Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 26 (1935)

Heft: 19

Artikel: Probleme der kürzesten Radiowellen

Autor: Tank, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060333

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: 08.08.2025

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

beitung einer Reihe von Problemen, deren Lösung für das Amt von grossem Interesse wäre, leider zurückgestellt werden muss.

Wenn die Behörden ausländischer Staaten, welche vielfach keine eigenen Prüfungsinstitute besitzen, vor Ankauf schweizerischer Erzeugnisse ein Gutachten des Amtes für Mass und Gewicht über Qualität und Leistungen der betreffenden Systeme von Messgeräten verlangen, so ist es einleuchtend, dass das Vertrauen des Auslandes zur Voraussetzung hat, dass die instrumentellen Einrichtungen des Amtes sowohl wie die Beherrschung der Messmethoden auf wissenschaftlicher Grundlage den Anforderungen der Zeit in vollem Umfange entsprechen. Nur in diesem Fall ist das Amt in der Lage, den schweizerischen Export von Messgeräten zu fördern.

Probleme der kürzesten Radiowellen.

Vortrag, gehalten am 17. Juni 1935 in der Physikalischen Gesellschaft Zürich, von *F. Tank*, Zürich.

621.396.029

Es wird ein Ueberblick über Entwicklung und Stand der Kurzwellentechnik gegeben. Behandelt werden: Strahlungsleistung des Dipols, Richtwirkung von Reflektoren und Richt-Antennen, Erzeugung der kurzen Radiowellen (elektrische und magnetische Bremsfeldschaltung, Magnetron), Empfang der Kurzwellen.

L'auteur donne un aperçu du développement et de l'état actuel de la technique des ondes courtes et traite en particulier: la puissance rayonnante du dipôle, l'effet de direction de réflecteurs et d'antennes dirigées, l'émission des ondes courtes (couplage à champ électrique ou magnétique de freinage, magnétron), la réception des ondes courtes.

Der Frequenzbereich der technisch verwerteten Radiowellen erstreckt sich heute über ein Gebiet, dessen äusserste Grenzen in einem Grössen-Verhältnis von 1 : 100 000 stehen. Dieses Intervall ist nicht geringer als dasjenige, welches zwischen den kürzesten Radiowellen und dem sichtbaren Lichte, oder zwischen dem sichtbaren Lichte und den härtesten γ-Strahlen liegt. Die Physik und Technik der längsten und der kürzesten Radiowellen weisen daher, obwohl innerlich zusammenhängend, äusserlich weitgehende Unterschiede auf, und insbesondere von dem durch die Technik erst in jüngster Zeit erschlossenen Gebiete der allerkürzesten Wellen wird man erwarten müssen, dass seine Eigenart auch einen ganz besonderen Aufgaben- und Anwendungskreis bedinge.

1. Heinrich Hertz legte seinen berühmten «Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft» [1]) ein schwingendes, gestrecktes Gebilde zugrunde, dessen Abmessungen klein gegen die Wellenlänge sind und das aus zwei Endkapazitäten mit kurzer Verbindungsleitung besteht. Sehr viele Antennen der Radiotechnik schwingen in der Art eines solchen Hertzschen Dipols. Bedeutet I den effektiven Wert des Stromes im Dipol, l dessen Länge und λ die emittierte Wellenlänge (Fig. 1a), so ergibt sich die abgestrahlte Leistung zu

$$P = I^2 \cdot R_s$$

wo R_s den sog. Strahlungswiderstand bedeutet

$$R_s = 790 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \quad \Omega$$

bzw. beim geerdeten Dipol oder Halbdipol (Fig. 1b)

$$R_s = 1580 \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 \quad \Omega$$

Mit kürzerer Welle, d. h. höherer Frequenz, steigt somit die Strahlungsleistung [2]). Nur die Rücksicht auf die gleichmässigeren Uebertragungseigenschaften hat vor Jahren dazu geführt, zu immer längeren Wellen überzugehen und dabei den verhältnismässig schlechten Wirkungsgrad der Antennen in Kauf zu nehmen. Die Verbesserung der Abstrahlung durch Steigerung der Frequenz erreicht jedoch eine

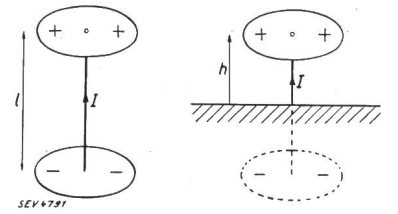

Fig. 1a. Hertzscher Dipol. Fig. 1b. Geerdeter Hertzscher Dipol. $h = \frac{l}{2}$

Grenze, wenn die Wellenlänge von der Grösse der Dipollänge wird. Der Dipol schwingt dann nicht mehr quasi-stationär. Am einfachsten und übersichtlichsten gestalten sich die Verhältnisse beim gestreckten Stab, der auch technisch eine wichtige Rolle spielt. Wir wollen ihn einen Linear-Dipol

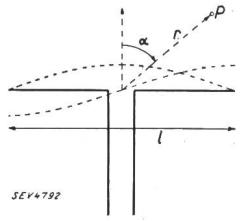

Fig. 2. Linear-Dipol mit Energieleitung. $l = \frac{\lambda}{2}$

nennen. In der Regel wird er durch eine Energieleitung in der Mitte gespeist, wo er einen Knoten der Spannung und einen Bauch des Stromes besitzt, während an den Enden Spannungsbauch und Stromknoten auftreten (Fig. 2). Der lineare Dipol schwingt in einer halben Wellenlänge.

Für ihn berechnet sich die elektrische Feldstärke an einem Punkt P in grossem Abstand r cm unter dem Winkel α zur Mittelebene zu [3])

[1]) Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1892.

[2]) Wellenlänge λ und Frequenz f hängen bekanntlich durch die Beziehung zusammen $\lambda \cdot f = c$; c = Lichtgeschwindigkeit $= 3 \cdot 10^{10}$ cm/s.

[3]) B. van der Pol, Jahrbuch der drahtl. Telegr., Bd. 13 (1918), S. 217.

$$\mathfrak{E} = \frac{60\,I}{r} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\sin\alpha\right)}{\cos\alpha}\ \text{V/cm}$$

Dabei gilt eine sinusförmige Verteilung des Stromes über die Dipollänge; I bedeutet den Effektivwert im Strombauch. In dieser Formel kommt bezeichnenderweise das Verhältnis $\frac{l}{\lambda}$ nicht mehr vor, da es in einen konstanten Wert übergegangen ist. Demzufolge wird die abgestrahlte Leistung

$$P = I^2 \cdot R_s$$

nur noch durch die Stromstärke im Schwingungsbauch gegeben, während der Strahlungswiderstand konstant und seinem Betrage nach

$$R_s = 73{,}2\ \Omega$$

ist [4]).

