

<b>Zeitschrift:</b>	Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe
<b>Band:</b>	33 (1955)
<b>Heft:</b>	11
<b>Artikel:</b>	Physik und Technik der Mikrowellenröhren
<b>Autor:</b>	Klinger, H.H.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-874251">https://doi.org/10.5169/seals-874251</a>

### 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:** 14.01.2026

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

## TECHNISCHE MITTEILUNGEN

## BULLETIN TECHNIQUE



## BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicata dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

### Physik und Technik der Mikrowellenröhren

Von H. H. Klinger, Ulm (Donau)

621.375.2.029.6

**Zusammenfassung.** Der Aufsatz berichtet über die grundlegenden physikalischen Vorgänge in Elektronenröhren für sehr hohe Frequenzen und beschreibt neuzeitliche technische Ausführungen solcher Röhren. Im einzelnen wird eingegangen auf Scheibentrioden, Klystrons, Wanderfeldröhren, Magnetrons und Reflexionsröhren.

Als Mikrowellenröhren bezeichnet man allgemein Elektronenröhren für Wellenlängen unterhalb etwa 1 m. Sie unterscheiden sich von gewöhnlichen Senden- und Verstärkerröhren in charakteristischen Gesichtspunkten. Die Besonderheit der Mikrowellen-Elektronik ist der Laufzeiteffekt, das heisst die Zeit, die ein Elektron zum Durchtritt durch das HF-Feld benötigt, ist vergleichbar mit der Schwingungsdauer des Feldes. Der Laufzeiteffekt hat energetische und kinematische Besonderheiten in Elektronenströmungen bei hohen Frequenzen zur Folge, die einerseits die Verwendung üblicher intensitätsgesteuerter Röhren bei hohen Frequenzen erschweren, andererseits aber auch bewusst zur Verstärkung und Erzeugung von Höchstfrequenzen herangezogen werden können, wie es bei Laufzeitröhren (Klystrons, Magnetrons, Wanderfeldröhren) der Fall ist.

#### 1. Intensitätsgesteuerte Röhren

(Trioden)

##### 1. Der Einfluss der Elektronenlaufzeit

Die gebräuchlichste Art zur Verstärkung hochfrequenter Schwingungen ist die *Intensitätssteuerung* (Mengensteuerung) einer Elektronenströmung durch ein negativ vorgespanntes Gitter. Bei Rundfunkfrequenzen, wo die Periodendauer der Steuerspannung gross gegen die Elektronenlaufzeit zwischen Gitter und Kathode der Röhre ist, erfolgt die Gittersteuerung leistungslos. Im Laufzeitgebiet wird dagegen durch die Influenzwirkung der schwankenden Elektronenraumladeung im Gitterkreis ein Strom influenziert, der eine Komponente aufweist, die mit der

**Résumé.** Cet article expose les principaux phénomènes physiques qui se déroulent dans les tubes électroniques pour très hautes fréquences et décrit l'exécution technique moderne de ces tubes. Il parle plus en détail des triodes à disques, klystrons, tubes à champ mobile, magnétrons et tubes à réflexion.

Steuerspannung in Phase ist. Diese Komponente entspricht einem elektronischen Wirkleitwert  $G_{el}$  zwischen Gitter und Kathode der Röhre. Für eine raumladungsbegrenzte Elektronenströmung und für Laufzeitwinkel  $\omega\tau < \pi$  ( $\omega$  Kreisfrequenz,  $\tau$  Laufzeit) ist

$$G_{el} = \frac{S_0}{20} (\omega \tau_{kg})^2$$

wobei  $S_0$  die statische Röhrensteilheit und  $\tau_{kg}$  die Elektronenlaufzeit zwischen Kathode und Gitter sind. Für eine Röhre mit ebenen Elektroden ist die Laufzeit zwischen Gitter und Kathode

$$\tau_{kg} = \frac{3}{\sqrt{\frac{2e}{m}}} \frac{d}{\sqrt{U}}$$

wobei  $d$  Abstand Gitter-Kathode und  $U$  die Betriebsspannung sind.

##### 2. Der Einfluss der Schaltung

In gleicher Weise wie der Laufzeiteffekt machen sich bei hohen Frequenzen die Induktivitäten der Elektrodenzuleitungen bemerkbar. Im Falle der bei niederen Frequenzen (Rundfunkwellen) verwendeten Kathodenbasisschaltung (Fig. 1a) ist für das Zustandekommen eines schaltungsmässig bedingten Wirkleitwerts zwischen Gitter und Kathode hauptsächlich die Induktivität  $L_k$  der Kathodenleitung verantwortlich. Dieser Eingangsleitwert

$$G_L = \omega^2 L_k C_{kg} S$$

addiert sich zum elektronischen Leitwert  $G_{el}$  und

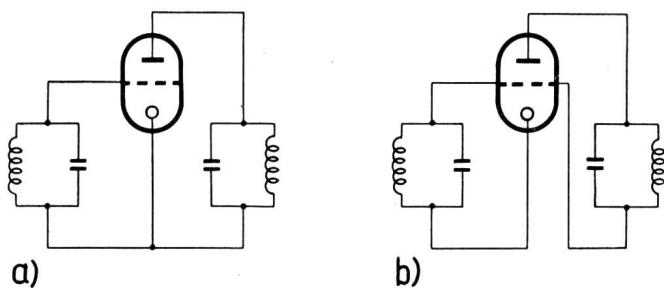


Fig. 1. a) Kathodenbasisschaltung und b) Gitterbasisschaltung einer Triode

vergrössert den Steuerleistungsaufwand bzw. setzt den Leistungsgewinn der Röhre herab.

Während man bei niederen Frequenzen die Kathodenbasisschaltung verwendet, erweist sich bei Mikrowellen die Gitterbasisschaltung, bei der Ein- und Ausgangskreis am Gitter zusammenstossen, überlegen (Fig. 1b). Die Überlegenheit der Gitterbasis schaltung beruht einerseits in der Möglichkeit der besseren Entkopplung von Ein- und Ausgangskreis und anderseits darin, dass der Eingangswirkleitwert der Röhre in Gitterbasisschaltung mit zunehmender Frequenz kleiner wird, während er bei der Kathoden basisschaltung im wesentlichen zunimmt (Fig. 2).

### 3. Scheibentrioden

Die angeführten Gesichtspunkte müssen beim Bau von Trioden für Mikrowellen in grundlegender Weise beachtet werden. Insbesondere ergeben sich hieraus Röhren mit möglichst kleinen Gitter-Kathoden-Abständen (kleine Elektronenlaufzeit) sowie induktivitäts- und verlustarmen Elektrodenzuleitungen. Diese Gesichtspunkte sind bei Scheibentrioden verwirklicht, bei denen die Elektroden über kurze und grossflächige Einschmelzungen unmittelbar in die äusseren Kreise in Form dämpfungsarmer Koaxialleitungen oder Hohlraumkreise übergehen. In Figur 3 sind Schnitt zeichnungen einiger gebräuchlicher Scheibentrioden wiedergegeben. Figur 4 zeigt die von der Western

Electric entwickelte Scheibentriode 416 A, die bei der Frequenz von 4000 MHz einen Leistungsgewinn von etwa 10 dB bei einer Bandbreite von 100 MHz ermöglicht. Den grössten Fortschritt in der Entwicklung von Mikrowellentrioden stellt zurzeit die Scheiben triode L-31 der General Electric dar, die in Gitter basisschaltung noch kürzeste Wellen von  $\lambda = 3$  cm in Selbsterregung erzeugt. Die erzielte HF-Leistung ist freilich recht klein und beträgt etwa 40 mW bei einem Wirkungsgrad unterhalb 1%.

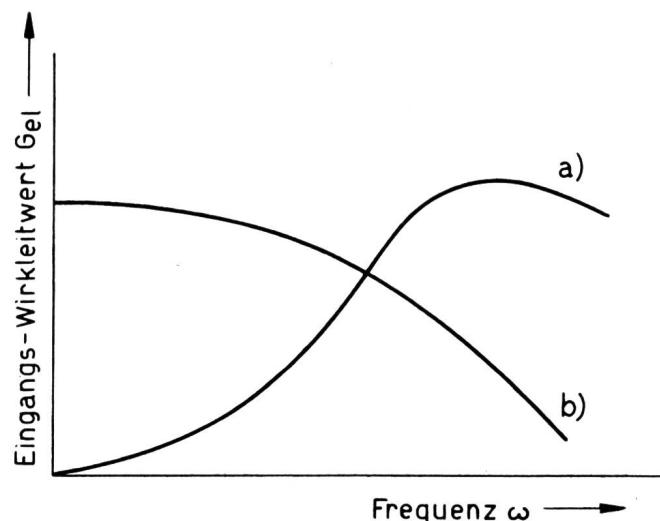


Fig. 2. Frequenzverlauf des Eingangs-Wirkleitwertes einer Triode in Kathodenbasisschaltung a) und Gitterbasisschaltung b)

### 2. Klystrons

#### 1. Geschwindigkeitssteuerung

Während bei Trioden die Intensität der durch das Steuergitter hindurchtretenden Elektronen gesteuert wird (Intensitäts- oder Mengensteuerung), lässt sich bei hohen Frequenzen mit besonderem Vorteil die *Geschwindigkeitssteuerung* von Elektronenströmen zur Verstärkung von Schwingungen heranziehen. Figur 5 erläutert diesen Vorgang am Beispiel eines Zweikreis-

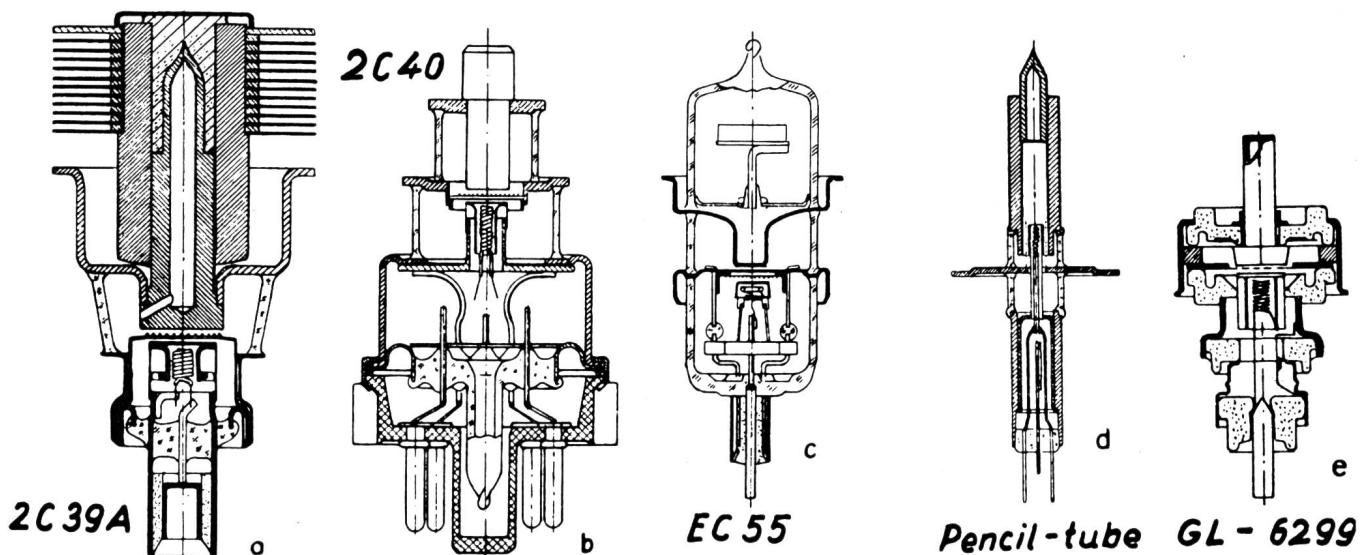


Fig. 3. Schnittzeichnungen einiger gebräuchlicher Scheibentrioden

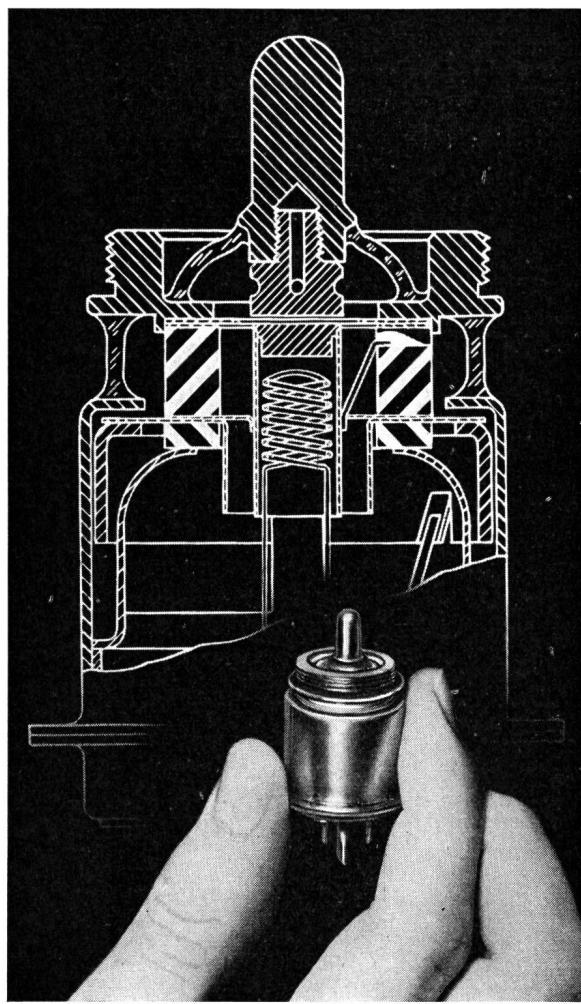


Fig. 4. Mikrowellentriode 416 A der Western Electric

*Klystrons.* Ein Elektronenstrahl tritt mit zeitlich konstanter Geschwindigkeit  $\bar{v}$  in das Hochfrequenzfeld des Eingangskreises zur Zeit  $t_0$  ein. Durch die HF-Spannung in diesem Kreis erhalten die Elektronen eine Wechselkomponente  $\tilde{v}_0$  der Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit, mit der die Elektronen aus dem Eingangskreis austreten, ist

$$v = \bar{v} + \tilde{v} = \bar{v} + \hat{v}_0 \sin \omega t_0$$

Der Weg  $z$ , der von den Elektronen im anschliessenden

den feldfreien Laufraum zurückgelegt wird, ist zur Zeit  $t$

$$z = (\bar{v} + \hat{v}_0 \sin \omega t_0) \cdot (t - t_0)$$

Der hierdurch gegebene Zusammenhang zwischen Weg und Zeit ist in Figur 6 dargestellt. In einem bestimmten Abstand vom Eingangskreis verdichten sich die Elektronen periodisch. Diesen Vorgang bezeichnet man als Phasenfokussierung. Ihm entspricht eine Amplitude  $\hat{i} = f(z)$  des Elektronenwechselstromes (Fig. 7a). Ordnet man am Ort der Phasenfokussierung daher einen Ausgangskreis an, so influenzieren die phasenfokussierten Elektronen beim Durchtritt in diesem Kreis ein HF-Feld, das den Elektronenstrahl bremst und wodurch sich die kinetische Energie der Elektronen in HF-Energie verwandelt.

