

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 19

Artikel: Technik von Mikrowellenverstärkern in Richtfunkanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Wanderfeldröhre

Autor: Bretting, J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916973>

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: 04.02.2026

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

Technik von Mikrowellenverstärkern in Richtfunkanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Wanderfeldröhre

Von J. Bretting, Ulm

621.375.029.6 : 621.396.43 : 621.385.63

Es wird gezeigt, an welchen Stellen in einem Richtfunksystem eine Höchstfrequenzverstärkung notwendig werden kann. Als Verstärker eignet sich für die gestellten Anforderungen die Wanderfeldröhre am besten. Die für die Verwendung im Richtfunk wichtigen Eigenschaften, Platzbedarf, Rauschen, nichtlineares Nebensprechen des Wanderfeldröhrenverstärkers werden erläutert. Vor- und Nachteile der verschiedenen Arten der Strahlführung werden verglichen.

L'auteur indique à quels endroits d'un système à faisceau hertzien une amplification en très haute fréquence peut être nécessaire. C'est un tube à ondes progressives qui convient le mieux dans ce cas comme amplificateur. L'auteur décrit ensuite les principales propriétés de l'amplificateur à tube à ondes progressives, en ce qui concerne l'encombrement, le bruit et la diaphonie, puis il compare les avantages et les inconvénients des différents modes de guidage des faisceaux.

1. Einleitung

Mit der Einführung des Selbstwahlfernverkehrs und des Fernsehens ergab sich u. a. die Notwendigkeit, eine grosse Nachrichtenmenge zwischen zwei festen Orten zu übertragen; beim Fernsprechen eine grosse Anzahl von Gesprächen zwischen grossen Städten, beim Fernsehen das Programm zwischen Studio und Sendestation. Diese Aufgaben erfordern grosse Bandbreiten des Übertragungssystems und können einerseits durch die Trägerfrequenztechnik mit Kabeln als Übertragungsmittel, andererseits aber durch die Richtfunktechnik, bei der der freie Raum als Übertragungsmittel verwendet wird, gelöst werden. Die Verwendung sehr hoher Frequenzen (Höchstfrequenz von 2000...6000 MHz) ermöglicht es, die HF-Leistung gebündelt in der Richtung des Empfangsortes auszustrahlen, so dass trotz, im Vergleich zu anderen Frequenzbereichen grosser Dämpfung, auf dem Übertragungsweg nur eine relativ geringe Sendeleistung (5...16 W) benötigt wird.

Im folgenden sollen nun die Probleme, die bei der Entwicklung von Höchstfrequenzverstärkern für Richtfunk auftreten, betrachtet werden.

2. Notwendigkeit der Verstärkung höchstfrequenter Leistung in Richtfunksystemen

Der Aufbau einer Richtfunkstrecke wird hauptsächlich dadurch bestimmt, dass sich höchstfrequente elektro-magnetische Wellen im wesentlichen nur auf optische Sicht ausbreiten. Dies erfordert, dass zwischen zwei mit Richtfunk verbundenen Orten im Abstand von jeweils etwa 50 km sog. Relaisstellen eingeschaltet werden müssen. Fig. 1 zeigt ein mögliches Blockschaltbild einer solchen Relaisstelle.

Die kleine von der Antenne empfangene höchstfrequente Leistung mit der Trägerfrequenz f_e , die das zu übertragende Signal als Frequenzschwankungen enthält, wird im Vorverstärker 1 verstärkt, im empfangsseitigen Mischer 2 auf die Zwischenfrequenz f_z umgesetzt, im ZF-Verstärker 4 verstärkt, im empfangsseitigen Mischer 5 auf die Sendefrequenz $f_s = f_e + \Delta f_v$ umgesetzt, im Sender-Mischer 6 auf die Zwischenfrequenz f_z umgesetzt, im Sende-Verstärker 7 verstärkt und über die Antenne abgestrahlt.

Fig. 1 zeigt ein mögliches Blockschaltbild einer solchen Relaisstelle.

1 Höchstfrequenzverstärker; 2 Empfangsmischer; 3 Empfangsoszillator; 4 ZF-Verstärker; 5 Sender-Mischer; 6 Sender-Oszillat-

7 Sende-Verstärker

f_e Trägerfrequenz; f_z Zwischenfrequenz; f_s Sendefrequenz;

Δf_v Frequenzversetzung

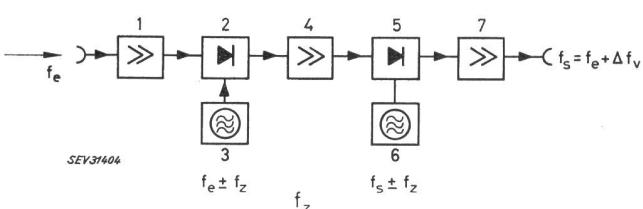


Fig. 1

Blockschaltbild einer Richtfunk-Relaisstelle

1 Höchstfrequenzverstärker; 2 Empfangsmischer; 3 Empfangsoszillator; 4 ZF-Verstärker; 5 Sender-Mischer; 6 Sender-Oszillat-

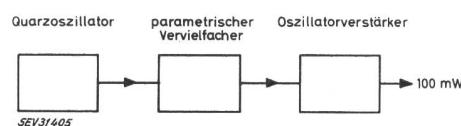
7 Sende-Verstärker

f_e Trägerfrequenz; f_z Zwischenfrequenz; f_s Sendefrequenz;

Δf_v Frequenzversetzung

setzt, im Zwischenfrequenzverstärker 4 verstärkt, im sendeseitigen Mischer 5 auf eine gegenüber der empfangenen Höchstfrequenz f_e um Δf_v versetzte Frequenz $f_e \pm \Delta f_v$ zurück umgesetzt, im Sendeverstärker 7 bis auf die erforderliche Leistung P_a verstärkt und über die Antenne wieder ausgestrahlt. Demzufolge findet eine Verstärkung höchstfrequenter Leistung im Vorverstärker und Sendeverstärker statt.

