frequenz in einer Überlagerungsapparatur gemessen werden musste (z. V. stand eine Tonfrequenz-Messbrücke von 50—10000 Hz).

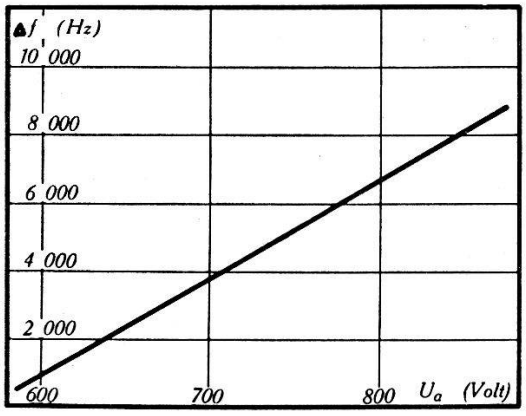


Fig. 21.

Die Frequenzstabilität der Generatorstufe: die Änderung der Frequenz (Δf) in Funktion der Anodenspannung des Generators. Dabei war dieser über die mittels C_G = konst. angekoppelte Dreiphasenleitung bzw. deren Abschlusswiderstände R_l belastet.

c) Die Abhängigkeit der Synchronisierung (des Mitnahmebereiches) von den Kopplungselementen und den Betriebsspannungen: die „Drehstabilität".

Auf Grund dieser, für den Drehfeld-Sender wohl charakteristischen Messung kann über dessen praktische Verwendbarkeit als eigentlicher Rundstrahler entschieden werden. Denn dabei wird in erster Linie verlangt, dass der „Drehzustand" und die Emission des Drehfeldes durch irgendwelche und irgendwie zustandegekommene Änderungen der Betriebsgrössen, welche periodischer Natur

(z. B. Modulation, mechanische Erschütterungen, Schwingungen) oder unregelmässiger Natur (z. B. Spannungsschwankungen, Verstimmungen der Antenne durch deren Bewegung im Wind und dgl.) sein können, nicht gestört wird.

In dieser Messung sind demnach zu erfassen: Die äussersten Grenzen des Mitnahmebereiches (gerade vor dem „Aussertrittfallen" des Generators) in Funktion,

1. der Verstimmung
2. der Änderung der Anodenspannung } je einer Phase
3. der Gittervorspannung

Dabei wurde der Drehfeldgenerator wieder über eine Dreiphasenleitung entsprechend (angepasst der Belastung durch einen später zu bauenden Verstärker) belastet. Diese Leitung war über die Kapazität C_G lose an den Generator angekoppelt. Da nun sowohl der Gitter- als auch der Anodenkreis des Generators nicht veränderlich sind, muss die Verstimmung einer Phase durch Änderung der Leitungsankopplung der betreffenden Phase vorgenommen werden, was in kleinen Grenzen noch keine Störung des Schwingungszustandes zur Folge hat.

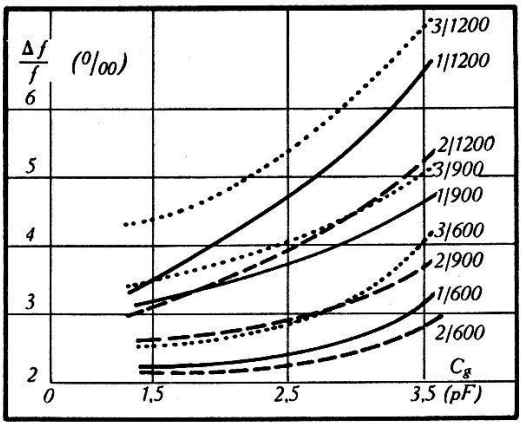


Fig. 22.

„Dreh-Stabilität": d. h. die innerhalb des „Drehbereiches" maximal zulässige Verstimmung je einer Phase bis zum „Aussertrittfallen" des Generators in Funktion der Kopplung C_g der Gitterkreise.

U_a = Parameter 1200/900/600 Volt.

Die Messung wurde wie folgt durchgeführt: Der Generator wurde auf „Drehen" eingestellt und hierauf jeweils eine Phase in der vorher genannten Weise bis zum Moment des „Aussertrittfallens" des Senders verstimmt. Diese Verstimmung je einer Phase erfolgte nach beiden Seiten (ausgehend von der Einstellung opti-

malen Drehens), wodurch für einen bestimmten Betrag der Gitterkopplung C_1 eine maximal zulässige Verstimmung, entsprechend dem Drehbereich des Kondensators C_G, erhalten wurde.

Diese in Fig. 22 dargestellte Kurve wurde als Endprodukt vieler sich wiederholender Messungen erhalten, wobei der optimale Betriebszustand für Drehen immer mehr und besser erreicht wurde.

Die Messungen der Drehstabilität bei Änderung der Anoden- und Gittervorspannung wurden bei konstanten Kopplungen C'_g und C_G durch Reduktion der betreffenden Spannung je einer Phase bis zum Moment des „Aussertrittfallens" erhalten. Über die maximal zulässige Verstimmung (s. Fig. 22) und die prozentualen Änderungen der Betriebsspannungen gibt die nachfolgende Tabelle der Messwerte Auskunft:

C_g	U_a	Verstimmung $\Delta f/f$			$\Delta U_a/U_a$	$\Delta U_g/U_g$
		‰				
pF	Volt	Phase			%	%
		1	2	3		
1,5	600	2,30	2,20	2,60	50	100
	900	3,15	2,63	3,50	55	100
	1200	3,50	3,15	4,40	65	100
2,5	600	2,28	2,20	2,80	65	100
	900	3,68	2,80	4,0	70	100
	1200	4,72	3,85	5,25	75	100
3,75	600	3,15	2,80	4,0	75	100
	900	4,55	3,15	5,25	80	100
	1200	6,5	5,25	7,20	90	100

Während der Variation einer Betriebsgrösse der betreffenden Phase wurden alle anderen Grössen der gleichen Phase, sowie alle Grössen der beiden anderen Phasen, konstant gehalten.

d) Die Leistung des Generators.