Zur Erzielung einer möglichst grossen Strahlungsleistung wird man es sogar vermeiden, zu allzu kurzen Wellen überzugehen, weil mit den kleiner werdenden Dimensionen der Antennen die Schwierigkeiten wachsen, starke Ströme in ihnen zu unterhalten. Dagegen besitzen die Wellen von wenigen Metern oder gar Dezimetern Wellenlänge eine Eigenschaft, welche geeignet ist, den genannten Nachteil erheblich abzuschwächen; es ist dies die Möglichkeit einer scharfen Bündelung des abgestrahlten Feldes. Diese Eigenschaft ist so charakteristisch, dass man sagen kann: Die Technik der Nachrichtenvermittlung mit kürzesten Wellen ist die Technik des Sendens und Empfangens mit Richtstrahlen.

2. In der Optik erzeugt man bekanntlich parallele Strahlenbündel durch Spiegel oder durch Linsen, indem man eine ursprünglich kugelförmige Wellenfläche in eine ebene Wellenfläche umformt. Dabei ist das entstehende Büschel aber nie scharf begrenzt, sondern leicht divergent und von einem Saum wechselnder Helligkeit und Dunkelheit umgeben. Dieses eigenartige Verhalten wird als Beugung bezeichnet und ist in der Wellennatur des Lichtes begründet. Wegen der ausserordentlichen Kleinheit der optischen Lichtwellen sind diese Beugungs-Erscheinungen in der Regel nicht leicht nachzuweisen. Anders im Gebiete der Radiotechnik. Man misst nämlich die Schärfe der Bündelung durch das Verhältnis $\frac{\lambda}{a}$, wobei a den Durchmesser der die Begrenzung des Büschels bestimmenden Blende, also z. B. des Hohlspiegels oder der Linse bedeutet [5]). Da dieses Verhältnis bei den Radiowellen (wie übrigens auch in der Akustik) meistens nicht sehr klein ist, so treten beim Richten derselben die Beugungseffekte stark in Erscheinung. Die Herstellung eines gut gerichteten Radiostrahles erweist sich daher als schwierig und gelingt um so besser, zu je kürzeren Wellen man übergeht.

[4]) Siegel und Labus, Zeitschrift f. Hochfrequenztechnik, Bd. 39 (1932), S. 86.

[5]) Vgl. auch W. Runge, Telefunkenzeitung Nr. 68, S. 24, Okt. 1934.

Ausser den eigentlichen Beugungsfragen kommt beim Richtsenden mit Reflektoren, z. B. mit Parabol-Spiegeln oder Reflektor-Antennen noch eine neue, wesentliche Schwierigkeit hinzu. Im Gegensatz zur Optik im engeren Sinne beträgt in der Radiotechnik der Abstand vom Dipol zum Spiegel, also die Brennweite, in der Regel nur wenige Viertel-Wellenlängen. Daher werden die Reflexionserscheinungen durch das sog. Nahfeld des Dipols mitbeherrscht. Dieses Nahfeld, das man auch als quasi-statisches Feld des Dipols bezeichnen könnte, klingt im Bereiche einiger Wellenlängen ab und ergibt zwar in grosser Entfernung keinen Beitrag zur direkten Strahlung, welche allein durch das sog. Fernfeld bestimmt wird. Wenn jedoch die Emission

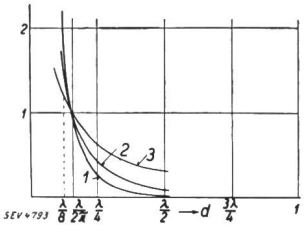

Fig. 3.
Relative Amplitudenwerte der elektrischen Äquatorialfeldstärke in verschiedener Entfernung d vom Dipol.
1 Nahfeld.
2 Uebergangsfeld.
3 Fernfeld.

eines Dipoles schon innerhalb des Nahfeldes gestört wird, z. B. durch mitschwingende Leiter, seien es nun Spiegelflächen, Antennenstäbe oder Aehnliches, so hängt der Einfluss der Störungen noch vom Nahfelde ab, und dadurch gewinnt dieses Bedeutung für die Struktur des resultierenden Fernfeldes [6]). In Fig. 3 ist die relative Grösse des Nahfeldes und des Fernfeldes für die Mittelebene des Dipols in Abhängigkeit von der Entfernung d vom Dipol nach Sammer (l. c) gezeichnet.

Man ist daher in bezug auf die Wirkungsweise der Spiegel weitgehend auf den Versuch angewiesen.

Die vollkommenste Spiegelwirkung wurde zweifellos bei der bekannten englisch-französischen Mikrostrahlen-Verbindung von Lympne nach St. Inglevert erzielt, wo auf einer Welle von 17,4 cm bei ganz kleiner Senderleistung eine Distanz von 56 km durch Telephonie und Telegraphie überbrückt wird [7]). Die Antenne, $\frac{\lambda}{2}$ lang, befindet sich im Brennpunkt eines Parabol-Reflektors von 2,3 Meter Durchmesser, der aus Aluminiumblech von 5 mm Dicke besteht. Die Wirkung wird erhöht durch einen Kugel-Reflektor von 3 λ Durchmesser, dessen Mittelpunkt auf die Antenne fällt, und der die direkt nach aussen gehende Strahlung abfängt und ebenfalls noch auf den Parabol-Spiegel wirft (Fig. 4).

Statt Rotations-Paraboloiden werden häufig auch Spiegel von der Form zylindrischer Paraboloide verwendet, sei es nun, dass sie aus gebogenem Blech bestehen (Voll-Metall-Reflektor), oder aus parallelen Stäben in Parabel-Anordnung (Gitter-Reflek-

[6]) F. Sammer, Telefunkenzeitung Nr. 53, S. 61, Dez. 1929.