Ausser diesen beiden genannten Möglichkeiten ist z. B. noch eine dritte Möglichkeit der Verstärkung höchstfrequenter Leistung möglich: Als Sendeoszillatoren (Fig. 1) werden häufig Reflexklystrons verwendet. Es bereitet jedoch Schwierigkeiten, die erforderliche Frequenzkonstanz von etwa $5 \cdot 10^{-5}$ zu erreichen. Die sehr hohe relative Frequenzstabilität eines Quarzes kann man für einen Höchstfrequenzoszillator erhalten, wenn man die Frequenz eines Quarzes (z. B. 125 MHz) mittels Kapazitätsvariationsdioden vervielfacht. Diese Vervielfachung lässt sich bekanntlich mit einem sehr hohen Wirkungsgrad durchführen. Beim derzeitigen Entwicklungsstand der sog. parametrischen Vervielfacher lässt sich noch nicht die vom Sendeoszillator benötigte Leistung von etwa 100 mW erreichen, so dass noch ein Verstärker benötigt wird. Ein solcher Verstärker kann gleichzeitig Leistungsschwankungen infolge von Temperaturänderungen ausgleichen, wenn er als Begrenzer betrieben wird. Fig. 2 zeigt den Aufbau eines solchen Sendeoszillators.



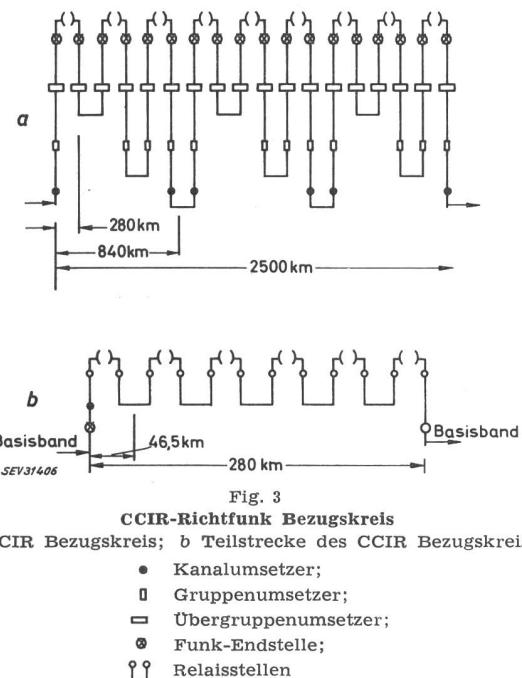
Blockschema eines Sende-Oszillators mit Oszillator-Verstärker

Diese dritte Möglichkeit der Anwendung eines Höchstfrequenzverstärkers als Oszillatorverstärker soll jedoch hier nicht näher betrachtet werden, da dieser sicher bald durch Vervielfacher mit höherer Ausgangsleistung ersetzt werden kann.

3. Anforderungen an Höchstfrequenzverstärker in Richtfunksystemen

Zunächst müssen Höchstfrequenzverstärker unabhängig vom Verwendungszweck bestimmten konstruktiven Anforderungen genügen. Die äusseren Abmessungen des gesamten Verstärkers dürfen bestimmte Werte nicht überschreiten, damit er in einem Normgestell normaler Tiefe unterzubringen ist.

Der Höchstfrequenzverstärker befindet sich mit anderen Bauelementen in einem Gestell und darf deren Funktion (z. B. durch magnetische Strefelder) nicht beeinflussen.



Die in Wärme umgewandelte Leistung soll möglichst gering sein, damit außer der Gestellbelüftung keine zusätzliche Kühlung nötig ist. Das bedeutet beim Sende-verstärker, dass der Wirkungsgrad möglichst gross sein muss. Die Anforderungen an die Übertragungseigenschaften sind dadurch gegeben, dass das Richtfunk-system die zu übertragende Nachricht nur soweit mit Störgeräuschen überlagert, wie diese vom Empfänger der Nachricht noch nicht als Störung empfunden werden.

Um von subjektiven Einflüssen unabhängig zu sein, wurden vom CCIR in einem 2500 km langen Bezugskreis (Fig. 3) Höchstwerte für die Störleistung (Rauschen und nichtlineare Verzerrungen) festgelegt. Bei Unterteilung der Störleistungen auf die einzelnen Relaisstellen und Elemente des HF-Weges ergibt sich für den Sendeverstärker eine höchstzulässige Klirrleistung pro Kanal $P_{Kmax} = 0,5 \text{ pW}$ und für das Rauschen $P_{rmax} = 1 \text{ pW}$. Das Rauschen eines Vorverstärkers sollte so klein wie möglich sein. Die Bandbreite des Verstärkers muss wegen der Verwendung von Frequenzmodulation ein Vielfaches der Bandbreite der zu übertragenden Nachricht (Basisband) betragen. Bei einem 960 Kanalsystem mit einer Basisbandbreite von etwa 4 MHz muss sie etwa 30 MHz betragen. Darüber hinaus ist anzustreben, dass der Verstärker ohne Nachstim-mung bei allen Frequenzen im Betriebsfrequenzbe-reich des Richtfunksystems (beim Richtfunksystem FM 960-TV/4000 z. B. von 3,6...4,2 GHz) betrieben werden kann. Das schliesst ein, dass die Betriebsdaten in diesem Bereich nur wenig streuen.