## 2. Raumladungswellen

Der kinematischen Beschreibung des Vorganges der Geschwindigkeitssteuerung steht eine elektrodynamische Darstellung gegenüber, bei der die Geschwindigkeitssteuerung als Störung betrachtet wird, die sich innerhalb der Elektronenströmung in Form von *Raumladungswellen* fortpflanzt. Die infolge der Geschwindigkeitssteuerung zustande kommende gegenseitige Annäherung der Elektronen hat nämlich zur Folge, dass wegen der zunehmenden elektrostatischen Abstossung die Elektronen relativ zueinander verlangsamt werden und schliesslich relativ zueinander zur Ruhe kommen. Die Amplitude der Wechselgeschwindigkeit der Elektronen klingt daher längs der Strömung zunächst ab und erreicht eine Nullstelle. Hier hat sich die kinetische Energie der Elek-

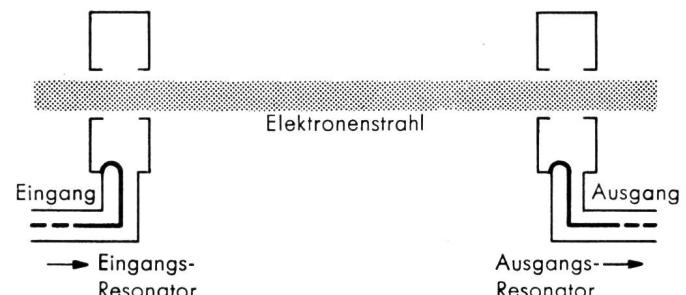


Fig. 5. Prinzip eines Zweikreisklystrons

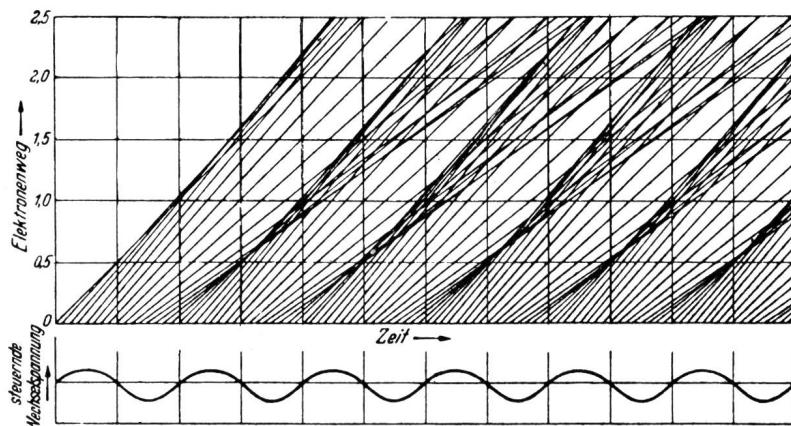


Fig. 6.

Weg-Zeit-Diagramm (Elektronenfahrplan) eines geschwindigkeitsgesteuerten Elektronenstrahles

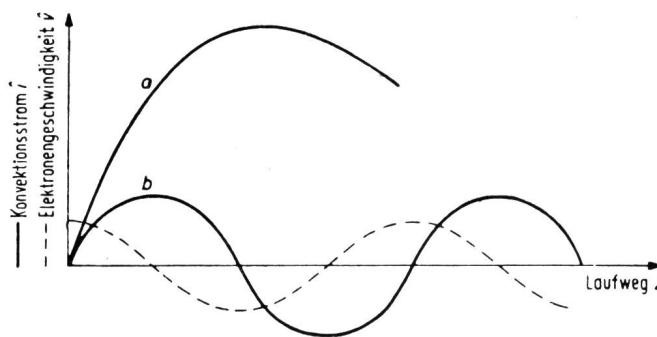


Fig. 7. Amplitude des Elektronenwechselstromes eines geschwindigkeitsgesteuerten Elektronenstrahls im Laufraum eines Klystrons  
a) nach ballistischen Vorstellungen  
b) unter Berücksichtigung von Raumladungswellen

tronen in potentielle Energie des Raumladungsfeldes verwandelt, derzufolge nun wieder eine Rückwandlung in kinetische Energie der Elektronen stattfindet. Die Elektronen entfernen sich daher wieder voneinander, wodurch die Amplitude der Wechselgeschwindigkeit wieder ansteigt. Der erste Abfall der Geschwindigkeitsamplitude ist daher von einem Elektronenwechselstrom begleitet, dessen Amplitude gerade an der Nullstelle der Geschwindigkeit ihr Maximum erreicht und umgekehrt (Fig. 7b).

Raumladungswellen von gleicher Frequenz, aber verschiedenen Phasengeschwindigkeiten

$$v_{p,1} = \frac{\bar{v}}{1 + \frac{\omega_p}{\omega}} \quad v_{p,2} = \frac{\bar{v}}{1 - \frac{\omega_p}{\omega}}$$

darstellen, wobei die eine Welle eine grössere, die andere eine kleinere Geschwindigkeit als die Elektronen hat (Fig. 8). Die Grösse

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e \cdot \rho_0}{m \cdot \epsilon}}$$

ist die Elektronen-Plasmafrequenz mit der Raumladungsdichte  $\rho_0$ . Im allgemeinen ist an Stelle von  $\omega_p$  im obigen Ausdruck die wirksame Plasmafrequenz  $\omega_q = R \omega_p$  einzusetzen, deren Wert sich von  $\omega_p$  um einen Faktor  $R \gtrsim 1$  unterscheidet, der von der Geometrie der Elektronenströmung, von der Signalfrequenz  $\omega$  sowie von der Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen im Strahl abhängt.

Der wesentliche physikalische Gesichtspunkt der Raumladungswellen im Laufraum eines Klystrons ist, dass trotz der Tatsache, dass die Amplitudenkonstanten jeder der beiden Raumladungswellen für sich allein gleich Null sind, infolge der Interferenz beider Raum-

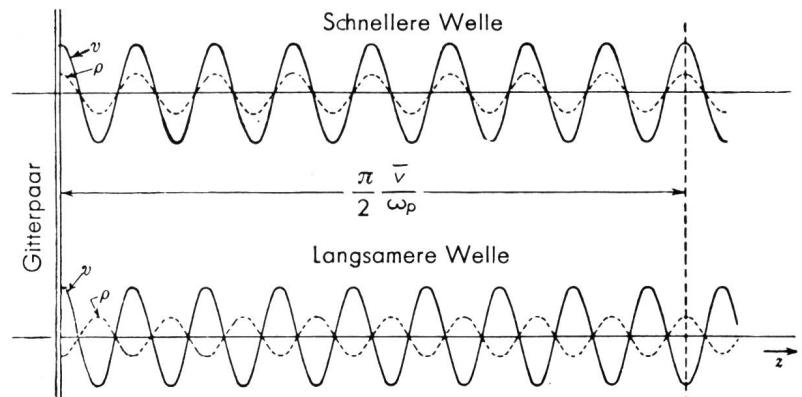


Fig. 8.  
Raumladungswellen in einem Elektronenstrahl infolge Geschwindigkeitssteuerung durch ein Gitterpaar, an dem eine HF-Spannung liegt. Die beiden Wellen pflanzen sich in z-Richtung fort mit Geschwindigkeiten grösser und kleiner als die mittlere Elektronengeschwindigkeit  $\bar{v}$ .  $v$  = Geschwindigkeits-,  $\rho$  = Dichtewelle der Elektronen

Ganz allgemein pflanzt sich jede Störung (HF-Signal, Rauschen) in einer Elektronenströmung in Form von Raumladungswellen fort. Rechnerisch lässt sich der Vorgang der Geschwindigkeitssteuerung einer Elektronenströmung durch zwei sich überlagernde

ladungswellen eine Verstärkung des Elektronenwechselstromes zustande kommen, weil es wegen der unterschiedlichen Phasengeschwindigkeit der beiden Wellen längs der Elektronenströmung Orte gibt, wo sich die Amplituden addieren.

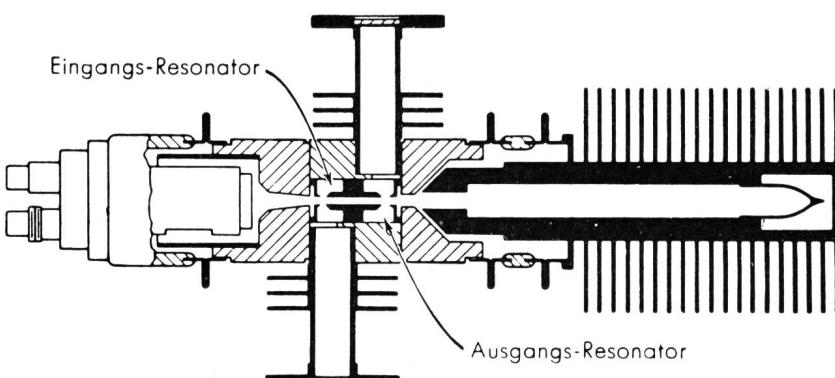


Fig. 9.  
Schnittzeichnung eines Zweikreisklystronverstärkers für den Bereich um 9300 MHz

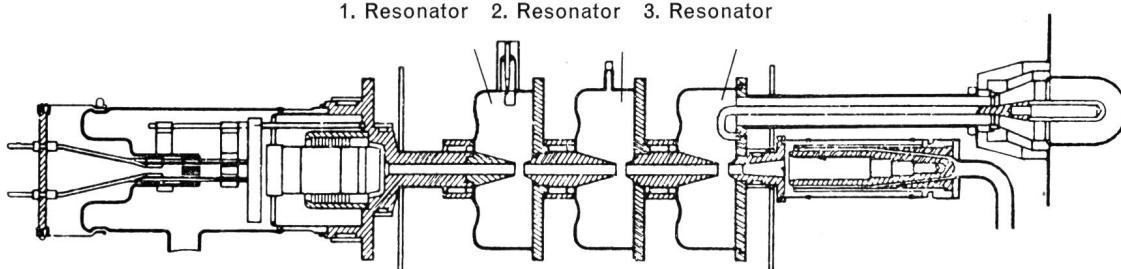


Fig. 10. Schnittzeichnung eines Dreikreisklystronverstärkers

### 3. Technische Klystrons

Klystrons dienen in der Mikrowellentechnik als Verstärker, Frequenzvervielfacher und Schwingungs erzeuger. Figur 9 gibt die Schnittzeichnung eines Zweikreis-Verstärkerklystrons für das 9300-MHz-gebiet wieder. Sowohl im Eingangs- als auch im Ausgangskreis werden dämpfungsarme Hohlraumresonatoren verwendet, denen die HF-Energie durch Hohlleiter zu und abgeführt wird. Höhere Leistungsverstärkungen als Zweikreisklystrons erzielt man mit Dreikreisklystrons (Fig. 10). Dem ersten Kreis wird die HF-Energie zugeführt und im Ausgangskreis verstärkt entnommen. Der zwischen Eingangs- und Ausgangskreis liegende Kreis bildet gewissermaßen den Ausgangskreis einer ersten und gleichzeitig den Eingangskreis einer zweiten Klystron-Zweikreisstrecke, die hintereinander geschaltet sind. Die maximale Verstärkung ergibt sich, wenn alle drei Kreise auf gleiche Frequenz abgestimmt sind. Zwecks Herstellung gröserer Bandbreite werden die einzelnen Kreise vielfach gegeneinander etwas verstimmt.

Die Figuren 11 und 12 zeigen Lichtbilder zweier neuzeitlicher Verstärkerklystrons der Varian Associates. Die Röhre V-82 liefert bei Impulsbetrieb im Gebiet um 9300 MHz eine HF-Ausgangsleistung von 8 kW bei einer Verstärkung von 57 dB, die Röhre V-80 B eine HF-Ausgangsleistung von 1 MW und 30 dB Verstärkung im Bereich 2700...3400 MHz.

### 3. Wanderfeldröhren

Während sich bei den bisher besprochenen Mikrowellenröhren der Energieaustausch zwischen einer Elektronenströmung und einem stehenden HF-Feld (z. B. innerhalb eines Hohlraumkreises) vollzieht, wird bei *Wanderfeldröhren* (Traveling-Wave-Röhren) die Wechselwirkung einer Elektronenströmung mit dem Feld einer fortschreitenden Welle zur Verstärkung von Mikrowellen benutzt.