Die Bestimmung der hochfrequenten Drehstromleistung erfolgte auf photometrischem Wege, wobei die an eine zwischengeschaltete Leitung angepassten Belastungswiderstände durch Soffittenlampen dargestellt wurden.

Die Messung des in diesen Soffittenlampen fliessenden hochfrequenten Stromes erfolgte entweder einzeln für jeden Belastungs-

widerstand der Dreieck- oder Sternschaltung mit Hilfe des Pyrometers oder gesamthaft mit Hilfe einer Photozelle und anschliessender Vergleichsmessung durch Speisung mit 50-periodigem Drehstrom.

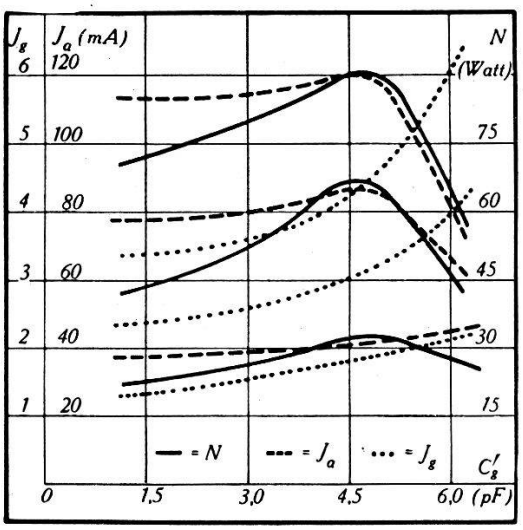


Fig. 23.

Leistung, Anodenstrom und Gitterstrom des Drehfeldgenerators in Funktion der Kopplung C_g' der Gitterkreise. Dabei war die Anodenspannung U_a Parameter mit 1500, 1200 und 1000 Volt.

Das Absinken des Anodenstromes und der Leistung ist durch die automatische Gittervorspannung ($J_g \cdot R_g$) der Oscillatorröhren bedingt.

Da die Anoden- und Gitterkreise fest gebaut und fest aufeinander abgestimmt waren, die Frequenz aber durch die variable Kopplung C_g' nach Fig. 20 etwas ändert, tritt für einen bestimmten Wert von C_g' ein optimaler Schwingungszustand des Generators auf.

B: Energieleitung und Antenne.

a) Die belastete, vom Generator direkt gespiesene Dreiphasenleitung beliebigen Wellenwiderstandes.

Eine symmetrische Dreiphasenleitung von der Länge $\lambda/2$ wurde in vollständig symmetrischer Weise durch den Kondensator C_G *lose* an den Generator angekoppelt.

In Funktion des Abschlusswiderstandes R_Δ^l dieser Leitung wurde die Welligkeit des Stromes bzw. der Spannung auf der Leitung gemessen, woraus der optimale Abschluss- oder Anpassungswiderstand für jede Leitung gefunden wurde. Die Messungen erfolgten für verschiedene Leitungen (Z = Parameter der Messungen) und die Anordnung der Abschlusswiderstände in Dreieck- und Sternschaltung.

Die Widerstände wurden auch hier durch Soffittenlampen dargestellt. Der durch die Eichmessung erhaltene Widerstandswert

war dann noch unter Berücksichtigung des Skin-Effektes, des induktiven und kapazitiven Einflusses der kleinen Glühfadenspiralen zu korrigieren.

Zwischen je zwei Drähten der Leitung hing ein an einem Schnurzug längs der Leitung fahrbar aufgehängter Mess-Dipol für die Messung der Spannungsverteilung auf den Drähten (s. Fig. 24).