4. Verstärkungsarten für Höchstfrequenz

Obwohl eine Vielzahl von Verstärkungsmechanismen für Mikrowellen bekannt ist, haben nur Scheiben-trioden, Verstärker-Klystrons und Wanderfeldröhren einen solchen Entwicklungsstand und solch hohe Zu-verlässigkeit im Betrieb erreicht, dass ihre Anwendung in Frage kommt. Trioden und Klystronverstärker haben beide den Nachteil, dass ihre Bandbreite wesent-lich durch die Güte der für den Verstärkungsmechanis-

mus notwendigen Hohlraum- und koaxialen Resona-toren bestimmt ist, während Wanderfeldröhren keine in diesem Masse frequenzabhängigen Bauelemente ent-halten und wesentlich grössere relative Bandbreiten bis zu 100 % (1 Oktave) erreichen. Im Gegensatz zu Wanderfeldröhren ist demnach bei Trioden und Kly-strons beim Wechsel der Betriebsfrequenz ein Nach-stimmen der Resonatoren erforderlich.

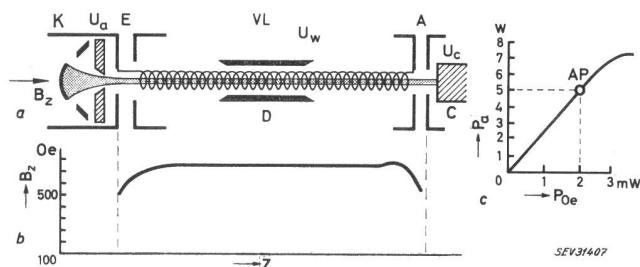
Bei Trioden wird ausserdem bei höheren Frequen-zen die Laufzeit zwischen Kathode und Gitter von gleicher Größenordnung wie die Periodendauer der Hochfrequenz. Dies hat zur Folge, dass die Eingangs-impedanz abnimmt und eine grosse Blindkomponente bekommt. Diese Schwierigkeit liesse sich durch Ver-ringerung des Gitter-Kathodenstandes bei gleicher Spannung oder durch Erhöhung der Spannung bei glei-chen Dimensionen umgehen. Durch technologische Schwierigkeiten und durch den oberen Grenzwert der Kathodenstromdichte ist eine obere Leistungsgrenze gegeben, die mit steigender Frequenz abnimmt.

Im Gegensatz zu den Verstärkern, die bewusst Lauf-zeiteffekte ausnutzen, benötigt die Tric¹e jedoch kein Strahlführungssystem. Ein Triodenverstärker ist des-wegen kleiner und billiger als z. B. ein Wanderfeld-röhrenverstärker. Dieser Vorteil hat zur Anwendung von Scheibentrioden als Senderöhre in Richtfunksys-temen kleinerer Kanalzahl bei niedrigen Richtfunkfre-quenzen geführt.

Mit Klystrons und Wanderfeldröhren lassen sich annähernd gleiche Werte der Verstärkung, Ausgangs-leistung und des Rauschens erreichen. Der Aufwand ist auch in beiden Fällen nahezu gleich gross. Wegen der sehr grossen Bandbreite wird in Breitbandricht-funksystemen bei allen für Richtfunk verwendeten Frequenzen und Richtfunksystemen kleinerer Kanal-zahl bei höheren Frequenzen ausschliesslich die Wan-derfeldröhre als Höchstfrequenzverstärker eingesetzt.

5. Aufbau und Wirkungsweise von Wanderfeld-röhrenverstärkern

Wegen der Bedeutung des Wanderfeldröhrenverstär-kers sei zum Verständnis des folgenden der Aufbau und die Wirkungsweise kurz erläutert (Fig. 4). Ein Strahlerzeugungssystem K , «Elektronenkanone» ge-nannt, erzeugt einen Strahl, dieser wird durch das Feld eines Strahlführungssystems (meistens das axiale Feld eines magnetischen Systems) über eine Strecke von 10...15 cm im Inneren einer wendelförmi-gen Leitung geführt und trifft auf den Auffänger C



Aufbau eines Wanderfeldröhrenverstärkers (a), Magnetfeldver-lauf (b) und Kennlinie (c)
 B_z magnetische Führungsfeldstärke; K Strahlerzeugungssystem; U_a Anodenspannung; E Hochfrequenz-Einkoppelspalt; VL wendelförmige Verzögerungsleitung; U_w Wendelspannung; D Entkop-pelungsdämpfung; A Hochfrequenz-Auskoppelspalt; U_c Kollek-torspannung; C Auffänger; P_a Ausgangsleistung; P_{Oe} Eingangs-leistung; AP Röhren-Arbeitspunkt; Z achsiale Koordinate

auf. Am Anfang dieser Wendel wird die zu verstärkende Leistung P_e durch einen Spalt E eingekoppelt. Diese Leistung breitet sich längs der Wendel in Form einer Welle aus. Wenn die Phasengeschwindigkeit der Welle einen bestimmten Wert besitzt, der ein klein wenig geringer ist als die Geschwindigkeit, mit der sich die Elektronen im Elektronenstrahl bewegen, so tritt die Welle mit dem Strahl in Wechselwirkung und zwar so, dass ein Teil der Gleichstromenergie des Strahles in HF-Energie umgewandelt wird.

Die Leistung der sich längs der Leitung ausbreitenden Welle nimmt zu, so dass bei A (Fig. 4a) eine um 30...40 db verstärkte Leistung P_a ausgekoppelt werden kann. Um zu erreichen, dass die Geschwindigkeit der Welle kleiner als die des Elektronenstrahls ist, muss die HF-Welle gegenüber der Ausbreitung der Lichtgeschwindigkeit im freien Raum verzögert werden. Dies geschieht durch die Wendelform der Leitung, die deswegen auch Verzögerungsleitung genannt wird. Um zu vermeiden, dass unerwünschte Schwingungen durch Rückkopplung der Welle zum Eingang entstehen, ist zwischen Eingang und Ausgang der Verzögerungsleitung eine Dämpfeschicht D angebracht.