#### 1. Die Wanderfeld-Wendel-Röhre

Die Wanderfeld-Wendel-Röhre stellt die gebräuchlichste Art von Wanderfeldröhren dar. Ihre Wirkungsweise beruht in der Wechselwirkung eines Elektronenstrahles mit dem elektrischen Feld einer fortschreitenden elektromagnetischen Welle. Für das Zustandekommen einer derartigen Wechselwirkung ist im allgemeinen nötig, dass beide Partner (Elektronen und Welle) gleiche oder angenähert gleiche Geschwindigkeiten haben. Da sich elektromagnetische Wellen

im freien Raum mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen, Elektronen infolge ihrer tragen Masse aber nicht auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden können, muss man die Wellengeschwindigkeit künstlich auf die Elektronengeschwindigkeit verzögern. Hierzu dienen Verzögerungsleiter in Form einer Wendel, in deren Achse der Elektronenstrahl fliegt (Fig. 13). Auf der Wendel pflanzt sich eine elektrische Welle angehährt mit Lichtgeschwindigkeit fort. Im Innern der Wendel entsteht hierbei ein axiales elektrisches Feld, das sich in Richtung der Wellenfortpflanzung verschiebt. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit  $v_p$  dieses Wellenfeldes (Phasengeschwindigkeit) beträgt

$$v_p = \frac{p c}{\pi D}$$

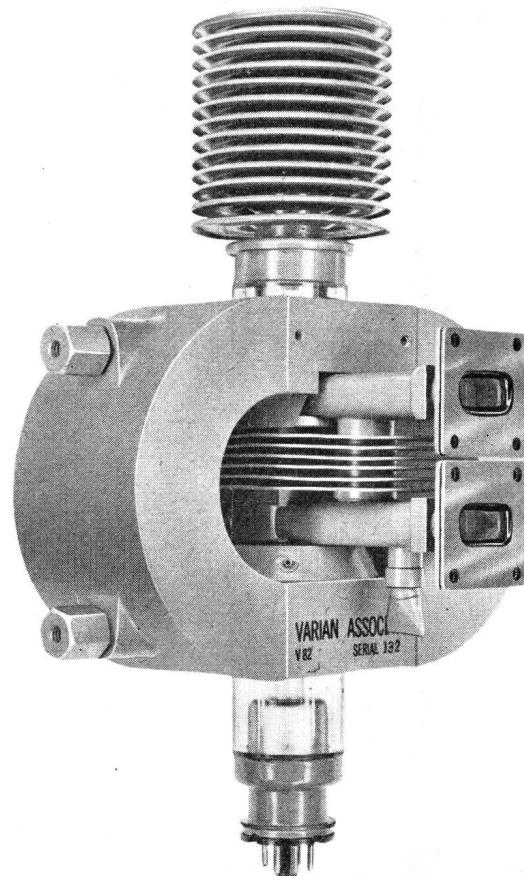


Fig. 11. Hochleistungsklystron V-82 der Varian Associates

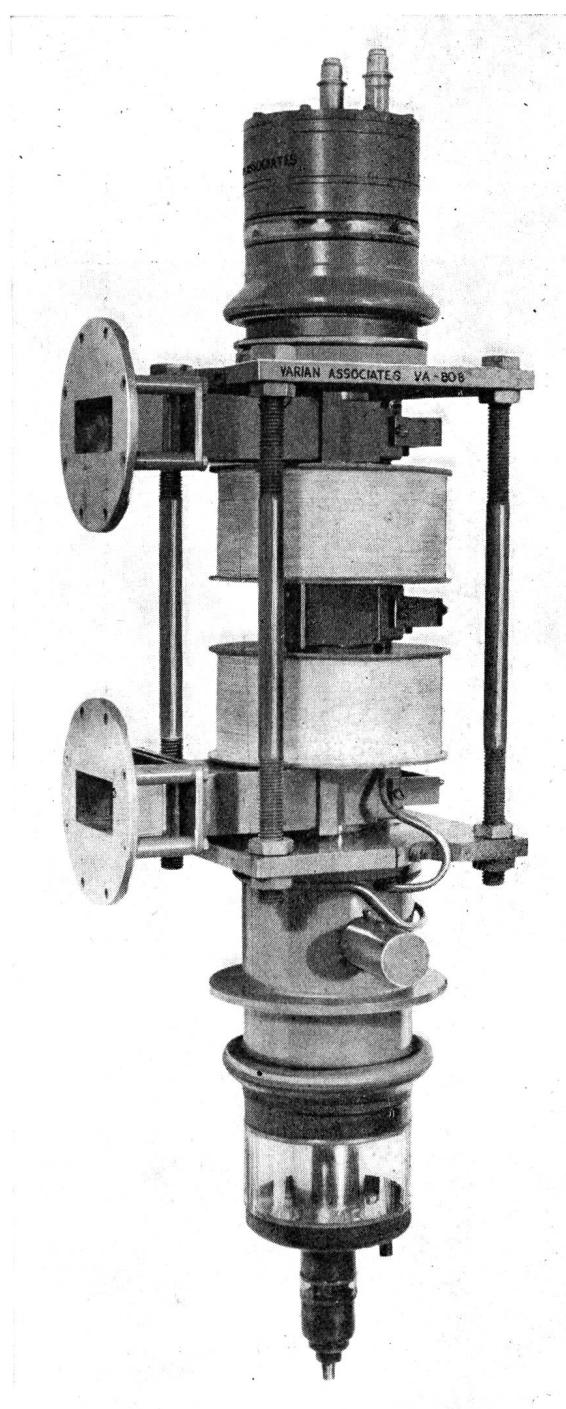


Fig. 12. Hochleistungsklystron V-80 B der Varian Associates

Fig. 13.  
Prinzip der Wanderfeld-Wendel-Röhre

- a) Grundsätzliches Schema
- b) Elektrisches Feldbild in der Wendelachse einer auf der Wendel fortschreitenden elektromagnetischen Welle

und ist um das Verhältnis von Wendelumfang  $\pi D$  zur Steigung  $p$  kleiner als die Lichtgeschwindigkeit  $c$ , das heisst in praktischen Fällen etwa  $1/10$  bis  $1/20$   $c$ . Haben Elektronenstrahl und Welle angenähert gleiche Geschwindigkeit, so wird der Strahl durch das axiale elektrische Feld der Welle geschwindigkeitsgesteuert und phasenfokussiert. Qualitativ ist dieser Vorgang in Figur 14 veranschaulicht, wobei die eingezeichneten Pfeile die Richtung der elektrischen Feldstärke der Welle auf die Elektronen angeben. Die Elektronen gruppieren sich in denjenigen Gebieten, wo die beschleunigende axiale Feldstärke in eine bremsende

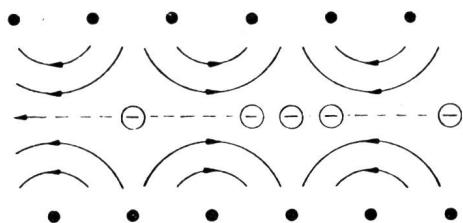
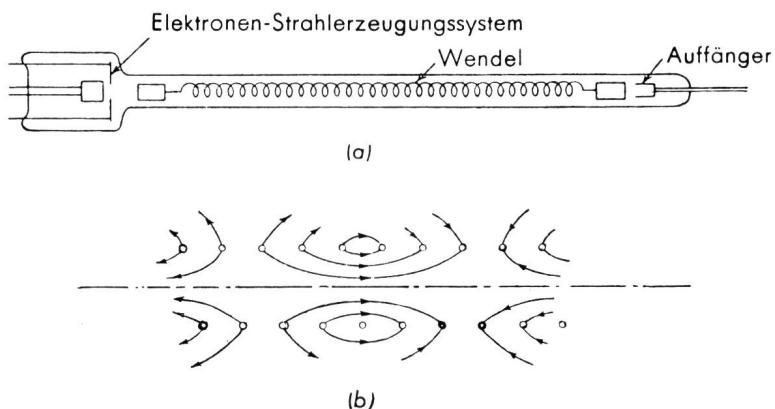


Fig. 14. Veranschaulichung des Vorganges der Phasenfokussierung der Elektronen im elektrischen Feld einer auf der Verzögerungsleitung fortschreitenden elektromagnetischen Welle

übergeht. Ist die Geschwindigkeit der Elektronen etwas grösser als die der Welle in Achsenrichtung der Wendel, so laufen die Elektronengruppen ständig im Bremsfeld der Welle und verstärken sie dadurch. Massgebend für die Energieabgabe der Elektronen an die Welle ist derjenige Anteil der kinetischen Energie der Elektronen, der der Differenz von Elektronen- und Phasengeschwindigkeit der Welle entspricht. Der Wirkungsgrad erreicht in praktischen Fällen die Grössenordnung 10 %.

Als technisches Beispiel zeigen Figuren 15 und 16 die Telefunken-Wanderfeldröhre TL 6, die als Leistungsrohre in Richtfunkstrecken für das 4000-MHz-Band bestimmt ist. Wesentliche Betriebseigenschaften dieser Röhre sind in den Figuren 17a und 17b wiedergegeben. Charakteristisch ist die über ein breites Frequenzband nahezu unabhängige Verstärkung, die der aperiodischen Impedanz der Wendel zu danken ist, die zwecks Vermeidung von Selbsterregung und zur Herabsetzung von Laufzeitverzerrungen mit einer Dämpfungsschicht versehen ist. Die Güte, das ist das



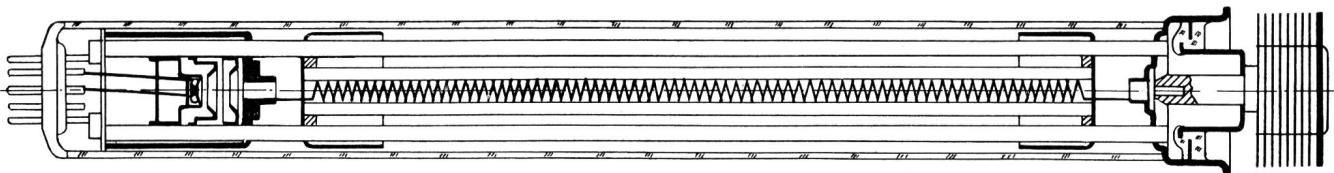


Fig. 15. Aufbau der Telefunken-Wanderfeldröhre TL 6

Produkt Gewinn  $\times$  Bandbreite, einer Wanderfeldröhre ist von der Größenordnung  $10^5$  MHz und ganz erheblich grösser als bei Trioden und Klystrons.\*)

Bei der Entwicklung von Wanderfeldröhren stellt die Herstellung von Elektronenstrahlen hoher Pervanzen, das heisst von hoher Strahldichte bei möglichst kleiner Strahlspannung, eine technisch wichtige Aufgabe dar. Die Elektronenströme erzeugt man durch Pierce-Kathoden. Im einfachsten Fall besteht eine solche Elektronenkanone (Fig. 19) aus der Glühkathode K, einem Wehneltzylinder W und der durch-

\*) Figur 18 zeigt ergänzend die Ansicht eines neueren Wanderfeldröhren-Verstärkers von Siemens & Halske, bei dem anstelle eines Spulenfeldes zur Fokussierung des Elektronenstrahles ein Permanentmagnet Verwendung findet. Die Verstärkung der Siemens-Wanderfeld-Endröhre V 503 beträgt bei einer HF-Ausgangsleistung von mehr als 3 Watt über 30 dB; sie arbeitet mit einer Wendelspannung von 1300 Volt und einem Strahlstrom von etwa 35 mA.