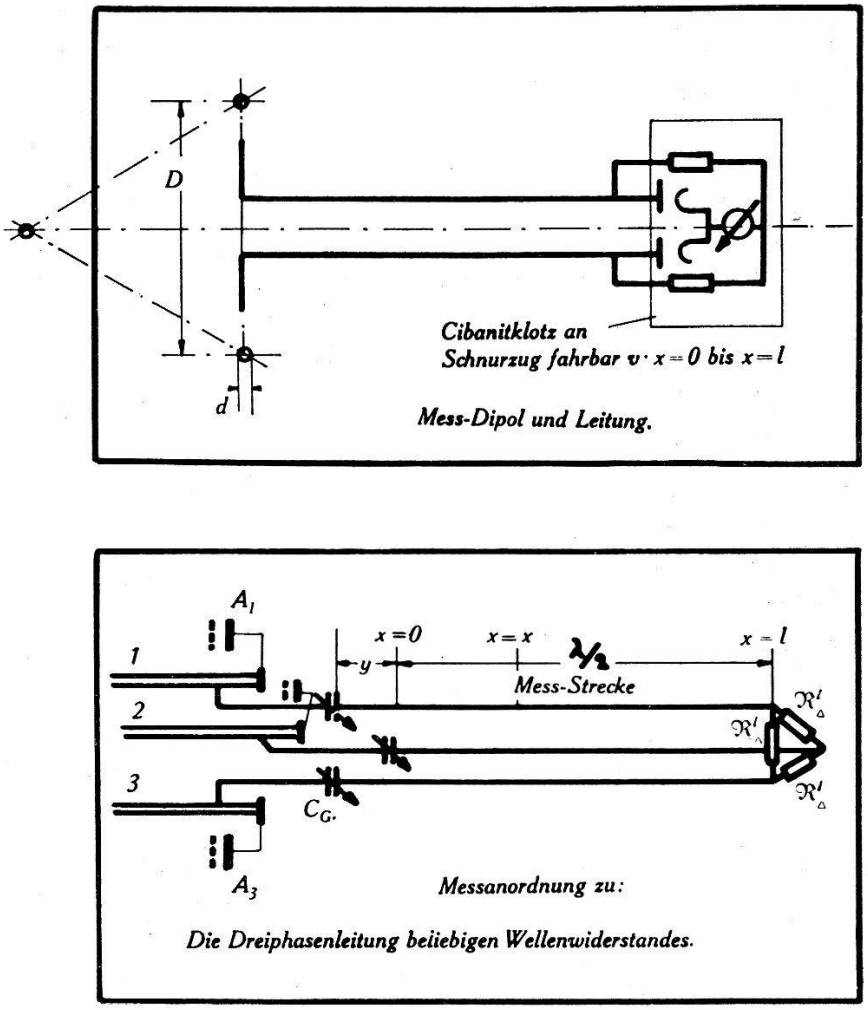


Fig. 24.

Zur Messung der Spannungsverteilung längs der Leitung waren zwischen je zwei Phasen ein an einem Schnurzug fahrbarer Messdipol frei aufgehängt. Zur Gleichrichtung diente eine Duo-Diode, deren Gleichrichtung bis zu einem Diodenstrom von 7 μA herab linear war, so dass dieser Diodenstrom direkt als Mass für die Welligkeit betrachtet werden kann. Die Empfindlichkeit konnte in einfacher Weise durch eine Längenänderung der eigentlichen Dipolarme reguliert werden.

Das zwischen den Ankopplungskondensatoren C_G und der Stelle $x = 0$ liegende Stück der Leitung kam für die Messung und Auswertung nicht in Frage, da dort die Verhältnisse gestört waren.

Die Leitungen für den Heizstrom und die Messleitung mussten in gut abgeschirmten Kabeln senkrecht aus dem Feld, also in radialer Richtung nach aussen, geführt werden.

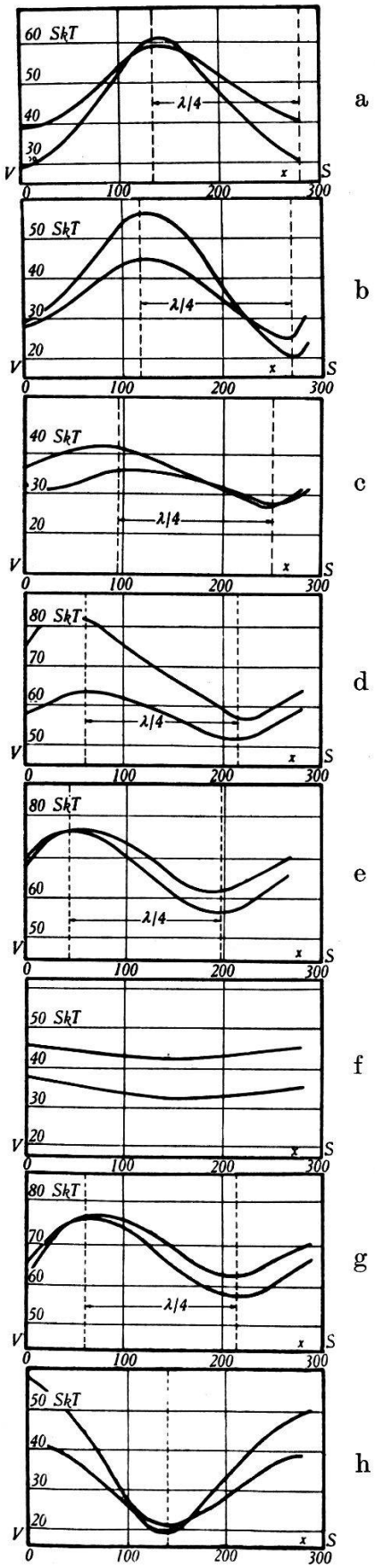


Fig. 25, a – h.

Der Verlauf der Spannungen längs der Dreiphasenleitung mit einem Wellenwiderstand $Z_\triangle = 1240$ Ohm.

Der Abschlusswiderstand R konnte zwischen 100 und 2000 Ohm geändert werden und hatte für die einzelnen Messungen (entsprechend den nebenstehenden Fig.) die folgenden Werte:

a)	$R = 0$	Kurzschluss
b)	200	
c)	600	
d)	950	
e)	1200	
f)	1360	Anpassung
g)	1540	
h)	∞	Leerlauf

Die gleichen Messungen wurden mehrmals durchgeführt und die Fig. zeigen 2 bei gleichen Versuchsbedingungen aufgenommene Kurven. Die dabei auffallenden Differenzen sind durch starke Spannungsschwankungen des Netzes zu erklären. Doch ist der prinzipielle Verlauf und die Lage der Extrema immer gleich.

Andere Messungen an Dreiphasenleitungen mit anderen Wellenwiderständen $Z_\triangle$ zeigen einen ganz ähnlichen Verlauf, so dass auf deren Wiedergabe verzichtet wurde. Dafür gibt die Tabelle die zugehörigen Werte von Wellenwiderstand und durch die Messung erhaltenem Anpassungswiderstand.