[7]) A. Clavier, Onde électrique, Bd. 13 (1934), S. 101; A. Clavier und L. C. Gallant, Elektr. Nachr.-Wesen, Bd. 12 (1934), S. 178, Bull. SEV 1934, Nr. 15, S. 419.

tor). Solche Spiegel sind unter anderem von Gresky [8]) und von Köhler [9]) untersucht worden. Es zeigt sich, dass die Brennweite b der Parabel im Verhältnis zur Wellenlänge nicht beliebig ge-

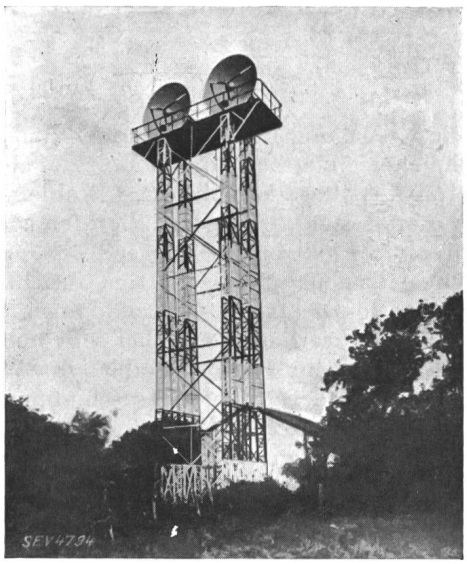

Fig. 4.
Mikrowellen-Station St-Inglevert.

wählt werden darf, sondern dass eine maximale Empfangs-Feldstärke erhalten wird, bei Erfüllung der Bedingung:

$$b = \lambda \left(0{,}27 + \frac{m}{2}\right) \qquad m = 0, 1, 2, 3 \ldots$$

Bis zu Oeffnungen (Spiegel-Durchmessern) von 5 λ scheint der unabgestimmte parabolische Gitterreflektor dem Voll-Metallreflektor überlegen, während bei grösseren Oeffnungen der Voll-Metall-Reflektor gegenüber dem unabgestimmten Gitterspiegel sich etwas günstiger gestaltet. Der abgestimmte Gitter-Reflektor dagegen besitzt wegen seiner grossen Rückenstrahlung geringere Verstärkung und geringere Richtschärfe.

Die Verwendung von Draht-Reflektoren ist an sich sehr bequem, doch hängt ihre Wirkung noch von der Zahl der Gitterstäbe ab, solange wenigstens diese nicht gross ist. Ein einzelner Stab als Reflektor-Antenne ergibt eine grösste Wirkung bei einem Abstande von $d = \frac{\lambda}{8}$ vom Sende-Dipol, während zwei parallele Stäbe in ganz grober Annäherung schon wie eine leitende Ebene wirken, d. h. wie diese etwa in $d = \frac{\lambda}{4}$ Abstand den günstigsten Richteffekt erzeugen [10]). Interessant ist, dass beim ebenen Vollspiegel eine Vergrösserung der Seitenabmessungen über λ hinaus nicht mehr viel nützt und man daher mit verhältnismässig kleinen Planspiegeln auskommen kann.

[8]) G. Gresky, Zeitschrift für Hochfrequenztechnik, Bd. 32 (1928), S. 149.

[9]) W. Köhler, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, Bd. 39 (1932), S. 207.

[10]) F. Sammer, l. c.

3. Die Erzielung einer Richtwirkung durch kombinierte Antennensysteme, sog. Richt-Antennen, ist theoretisch häufig behandelt worden [11]), und ist auch bei den den Fernverkehr vermittelnden Kurzwellen-Sendern der Technik allgemein eingeführt. Aus der Fülle der Einzelheiten sei nur folgendes angeführt: Eine nach Fig. 5 ausgeführte ebene Kombination von m gleichphasig erregten Linear-Dipo-

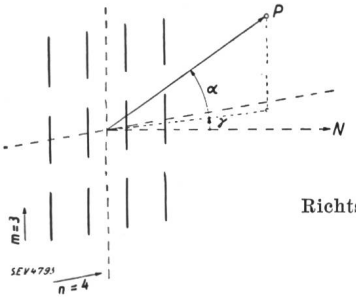

Fig. 5.
Richtstrahl-Antennensystem.

len, welche in Abständen von $\frac{\lambda}{2}$ übereinander liegen (Dipolreihe), mit n ebensolchen, die ebensoweit nebeneinander angeordnet sind (Dipolgruppe) ergibt ein Richtantennen-Gebilde von $m \cdot n$ Dipolen, bei welchem in einem durch die Entfernung r und die Winkel α und γ festgelegten Punkte die resultierende Feldstärke beträgt

$$\mathfrak{E}_{\alpha\gamma} = \frac{60\,I}{r} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi \sin\alpha}{2}\right)}{\cos\alpha} \cdot \frac{\sin\left(\frac{m\,\pi \sin\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \sin\alpha}{2}\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{n\,\pi}{2}\cos\alpha \sin\gamma\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2}\cos\alpha \sin\gamma\right)}$$

In Richtung der Normalen N ($\alpha = 0$, $\gamma = 0$) ergibt sich ein starkes Hauptmaximum, während in bestimmten, bevorzugten Richtungen schwache Nebenmaxima auftreten. Insbesondere erhält man für die einfache Dipolreihe ($n = 1$) eine Feldverteilung

$$\mathfrak{E}_{\alpha} = \frac{60\,I}{r} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi \sin\alpha}{2}\right)}{\cos\alpha} \cdot \frac{\sin\left(\frac{m\,\pi \sin\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \sin\alpha}{2}\right)}$$

welche durchaus der bekannten Intensitätsverteilung im Beugungsfeld des optischen Strichgitters entspricht.

Durch Hinzufügen eines zweiten parallelen Richt-Antennen-Systems im Abstande $\frac{\lambda}{4}$, das mit einer um eine Viertelperiode verschobenen Phase schwingt (Reflektor-System), wird ein einseitiger Richteffekt erzielt.

[11]) Vgl. z. B. E. Siegel und J. Labus, Hochfrequenztechnik u. Elektroakustik, Bd. 39 (1932), S. 86; W. Ochmann und M. Rein, Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik, Bd. 42 (1933), S. 27, 68.

Krüger und Plendl [12]) haben im Flugzeug das Feld des deutschen Japan-Senders DGY vermessen und ihre Resultate mit der Berechnung verglichen. Der Japan-Sender besteht aus 64 horizontalen Dipolen, wovon je 8 eine Horizontalreihe und je 4 eine Vertikalgruppe bilden und 32 Dipole dem eigentlichen Antennensystem und 32 dem Reflektorsystem angehören. Die verwendete Wellenlänge be-

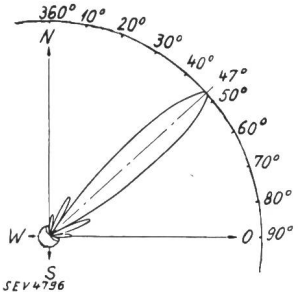

Fig. 6.
Berechnetes Horizontal-Strahlungs-Diagramm des Senders DGY.