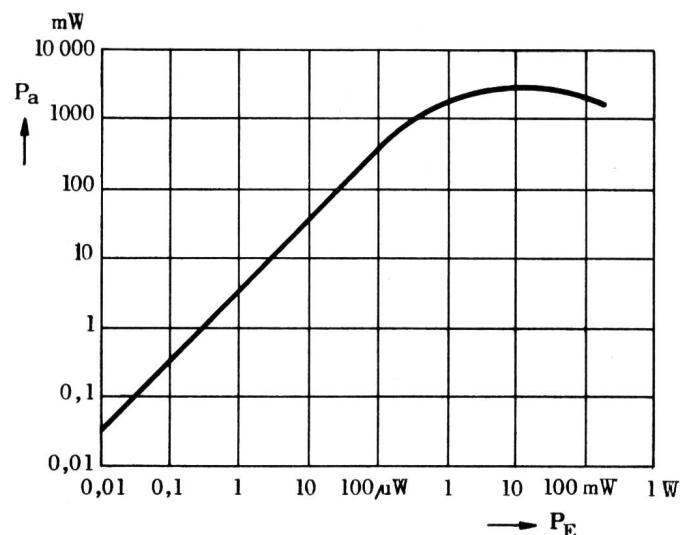
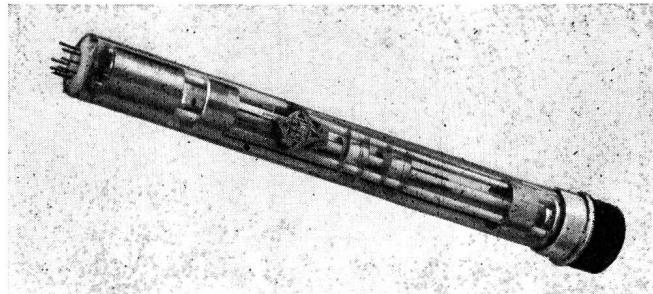
Fig. 17a. Abhängigkeit der HF-Ausgangsleistung  $P_a$  von der HF Eingangsleistung  $P_e$  für die TL 6

Fig. 16a. Telefunken-Wanderfeldröhre TL 6

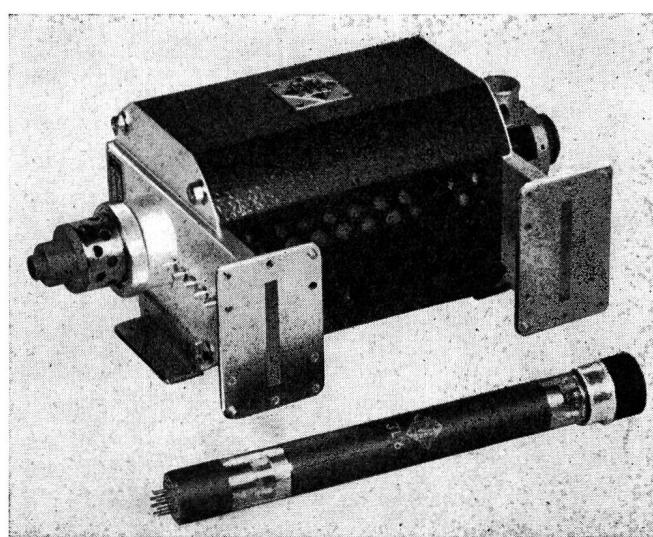
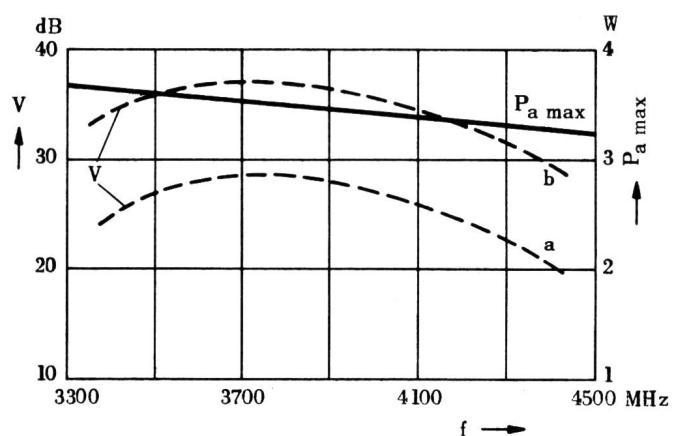


Fig. 16b. TL 6 mit magnetischem Fokusator

bohrten Anode A, die auf gleichem Potential wie die Wendel liegt. Ein magnetisches Führungsfeld dient zur Bündelung des Elektronenstrahles. Dieses Feld ist so angeordnet, dass der konvergente Strahl beim Durchtritt durch die Anodenöffnung plötzlich in das Magnetfeld eintritt. Unter Einwirkung des Feldes führen die Elektronen neben ihrer Triftbewegung noch eine Drehbewegung um die Strahlachse mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_L = eB/2m$  (B magnetische Induktion) infolge Lorentz-Kraft aus. Bei richtig gewählten Betriebsdaten hebt die durch das Magnetfeld

Fig. 17b. Abhängigkeit der Verstärkung V (dB) und der maximalen HF-Ausgangsleistung  $P_{a\max}$  (Watt) von der Signalfrequenz für die TL 6

Kurve a: Großsignalverstärkung  $P_e \approx 6$  mW  
Kurve b: Kleinsignalverstärkung  $P_e \approx 10 \mu$ W

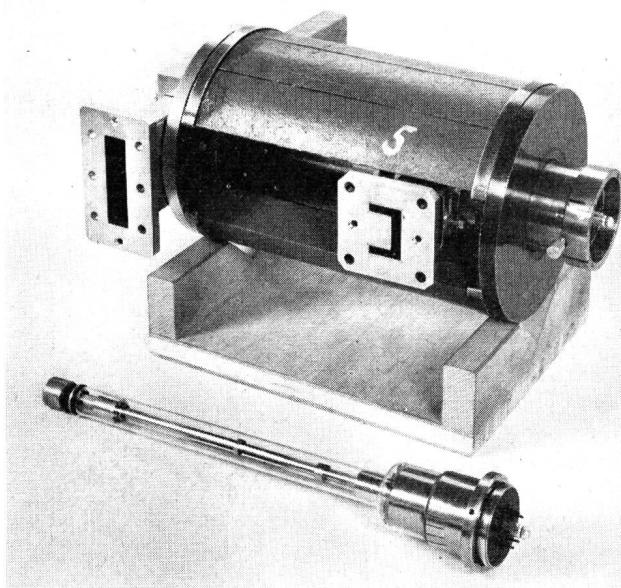


Fig. 18. Siemens-Wanderfeld-Leistungsröhr V 503 mit Verstärker; Leistungsabgabe > 3 W, Leistungsgewinn > 30 dB.

verursachte Zentripetalkraft die Zentrifugal- und Raumladungskraft der Elektronen genau auf, so dass der Elektronenstrahl als homogenes Bündel durch die Achse der Wendel läuft (Brillouin-Strahl).

Bei Verwendung von Wanderfeldröhren in Anfangsstufen ist neben der erzielbaren Verstärkung und Bandbreite noch die Rauschzahl der Röhre von Bedeutung. Die wesentlichste Rauschursache sind die statistischen Dichte- und Geschwindigkeitsschwankungen der Elektronen, die, von der Kathode ausgehend, sich innerhalb des Strahlerzeugungssystems in Form von Raumladungswellen verstärkt fortpflanzen. Es handelt sich hierbei grundsätzlich um denselben Vorgang wie bei den Raumladungswellen im Laufraum eines Klystrons. Die Existenz stehender Rauschwellen in Elektronenströmen ist experimentell mittels eines längs der Strömung beweglichen Resonators nachgewiesen worden, mit dem die Rauschintensität innerhalb eines schmalen Frequenzbereiches aus der Strömung ausgefiltert und gemessen wurde. Um die Rauschzahl einer Wanderfeldröhre möglichst klein zu halten, wird man bestrebt sein, den Stromknoten der Rauschwellen bei möglichst kleiner Wechselgeschwindigkeit an den Beginn der Verzögerungsleitung zu legen. Man kann die Rauschleistung im Strahl vor Eintritt in die Wendel aber dadurch zusätzlich schwächen, dass man den Strahl verschiedene Potentialbereiche durchlaufen lässt, so dass den Elektronen ihre Endgeschwindigkeit nicht in einer einzigen Vorbeschleunigungsstrecke, sondern in zwei aufeinanderfolgenden Stufen erteilt wird. Unter Verwendung derartiger rauscharmer Elektronenkanonen konnten in letzter Zeit sehr rauscharme Wanderfeldröhren gebaut werden, deren Rauschzahl bei 3000 MHz 6 dB beträgt und damit das theoretische Minimum erreicht.

## 2. Wanderfeldröhren mit Runzelleitern

Bei sehr kurzen Wellen wird die Verwendung von Wendeln als Verzögerungsleiter schwierig, weil die räumliche Periode im Aufbau der Wendel wesentlich kleiner als die freie Raumwellenlänge sein muss. Ein Vordringen zu kürzeren Wellen ist jedoch möglich, wenn man zu ungleichen Geschwindigkeiten von Elektronenströmung und Welle übergeht. Da sich in diesem Fall die energetische Wechselwirkung über kurze Wegstrecken ausmittelt, muss man die Elektronen periodisch dem Einfluss des Feldes entziehen und gleichphasig wieder zusetzen. Figur 20 zeigt schematisch eine derartige Wanderfeldröhre mit einer Runzelleitung als Verzögerungsleiter. Entlang der Leitung wiederholt sich die Struktur im Abstand  $p$ . Eine elektromagnetische Welle, die an einer solchen Leitung entlangläuft, hat zwischen Anfang und Ende eines Elementarabschnitts  $p$  eine Phasenverschiebung  $\varphi$  oder  $\varphi + 2\pi k$ , wobei  $k$  eine positive oder negative ganze Zahl ist. Den verschiedenen Werten von  $k$  entsprechen verschiedene Teilwellen (spatial harmonic waves), die alle die gleiche Gruppengeschwindigkeit

$$v_g = p \frac{d\omega}{d\varphi}$$

aber verschiedene Phasengeschwindigkeiten

$$v_p = \frac{\omega p}{\varphi + 2\pi k}$$

haben, wobei  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$  usw. Die Phasengeschwindigkeit der Teilwellen kann positiv oder negativ sein, je nach dem Vorzeichen des Wertes von  $k$ . Im ersten Falle hat die Phasengeschwindigkeit der Welle dieselbe Richtung wie die Gruppengeschwindigkeit (Vorwärtswelle), im zweiten Falle die entgegengesetzte Richtung (Rückwärtswelle). Die Teilwelle mit  $k = 0$  heißt Fundamentale, die Teilwellen mit  $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$  usw. höhere Teilwellen. Sämtliche Teilwellen treten stets gleichzeitig auf. Eine

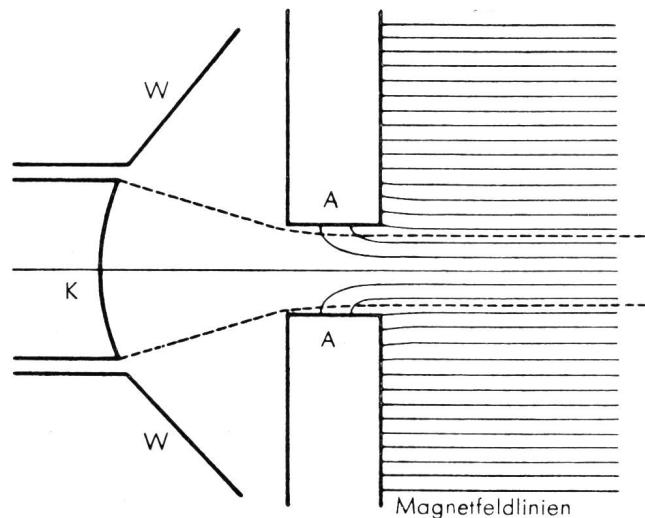


Fig. 19. Grundsätzlicher Aufbau einer Elektronenkanone (Pierce-Kathode)

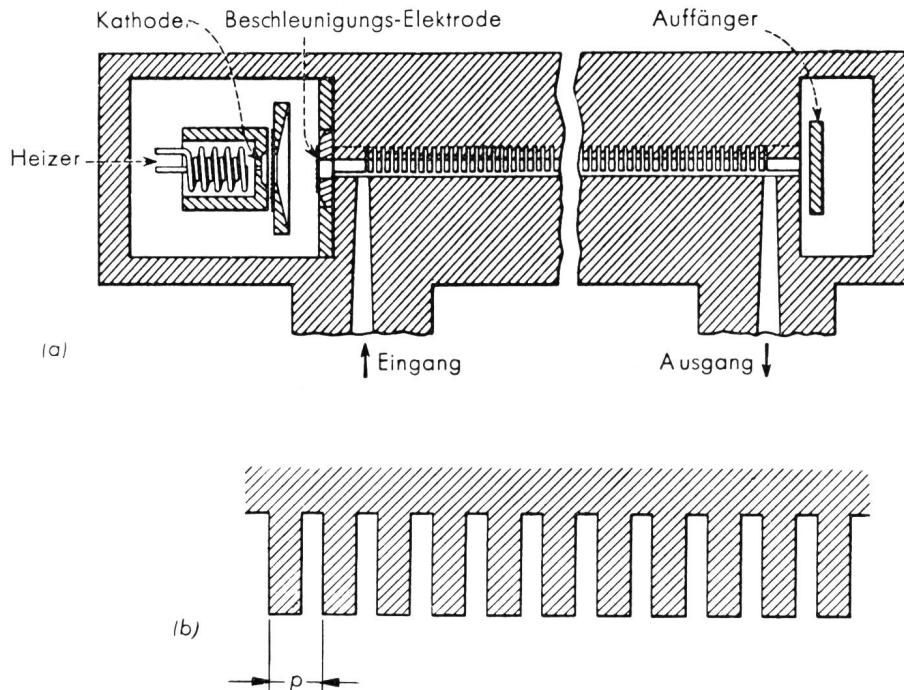


Fig. 20.  
Wanderfeldröhre mit Runzelleiter  
a) Schema der Röhre  
b) Runzelleiter

Elektronenströmung kann mit einer Teilwelle in Energieaustausch treten, wenn die Strömung zwischen aufeinanderfolgenden Elementarabschnitten der Leitung immer gleiche oder angenähert gleiche Phasen des elektrischen Feldes der Welle vorfindet. Da bei gleicher Frequenz die höheren Teilwellen wesentlich niedrigere Phasengeschwindigkeiten als die Fundamentalwelle besitzen, kann man also eine bestimmte Wellenlänge mit entsprechend kleineren Betriebsspannungen verstärken. Hierin liegt die praktische Bedeutung dieser Art Wanderfeldröhren.