Das Resultat der an einer Dreiphasenleitung von $Z = 715$ Ohm ($Z_\Delta = 1240$ Ohm) Wellenwiderstand durchgeführten Messungen zeigt Fig. 25, a) bis h). Die für die Dreiphasenleitungen mit anderem Wellenwiderstand erhaltenen Werte des Abschlusswiderstandes für optimale Anpassung zeigt die nachstehende Tabelle:

$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{276}{\sqrt{2}} \cdot \log \frac{2 \cdot D}{d}$	$Z_\Delta = Z \cdot \sqrt{3}$ (berechnet)	R^l_Δ für Anpassung (gemessen)
550 Ohm	950 Ohm	1060 Ohm
635 Ohm	1100 Ohm	1200 Ohm
715 Ohm	1240 Ohm	1360 Ohm
800 Ohm	1380 Ohm	1600 Ohm

Dabei sind die Differenzen als bei der Berechnung des Wellenwiderstandes (kleiner Drahtdurchmesser) und der messtechnischen Bestimmung des Wertes von R^l_Δ entstandene Fehler zu erklären.

b) Die Abstimmung der Antenne.

1. Die Spannungsverteilung längs der Energieleitung niederen Wellenwiderstandes und die Knotenverschiebung in Funktion der Länge der Strahler-Elemente des Tripols.

Der aus drei symmetrischen, in einer Horizontalebene angeordneten und um 120° geometrisch verschobenen Strahlerelementen bestehende Tripol wurde durch eine niederohmige Dreiphasenenergieleitung besonderer Konstruktion (s. Fig. 12, a und 26) an die Verstärkerstufe des Senders angekoppelt.

In kleinstmöglichem Abstande vom Speisepunkt des Tripols (Strombauch) waren Thermokreuze und Mikroampèremeter zur Strommessung eingebaut.

Um auf der Leitung eine merkliche Welligkeit zu erhalten, wurde diese Messung mit einer solchen Leitung durchgeführt, deren Wellenwiderstand ein Vielfaches des Strahlungswiderstandes des Tripols darstellte.

Die Länge der Strahler wurde nun zwischen 140 und 170 cm ($^1/_4$ Wellenlänge = 155 cm) eingestellt und für jede dieser Einstellungen wurde die Verteilung der Spannung längs der Leitung aufgenommen.

Da die gesuchte optimale Abstimmung (Länge) des Strahlers jene ist, bei welcher der Strombauch bzw. der Spannungsknoten gerade in den Speisepunkt zu liegen kommt, muss für diesen Fall auf der Speiseleitung der nächste Spannungsbauch genau im Abstand $\lambda/4$ von diesem Speisepunkt liegen (s. Fig. 27).

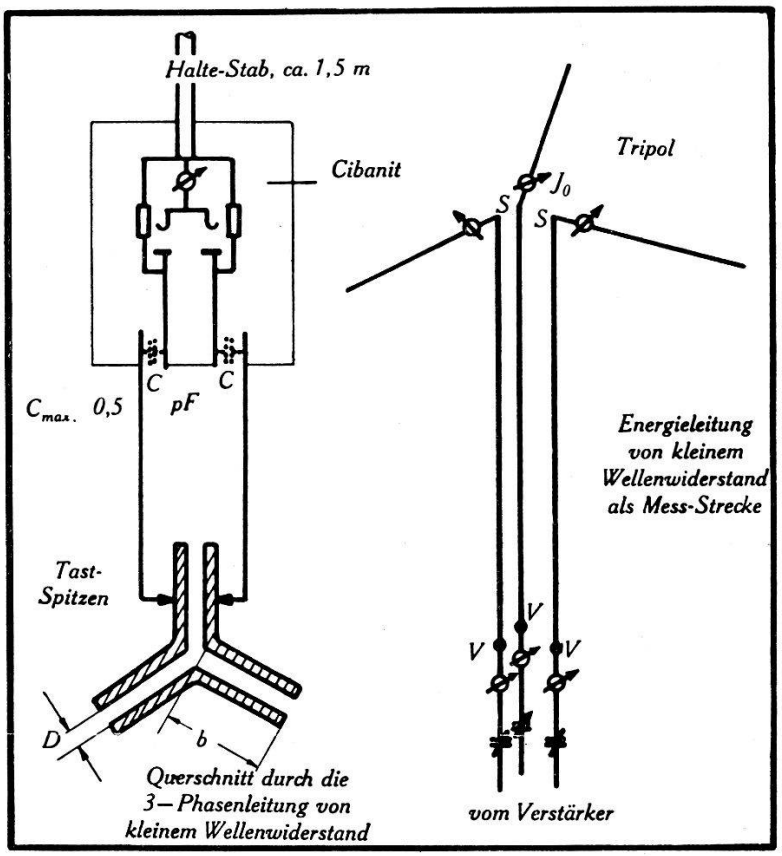


Fig. 26.

Dreiphasen-Energieleitung und Messanordnung zu B—b—1): Bei dieser Messapparatur wurde das den Diodenstrom anzeigende Messinstrument unmittelbar bei der Diode selbst montiert. Damit konnte die vertikal nach oben verlaufende Leitung von einer Leiter aus abgetastet werden.

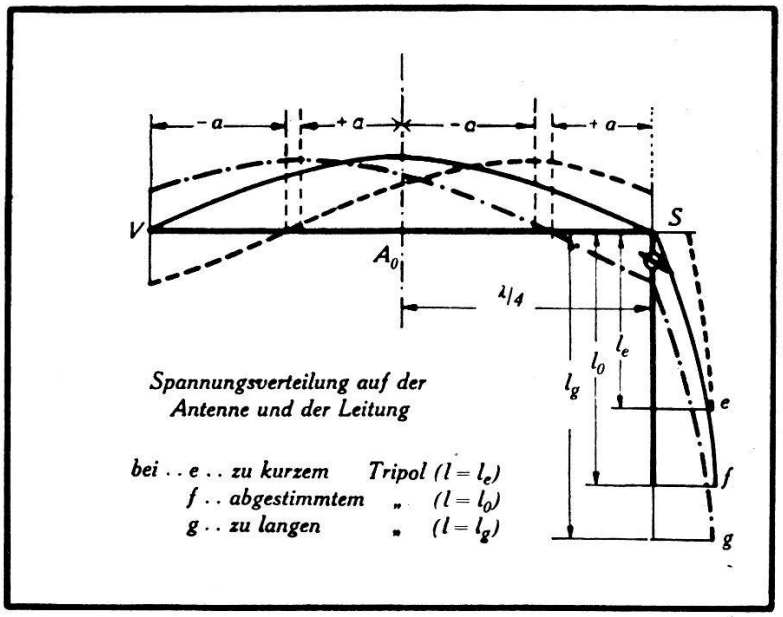


Fig. 27.