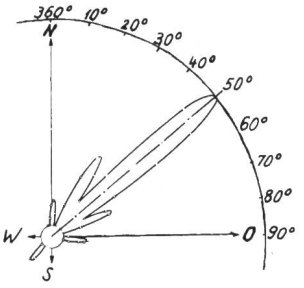

Fig. 7.
Gemessenes Horizontal-Strahlungs-Diagramm des Senders DGY.

trägt $\gamma = 16{,}95$ Meter. Aus den Diagrammen (Fig. 6 und Fig. 7) ist deutlich das Auftreten von Nebenmaxima neben dem Hauptmaximum zu erkennen sowie die gute Uebereinstimmung zwischen Rechnung und Messung.

Mit solchen Richtantennen-Systemen werden im Gebiete von 10 bis 40 Metern Wellenlänge gewaltige Reichweiten von Tausenden von Kilometern erzielt, bei Antennen-Leistungen, welche 20 kW kaum übersteigen. Diese ausserordentlichen Reichweiten verdankt man aber noch dem glücklichen Umstande, dass die Radiowellen durch die Reflexion zwischen den ionisierten höheren Atmosphärenschichten (Heaviside-Kenelly-Schicht, Ionosphäre) und der Erde gewissermassen eine Führung erhalten [13]).

Mehrfachzeichen der verschiedensten Art, seien es solche, welche von mehrmaligen Umläufen um die Erde herrühren, seien es solche, welche einer Anzahl getrennter Reflexionen in der Ionosphäre entsprechen, werden nicht selten beobachtet [14]).

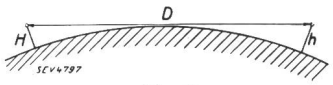

Fig. 8.
Ausbreitung von Ultrakurzwellen innerhalb direkter Sicht.

4. Doch gehören die zum Fernverkehr benützten Radiowellen schon nicht mehr in das Frequenzband der kürzesten Wellen, das wir eigentlich hier betrachten wollen. Die kürzesten Wellen von wenigen Dezimetern bis wenigen Metern Wellenlänge pflanzen sich quasi-optisch fort. Ihre Ausbreitung ist im grossen ganzen durch die optische Sicht bestimmt. Auf freiem Meere oder ebenem Gelände bestimmt daher der Horizont die Reichweite, welche sich nach Fig. 8 bei einer Erhebung des Senders und Empfängers um H bzw. h Meter über dem Boden berechnet zu:

$$D = \sqrt{2\,RH} + \sqrt{2\,Rh}$$

oder, wenn für den Erdradius der Wert $R = 6370$ km eingesetzt wird,

$$D = 3{,}55\ (\sqrt{H} + \sqrt{h})\ \text{km}$$ [15])

5. Die Erzeugung möglichst kurzer Radiowellen hat von jeher einen besonderen Reiz auf die Techniker und Physiker ausgeübt. Das Problem ist deswegen so interessant, weil gegenüber den geläufigen Verfahren mit Elektronenröhren in Rückkopplungsschaltung ganz neue und eigenartige Gesichtspunkte auftreten. Die Elektronen-Raumladungen im Innern der Röhre verhalten sich bei sehr hohen Frequenzen nicht mehr quasi-stationär; ihre Trägheit verursacht besondere Phasen-Verschiebungen zwischen den Spannungen und Strömen. Die Raumladungen selbst nehmen eine zusätzliche Dichteverteilung entsprechend einer stehenden Welle an, weshalb dann auch oft von Raumlade-Schwingungen gesprochen wird. Als Verfahren zur Erzielung solcher Raumlade-Schwingungen und damit der kürzesten ungedämpften elektrischen Wellen überhaupt kennt man heute die elektrische und die magnetische Bremsfeldschaltung.

Die elektrische Bremsfeldschaltung wurde 1919 durch Barkhausen und Kurz [16]) entdeckt. Das Gitter einer Triode wird an den positiven Pol einer Spannungsquelle gelegt, während das Potential der Anode Null oder negativ gewählt wird. Die eintretenden Elektronenpendelungen geben Anlass zu Schwingungen, deren Frequenz ungefähr mit der Pendelfrequenz der Elektronen übereinstimmt. Diese Barkhausen-Kurz-Schwingungen sind häufig untersucht worden [17]); sie dürfen heute ihrem Wesen nach als weitgehend geklärt gelten. Eine eingehende Studie hat ihnen Dick gewidmet [18]).

Unter Mitwirkung der äusseren Kreise, die meistens nahezu oder ganz auf die Pendelfrequenz der Elektronen abgestimmt werden, entstehen Schwebungen der Elektronenbewegungen. Je nachdem ein äusserer Kreis Energie an ein Elektron abgibt oder von demselben aufnimmt, wird die Amplitude der Elektronenbewegung vergrössert oder verkleinert. Bei den grossen Amplituden kann ein Abfangen an Anode oder Heizfaden eintreten, während die Elektronen kleiner Amplitude besonders leicht an das Gitter übergehen. So findet ein Amplituden-Aussortier-Effekt statt [19]), der in den ursprünglich gleichförmigen Elektronenstrom einen Rhythmus

[12]) W. Krüger und H. Plendl, Telefunkenzeitung Nr. 59, S. 7, Nov. 1931.

[13]) K. Försterling und H. Lassen, Hochfrequenztechnik u. Elektroakustik, Bd. 42 (1933), S. 158.

[14]) O. Böhm, Telefunkenzeitung Nr. 53, S. 9, Dez. 1929.

[15]) H. E. Hollmann, Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik, Bd. 44 (1934), S. 59.

[16]) H. Barkhausen und K. Kurz, Physikalische Zeitschrift, Bd. 21 (1920), S. 1.

[17]) Vgl. z. B. H. E. Hollmann, Hochfrequenztechnik u. Elektroakustik, Bd. 35 (1930), S. 21, 76, Bd. 33 (1929), S. 27, 66, 101, Bd. 44 (1934), S. 37; K. W. Wagner und H. E. Hollmann, Elektr. Nachrichtentechnik, Bd. 11 (1934), S. 418.

[18]) M. Dick, Diss. Zürich 1935.