### 3. Karzinotrons

Das Karzinotron<sup>1</sup> (Rücklaufwellenröhre, backward-wave tube) ist eine Wanderfeldröhre, bei der die Phasengeschwindigkeit der Welle, die mit der Elektronenströmung in Wechselwirkung tritt, entgegengesetztes Vorzeichen wie die Gruppengeschwindigkeit hat. Figur 21 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer solchen Röhre. Die dispersionsbehaftete Verzögerungsleitung ist an dem der Kathode entgegengesetzten

Ende durch ein Dämpfungselement reflexionsfrei abgeschlossen. Die Elektronenströmung erregt in der Leitung Wellen, deren Phase in derselben Richtung fortschreitet. Die verstärkte Energie läuft in Richtung der Gruppengeschwindigkeit zum Eingang der Strömung zurück und wird dort abgenommen. Das Feld der Welle steuert also schon am Eingang der Verzögerungsleitung in Kathodennähe Geschwindigkeit und Dichte der Elektronen. Dieser Mechanismus entspricht einer Rückkopplung, die zur Selbsterregung führt. Das Karzinotron ist also ein Schwingungserzeuger. Es erregt sich diejenige Frequenz, für die optimale Wechselwirkung zwischen Strahl und Welle zustande kommt. Die Frequenz folgt bei Spannungsänderung der Dispersionskurve der Leitung. In der Möglichkeit, die Frequenz innerhalb eines breiten Bereiches lediglich durch die Betriebsspannung kon-

<sup>1</sup> Der Name röhrt vom griechischen Wort *καρκίνος* für Krebs her, der ebenfalls rückwärts läuft!

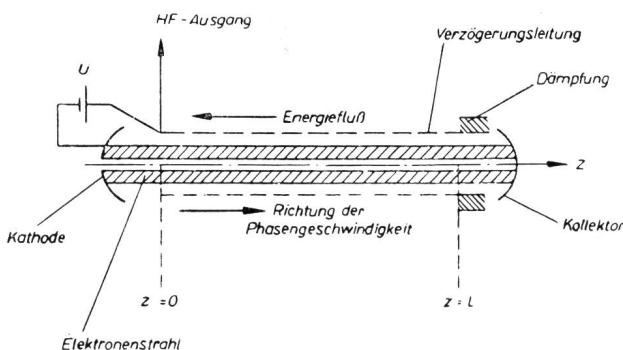


Fig. 21. Schema eines Karzinotrons

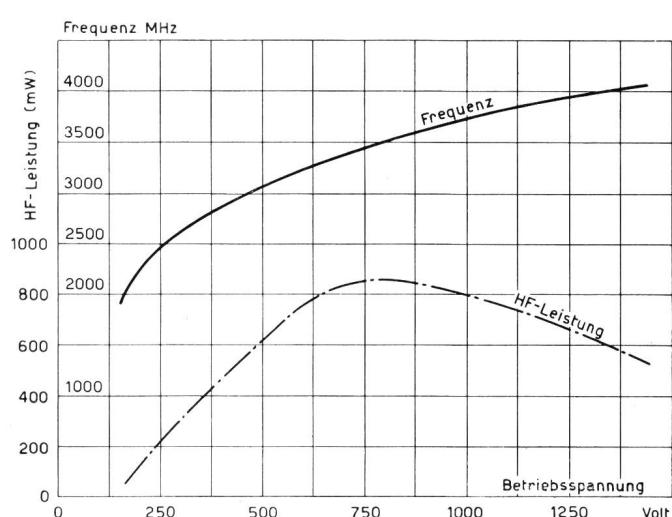


Fig. 22. Durchstimmkurven des Karzinotrons CO 127 der CSF Paris



Fig. 23. Karzinotron CO 127 der CSF Paris

tinuierlich regeln zu können, liegt die grosse technische Bedeutung dieser Röhre für die Mikrowellen-technik. Als praktisches Beispiel ist in Figur 22 die Durchstimmkurve des Karzinotrons CO 127 (Fig. 23) der CSF Paris wiedergegeben. Im Spannungsbereich zwischen 200 und 1400 V wird ein Frequenzgebiet zwischen 2000 und 4000 MHz bei HF-Leistungen zwischen etwa 50 mW und 1 W bestrichen. Karzinotrons haben für die Millimeterwellentechnik ganz

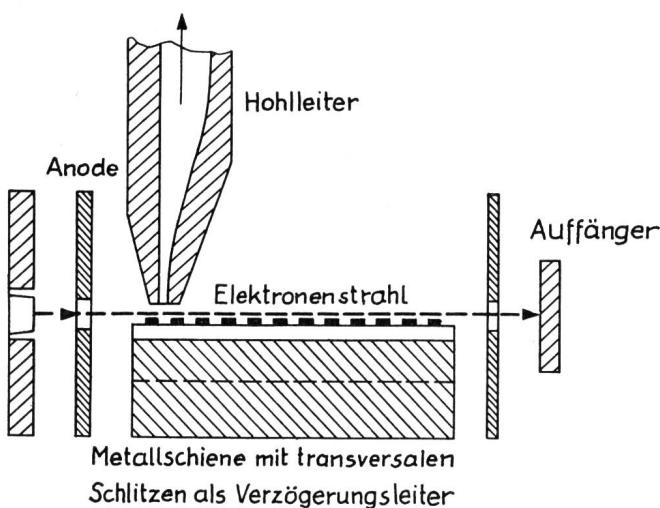


Fig. 24. Schema eines Karzinotrons für Millimeterwellen

besondere Bedeutung, da es für diese sehr kurzen Wellen bisher keine durchstimmmbaren Generatorröhren gibt. Figur 24 zeigt schematisch den Aufbau eines Karzinotrons für den Bereich zwischen 57 kHz ( $\lambda = 5,5$  mm) und 61 kHz ( $\lambda = 4,9$  mm), während Figur 25 das Lichtbild einer ähnlichen Röhre für  $\lambda = 5 \dots 6$  mm darstellt.

#### 4. Andere Arten von Wanderfeldröhren

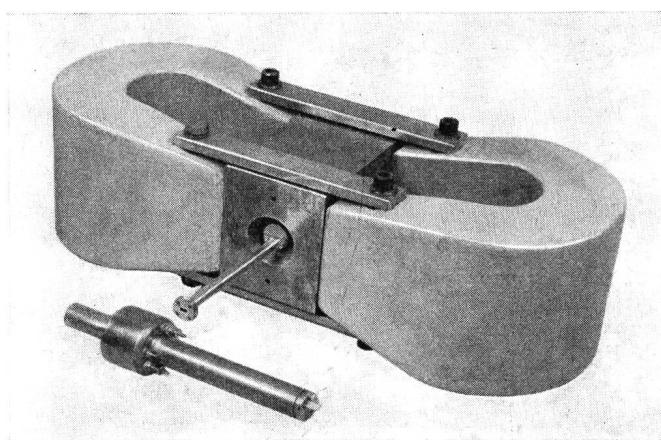
In den letzten Jahren sind noch verschiedene Abarten von Wanderfeldröhren bekannt geworden, die allerdings bisher noch keine nennenswerte praktische Bedeutung erlangt haben.

Bei der *Relaxations-Wanderfeldröhre* wird die Verzögerungsleitung durch einen die Elektronenströmung

umschliessenden Halbleiter mit endlicher Leitfähigkeit  $\sigma$  und endlicher Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  oder durch eine Widerstandsschicht ersetzt. Infolge der Wechselgeschwindigkeit der Elektronen werden im Halbleiter Ladungen influenziert, die auf die Elektronenströmung zurückwirken und eine Phasenfokussierung zur Folge haben. Damit dies möglich wird, und eine Verstärkung von Raumladungswellen im Zuge der Strömung zustande kommt, muss der Auf- und Abbau der Influenzladungen auf der Oberfläche des Halbleiters in einem bestimmten Verhältnis zur Periodendauer des HF-Signals stehen. An die Stelle der zur Erzielung von Verstärkungseffekten erforderlichen Übereinstimmung der Geschwindigkeiten von Strahl und Welle bei der gewöhnlichen Wanderfeld-Wendel-Röhre tritt bei der Relaxationsröhre eine Beziehung zwischen der Relaxationsfrequenz  $\omega_r = \sigma/\epsilon$  des dielektrischen Halbleiters und der Signalfrequenz  $\omega$ .

An Stelle einer materiellen Verzögerungsleitung oder eines Halbleiters kann ein zweiter Elektronenstrahl treten, der im Raumladungsfeld des ersten Strahles läuft und durch dieses Feld mit ihm gekoppelt ist. Falls beide Strahlen unterschiedliche Geschwindigkeiten haben, kann eine fortschreitende Raumladungswelle mit positiver Verstärkungskonstante zustande kommen (*Elektronenwellenröhre*).

Von grösserem technischem Interesse als die Relaxationsröhre und die Elektronenwellenröhre ist die *Einstrahl-Raumladungswellenröhre*. Bei ihr wird eine Verstärkung von Raumladungswellen bzw. eines HF-Signals im Zuge ein und derselben Elektronenströmung bewirkt, wobei die Elektronen durch räumlich periodische Gleichfelder mit abwechselnd höherem und niedrigerem Potential hindurchlaufen (Fig. 26). Damit Verstärkungseffekte zustande kommen, muss die Elektronenströmung an denjenigen Orten, wo die Wechselgeschwindigkeit der Elektronen ein Maximum hat, in Gebiete niedriger Potentials eintreten. Nach einer gewissen Wegstrecke haben sich die Geschwindigkeitsschwankungen in Dichteschwankungen der

Fig. 25. Millimeterwellenkarzinotron für  $\lambda = 5 \dots 6$  mm der Bell Telephone Laboratorien

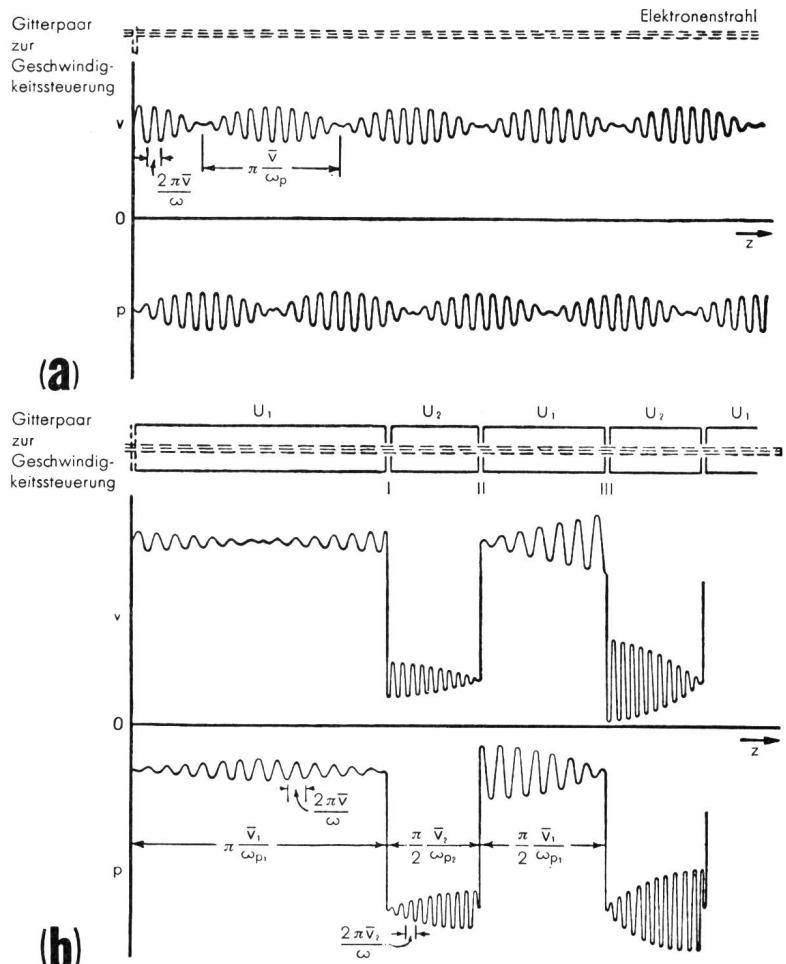


Fig. 26.  
Geschwindigkeitswelle und Dichtewelle der Elektronen  
a) ohne Potentialsprung  
b) mit viermaligem Potentialsprung

Raumladung verwandelt. An Orten, wo die Dichteschwankungen ein Maximum erreichen, lässt man die Strömung wieder in Gebiete mit höherem Potential eintreten. Die Potentialsprünge können mehrmals wiederholt werden, wobei die Amplitude der Raumladungswelle jedesmal zunimmt, bis ihr Wert durch Nichtlinearität begrenzt wird. Wie im Falle der Relaxationsröhre und der Elektronenwellenröhre wird das zu verstärkende HF-Signal der Elektronenströmung am Eingang durch ein Ankoppelsystem, zum Beispiel

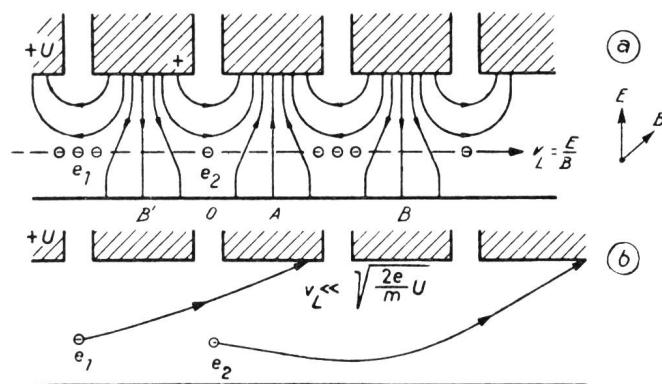


Fig. 27. Wanderfeld-Magnetron-Verstärker  
a) Felder der elektromagnetischen Welle im Innern des Verzögerungsleiters und Phasenfokussierung als Folge des transversalen elektrischen Feldes der Welle  
b) Elektronenbahnen

vermittels einer Wendel oder eines Gitterpaars, aufgeprägt und am Ausgang sinngemäß wieder entzogen.

Entsprechende Verstärkungseffekte lassen sich bei konstanter Elektronengeschwindigkeit erzielen, wenn der Strahlquerschnitt oder die Plasmafrequenz längs des Strahlenweges eine räumliche Periodizität aufweist. Ein grundsätzlicher Unterschied gegenüber dem Klystron besteht bei allen Wanderfeldröhren darin, dass durch Rückwirkung erzwungener Felder Raumladungswellen mit positiver Amplitudenkonstante in der Elektronenströmung erregt werden. Beim Klystron kommt dagegen der Verstärkungsvorgang durch die Interferenz zweier Raumladungswellen zu stande, von denen jede einzelne die Amplitudenkonstante Null hat.