Spannungsverteilung auf der Antenne und der Leitung bei zu kurzen (e), abgestimmten (f) und zu langen (g) Tripolarmen.

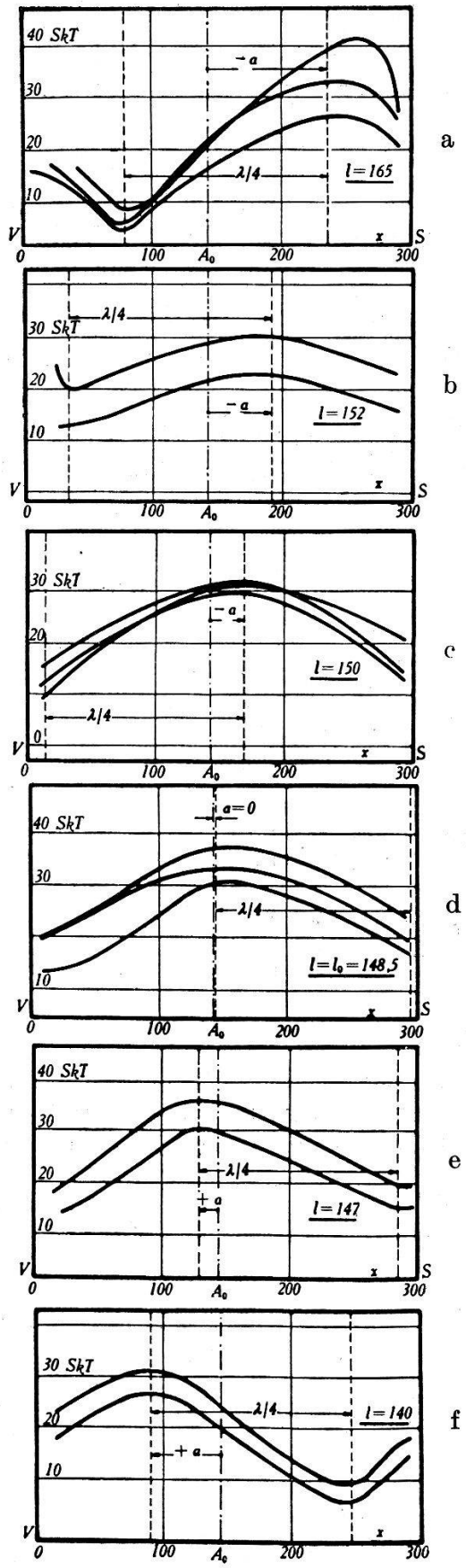


Fig. 28, a—f.

Zur Ermittlung der Abstimmung des Tripols.

Die Spannungsverteilung längs der niederohmigen Dreiphasenleitung spezieller Konstruktion in Funktion der Längen l der Strahlerelemente des Tripols.

Diese Länge l wurde zwischen 140 und 170 cm ($\lambda/4 = 155$ cm) variiert und hatte entsprechend den Fig. die folgenden Werte:

a) $l = 165$ cm
b) 152
c) 150
d) $148{,}5 = l_0$
e) 147
f) 140

Die Messungen bei einer und derselben Länge wurden mehrmals durchgeführt. Die Differenzen zwischen den einzelnen entsprechenden Kurven, deren Extrema jedoch immer an derselben Stelle liegen, sind auf Spannungsschwankungen des Netzes und kapazitive Einflüsse auf die Leitung und Antenne zu erklären.

Die Spannung längs der Leitung wurde durch die lose an die Leitung angekoppelte Messdiode (s. Fig. 26) aufgenommen. Gleichzeitig wurden für jede Strahlerlänge die Ströme in den einzelnen Armen gemessen.

Die Messungen haben gezeigt, dass die Abstimmung des Tripols sehr scharf und demzufolge auch sehr empfindlich ist, weshalb die optimale Abstimmung durch schrittweise Näherung von beiden Seiten angestrebt wurde.

In Auswertung der gemessenen Kurven von Fig. 28 lässt sich eine Kurve, welche die Verschiebung a des Spannungsbauches oder des Spannungsknotens (sie sei von nun an immer mit „Knotenverschiebung" a bezeichnet) von seiner Lage A_0 bei optimaler Abstimmung der Strahlerelemente ($a = 0$) in Funktion der Länge des Strahlers darstellt, finden:

$$a = F_1 (l)$$

oder relativ

$$a/\lambda = F_2 \left(\frac{\lambda/4 - l}{\lambda} \right)$$

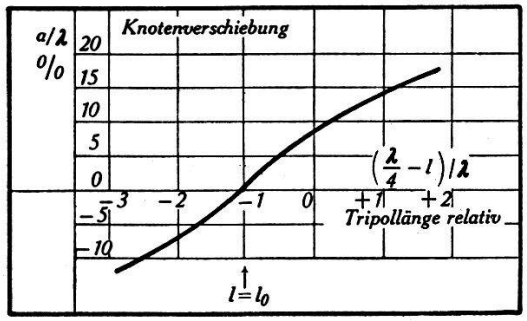


Fig. 29.