[19]) H. G. Möller, Elektr. Nachr.-Technik, Bd. 7 (1930), S. 293, 411.

und in die Raumladung eine einer stehenden Welle ähnliche Struktur hineinbringt. Von der potentiellen Anfangsenergie der Elektronen wird im Mittel ein grösserer Energiebetrag an die äusseren Kreise abgegeben, als von diesen wiederum aufgenommen. Es entsteht eine Energiebilanz, die grundsätzlich eine Selbsterregung ermöglicht; die Frequenz hat sich lediglich noch entsprechend den Bedingungen der Phase einzustellen. Es gibt aber noch eine zweite aussortierende Wirkung, die darauf beruht, dass die Frequenz der Elektronenpendelungen amplitudenabhängig ist und daher Elektronen mit grossen Amplituden zurückbleiben, während solche mit kleinen Amplituden voraneilen [20]). Es ist klar, dass diese elektrischen Bremsfeldschwingungen die allgemeinen Züge jeder selbsterregten Schwingung zeigen müssen, dass es möglich sein muss, für sie eigentliche Schwing-Kennlinien-Diagramme aufzustellen (Dick) und dass die Rückwirkung der äusseren Kreise auf Frequenz und Amplitude qualitativ verstanden werden kann (Kopplungs-Effekte usw.). Ihr Wirkungsgrad ist aber nur gering. Eine Röhre, welche bei 50 cm Wellenlänge etwa 4 Watt Schwingleistung hergab, wurde von Telefunken gebaut [21]). Eine besonders einfache und für Untersuchungen geeignete Anordnung wird durch ein System paralleler Drähte erzielt, wovon der eine als Heizfaden (Kathode) und der andere als positives Gitter dient, während die negativ aufgeladene Glaswand der Röhre die Rolle der Anode versieht [22]).

6. Merkwürdigerweise gelingt es, Oberwellen dieser Raumladeschwingungen selbständig zu erregen, so wie man etwa eine Pfeife in einem ihrer Obertöne anblasen kann. Sie liefern ein sehr einfaches Mittel, zu ganz kurzen Wellen von 10 bis 20 cm Wellenlänge zu gelangen, wenn auch nur bei Leistungen, die Bruchteile eines Watt betragen. Müller [23]) fand in Erweiterung und Präzisierung einer schon von Potapenko aufgestellten Beziehung, dass diese Oberwellen ein konstantes Frequenzverhältnis mit der Grundwelle λ_0 bilden, welch letztere sich nach einer Formel von Scheibe [24]) ziemlich gut berechnen lässt. Es gilt

$$\lambda_r = \frac{\lambda_o}{\sigma_n},$$

wo λ_n die Wellenlänge der n-ten Oberschwingung bedeutet und σ_n angenähert die Zahlenwerte 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5 durchläuft. Hollmann sucht diese Beziehung aus seiner Theorie der Kennlinien-Inversion herzuleiten [25]); eine etwas genauere quantitative Herleitung dürfte aus der Theorie von Dick möglich sein.

[20]) «Phasenaussortierung», Möller l. c.

[21]) F. Herriger, Telefunkenzeitung Nr. 68, Okt. 1934, S. 5.

[22]) W. Gerber, Zeitschr. für Hochfrequenztechnik, Bd. 36 (1930), S. 98; Diss. Zürich 1930.

[23]) J. Müller, Ann. d. Phys., Bd. 21 (1934/35), S. 611; Diss. Zürich 1935.

[24]) Ann. d. Phys. 73, 1924, S. 54.

[25]) H. E. Hollmann, Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik, Bd. 44 (1934), S. 50; Sitz.-Ber. preuss. Akad. Wiss. VI, 1933.

Praktisch werden diese Oberschwingungen mit Hilfe einer im Gegentakt schwingenden Gitter-Spirale erzeugt, an welche ein abstimmbares Paralleldraht-System angeschlossen ist (Fig. 9).

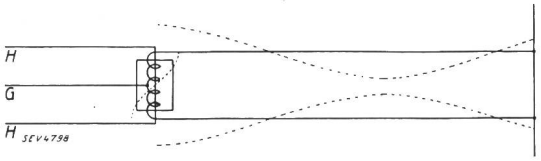

Fig. 9.
Aufbau einer Mikrowellenröhre mit angeschlossener Energieleitung und Dipol.

Zweckmässig wird die Gitter-Gleichspannung in der Gittermitte zugeführt, so dass das Paralleldrahtsystem als Energieleitung am Ende direkt in einen Dipol verzweigt werden kann [26]). Ein Generator-Antennen-System ähnlicher Art besitzt die schon erwähnte englisch-französische Kurzwellenverbindung Lympne-St. Inglevert.

7. Das Interesse an der Erzeugung besonders kurzer elektrischer Wellen mit Hilfe der elektrischen Bremsfeldschaltung ist gegenwärtig etwas in den Hintergrund gedrängt worden durch die Erfolge, welche die Methode der magnetischen Bremsfeldschaltung erlangt hat.

Bringt man eine Diode, bestehend aus Glühkathode und zylindrischer Anode in ein dem Heizfaden paralleles Magnetfeld, so werden die Elektronen abgelenkt und bei steigender Stärke des Magnetfeldes schliesslich in rückläufige Bahn gezwungen. Da die durch das Magnetfeld bewirkte Kraft

$$K = e\,v\,\mathfrak{H}$$

immer senkrecht zur Bewegungsrichtung des Elektrons steht, so leistet sie keine Arbeit, sondern verändert nur die Geschwindigkeitsrichtung des Elektrons. Bei Abwesenheit des elektrischen Feldes müsste daher ein Kreis beschrieben werden, dessen Radius ϱ sich aus der Beziehung berechnet

$$\frac{m\,v^2}{\varrho} = e\,v\,\mathfrak{H} \tag{1}$$

(e Ladung, m Masse des Elektrons)

und daher gleich wird

$$\varrho = \frac{v}{\left(\frac{e}{m}\right)} \cdot \frac{1}{\mathfrak{H}} \tag{2}$$

während die Umlaufszeit sich ergibt zu

$$\tau = \frac{2\,\pi\,\varrho}{v} = \frac{2\,\pi}{\left(\frac{e}{m}\right)\mathfrak{H}}. \tag{3}$$

Die Anwesenheit des elektrischen Feldes kompliziert die Bewegung des Elektrons erheblich. Bei steigendem Magnetfeld wird ein Wert $\mathfrak{H}_k$ erreicht, bei welchem die Elektronen nicht mehr zur Anode

[26]) J. Müller und F. Tank, Helv. Phys. Acta, Bd. 8 (1935), S. 309.

gelangen, sondern diese gerade noch tangieren. Der Anodenstrom sinkt infolgedessen rasch auf kleine Werte (Fig. 10).

Die Elektronenbahn ist dann in der Nähe der Kathode stark gekrümmt, nähert sich auf dem äusseren Teil der Kreisform und verläuft in der zwei-

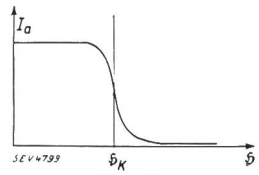

Fig. 10.
Magnetron-Charakteristik.