#### 4. Magnetrons

##### 1. Magnetron-Verstärker

Unter Magnetron wird in der Mikrowellentechnik eine besondere Art von Wanderfeldröhren verstanden, bei denen senkrecht zur mittleren Bewegungsrichtung der Elektronen ein elektrostatisches und ein zeitlich konstantes magnetisches Querfeld vorhanden sind. Das Prinzip eines Magnetrons zur Verstärkung von Höchstfrequenzen erhellt aus Figur 27. Der ebenen Kathode steht eine positive Elektrode (Anode) mit der Struktur eines Runzelleiters gegenüber. Senkrecht auf der Zeichenebene, das heißt senkrecht zum

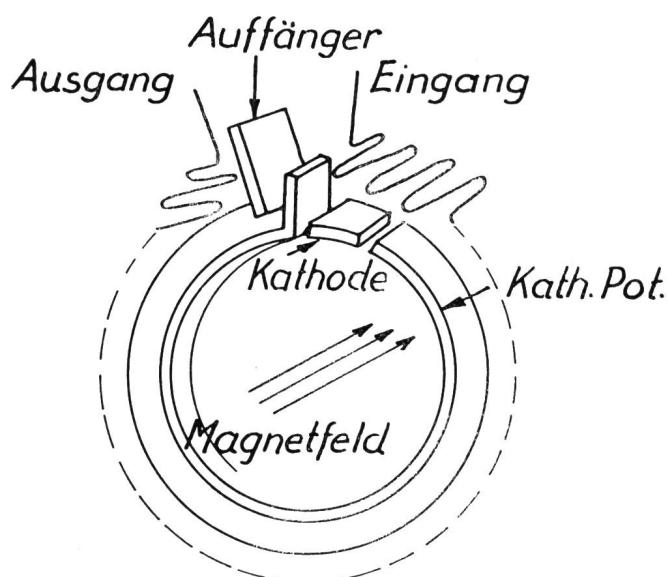


Fig. 28. Wanderfeld-Magnetron-Verstärkeröhre mit kreisförmiger Flachwendel als Verzögerungsleiter

elektrischen Gleichfeld  $\bar{E}$ , steht ein Magnetfeld  $B$ . In einem solchen gekreuzten statischen elektrischen und magnetischen Feld ist die Triftgeschwindigkeit der Elektronen senkrecht zu  $\bar{E}$  und  $B$   $v_L = \bar{E}/B$ . Eine Wechselwirkung zwischen einer auf der Verzögerungsleitung fortlaufenden elektromagnetischen Welle und der Elektronenströmung kann zu stande kommen, wenn die Phasengeschwindigkeit der Welle angenähert gleich der Leitbahngeschwindigkeit  $v_L = \bar{E}/B$  der Strömung ist. Im Gegensatz zur Wanderfeldröhre (ohne statisches magnetisches Querfeld) wirken beim Magnetron aber außer axialen Feldern auch transversale Felder auf die Elektronenströmung.

Das transversale elektrische Wellenfeld addiert sich vektoriell zum statischen elektrischen Querfeld. Daher ist an einigen Orten (A in Fig. 27) die elektrische Feldstärke  $E$  und infolgedessen auch die Leitbahngeschwindigkeit  $v_L$  grösser, an andern Orten (B, B' in Fig. 27) kleiner, als dem durch das Gleichfeld bestimmten Wert entspricht. Die Elektronen fliegen deshalb an Orten grösserer transversaler elektrischer Feldstärke schneller, an Orten kleinerer Feldstärke langsamer, was sich in einer Phasenfokussierung im longitudinalen elektrischen Bremsfeld der Welle äussert. Ursache dieser Phasenfokussierung ist die Transversalkomponente des elektrischen Feldes der Welle. Die longitudinale Komponente hat hier im Gegensatz zur Wanderfeldröhre ohne transversales Magnetfeld keine Elektronenbremsung zur Folge, sondern lenkt die Elektronen vielmehr infolge der Lorentz-Kraft zur Anode, wobei sich die kinetische Energie der Elektronen praktisch nicht ändert. Im Feld der fortschreitenden Welle laufen die Elektronen auf den Bahnen entsprechend Figur 27 und landen schliesslich auf der Anode mit einer Energie, die zwar angenähert gleich der kinetischen Energie der Leitbahnbewegung  $W = \frac{m}{2} (\bar{E}/B)^2$ , jedoch wesentlich kleiner als die potentielle Gleichfeldenergie  $eU$  ist. Die an die Welle abgeführte Energie ist  $\Delta W = eU - \frac{m}{2} (\bar{E}/B)^2$ . Für den Wirkungsgrad erhält man

$$\eta \approx \frac{1 - \frac{m}{2} (\bar{E}/B)^2}{e U}$$

Für  $E/B \ll (2eU/m)^{1/2}$  nähert sich der Wirkungsgrad dem Wert  $\eta \approx 1$ . In praktischen Fällen erreicht man

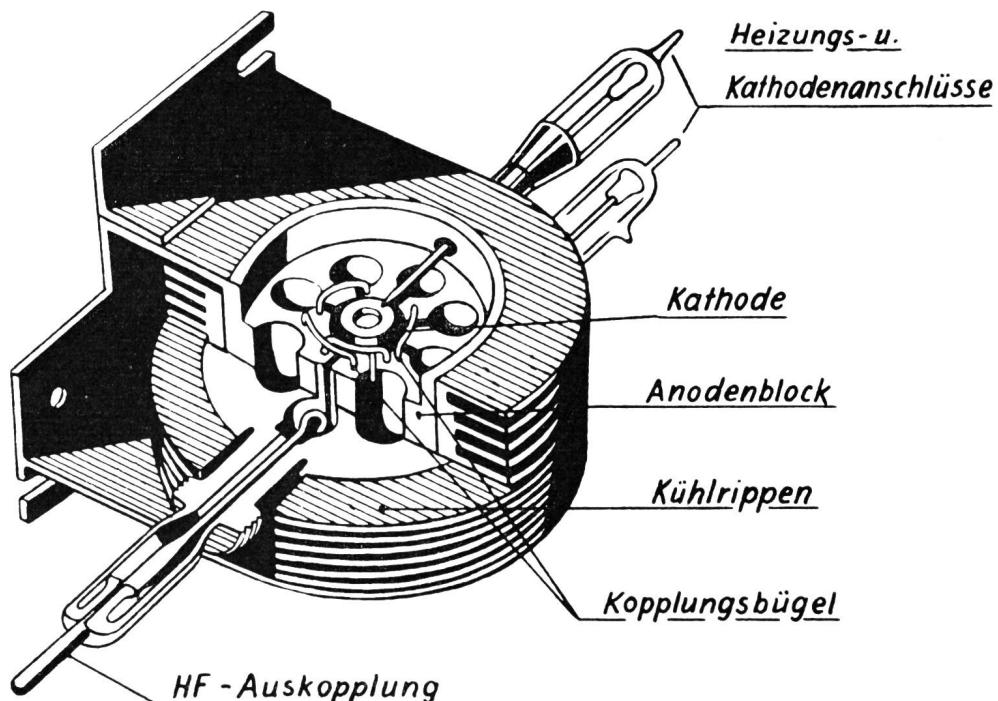


Fig. 29.  
Schnittzeichnung einer Magnetron-Senderöhre für Zentimeterwellen

Werte von der Größenordnung  $\eta = 30 \dots 50\%$ . Der gegenüber der Theorie kleinere technische Wirkungsgrad kommt hauptsächlich dadurch zustande, dass zwecks Vermeidung von Selbsterregung die Verzögerungsleitung mit einer Dämpfungsschicht versehen werden muss, wodurch der Welle Leistung absorbiert wird. Figur 28 zeigt das Schema einer Wanderfeld-Magnetron-Verstärkerröhre mit einer ringförmigen Flachwendel als Verzögerungsleiter. Röhren dieser Art ergeben zum Beispiel bei einer Frequenz von 1200 MHz eine Leistungsverstärkung von etwa 15 dB bei einer HF-Leistung von 500 Watt und einem Wirkungsgrad von 45 %.

## 2. Magnetron-Generatoren

Durch eine Rückkopplung, die durch einen Kurzschluss zwischen Ein- und Ausgang des Verzögerungsleiters bewirkt wird, wird das Magnetron zum selbsterregten Generator für Höchstfrequenzen (Fig. 29).

Die Verzögerungsleitung ist jetzt eine in sich geschlossene Ringkette. Diese hat N-Schlitzte (Vierpole), wobei zwischen benachbarten Schlitzten die Fundamente der von dieser Leitung im Kreise geführten Welle die Phasendifferenz  $\psi$  hat. Nur derjenige Schwingungszustand ist stabil, für den

$$\psi \cdot N = 2\pi k$$

ist, wobei  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$  usw. eine ganze Zahl ist. Im Durchlassbereich der Leitung muss  $\psi \leq \pi$  sein. Es ist daher  $k = 0, 1, 2 \dots N/2$ . Die Phasen-Winkelgeschwindigkeit  $\omega_p$  der Welle auf der Leitung ist mit der Frequenz  $\omega$  der sich erregenden Welle im Zusammenhang

$$\omega_p = \frac{\omega}{k} = \omega_L$$

wobei

$$\omega_L = \frac{2 U}{r_a^2 B} \quad (\text{Posthumus-Formel})$$

die Leitbahn-Winkelgeschwindigkeit der Elektronen ist. Wegen  $k = 0, 1, 2 \dots N/2$  können sich  $(N/2 + 1)$  Frequenzen (Moden) erregen. Der technisch wichtigste Modus ist der  $\pi$ -Modus, bei dem benachbarte Anodensegmente gegenphasig schwingen. Um diesen Schwingungszustand anzuregen, muss angenäherte Übereinstimmung zwischen Elektronen-Leitbahn- und Phasen-Winkelgeschwindigkeit der Welle bestehen. Die Transversalkomponente der von der Verzögerungsleitung im Kreise geführten Welle erzeugt die Geschwindigkeitssteuerung und Phasenfokussierung der Elektronen, die beim Einlaufen in das Bremsfeld der Longitudinalkomponente der Welle infolge der Lorentz-Kraft zur Anode gelenkt werden, wobei sie ihre Gleichfeldenergie stufenweise in Form von HF-Energie an die Welle abführen. Dieser Vorgang entspricht weitgehend demjenigen beim ebenen Magnetron-Verstärker.

Magnetrons werden in der Regel impulsbetrieben. Um ein Springen zwischen den einzelnen Moden zu vermeiden, werden gleichphasige Anodensegmente

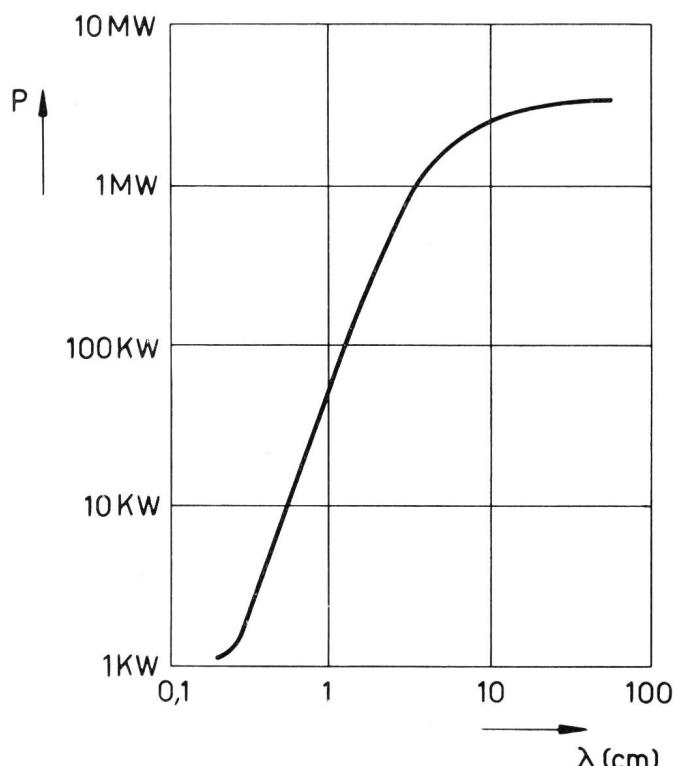


Fig. 30. Abhängigkeit der erzielbaren maximalen Impuls-Sendeleistungen verschiedener Magnetrons von der Wellenlänge

durch Kurzschlussbügel («straps») verbunden. Diese stellen kleine Zusatzkapazitäten parallel zu den Anodenschlitzen dar und verschieben die Eigenfrequenz des  $\pi$ -Modus nach niederen Frequenzen, so dass sich praktisch nur dieser Schwingungszustand