Die Abstimmung des Tripols. Der Knoten der Spannungsverteilung auf der Leitung verschiebt sich bei einer Veränderung der Armlänge des Tripols gegenüber seiner Lage bei optimaler Abstimmung. Aus dieser Verschiebung kann man die Abstimmung des Tripols finden.

Als optimale Strahlerlänge für den Tripol findet man:

$$\underline{l = l_0 = \lambda/4 - 4/100 = 0{,}24\,\lambda}$$

Vergleichsweise sei hier angeführt, dass bei gleichen Ausführungen der Antennenarme (Durchmesser, Material, Endkapazität etc.) für die optimale Abstimmung eines Dipols in der Regel gerechnet wird:

$$l^*_{\text{Dipol}} = l^*_0 = \lambda/4 - 3\%$$

2. Der Antennenstrom in Funktion der Länge l der Strahlerelemente.

Bei gefundener optimaler Abstimmung des Tripols erreicht der im Speisepunkt gemessene Antennenstrom seinen Maximalwert. Wenn man nun noch berücksichtigt, dass die zur Strommessung eingebauten Thermokreuze aus konstruktiven Gründen in einem Abstand von 5 cm vom Speisepunkt sich befanden, dann kann man ebenfalls aus dieser Messung des Stromes auf die optimale Abstimmung des Tripols schliessen.

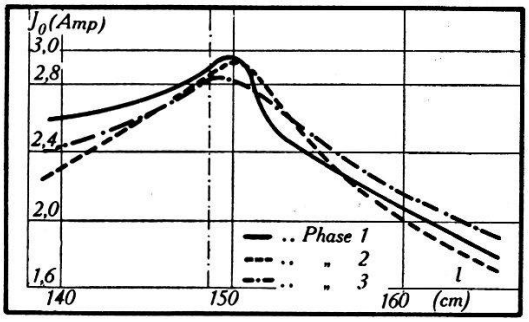


Fig. 30.

Die Abstimmung des Tripols: Antennenstrom in Funktion der Länge l des Tripols. Der Antennenstrom erreicht bei optimaler Abstimmung der Drehfeldantenne ($l = l_0$) seinen maximalen Wert.

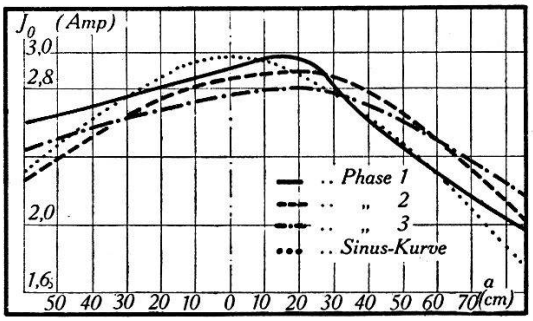


Fig. 31.

Die Abstimmung des Tripols: Antennenstrom in Funktion der Knotenverschiebung a auf der Leitung ($Z = 118$ Ohm).

Fig. 30 und 31 zeigen den Verlauf der Ströme (noch ohne Berücksichtigung des Skin-Effektes, daher J_0) in den drei Strahlerelementen in Funktion deren Länge bzw. der Knotenverschiebung a.

Mit Berücksichtigung des Skin-Effektes (Thermokreuze 0,2 m/m Eisen-Konstanten, $R_f/R_0 = 3{,}43$) wird der bei abgestimmtem Tripol maximale Antennenstrom $J_{\text{Ant}} = 1{,}85$ Amp.

c) Die Anpassung der Leitung an die abgestimmte Antenne.

Nach Abschnitt I., B., f) ist der Strahlungswiderstand der abgestimmten Drehfeldantenne bekannt. Er beträgt danach, je nach

dem Einfluss der näheren Umgebung (s. auch Kurve für $F_h\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)$ in [10])

$$R_S = 80—110 \text{ Ohm}$$

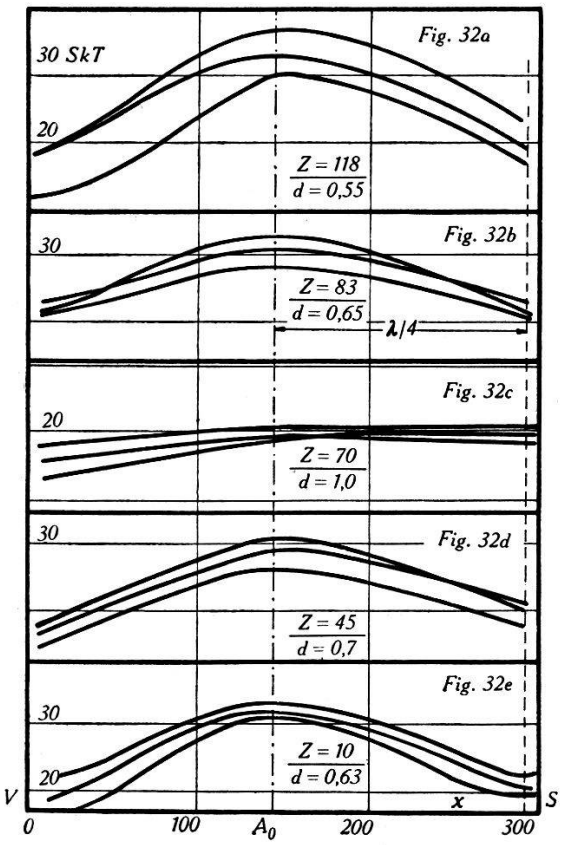


Fig. 32.