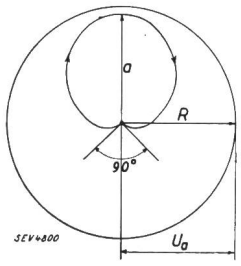

Fig. 11 (rechts).
Bahn eines Elektrons im Magnetron.

ten Halb-Periode symmetrisch, indem der Winkel zwischen den Tangenten an Bahn-Anfang und Bahn-Ende etwa 90° beträgt (Fig. 11).

Die Geschwindigkeit v ist in jedem Momente durch das elektrische Potential bestimmt gemäss der Energiegleichung

$$\frac{1}{2} m v^2 = e U$$

oder

$$v = \sqrt{\frac{2 e U}{m}} \tag{4}$$

Setzt man für U die Anodenspannung U_a ein und für ϱ den Wert $\frac{R}{2}$, so ergibt sich ein einfacher Zusammenhang zwischen Anodenspannung, Anodendurchmesser und $\mathfrak{H}_k$, nämlich

$$\mathfrak{H}_k = \frac{1}{R} \sqrt{8 \left(\frac{m}{e}\right) U_a}. \tag{5}$$

Diese Formel ist für die Dimensionierungsfragen des Magnetrons, wie die Röhren in magnetischer Bremsfeldschaltung auch heissen, wichtig. Die Verhältnisse liegen also nicht unähnlich denjenigen in der elektrischen Bremsfeldschaltung, nur ist hier die Wirkung des Gitters durch das Magnetfeld ersetzt. Es ist daher in Verbindung mit einem äusseren Kreis eine Schwingungserregung denkbar, die in Analogie mit der elektrischen Bremsfeldschaltung vor sich geht; und in der Tat verhält es sich auch so. Die entstehende Frequenz entspricht ungefähr der Umlaufszeit τ der Elektronen auf einer geschlossenen Bahnkurve, für welche, abgesehen von gewissen Korrekturen, annähernd Gl. (3) gilt. Die Energie dieser Schwingungen ist jedoch schwach.

8. Ein grosser Fortschritt wurde erzielt als Yagi und Okabe [27]) nach dem Vorgange von Habann die Anode der Länge nach in zwei Teile aufschlitzten. Sie gewannen dadurch nicht nur einen symmetrischen Aufbau, indem das äussere Schwingungssystem nun an die beiden Anodenhälften angeschlossen werden konnte, sondern es gelang, neue Typen von Magnetron-Schwingungen zu erzeugen, welche sich durch verhältnismässig grosse Leistung und guten Wirkungsgrad auszeichneten.

Zwischen den beiden Anodenhälften bildet sich eine fallende Strom-Spannungs-Charakteristik aus, wenn man beim kritischen Wert des Magnetfeldes der einen Halb-Anode eine ebenso grosse Spannungserhöhung gibt als der andern Anodenhälfte eine Spannungserniedrigung. Diese fallende Charakteristik kommt dadurch zustande, dass ein Elektron, das in der Richtung gegen die positive Anodenhälfte die Kathode verlässt, zwar eine grössere Geschwindigkeit und einen grösseren Krümmungsradius seiner Bahn erhält, aber durch das Magnetfeld zur negativeren Anodenhälfte abgelenkt wird, während ein Elektron, welches seine Anfangsbahn auf der Seite der negativen Anodenhälfte beginnt, gegen die positive Anodenhälfte abgelenkt wird und diese wegen der kleineren Geschwindigkeit und des kleineren Krümmungsradius nicht mehr erreichen kann. Ein an die beiden Halbanoden angeschalteter Schwingungskreis muss daher nach bekannten Grundsätzen zur Selbsterregung zu bringen sein. Dies gelingt auch. Die entstehende Schwingungsdauer ist zunächst nur durch die Eigenfrequenz des äusseren Schwingungskreises bestimmt. Sobald aber die Laufzeiten der Elektronen im Innern der Röhre mit ihr vergleichbar werden, darf das Verhalten der Elektronen-Raumladung nicht mehr als quasi-stationär betrachtet werden, vielmehr treten zwischen den Strömen und den Spannungen zusätzliche Phasenverschiebungen auf, welche nur für ausgewählte Frequenzen die Uebertragung des Begriffes der negativen Charakteristik auf den Schwingungsvorgang erlauben.

Bezeichnet man das Verhältnis von Schwingungsdauer T zur Elektronen-Umlaufszeit τ mit n

$$n = \frac{T}{\tau},$$

so lassen sich erfahrungsgemäss Schwingungen bis zu $n = 4$ herunter in kontinuierlicher Folge erzeugen [28]). Dann setzt, wie in Fig. 12 angedeutet, eine Lücke ein, die bis zu $n = 1$ reicht, wo die den Barkhausen-Kurz-Schwingungen analogen Magnetron-Schwingungen einsetzen können.

Für das Maximum der Schwingneigung bei $n = 4$ und ihr Abbrechen kurz darunter gibt Runge [28]) folgende Erklärung: Ein Elektron, welches die Anode nicht erreichte, kehrt zur Kathode zurück und beginnt seine Bewegung aufs neue mit einer gegenüber der ursprünglichen um 90° verschobenen Ausgangsrichtung. Nach viermaligem Umlaufe würde das Elektron ungefähr wieder auf seine ursprüngliche Bahn treffen. Es ist somit auch mit

[27]) H. Yagi und K. Okabe, Proc. Inst. Radio Engineers, Bd. 17 (1929), S. 652, Bd. 16 (1928), S. 715, Bd. 18 (1930), S. 1748. Vgl. auch A. Zacek, Zeitschrift für Hochfrequenztechnik, Bd. 32 (1928), S. 172; E. C. S. Megaw, Journal Inst. electr. Engineers, Bd. 72 (1933), S. 313; K. Posthumus, The wireless engineer, Bd. 12, (1935), S. 126; P. J. H. A. Nordlohne und K. Posthumus, Philips Transmitting News, Bd. 1, Aug. 1934; F. Müller, Elektr. Nachr.-Technik, Bd. 12 (1935), S. 131.

[28]) Nach W. Runge, Telefunkenzeitung Nr. 69, S. 8, Dez. 1934.

der erregten Schwingung in Phase und kann diese unterstützen. Nicht so bei $n = 3$ oder bei $n = 2$. Bei $n = 2$ tritt sogar Phasen-Opposition ein. Für $n = 1$ liegen die früher erwähnten, der elektrischen Bremsfeldschaltung ähnlichen Schwingungen wieder vor.