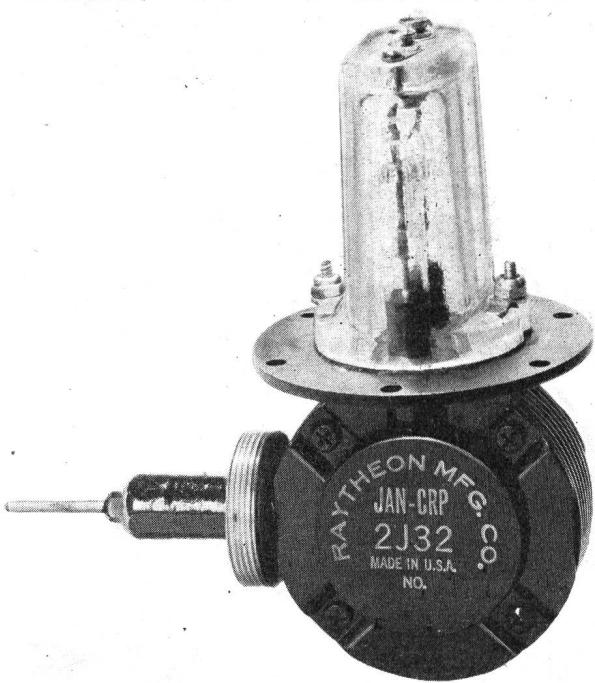


Fig. 31. Magnetron 2 J 32 der Firma Raytheon

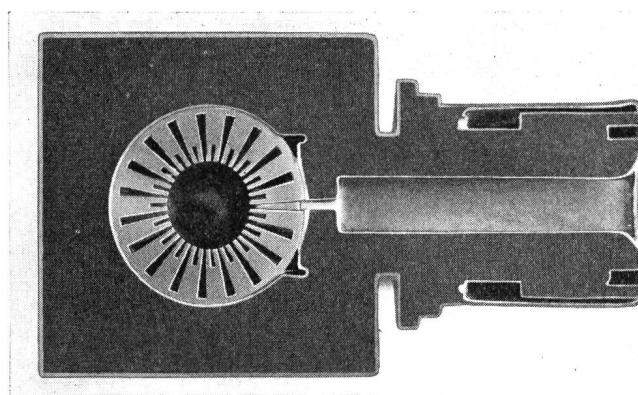


Fig. 32. Rising-Sun-Magnetron für  $\lambda = 6,3$  mm (Columbia Radiation Laboratory, New York).

a) Anoden-Resonanzsystem mit Hohlleiter zur Energieauskopplung

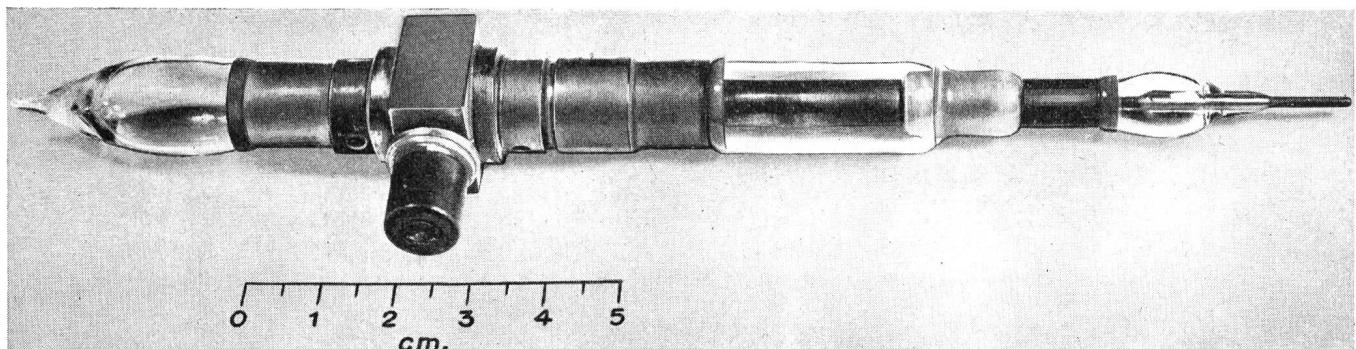


Fig. 32. b) Gesamtansicht der Röhre ohne Magnet

des Resonanzsystems erregen kann. Bei sehr kurzen Wellen verwendet man Magnetrons mit abwechselnd langen und kurzen Anodenschlitzen (Rising-Sun-Magnetron) Figur 32. Die Eigenfrequenz des  $\pi$ -Modus liegt hierbei etwa zwischen der Eigenfrequenz des Systems der langen und derjenigen des Systems der kurzen Schlitze.

Magnetrons werden vorzugsweise in Radarsendern verwendet, wo es auf die Herstellung sehr grosser Impuls-Sendeleistungen ankommt. Figur 30 gibt einen Überblick über die bei verschiedenen Wellenlängen erzielbaren maximalen HF-Leistungen (Impulsbetrieb). Figur 31 zeigt die technische Ausführung eines Magnetrons (Typ 2J 32 der Firma Raytheon) für den Bereich zwischen 2780 und 2820 MHz und 300 kW Impuls-Sendeleistung und Figur 32 ein Rising-Sun-Magnetron für  $\lambda = 6,3$  mm und 30 kW Impuls-sendeleistung des Radiation Laboratory der Columbia Universität.

## 5. Reflexionssenderöhren

### 1. Reflexionsklystron

Die periodische Bewegung der Elektronen im Magnetron leitet über zu den Reflexionslaufzeitröhren, bei denen eine in einem elektrostatischen Bremsfeld umkehrende Elektronenströmung zur

Schwingungserzeugung benutzt wird. Die technisch wichtigste Reflexionsröhre ist das *Reflexionsklystron* (Fig. 33). Die in das HF-Feld des Hohlraumresonators mit konstanter Geschwindigkeit eintretenden Elektronen werden geschwindigkeitsgesteuert und im elektrostatischen Gegenfeld zwischen Resonator und Reflektor zur Umkehr gezwungen. Die schnelleren Elektronen dringen tiefer in das Gegenfeld ein als die langsameren und benötigen deshalb zur Rückkehr in den Resonator eine entsprechend längere Zeit. Dadurch kommt eine Phasenfokussierung der Elektronen zustande, wie es schematisch in Figur 34 angedeutet ist. Haben die verdichteten Elektronengruppen solche Laufzeit, dass sie gerade zur Bremsphase des HF-Feldes wieder in den Resonator zurückkehren, so geben sie HF-Energie an das Feld ab und regen den Resonator zu verstärkten Schwingungen an.

Die in den Resonator zurückkehrenden Elektronen stellen einen Wechselstrom dar, dessen Phase relativ zur HF-Spannung von der mittleren Geschwindigkeit und von der mittleren Entfernung des Umkehrpunktes der Elektronen abhängt. Die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen lässt sich durch die Beschleuni-

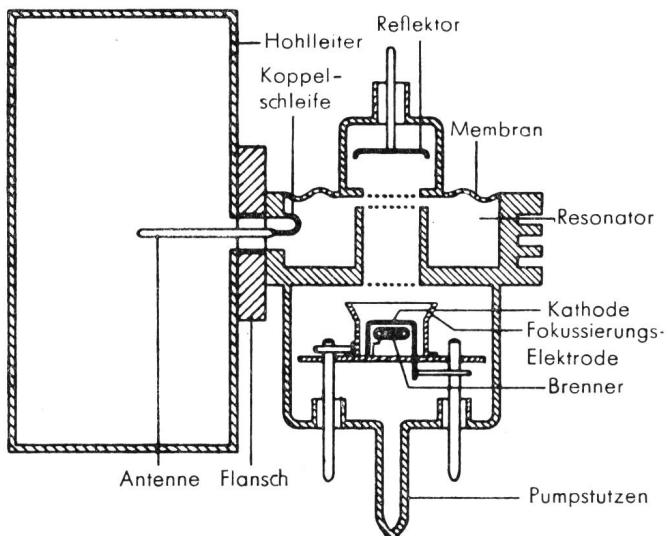


Fig. 33. Schema eines Reflexionsklystrons (gleichzeitig Aufbau der Telefunken-Röhre TK 7)

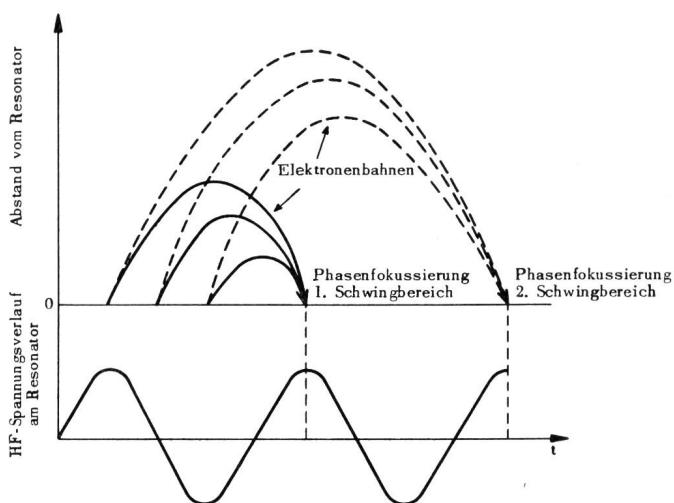


Fig. 34. Veranschaulichung des Vorganges der Phasenfokussierung beim Reflexionsklystron

gungsspannung am Resonator verändern, die mittlere Entfernung ihres Umkehrpunktes durch die Reflektorspannung. Der Wechselstrom erzeugt parallel zum Resonator einen Wirkleitwert, der die HF-Leistung liefert, und einen Blindleitwert, der innerhalb eines Schwingbereiches bei Erhöhung der negativen Reflektorspannung von positiven nach negativen Werten läuft. Hierdurch kommt eine Frequenzänderung zu stande, wobei sich infolge der gleichzeitigen Änderung des Wirkleitwertes auch die HF-Leistung ändert. Die Frequenzänderung beträgt bei  $\lambda = 10$  cm etwa 1 MHz/V. Da die Durchstimmkennlinie befriedigend linear ist, wird dieser Vorgang sowohl zur selbsttätigen Frequenzstabilisierung als auch zur Frequenzmodulation herangezogen.

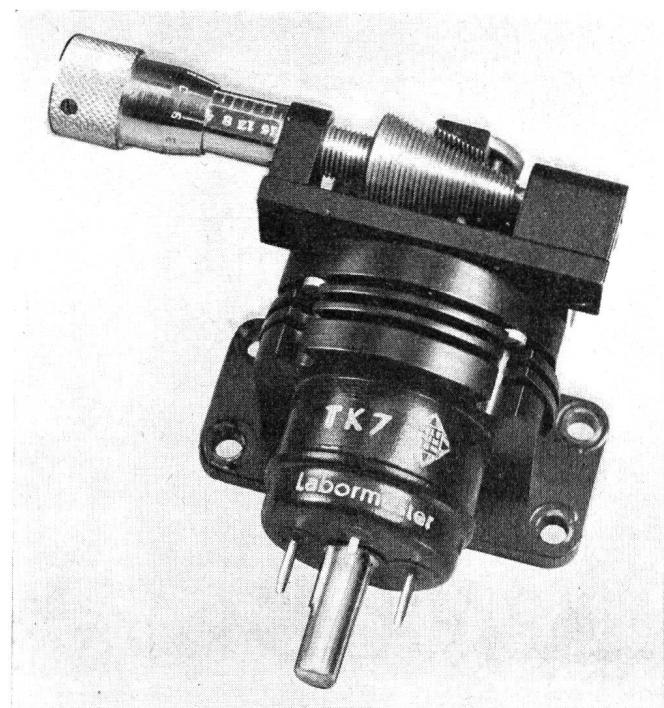


Fig. 35. Reflexionsklystron TK 7 der Firma Telefunken

Bei verschiedenen Reflexionsklystrons lässt sich die Frequenz zusätzlich durch Eindrücken der flexiblen Resonatorwand oder mittels einer in den Resonator eintauchenden und in ihrer Länge abstimmbaren Spindel um etwa 10 % der mittleren Frequenz variieren. Die Figuren 35 und 36 zeigen Lichtbilder zweier durchstimmbarer Reflexionsklystrons. Die Röhre TK7 (Telefunken) ist für den Bereich 3600...4400 MHz vorgesehen und liefert eine maximale HF-Leistung von etwa 3 W; die Röhre X-13 (Varian Associates) für den Bereich 8200...12 400 MHz bei einer HF-Leistung von 0,5 W. Reflexionsklystrons werden in der Mikrowellentechnik hauptsächlich in Meßsendern sowie als Oszillatroröhren in Überlagerungsempfängern verwendet.