Die Anpassung der Energieleitung an die abgestimmte Antenne. $l = l_0 =$ 148,5 cm. Die Welligkeit erreicht bei optimaler Anpassung der Speiseleitung an die Antenne ein Minimum, wenn

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{L^*}{C^*}} = \frac{R_S}{\sqrt{3}} \text{ oder } R_S = \sqrt{\frac{3}{2}\frac{L^*}{C^*}} \text{ ist.}$$

Daraus kann experimentell auf den Strahlungswiderstand geschlossen werden.

Die Anpassung kann nur durch eine Änderung des Wellenwiderstandes Z der Dreiphasenleitung und Angleichung desselben an den Strahlungswiderstand erfolgen. Praktisch war dies durch eine Änderung des Abstandes D (s. Fig. 26) der drei Leiter untereinander im Bereiche zwischen 5 und 20 m/m möglich.

Die Kapazität zwischen je zwei Leitern lässt sich rechnerisch, sowie auch durch Messung mit einer Hochfrequenz-Messbrücke genau ermitteln. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen längs dieser Leitung ($v = c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sec) bekannt ist, so lässt sich die Induktivität L^* berechnen:

$$L^* = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{1}{C};$$

damit ist der Wellenwiderstand Z^* (d. h. also berechnet wie für *zwei* Leiter allein, Doppeldrahtsystem) gefunden.

Tabelle.

Fig.	Leitung				Spannungs-verteilung $d = U_{min}/U_{max}$
	D	C	L^*	Z^*	
	m/m	pF/m	Hy/m	Ohm(*)	
a)	20	30	$3{,}8 \cdot 10^{-7}$	118	0,55
b)	15	40	$2{,}8 \cdot 10^{-7}$	83	0,65
c)	10	50	$2{,}2 \cdot 10^{-7}$	$70 = Z_0^*$	1,00
d)	7,5	75	$1{,}5 \cdot 10^{-7}$	45	0,70
e)	5	110	$1{,}0 \cdot 10^{-7}$	10	0,63

(*) Berechnet nach den Formeln für das Doppeldrahtsystem.

Die zugehörige Spannungsverteilung wurde mit der in Fig. 26 beschriebenen Messdiode aufgenommen und zeigt für alle Kurven ihren Spannungsbauch im Abstande $\lambda/4$ vom Speisepunkt S (Bestätigung der unter b) gefundenen Abstimmung).

Diese Messungen über die Anpassung der Speiseleitung an die abgestimmte Antenne haben also bei einem Wellenwiderstand Z^* von 70 Ohm der Speiseleitung eine minimale Spannungswelligkeit und damit die gesuchte Anpassung ergeben, so dass

d) die experimentelle Bestimmung des Strahlungswiderstandes der Drehfeldantenne daraus erfolgen kann.

Auf S. 30 haben wir auf Grund theoretischer Überlegungen folgende Beziehung erhalten: Es ist

$$R_S = 3 \cdot R_\lambda = 3 \cdot Z_\lambda = \sqrt{3} \cdot \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}.$$

Nun ist aber

$$\sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L_0^*}{C_0^*}}$$

(Darin soll der Index $_0$ auf die Anpassung und der * wieder auf die entsprechenden Grössen des Doppeldrahtsystems hinweisen.) Somit wird

$$\underline{R_{S_{exp.}}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{\frac{L_0^*}{C_0^*}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot 70 = \underline{86 \text{ Ohm}}$$

Der maximale, je in den drei Strahlern des abgestimmten Tripols fliessende Antennenstrom betrug (unter Berücksichtigung des

Skin-Effektes) 1,85 Amp. Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass durch eine sorgfältigere Anpassung der Energieleitung an die Verstärkerstufe noch eine wesentliche Steigerung der Leistung zu erreichen gewesen wäre. Dies hätte aber grössere Arbeiten vorwiegend mechanischer Natur bedingt, welche in Ermangelung der notwendigen Zeit nicht mehr zur Ausführung gelangen konnten.

Die gesamte Strahlungsleistung des Drehfeld-Senders betrug daher, berechnet mit Hilfe des experimentell bestimmten Strahlungswiderstandes:

$$\underline{N_{S_{\text{exp.}}} = J^2_{\text{Ant}} \cdot R_S = 296 \text{ Watt}}$$

während aus dem theoretischen Wert für den Strahlungswiderstand des freien Tripols ($R_S = 90$ Ohm, Abschnitt I., B., f)) folgt:

$$\underline{N_{S_{\text{theoret.}}} = 310 \text{ Watt}}$$

Zusammenfassung.

Beruhend auf dem Prinzip der Mitnahme mehrerer selbsterregter Röhrengeneratoren wurde ein dreiphasiger Drehfeld-Sender mit Steuersender, Verstärkerstufe und Strahlersystem für UKW konstruiert.

Durch Verwendung von abgeschirmten nichtquasistationären Schwingungskreisen, denen eine hohe mechanische und elektrische Stabilität eigen ist, wurden gute Betriebsresultate erzielt.

Der Nachweis des Drehzustandes erfolgte in einfacher und übersichtlicher Weise durch Erzeugung eines kreisförmigen Oscillogrammes mittels einer sich im Feld eines dreiphasigen Anodenkreises befindenden Hochvakuum-Kathodenstrahlröhre.

Die Stabilität des Drehzustandes nimmt mit wachsender Kopplung der einzelnen Röhrengeneratoren zu und ist gross genug, dass der Drehfeld-Sender den praktischen Anforderungen genügen kann.

Soweit es für die Durchführung der vorwiegend experimentell gedachten Arbeit notwendig war, wurden die theoretischen Grundlagen einiger Konstruktionsteile ausgearbeitet.

Dabei ist die Dreiphasenleitung als das wichtigste Bauelement des Dreiphasen-Drehfeld-Senders eingehend behandelt worden, wobei sich zeigte, dass das bekannte Doppeldrahtsystem als Spezialfall dieser dreifachen Leitung behandelt werden kann.