Anders gestalten sich die Verhältnisse, wenn man dem Anodenzylinder 4 Schlitze gibt, wobei gegenüberliegende Paare miteinander verbunden werden. Jetzt ist die Phasengleichheit von elektrischer Schwingung und Elektronenbewegung schon nach zwei Umläufen erreicht, so dass für $n = 2$ Selbst-

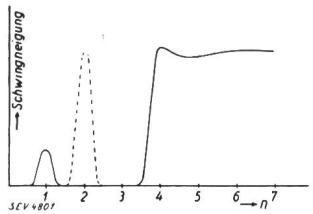

Fig. 12.
Abhängigkeit der Schwingneigung eines Magnetrons von der Zahl der Elektronenumläufe pro Periode.

erregung stattfinden kann. Dieser Fall ist in Fig. 12 durch die gestrichelte Kurve angedeutet. Auch Magnetrons mit 8 Schlitzen sind gebaut worden. Für ein Magnetron mit $k = 1$, 2 oder 4 Anodenpaaren gilt dabei:

$$T = \frac{4\,\tau}{k}$$

oder, wenn man Formel (3) benutzt und mit Hilfe von (5) $\frac{e}{m}$ eliminiert

$$T = \frac{2\,\pi}{k} \cdot \frac{R^2\,\mathfrak{H}}{2\,U_a}.$$

In Wirklichkeit wurden hier nur die grundlegenden, anschaulichsten Züge der Schwingungserregung mit Magnetrons dargestellt. Im einzelnen ist noch manches abzuklären und zu ergänzen. Für ein 4-Platten-Magnetron lässt sich je nach Konstruktion (zentrische oder exzentrische Lage des Heizfadens) eine abgegebene Schwingleistung von etwa 30 Watt bei $\lambda = 40$ cm erzielen oder von 40 bis 80 Watt im Bereich von $\lambda = 60$ bis 150 cm bei Wirkungsgraden von etwa 50 % [29]). Es sind bereits Wellenlängen von 10 cm mit ca. 1 Watt Nutzleistung erreicht worden. Damit eröffnen sich den Magnetrons interessante technische Perspektiven.

9. Die technische Verwendbarkeit der kürzesten Radiowellen lässt sich jedoch nicht vollständig beurteilen, wenn nicht auch die Empfangsverhältnisse betrachtet werden. Vor allem ist zu beachten, dass der Energiebetrag, welchen eine Empfangsantenne aus einem Strahlungsfelde aufzunehmen vermag, mit der abnehmenden Grösse dieser Empfangsantenne sinkt. Handelt es sich um einen abgestimmten Linear-Dipol von der Länge $\frac{\lambda}{2}$, so ist die vom elektrischen Strahlungsfelde in ihr erzeugte elektromotorische Kraft bei paralleler Lage von Feld und Antenne $\frac{1}{2}$ ($\mathfrak{E}\,\lambda$), also bei einer Dezimeterwelle schon 10mal kleiner als bei einer Meterwelle, wobei noch in Erwägung zu ziehen ist, dass wegen der Leistungsverhältnisse im Sender das Feld der Meterwelle viel stärker gemacht werden kann als das der Dezimeterwelle. Durch sende- und empfangsseitige Reflektor-Anordnungen lassen sich diese Nachteile nur teilweise beheben. Man kommt also auch bei den kürzesten Wellen nicht um räumlich ausgedehnte Sende- und Empfangssysteme herum, sofern man wenigstens auf eine rationelle Energieausnützung sehen und befriedigende Uebertragungsweiten erreichen will. Es ist ferner heute noch nicht möglich, ganz kurze Wellen zu verstärken und sehr schwierig, beim Empfang eine Zwischenfrequenz-Transformation nach dem Superheterodyn-Prinzip einzuführen. So bleibt beim Empfang zunächst nur die unmittelbare Gleichrichtung, z. B. durch ein geeignetes Audion, wie das Hollmannsche Bremsaudion [30]) und nachfolgende Niederfrequenz-Verstärkung. Der Wegfall der Hochfrequenzverstärkung muss als empfindliche Einbusse bezeichnet werden, da die Niederfrequenz-Verstärkung wegen der Mitverstärkung der Störgeräusche nicht beliebig weit getrieben werden kann. Es ist auch zu bedenken, dass bei den kürzesten Wellen die Gleichrichterwirkung frequenzabhängig wird [31]).

Man kann nun die wünschbare hochfrequente Zwischen-Modulation sendeseitig einführen [32]), indem man die Ultra-Kurzwellen durch eine etwa dem gewöhnlichen Rundspruchband angehörige modulierte Hochfrequenzwelle moduliert. Diese Doppelmodulation hat noch den Vorteil, dass mehrere Uebertragungen auf einer einzigen höchstfrequenten Trägerwelle vor sich gehen können, und dass beim Empfang nach einer ersten Gleichrichtung diese verschiedenen Uebertragungen durch verschieden abgestimmte Radioempfänger leicht zu trennen und weiter zu verstärken sind. Ein solches Verfahren hat auf einer Welle von $\lambda = 14$ cm Nobile [33]) durchgeführt. Der gerichtete Radiostrahl nimmt also in mehrerer Beziehung wieder die Funktionen einer Leitung an.

10. Unsere Darstellung des Gebietes der kürzesten Radiowellen wäre nicht vollständig, wenn wir nicht der Wellen im Bereiche von 1 bis 10 Meter Länge gedenken würden, die beim Fernsehen [34]), beim Flugwesen [35]), in der Medizin Verwendung finden. Wenn wir auch auf die eigentlichen Probleme des Fernsehens nicht eingehen wollen, so sei doch erwähnt, dass hier die ungeheuer breiten Modulationsbänder, welchen Frequenzen von über

[29]) Vgl. auch K. Posthumus l. c.; W. Runge l. c.

[30]) H. E. Hollmann, Proc. Inst. Radio Eng., Bd. 22 (1934), S. 630.

[31]) J. Müller und F. Tank, Helv. Phys. Acta, Bd. 1 (1928), S. 447.

[32]) F. Schröter, Telefunkenzeitung Nr. 57, S. 48, April 1931; M. von Ardenne, ETZ, Bd. 51 (1930), S. 1619.

[33]) Institut für Hochfrequenztechnik, ETH, Zürich.

[34]) Vgl. F. Schröter, Handbuch der Bildtelegraphie und des Fernsehens, Berlin, Springer 1932.

[35]) Vgl. H. Fassbender, Hochfrequenztechnik in der Luftfahrt, Berlin, Springer 1932.