## 2. Andere Reflexionslaufzeitröhren

Auch die seit langem bekannte *Barkhausen-Kurz-Röhre* ist eine Reflexionslaufzeitröhre, die jedoch wegen ihres sehr geringen Wirkungsgrades heute nur noch historische Bedeutung hat. Eine neuartige Form

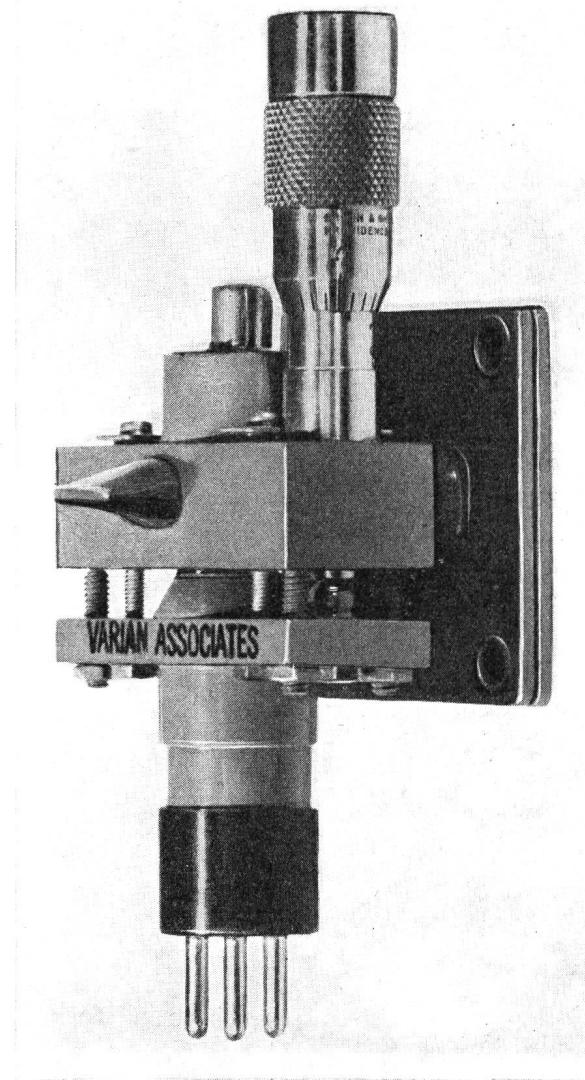


Fig. 36. Reflexionsklystron X-13 der Varian Associates

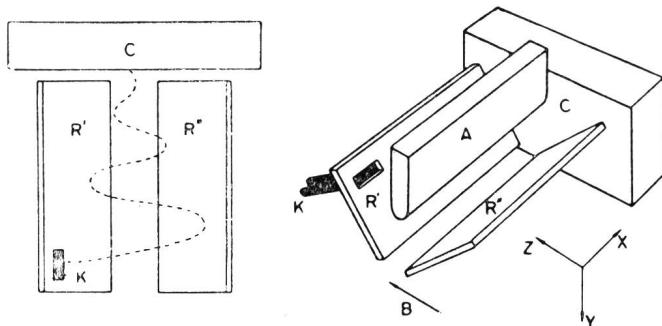
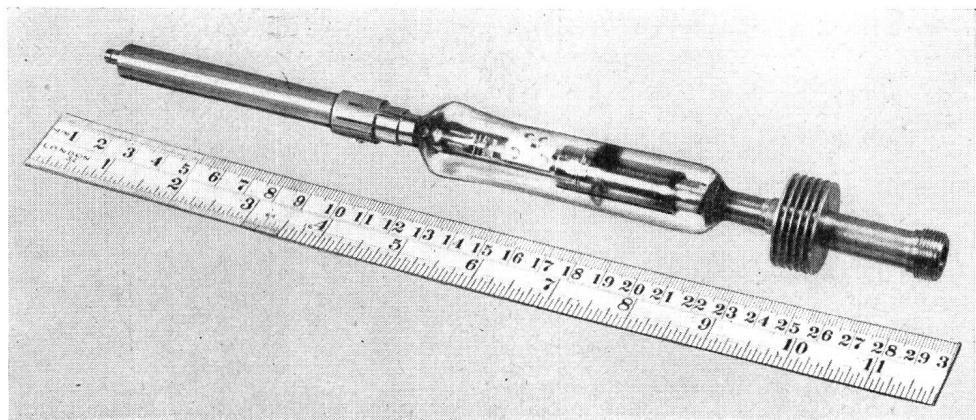


Fig. 37. Schema eines Strophotrons

der Barkhausen-Kurz-Röhre ist das *Strophotron* (Figur 37). Hierbei pendeln die Elektronen im parabolischen Gleichfeld einer positiven Anode A zwischen zwei auf negativem Potential liegenden Elektroden R' und R'' hin und her, an die auch der äussere Resonanzkreis (Lecherleitung oder Koaxialleitung) angeschlossen wird. Ein Magnetfeld in Richtung der Pendelbewe-

Reflexionsklystrons und Karzinotrons erzeugbaren Wellen konnte man die Grenzwellenlänge sogar bis in den Bereich um  $\lambda \geq 1$  mm verkürzen. HF-Leistung und Wirkungsgrad nehmen mit abnehmender Wellenlänge in diesem Gebiet allerdings sehr schnell ab, so dass die Anwendungen dieser extrem kurzen Wellen bisher im wesentlichen auf rein wissenschaftliche Untersuchungen (Millimeterwellen-Spektroskopie) beschränkt ist. Zur Herstellung von Zehntelmillimeterwellen sind neuartige Verfahren in der Entwicklung begriffen, die die Eigenstrahlung beschleunigter Elektronen ausnutzen (Relativistische Doppler-Methode und Cherenkov-Effekt). In letzter Zeit ist es auch gelungen, die quantenhaften Energiezustände gewisser Moleküle in Emission zu erhalten und auf diese Weise Millimeterwellen zu erzeugen. Damit ist nunmehr sowohl von seiten der elektrischen als auch der quantenhaften Strahler die Brücke zwischen dem elektrischen und optischen Spektralbereich geschlossen.

Fig. 38.  
Strophotron der Firma Svenska  
Elektronrör, Stockholm



gung lenkt die Elektronen von der Anode zu einer seitlich angeordneten Auffängerelektrode C hin. Der Nachteil der hohen Gitterverlustleistung der Barkhausen-Kurz-Röhre tritt beim Strophotron nicht auf. Der Mechanismus entspricht weitgehend dem der Barkhausen-Kurz-Röhren und beruht im wesentlichen in einer Auslese falschphasiger Elektronen. Im Bereich zwischen 1000 und 2000 MHz werden mit Strophotrons HF-Leistungen von etwa 5 W und etwa 30 % Wirkungsgrad erzielt, wobei die Frequenz in weiten Grenzen durch Wahl der Höhe der Anoden Spannung regelbar ist. Figur 38 zeigt die technische Ausführung eines Strophotrons, das von der Firma Svenska Elektronrör, Stockholm, entwickelt wurde und als Senderöhre in schwedischen Richtfunkstrecken vorgesehen ist.

## 6. Methoden zur Erzeugung extrem kurzer Wellen

Mit Laufzeitröhren lassen sich heute Mikrowellen bis zu kürzesten Wellen von etwa  $\lambda = 3$  mm erzeugen. Durch Aussonderung harmonischer Magnetron-Oberwellen und durch Frequenzvervielfachung der mit

## Bibliographie

- Über Mikrowellenröhren erschienen in den letzten Jahren zahlreiche Veröffentlichungen. Wir führen nachstehend nur einige an, auf die der Aufsatz Bezug hat.
- Alfvén, H. and D. Romell.* A new Electron Tube: The strophotron, Proc. Inst. Radio Engrs **42** (1954), 1239.
  - Beggs, J. E. and N. T. Lavoo.* A triode useful to 10 000 Mc. Proc. Inst. Radio Engrs **43** (1955), 15.
  - Birdsall, C. K., G. R. Brewer and A. V. Haefl.* The resistive-wall amplifier. Proc. Inst. Radio Engrs **41** (1953), 865.
  - Bloom, S. and R. W. Peter.* A minimum noise figure for the traveling-wave tube. RCA Review **15** (1954), 252.
  - Brück, L. und A. Lauer.* Die Telefunken-Wanderfeldröhre TL 6. Telefunken-Röhre 1955, Nr. 32, S. ....
  - Eichlin, W., P. Meyerer, W. Veith und O. Zinke.* Wanderfeld-Endröhre hoher Verstärkung mit Permanentmagnet. FTZ **7** (1955), 369.
  - Tien, P. K. and L. M. Field.* Space-charge waves in an accelerated electron stream for amplification of microwave signals. Proc. Inst. Radio Engrs **40** (1952), 688.
  - Gordon, J. P., H. J. Zeiger and C. H. Townes.* Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of NH<sub>3</sub>. Phys. Rev. **95** (1954), 282.
  - Gundlach, F. W.* Trioden mit sehr kleinen Elektrodenabständen. Fernmeldetechn. Z. **7** (1954), 516.

- Haeff, A. V.* The electron wave tube. Proc. Inst. Radio Engrs **37** (1949), 4.
- Karp, A.* Traveling-wave tube experiments at millimeter wavelength with a new, easily built, space harmonic circuit. Proc. Inst. Radio Engrs **43** (1955), 41.
- Kleen, W.* Einführung in die Mikrowellen-Elektronik. Zürich, 1952.
- Kleen, W.* Geschichte, Systematik und Physik der Höchstfrequenz-Elektronenröhren. Elektrotechn. Z. (A) **76** (1955), 53.
- Kleen, W.* Raumladungswellen in Elektronenströmungen. Entwicklungsberichte Siemens & Halske, 17. Jg., 1. Folge, Juni 1954, S. 89.
- Kompfner, R.* and *N. T. Williams*. Backward-wave tubes. Proc. Inst. Radio Engrs **41** (1953), 1602.
- Millman, S.* Spatial harmonic traveling wave amplifier. Bell Lab. Rec. **30** (1952), 413.
- Pierce, J. R.* Some recent advances in microwave tubes. Proc. Inst. Radio Engrs **42** (1954), 1735.
- Pierce, J. R.* The wave picture of microwave tubes. Bell Syst. Techn. J. **33** (1954), 1343.
- Stark, L.* Electromagnetic waves in periodic structures. Res. Lab. Electronics MIT, Rep. No 208. Cambridge (Mass.), December 1952.
- Ramo, S.* The electronic-wave theory of velocity-modulation tubes. Proc. Inst. Radio Engrs **27** (1939), 757.
- Reed, E. D.* A tunable, low-voltage reflex klystron for operation in the 50 to 60-kmc band. Bell Syst. Techn. J. **34** (1955), 563.
- Rydbeck, O. H. E.* und *B. Agdur*. The propagation of electronic space charge waves in periodic structures. Chalmers Tekn. Högskolas handlingar, Göteborg, Schweden.
- Veith, W.* Das Carcinotron, ein elektrisch durchstimmbarer Generator für Mikrowellen. Fernmeldetechn. Z. **7** (1954), 554.
- Warnecke, R. R.*, *W. Kleen*, *A. Lerbs*, *O. Döhler* and *H. Huber*. The magnetron-type traveling-wave amplifier tube. Proc. Inst. Radio Engrs **38** (1950), 481.
- Warnecke, R. R.*, *P. Guénard*, *O. Döhler* and *B. Epsztain*. The „M“-type carcinotron tube. Proc. Inst. Radio Engrs **43** (1955), 413.
- Warnecke, R. R.* Sur quelques résultats récemment obtenus dans le domaine des tubes électroniques pour hyperfréquences. Ann. Radioélect. **9** (1954), 107.

## Die Flugsicherung des interkontinentalen Flughafens Zürich

Von *Albert Fischer*, Zürich-Flughafen 621.396.933 + 656.7.05 Par *Albert Fischer*, Zurich-aéroport

**Zusammenfassung.** Unter dem Begriff «Flugsicherung» versteht man eine Reihe von unterschiedlichen Diensten und Funktionen, und es ist für den Außenstehenden nicht immer leicht, sich in das Wesen des Flugsicherungsdienstes hineinzudenken. Bevor deshalb auf die Beschreibung der Anlagen des Flughafens Zürich und die dort angewandten Sicherungsverfahren eingegangen wird, sind einige allgemeingültige Erklärungen am Platze. Vor allem sei auf die Zusammenhänge und Verkettungen hingewiesen, desgleichen auf die Notwendigkeit, drei Begriffe auseinanderzuhalten: Funknavigation – Luftverkehrskontrolle – Übermittlungsdienst.

### Funknavigation

Funknavigation bedeutet das Auffinden des Flugweges mit Hilfe von radioelektrischen Mitteln. Die Funknavigation ist unerlässlich, weil dem Flugzeugführer die optische Sicht auf den Erdboden wegen der Wolken und Bodennebel häufig und in der Nacht völlig fehlt oder bei Flügen über Wasser oder Wüstengebiete nichts nützt. Die Einrichtungen, um Funknavigation betreiben zu können, sind ausserordentlich vielfältig und immer wieder Änderungen unterworfen. Die heute gebräuchlichsten Gattungen sind: Rundstrahl-Funkfeuer, gerichtete Funkfeuer, Leitstrahlsender, Hyperbelsysteme, Peilgeräte, Radareinrichtungen und andere mehr. Solche Geräte und Systeme können auf dem Erdboden aufgestellt oder in den Flugzeugen montiert sein; sie können selbsttätig arbeiten oder Bedienung erfordern; wesentlich für ihre Einreichung als Navigationsgeräte ist nur der Zweck: *Hilfeleistung beim Auffinden des Flugweges*.

### Luftverkehrskontrolle

Die Luftverkehrskontrolle ist etwas ganz anderes. Wenn sich auf der Strecke Paris-Zürich und um den

## Le service de la sécurité aérienne à l'aéroport intercontinental de Zurich

**Résumé.** Le service de la sécurité aérienne comprend toute une série d'organes et de fonctions parmi lesquels le profane a quelque peine à se reconnaître. C'est pourquoi, avant de décrire les installations de l'aéroport de Zurich et les méthodes employées pour garantir la sécurité des avions en vol, nous devons donner quelques explications d'ordre général. Nous montrons en premier lieu quels sont les rapports des divers services entre eux et faisons une nette distinction entre la radionavigation, le contrôle de la circulation aérienne et le service de communication.

### La radionavigation

Le travail du service de radionavigation consiste à déterminer, au moyen d'appareils radioélectriques, le chemin que doit suivre l'avion. Cela est indispensable, car, du fait des nuages ou du brouillard au sol, le pilote n'a pas toujours la vue directe sur le sol – elle lui manque complètement pendant la nuit ou ne lui est d'aucune utilité lorsqu'il survole la mer ou le désert. Les installations servant à la radionavigation sont extrêmement diverses et sujettes à de perpétuels changements. Celles qu'on emploie le plus actuellement sont les radiophares non directifs ou directifs, les systèmes hyperboliques, les appareils de radiogoniométrie, les radars, etc. Ces appareils peuvent être montés au sol ou sur l'avion; ils peuvent être automatiques ou exiger la présence d'un desservant; pour les classer comme appareils de navigation, on considère seulement leur fonction, qui est de permettre de déterminer le chemin que doit suivre l'avion.

### Le contrôle de la circulation aérienne

Le contrôle du trafic aérien est quelque chose de tout différent. S'il n'y avait qu'un seul avion en vol