Während der Zeit, in welcher die vorliegende Arbeit zum Abschluss gelangte, wurde eine theoretische Behandlung der Drehfeldantennen durchgeführt[10]), so dass die entsprechenden Resultate in nützlicher Weise zur Verfügung standen.

Die Resultate der theoretischen Betrachtung der Dreiphasenleitung wurden durch die Messung bestätigt, worauf eine experimentelle Bestimmung des Strahlungswiderstandes durchgeführt werden konnte. Die dabei erhaltenen Resultate der Bestimmung durch die Messung:

$R_{S_{\text{exp}}} = 86$ Ohm und der Berechnung:

$R_{S_{\text{theoret}}} = 90$ Ohm (evtl. 80—110 Ohm) (s. auch S. 53)

zeigen gute Übereinstimmung.

Schlusswort.

Die vorliegende Arbeit wurde 1939—1941 am Institut für Hochfrequenztechnik der ETH durchgeführt, wobei deren Durchführung und Abschluss infolge der politischen und geschichtlichen Zeitereignisse und meine damit zusammenhängende militärische Dienstleistung sehr erschwert und entsprechend verzögert wurde.

Dass die Arbeit trotzdem ihren Abschluss fand, habe ich in erster Linie meinem verehrten Lehrer und Leiter des Institutes, Herrn Prof. Dr. Tank, zu verdanken.

Es ist mir ebenso ein Bedürfnis wie eine Freude, ihm für sein jederzeit wohlwollendes Interesse für den Fortgang und ganz besonders für seine wertvollen Anregungen zur Arbeit, sowie auch für die Ratschläge während deren Entwicklung, meinen aufrichtigsten Dank auszusprechen.

Dank schulde ich ferner dem Vorstand der Abteilung für Elektrotechnik und des elektrotechnischen Institutes der ETH, Herrn Prof. Dr. Kuhlmann, für die Überlassung des Hochspannungsraumes der ETH, wodurch die abschliessenden und grossen Platz beanspruchenden Messungen ermöglicht wurden.

Herrn Benz, Institutsmechaniker, dem die gesamte konstruktive Ausführung des Drehfeld-Senders oblag, sei an dieser Stelle für seine grosse und unermüdlich geleistete Arbeit besonders gedankt.

Die Arbeit wurde auch von Seiten der Industrie weitgehend gefördert. Mein Dank gehört insbesondere

der Direktion der Aluminium-Industrie A.G. in Neuhausen für die Bewilligung eines Kredites, durch welchen der Bezug des notwendigen Leichtmetalles ermöglicht wurde,

den Kabelwerken Brugg, welche das 50 m lange dreiphasige Hochfrequenzkabel fabrizierten und in entgegenkommendster Weise zur Verfügung stellten, sowie

der Signum A.G. in Wallisellen für die Fabrikation und Überlassung der Senderöhren.

Die Durchführung dieser vorliegenden Arbeit wurde zu einem grossen Teile dank der finanziellen Unterstützung durch den Vorstand und Stiftungsrates des Aluminiumfonds und des ETH-Landesausstellungskredites ermöglicht, denen ich mich zu besonderem Dank verpflichtet fühle.

Literaturverzeichnis.

[1]) O. Böhm, Hf-Techn. und El. Ak. 42/4, S. 139, 1933: „Rundfunk-Sendeantennen mit vertikal gebündelter Ausstrahlung".

[2]) O. Böhm, Telefunken-Zeitung, 60, S. 26, 1932: „Kurzwellen-Rundstrahlantennen".

[3]) P. v. Handel und H. Plendl, ENT 10/2, S. 76, 1933: „Selektive Schwunderscheinungen und Höhenmessungen der Jonosphäre".

[4]) R. W. George, Proc. IRE 27/1, S. 28, 1939: „A study of Ultra-High-Frequency Wide Band Propagation Characteristics".

[5]) Nils E. Lindenblad, RCA-Review 3/4, S. 387, 1939: „Television Transmitting-Antenna for Empire State Building".

[6]) G. H. Brown, Electronics, Heft April, S. 14, 1936: „The Turnstile Antenna"

[7]) F. Tank, Helv. Phys. Acta, Bd. 7 (1934), S. 652: „Die Drehfeldantenne".

[8]) „Die Schweiz im Spiegel der Landesausstellung 1939", Band I, S. 313, Atlantis-Verlag A.G. Zürich, 1940.

[9]) „Die Elektrizität, ein Zeitbild aus der Schweiz. Landesausstellung 1939". Zürich 1941, S. 150.

[10]) V. Hardung, Bulletin SEV, 32 (1941), S. 584: „Die Strahlungseigenschaften von Drehfeldantennen".

[11]) J. J. Müller, Dissertation ETH 1937, S. 29: „Oscillations électroniques dans le magnetron".

[12]) H. Samulon, Helv. Phys. Acta, Bd. 14, S. 281, 1941: „Über die Synchronisierung von Röhrengeneratoren".

[13]) F. Tank und L. Ackermann, Helv. Phys. Acta, Bd. 2, S. 512, 1929: „Über die Erzeugung von n-Phasen-Hochfrequenzströmen".

[14]) Vilbig, Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H., Leipzig 1939.

[15]) „The Radio Antenna Handbook, second Edition", 1938 (USA).

[16]) A. W. Ladner and C. R. Stoner, Short Wave Wireless, S. 273, Chapman and Hall, Ltd. London 1936.

[17]) O. Heymann, Veröffentlichungen auf dem Gebiete der Nachrichtentechnik, 4, S. 111, 1934: „Strom- und Spannungsverteilung bei einer dreifachen Leitung".

[18]) Abraham-Föppl, „Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität", 4. Aufl., 1912, § 72, S. 301.