100 000 Hertz entsprechen, die Technik gezwungen haben, zur Fernsehübertragung die kürzesten Wellen zu verwenden, welche noch mit grosser Energie und genügender Qualität der Ausbreitung erzeugt werden können. Die medizinischen Anwendungen beziehen sich auf spezielle Arten von Diathermie und beruhen auf den Eigenschaften vieler hochmolekularer Stoffe, selektive Absorptionsmaxima im Gebiete der kürzesten Radiowellen zu besitzen. Dadurch wird es der Medizin möglich, unter Umständen besonders intensive innere Wärmewirkungen zu erzielen.

Schliesslich kann man die alte, oft gestellte Frage wiederum aufwerfen: Wodurch ist der Uebergang von den kürzesten Radiowellen zu den von atomaren und molekularen Strahlern ausgesandten Lichtwellen der Optik ausgezeichnet und worin liegt der wesentliche Unterschied dieser Wellenarten? Rubens und von Beyer haben schon 1911 als eine der längsten optischen Wellen die Linie von 0,343 μ Länge des Quecksilbermoleküls nachgewiesen. Das Gebiet dieser Grössenordnung ist mit gedämpften elektrischen Wellen auch schon erreicht worden [36]). Im Betrage der Wellenlänge liegt der Unterschied also nicht. Er beruht vielmehr auf der Grösse des Generators, bzw. des Strahlers. Der Strahlungsmechanismus der Atome und Moleküle unterliegt den Quantengesetzen und zeichnet sich neben grösster Schärfe der beobachtbaren Erscheinungen durch ausgesprochen diskontinuierliche Gesetzmässigkeit aus. Für die Gesetzmässigkeiten der Radiostrahlen gelten aber noch die klassischen Gesetze der Makro-Physik und vor allem die Begriffe kontinuierlicher Uebergänge und Veränderbarkeiten. Mit der Abnahme der Grösse der Radiostrahler um viele Zehner-Potenzen müsste aber der Uebergang zur diskontinuierlichen Physik von selbst eintreten. Denn bei jedem Objekt, wenn es nur genügend klein ist, verschwindet der Gültigkeitsbereich der klassischen Physik und beginnt schliesslich die Vorherrschaft der Physik der Quanten.

Erwärmung von Oeltransformatoren bei Belastung durch Erdschluss-Spulen

Von *H. Salazin*, Berlin.

In den letzten Jahren ist man mehr und mehr dazu übergegangen, Freileitungs- und Kabelnetze mit Löscheinrichtungen für den Erdschlußstrom zu versehen und benutzt in vielen Fällen die Nullpunkte vorhandener Netztransformatoren zum Anschluss der Erdschlußspulen. Es entsteht hierbei die Frage, wie weit die Transformatoren zum Anschliessen der Spulen geeignet sind und mit welcher Spulenleistung sie belastet werden können. Die nachstehenden Ausführungen sollen als Beitrag zur Beantwortung dieser Fragen dienen. Es werden die Berechnungsgrundlagen für die Stromverteilung und die Erwärmung des Drehstrom-Transformators mit angeschlossener Erdschlußspule angegeben; Rechnungsbeispiele und Kurven erläutern diese Grundlagen.

Au cours de ces dernières années, on a de plus en plus muni les réseaux aériens et souterrains de dispositifs d'extinction du courant de court-circuit à la terre, et utilise fréquemment le neutre des transformateurs de réseau pour raccorder les bobines d'extinction. La question se pose ici de savoir jusqu'à quel point les transformateurs se prêtent à l'insertion de bobines d'extinction et avec quelle puissance de bobine on peut les charger. Dans l'article ci-dessous l'auteur essaye de donner une réponse à ces questions. Il expose les notions fondamentales qui servent au calcul de la répartition du courant et de l'échauffement d'un transformateur triphasé couplé avec une bobine d'extinction et complète ces données par des exemples numériques et des graphiques.

Die Wirkungsweise der Erdschlußspulen darf als bekannt vorausgesetzt werden [1]); auch der Einfluss der verschiedenen Transformatorenschaltungen findet sich in der Literatur behandelt [2]). Der Vollständigkeit halber mögen jedoch die geeigneten Schaltungen hier Erwähnung finden. Für jeden Drehstromtransformator stellt der Erdschlußstrom eine durch den Nullpunkt tretende zusätzliche Einphasenlast dar, die sich auf die drei Phasen gleichmässig verteilt; jeder Schenkel führt also ein Drittel des Erdschlußstromes. Ist die Wicklung, an die die Erdschlußspule angeschlossen ist, in Stern geschaltet und besitzt der Transformator ausserdem eine Dreieck-Wicklung, so fliesst in dieser ein Ausgleichstrom, der so gross ist, dass auf jedem Schenkel des Transformators Gleichgewicht der Ampèrewindungen herrscht. Dieser Fall dürfte in der Praxis meistens in Frage kommen, zumal sich alle Ausführungen des Eisenkerns (Mantel- oder Kerntype, Drei- oder Fünfschenkelkern sowie 3 Einphasenkerne) dafür eignen. Die Grenze der anschliessbaren Spulenleistung ist durch die thermische Beanspruchung des Transformators gegeben. Den zweiten Fall stellt der dreischenklige Kerntransformator in Stern-Stern-Schaltung ohne Ausgleichwicklung dar. Hier wirkt der Erdschlußstrom magnetisierend und erzeugt ein Jochfeld, das zu den bekannten Schwierigkeiten der Nullpunktsverlagerung sowie zusätzlicher Verluste im Kasten führt; aus diesen beiden Gründen ist die Spulenleistung wesentlich geringer zu wählen als im ersten Fall. Ferner soll noch an die Verwendung der Zickzackwicklung zum Anschluss von Erdschlußspulen erinnert werden. Bei dieser findet bereits innerhalb der Wicklungsteile ein magnetischer Ausgleich der Einphasenlast statt, so dass weitere Wicklungen nicht beeinflusst werden; die Schaltung ist besonders zur Bildung eines künstlichen Nullpunktes geeignet und die so geschalteten Nullpunktstransformatoren werden zuweilen mit den Erdschlußspulen in einen gemeinsamen Kasten eingebaut. Im folgenden sollen zunächst die Verhältnisse in einem Transformator mit Stern-Dreieck-Schaltung untersucht werden.

[1]) Van Gastel, Bull. SEV 1932, Nr. 7, S. 157; 1934, Nr. 18, S. 491.

[2]) W. Bollmann, BBC-Nachr., Bd. 21, Nr. 3.

[36]) A. Glagolewa-Arkadiewa, Zeitschrift für Physik, Bd. 24 (1924), S. 153, Bd. 55 (1929), S. 234.