In Fig. 4c ist die Kennlinie eines solchen Wanderfeldverstärkers gezeigt. Bei kleinen Eingangsleistungen ist die Verstärkung $G = P_a/P_e$ konstant. Bei grösseren Werten nimmt G ab und die Ausgangsleistung strebt einem Sättigungswert zu.

6. Die Wanderfeldröhre als Richtfunk-Sendevertärker

Aufgabe des Sendevertäkers in Richtfunkanlagen ist es, die vom senderseitigen Mischer angegebene Höchstfrequenzleistung von 2...10 mW bis auf die erforderliche Sendeleistung von 5...16 W zu verstärken. Die vom Sendevertäker erzeugte Störleistung soll dabei nur einen kleinen Beitrag zum Gesamtrauschen der Relaisstelle liefern.

6.1 Strahlführungssystem

Bei Verwendung von Wanderfeldröhrenverstärkern bestimmt das Magnetsystem zur Erzeugung des der Strahlführung dienenden Längsfeldes B_z die Abmessungen, das Gewicht und zum grossen Teil auch die Kosten des gesamten Verstärkers. Es muss daher besonderer Wert darauf gelegt werden, dieses Strahlfüh-

rungssystem so klein, leicht und billig wie möglich zu bauen.

Die einfachste Art der Erzeugung eines axialen Magnetfeldes ist die Verwendung einer Spule (Fig. 5a). Durch eine abgestufte Zunahme der Windungszahl/Längeneinheit zu den Spulenenden hin und durch Verwendung von Polschuhen an den Stirnflächen der Spule lässt sich erreichen, dass das ausnutzbare Magnetfeld länger als die Spule wird. Ein- und Auskopplungspunkt liegen außerhalb des Elektromagneten, so dass ein direkter Übergang von den als Zuleitung dienenden Hohlleitern auf die Röhre möglich ist.

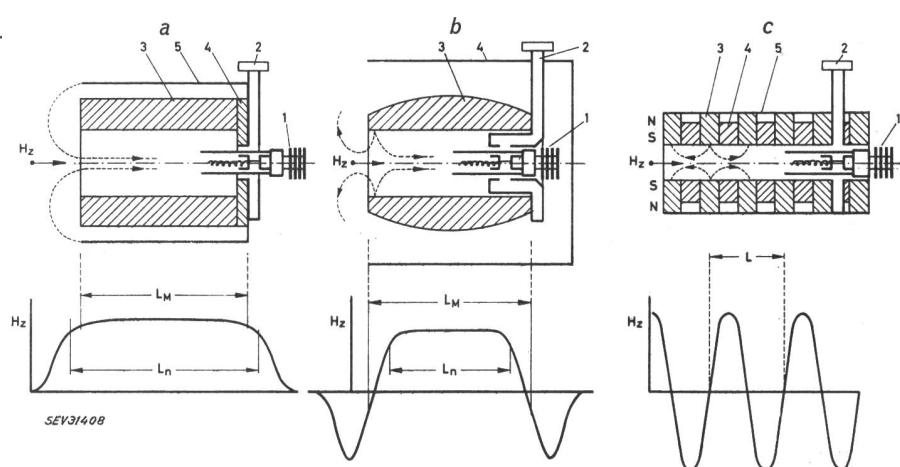
Das Streufeld außerhalb der Spule ist gross. Es lässt sich aber ohne nennenswerte Wirkung auf die Nutzfeldstärke durch einen dicht an der Spule befestigten Eisenblechmantel abschirmen. Nachteilig ist, dass ein eigenes Netzgerät zur Erzeugung des Stromes benötigt wird, und dass die Ohmschen Verluste in der Spule als Wärme abgeführt werden müssen. Von Vorteil ist, dass sich durch Vergrösserung der Windungszahl und des Stromes auf einfache Weise hohe Werte der Feldstärke H_z erreichen lassen. Eine obere Grenze ist nur durch die Erwärmung der Spule gegeben. Mit Permanentmagneten lässt sich ein magnetisches Gleichfeld auf verschiedene Arten erzeugen.

Das geringste Gewicht und das kleinste Volumen besitzt der Tonnenmagnet [2] ¹⁾ (Fig. 5b). Sein Gewicht ist grösser als das einer Spule. Eine Abschirmung des weit in den Außenraum ausgedehnten Streufeldes bewirkt eine nennenswerte Verringerung des Nutzfeldes auf der Achse. Eine Abschirmung muss daher in einem bestimmten Abstand vom Magneten angebracht werden und bestimmt somit das Volumen des Wanderfeldverstärkers. Die zur Strahlführung ausnutzbare Strecke ist kürzer als der Magnet. Ein- und Ausgang der Wanderfeldröhre sind nur durch koaxiale Leitungen zu erreichen, die außerhalb des Magneten auf den Hohlleiter übergehen. Mit einer solchen Ankopplung ist nur schwer ein breitbandiger Übergang auf die Wanderfeldröhre zu erreichen. Weil eine langgestreckte Form für ein Gleichfeld nötig ist, ist die erreichbare Nutzfeldstärke H_z auf Werte, die kleiner als die Koerzitivkraft des verwendeten Magnetmaterials sind, beschränkt. Da zur Vermeidung von Feldstärkeänderungen durch Temperaturschwankungen nur Alnico-Legierungen als Magnetmaterial in Frage kommen, sind praktisch nur Werte $H_z < 700$ Oe erreichbar. Nach-

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Fig. 5
Vergleich der für Wanderfeldröhren üblichen Strahlführungssysteme

- a Elektromagnet
 - 1 Wanderfeldröhre;
 - 2 Ankopplung;
 - 3 Magnetspule;
 - 4 Polschuh;
 - 5 Abschirmung
- b Tonnenmagnet
 - 1 Wanderfeldröhre;
 - 2 Ankopplung;
 - 3 Tonnenmagnet;
 - 4 Abschirmung
- c periodisches permanentmagnetisches System
 - 1 Wanderfeldröhre;
 - 2 Ankopplung;
 - 3 Magnetringe;
 - 4 Abstandsringe;
 - 5 Abschirmung



teilig ist ferner, dass bei zunehmender Länge des Magneten die Querabmessungen proportional, d. h. das Gewicht proportional zur 3. Potenz der Länge anwächst.

Die Vorteile des Permanentmagneten unter Vermeidung der Nachteile des Gleichfeldmagneten besitzt ein aus einzelnen Magnetringen zusammengesetztes Strahlführungssystem, das ein periodisch die Richtung wechselndes Feld erzeugt (Fig. 5c). Das ausnutzbare Feld ist ebenso lang wie das Magnetsystem. Zwischen den einzelnen Magnetringen lässt sich eine Ankopplung einfach anbringen. Die Abschirmung kann gleichzeitig als Lagerung für die einzelnen Magnetringe verwendet werden. Es können beliebig viele Ringe aneinander gereiht werden, ohne dass sich die Querabmessungen ändern müssen. Das Volumen nimmt daher nur proportional der Länge zu. Der Effektivwert der erreichbaren Feldstärke kann bei der Anordnung nach Fig. 5c grösser als die Koerzitivkraft des Magnetmaterials werden. Es muss nur das Verhältnis vom Innenradius R_1 zum Außenradius R_2 genügend klein werden. Nachteilig ist, dass bei Verwendung eines periodischen Permanentmagnetsystems die Betriebsspannungen höher liegen als bei Verwendung von Gleichfeldmagneten. Höhere Spannungen haben geringere Verstärkung pro Längeneinheit und damit bei gleicher Röhrenverstärkung eine grössere Röhrenlänge zur Folge. Der Vergleich der wesentlichen Eigenschaften von periodischen und Gleichfeldpermanentmagneten zeigt, dass das periodische Strahlführungssystem Vorteile bezüglich Gewicht und Volumen aufweist. In Fällen, bei denen der zur Verfügung stehende Raum nicht begrenzt ist, ist eine Verwendung des Gleichfeldmagneten wegen des einfacheren Aufbaus möglich.

6.2 Störleistung

Ausser den soeben geschilderten konstruktiven Gesichtspunkten ist die Kenntnis der durch den Sende-verstärker erzeugten Störleitung in einem einzelnen Gesprächskanal von 3,4 kHz Bandbreite wichtig. Sende-röhren werden i. a. nicht im linearen Teil ihrer Kennlinie (Fig. 4c) betrieben. Dies hat zur Folge, dass Intermodulation zwischen den Rauschkomponenten verschiedener Frequenzbereiche stattfindet. Zur Beurteilung des Rauschverhaltens eines Sende-verstärkers genügt es daher nicht, die auf Amplitudenschwankungen bezogene Rauschzahl

$$F = \frac{P_a/N_a}{P_e/N_e}$$

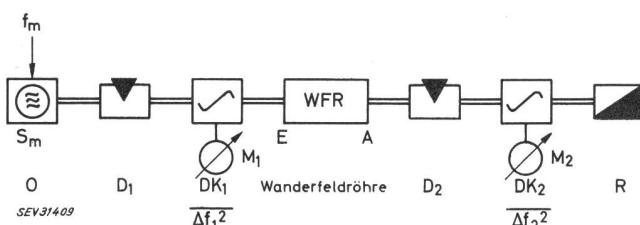


Fig. 6

Messanordnung zur Bestimmung des Rauschhubs von Wanderfeldröhren

$$\overline{f_{WFR}^2} = \overline{\Delta f_r^2} - \overline{\Delta f_i^2}$$

O Reflexklystron; D_1 Dämpfglied zur Einstellung der Eingangsleistung; DK_1 Diskriminator zur Bestimmung des Rauschhubs des Reflexklystrons; WFR zu untersuchender Wanderfeldröhrenverstärker; D_2 Dämpfglied; DK_2 Diskriminator zur Bestimmung des Rauschhubs des Wanderfeldverstärkers; R Abschlusswiderstand;

f_m Modulationsfrequenz; S_m Modulationsteilheit des Reflexklystrons

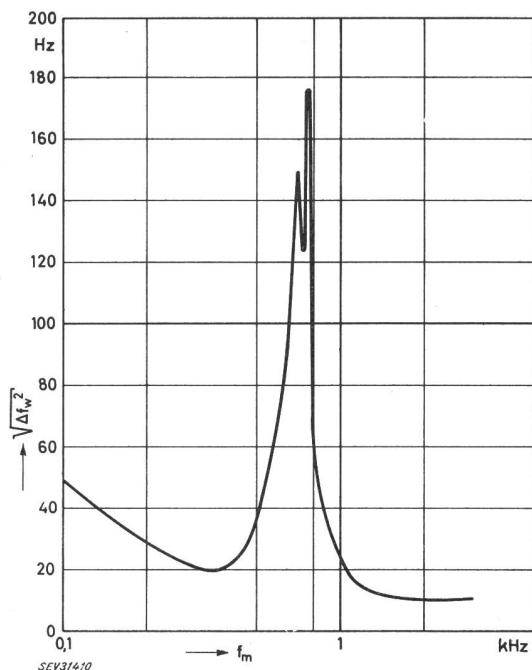


Fig. 7

Messwerte des Frequenzrauschhubs $\sqrt{\Delta f_w^2}$ eines Versuchsmusters einer Wanderfeldröhre mit Ionenrauschen

(N_c, N_a Rauschleistung am Eingang bzw. Ausgang) im linearen Teil der Kennlinie zu kennen.

Zur Kennzeichnung des Rauschens verwendet man statt dessen die in einem mit Frequenzmodulation arbeitenden System, in dem das Signal durch Frequenzschwankungen übertragen wird, wirklich störende Grösse, nämlich den durch statistische Frequenzschwankungen hervorgerufenen Frequenzhub $\sqrt{\Delta f^2}$ im Arbeitspunkt der Röhre. Er kann in einer Anordnung nach Fig. 6 gemessen werden.

Der gemessene Störhub $\sqrt{\Delta f_w^2}$ ist eine Funktion der Basisbandfrequenz, wie in Fig. 7 gezeigt. Man kann ihn als Folge einer Seitenbandrauschleistung $N_{as} = n_{as} \cdot 4kT_0 \Delta f$ entstanden denken.

Ohne den durch Intermodulation entstandenen Anteil müsste N_{as} von der Frequenz unabhängig sein. Fig. 7 zeigt, dass dies jedoch nicht der Fall ist. Bei Sende-verstärkern in Richtfunksystemen, in denen der äquivalenten Sprechleistung pro Kanal $N_k = 32 \mu\text{W}$ ein Signalhub in einem mittleren (dem neutralen) Kanal von $f = 200 \text{ kHz}$ entspricht, darf unter den 3 genannten Bedingungen ($N_{rmax} = 1 \text{ pW}$) der Störhub

$$\sqrt{\Delta f^2} = \sqrt{\frac{N_{rmax}}{N_k} \Delta f} \approx 17 \text{ Hz}$$

nicht überschreiten, wenn die Bandbreite des Messinstrumentes gleich der des Basiskanals ist.

Diese Bedingung kann ohne Schwierigkeiten eingehalten werden, wenn im Strahlerzeugungssystem ein kleiner magnetischer Fluss die den Elektronenstrom liefernde Kathode durchsetzt und der Gasdruck in der Wanderfeldröhre genügend klein ($< 5 \cdot 10^{-7} \text{ Torr}$) gehalten wird. Da für Richtfunk nahezu ausschliesslich Frequenzmodulation verwendet wird, können sich nichtlineare Verzerrungen des Phasenganges durch Mehrfachreflexionen zwischen der Dämpfschicht D im Röhreninneren (Fig. 4), dem Röhrenausgang und der Sendeantenne, die über eine elektrisch lange Leitung

mit dem Röhrenausgang verbunden ist, bemerkbar machen (longline-effect). Durch Einfügen einer Richtungsleitung zwischen Röhrenausgang und Sendeanenne kann die Störleistung verringert werden. Die von der Röhre gelieferte Störleistung entsteht dann nur noch durch Mehrfachreflexionen zwischen Dämpfeschicht und Röhrenausgang. Sie nimmt mit dem Produkt aus dem Reflexionsfaktor r_1 an der Dämpfeschicht, dem Reflexionsfaktor r_2 am Röhrenausgang und der zwischen Röhrenausgang und Dämpfeschicht stattfindenden Verstärkung G' zu. Sie ist außerdem abhängig von der Wendellänge, auf der die Verstärkung G' stattfindet, und der Geschwindigkeit der Elektronen. Für jeden Anwendungsfall lässt sich ein Wert des Produktes $r_1 r_2 G'$ bestimmen, der nicht überschritten werden darf, wenn die Klirrleistung unterhalb eines bestimmten Betrages bleiben soll. Die Aufteilung dieses Produktes auf innere Reflexionen $r_1 G'$ und Reflexionen am Übergang Röhre-Hohlleiter r_2 ist beliebig. Hat eine Röhre grosse innere Reflexionen, so sind die Anforderungen an den Reflexionsfaktor r_2 am Übergang Röhre/Hohlleiter grösser und umgekehrt.

Ausser den beiden genannten Arten tritt noch eine dritte Art von Störleistungen auf, die i. a. ebenfalls als Rauschen bezeichnet wird. Das Rauschspektrum $N_{as}'' = f(t\omega)$ zeigt, dass bei $f_m = 0,8$ MHz ein ausgeprägtes Maximum auftritt, das den zulässigen Wert bei weitem übersteigt. Die Ursache dieser «Rauschspitze» ist eine zu grosse Ionenkonzentration im Elektronenstrahl infolge zu hohen Gasdrucks in der Röhre. Die einzige Möglichkeit diese Störerscheinung (Ionenrauschen) zu verhindern, ist die Erzeugung eines genügend guten Vakuums in der Röhre.

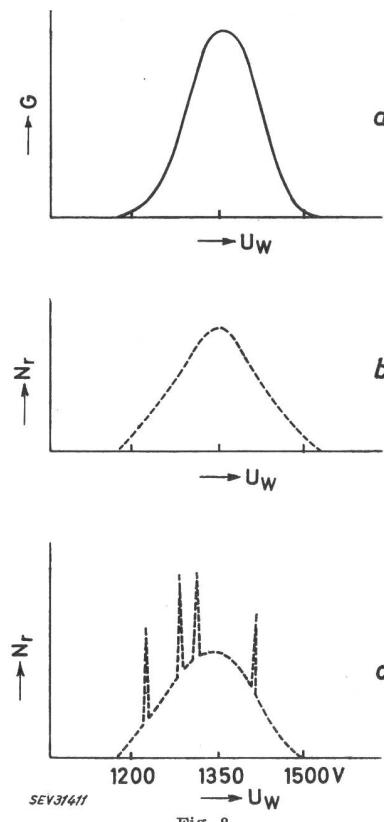


Fig. 8
Störschwingungen infolge reduzierten Kollektorpotentials
a Verstärkung als Funktion der Wendelspannung; b Rauschausgangsleistung bei $U_c \gg U_w$; c Rauschausgangsleistung bei $U_c < U_w$

6.3 Wirkungsgrad

Bei einer Betriebsleistung von 15 W liegt die in Wärme umgewandelte Verlustleistung normalerweise in der Größenordnung von 100 W. Die Abführung dieser Wärmemenge kann besonders bei magnetisch abgeschirmten Wanderfeldröhrenverstärkern Schwierigkeiten bereiten. Eine Erhöhung des Wirkungsgrades ist aus diesem Grunde erwünscht. Eine einfache Möglichkeit besteht darin, dass man das Kollektorpotential U_c kleiner als das Wendelpotential U_w wählt. Durch Verwendung eines geeigneten als «Elektronenfalle» ausgebildeten Auffängers gelingt es, den Übergang der am Kollektor ausgelösten Sekundärelektronen auf die Wendel genügend klein zu halten. Trotzdem wird dieses Verfahren nur selten in Richtfunkröhren angewandt, weil durch diese Sekundärelektronen, die im Wendelraum Längsschwingungen ausführen, eine Störmodulation erzeugt werden kann, wie sie Fig. 8 zeigt. Dort ist der niederfrequente Anteil des Rauschens nach der Demodulation als Funktion der Wendelspannung aufgetragen. Fig. 8b zeigt das Rauschen ohne und Fig. 8c mit reduziertem Kollektorpotential. Man erkennt das Auftreten von Spitzen des Rauschens.

Der Wirkungsgrad einer Röhre mit $U_c \geq U_w$ ist eine Funktion der Röhrendimensionierung. Um einen möglichst grossen elektronischen Wirkungsgrad zu erreichen, muss die Strahlpervaneanz und der Pierceschen Verstärkungsparameter

$$C = \left(\frac{KI}{4U_w} \right)^{1/3}$$

(K = Kopplungswiderstand)

möglichst gross sein. Das heisst aber, dass die Röhre mit den niedrigen Spannungen betrieben wird, und außerdem, dass der Wendelparameter

$$\gamma a = \frac{\omega}{v} \quad \omega$$

(ω Betriebskreisfrequenz, v Elektronengeschwindigkeit, a Wendelradius)

zwischen 1 und 1,5 gewählt wird.

7. Wanderfeldröhre als Vorverstärker in Richtfunkanlagen

Den grössten Beitrag zur Rauschleistung einer Relaisstelle liefert, wie bei jedem Empfänger, die 1. Stufe. Durch Vorschalten eines rauscharmen Verstärkers (Fig. 1) ist es möglich, den Rauschabstand zu vergrössern, wenn die Verstärkung G genügend gross und die Rauschzahl F des Vorverstärkers kleiner als die der nachfolgenden Stufe, des Empfangsmischers, ist. Für den Mischer lassen sich Rauschzahlen $F = 8...10$ dB erreichen. Als Verstärker mit kleinerer Rauschzahl sind Maser, parametrische Verstärker und rauscharme Wanderfeldröhren bekannt. Mit Masern erreicht man die kleinsten Rauschzahlen. Sie scheiden aber für die Anwendung im Richtfunk schon wegen des grossen Aufwandes für ihren Betrieb aus. Bei parametrischen Verstärkern bereitet bisher die Entkopplung zwischen Ein- und Ausgang Schwierigkeiten. Wegen der schon bei den Sendeverstärkern genannten Gründe (grosser Bandbreite, grosse Verstärkung) sind rauscharme Wanderfeldröhren schon wiederholt zur Anwendung in Richtfunksystemen vorgeschlagen worden. Bei ihnen

gelingt eine wesentliche Verringerung der Rauschzahl durch eine geeignete Transformation der sich als Raumladungswellen ausbreitenden Rauschgrößen im Strahlerzeugungssystem vor der Einkopplung eines HF-Signals. Auf diese Weise liessen sich in Einzelfällen Rauschzahlen $F < 3$ dB erreichen. Für eine reproduzierbare Fertigung einer möglichst kleinen Rauschzahl in einem grösseren Frequenzbereich kann aber nur mit Werten $F = 5\ldots6$ dB gerechnet werden, so dass der Rauschabstand durch einen Wanderfeldvorverstärker um 3...4 dB vergrössert werden könnte.

Eine Vergrösserung des Rauschabstandes kann umgekehrt durch eine Erhöhung der Ausgangsleistung bei gleicher Eingangsrauschzahl erreicht werden. Im Gegensatz zur Radartechnik, die mit extrem grossen Sendeleistungen arbeitet, ist beim Richtfunk eine Erhöhung der Ausgangsleistung um 3...4 dB, d. h. auf das 2 bis 3fache ohne Schwierigkeiten möglich. Der zusätzliche Aufwand ist dann auf jeden Fall kleiner als bei Verwendung einer rauscharmen Vorverstärkerstufe,

besonders weil rauscharme Wanderfeldröhren hohe magnetische Gleichfelder benötigen, so dass im allgemeinen eine Verwendung periodisch permanentmagnetischer Strahlführungssysteme nicht möglich ist.

Literatur

- [1] Kleen, W.: Einführung in die Mikrowellen-Elektronik. Teil I: Grundlagen. Zürich: Hirzel 1952.
- [2] Klein, W., J. Bretting und E. Meyerhofer: Gesichtspunkte zur Dimensionierung von Wanderfeldröhren mit Tonnenmagnetfokussierung für Richtfunk. Telefunken-Röhre -(1960)38, S. 85... 98.
- [3] Kaiser, R.: Grundgeräusch-Verteilung in Richtfunksystemen mit Winkelmodulation. (I) Fernmelde-Ing. 14(1960)12, S. 1...26.
- [4] Kaiser, R.: Grundgeräusch-Verteilung in Richtfunksystemen mit Winkelmodulation. (II) Fernmelde-Ing. 15(1961)2, S. 1...36.
- [5] Marko, H.: Die Berechnung der Klirrfaktoren und des Klirrgeräusches für die verschiedenen Verzerrungsarten bei Vielkanal-Richtfunksystemen mit Frequenzmodulation. NTZ 10 (1957)9, S. 450...457.
- [6] Klein, W.: Mikrowellenröhren für die Richtfunktechnik. Telefunken-Röhre -(1960)38, S. 5...36.
- [7] Bosch, B. G. und K. B. Niclas: Ultra-Low-Noise Traveling-Wave Tube with Simple Electron-Gun Structure. Proc. IRE 50(1962)3, S. 324...325.

Adresse des Autors:

Jörk Bretting, Diplom-Ingenieur, Telefunken GmbH, Geschäftsbereich Röhren, Ulm (Donau), Söflinger Strasse 100 (Deutschland).

Elektrizität, elektrische Beleuchtung und vegetatives Nervensystem

Von H. G. Polster, Eschweiler

621.3 + 628.979 : 612.8

Das vegetative Nervensystem wird als autonom funktionierendes Reglersystem dargestellt, von dessen harmonischem Zusammenspiel in hohem Masse Gesundheit und Wohlbefinden des Menschen abhängen. Bei krankhaftem oder durch Verletzung bzw. Überforderung gesetztem Versagen kann selektive Reizung des funktionsuntüchtigen Reglers mit elektrischen Strömen, deren Anstiegszeiten (Frequenzmodulation) und Reizzahlen/Sekunde beschrieben werden, die Harmonie wiederherstellen. Aber auch elektrische Beleuchtung wirkt stimulierend oder hemmend auf die Reglertätigkeit des Vegetativums, je nachdem das Licht auf den kürzer- oder längerwelligen Bereich des Sichtspektrums beschränkt wird. Es ergeben sich daraus interessante Aufgaben für Elektro- und Beleuchtungs-Ingenieure, wenn sie die Wirkungen der elektrischen Beleuchtung und der Elektrizität auf das autonome Nervensystem studieren.

Das vegetative Nervensystem ist in seiner Bedeutung für den geregelten Ablauf der Lebensvorgänge im menschlichen Organismus seit langem erkannt. Aber erst in den letzten Jahrzehnten ist es als *autonom funktionierendes Reglersystem* entdeckt und systematisch erforscht worden. Man weiss jetzt, dass eine grosse Zahl von Krankheiten des Kulturmenschen auf einer Störung des harmonischen Funktionsrhythmus von Sympathikus und Parasympathikus beruhen, und gibt deshalb charakteristischen Formen pathologischer Erscheinungen Namen wie «Vegetative Dystonien» (Mark) und «Vegetative Depressionen» (Lemke).

Es ist in der Tat eine Grundforderung für die Gesundheit des Menschen, dass die vegetative Tonisierung das Gleichgewicht aller Organaktivitäten gewährleistet. So wird z. B. die Zahl der Herzpulse beim herzgesunden Erwachsenen durch den Sympathikus bestimmt. Sie beträgt im Normalfall zwischen 66 und 60 in der Minute. Wenn aber bei sportlichen Leistungen oder Bergsteigen die Herzleistung mehr beansprucht wird und der Sauerstoffbedarf des Organismus nur durch eine physiologisch überhöhte Pulszahl decken könnte, schaltet das Reglersystem automatisch auf Vagotonus um: die Pulsfrequenz wird in physiologischen Grenzen gehalten. Der Parasympathikus (Vagus) vollbringt eine erstaunliche Leistung: er hemmt nicht etwa mechanisch die Schnelligkeit der Herzschläge, sondern stellt den Rhythmus der Herzaktivität so ein, dass die Pulsfrequenz zwar gemindert

Le système nerveux végétatif est décrit comme régulateur autonome, dont dépendent d'une manière très nette la santé et le bien-être de l'homme. En cas de manque de la régulation harmonique du système à cause d'une maladie ou d'une blessure, il est possible de rétablir l'harmonie au moyen d'une excitation sélective par des courants électriques dont sont exposés les caractéristiques (temps d'amplification, nombre d'impulsion par seconde). En outre, l'éclairage électrique peut stimuler ou entraîner l'activité du système, suivant la longueur d'onde plus courte ou plus longue de la lumière. Il en résulte que l'ingénieur et l'éclairagiste se trouvent devant des tâches fort intéressantes en ce qui concerne les effets de l'électricité et de l'éclairage sur le système nerveux végétatif.

wird, aber trotzdem der Kreislaufbedarf befriedigt und den erhöhten sportlichen Leistungen angepasst bleibt. Der Herzmuskel nämlich arbeitet bei jedem einzelnen Pulsschlag intensiver, er pumpt langsamer, aber wuchtiger. Er ernährt sich mit weniger Sauerstoff, weil er durch Abwandlung der Zuckeraufspaltung zusätzliche Energiequellen erschliesst. Bei Leistungssportlern und Bewohnern der Mittel- und Hochgebirge wird daher zumeist die vagotonische Herzarbeit zur Regel, weil sie von Jugend an auf die Umstellung vom einen auf den anderen Tonus angewiesen sind.

Aber nicht nur am Herzen, sondern an allen anderen Körperorganen ist das Spiel zwischen Sympathikus und Parasympathikus (Vagus) entscheidend für die Gesunderhaltung des Menschen (Fig. 1). Besteht volle Harmonie zwischen Zögler und Gegenzögler, so laufen unbewusst alle lebensnotwendigen Funktionen ordnungsgemäss in bewundernswerter Anpassung an die erforderlichen Leistungen ab: es besteht Harmonie. Disharmonie entsteht erst dann, wenn einer von beiden in seiner selbstverständlichen Ausgleichsfunktion gehemmt, also krankhaft gestört ist. Dann vermag er die Harmonie zwischen Lebensablauf und Umwelteinflüssen bzw. Berufsanforderungen nicht mehr herzustellen. Man fühlt sich «indisponiert, unwohl, ausserstande zur Erledigung der gestellten Aufgaben oder zum Kampf ums Dasein».

Nachdem nun infolge des Siegeszuges der Ver-