

H. S t e y s k a l : Experimentelle Untersuchungen an Laufzeitröhren.

Die Entwicklung von abgeschmolzenen Laufzeitröhren hatte zur Zeit des Berichtes der AEG vor der Lilienthal-Gesellschaft im Jahre 1942 hinsichtlich der erzielbaren Nutzleistung und des Wirkungsgrades bei Wellenlängen von rund 25 cm einen gewissen Abschluß erreicht. In der Folgezeit lassen sich die Arbeiten des AEG-Forschungsinstitutes auf diesem Gebiete in 2 Gruppen gliedern:

- 1.) Die Entwicklung eines von der Pumpe abgezogenen Ganzmetallrohres nach dem Einkreis-Zweifeldprinzip für eine feste Wellenlänge von etwa 7 cm bei einer Hochfrequenzleistung von rund 50 W.
- 2.) Grundsätzliche Untersuchungen an Rohren rein labormäßigen Aufbaues, wobei das Zweikreissystem (Klystron) im Vordergrund stand. Wir arbeiteten dabei aus Gründen der leichteren Handhabung ebenfalls wieder mit Wellenlängen von 25 cm.

Da aber die erste Gruppe unserer Arbeiten schon mehrfach an anderer Stelle mündlich berichtet worden ist, beschränken sich die vorliegenden Ausführungen nur auf die Untersuchungen an dem Klystron. Hinsichtlich dieses Laufzeitrohres lagen zum Zeitpunkt der Arbeitsaufnahme eine Reihe theoretischer Arbeiten vor,¹⁾ die je nach Annahmen zu sehr verschiedenen Ergebnissen, insbesondere bezüglich des Wirkungsgrades, führten. Diese unterschiedlichen Werte, vermehrt um die Tatsache, daß in amerikanischen Veröffentlichungen²⁾ über praktische Ergebnisse mit einem Klystron berichtet wurde, das bei 40 cm Wellenlänge mit einem Wirkungsgrad von 50 %

1) D.L. Webster: J.Appl.Phys. 10 (1939) 501; M.Geiger: Telefunkenröhre 16 (1939) 177; F.Lüdi: Helv.Phys.Acta 13 (1940) 122; Labus und Dahlke: ZWB-Bericht 1577
2) Electronics

arbeiten sollte, bewogen uns gerade das Problem des Klystrons von der experimentellen Seite in Angriff zu nehmen.

Wir bedienten uns dabei eines Aufbaues, wie ihn Abb. 1 schematisch zeigt. Ein Entladungsrohr aus Kupfer bildete gleichzeitig das Schwingsystem, indem durch eine Wand in der Mitte des Gefäßes das gesamte Volumen in zwei Hohlräume zerlegt wurde. Der Laufraum konnte in die Mittelwand eingeschraubt werden und ergab zusammen mit den von Grund- und Deckfläche her einsetzbaren Rohrstücken die Spaltkapazitäten der Schwingkreise. Die Spaltfelder wurden durch eine Anzahl radialer, hochkant eingesetzter Molybdänstreifen homogenisiert. Die Kathode, eine ebene Spirale aus Wolframdraht, und die wassergekühlte Anode, aus einem langen, einseitig verschlossenen Kupferrohr bestehend, waren mittels Kitt bzw. Gummidichtungen auf dem Schwingsystem befestigt. Diese Dichtungsstellen- und damit das gesamte Gefäß- hatten ebenfalls eine eigene Wasserkühlung. Die Anode besaß einen so großen Querschnitt und ragte soweit in das Schwingsystem hinein, daß sie praktisch sämtliche aus dem letzten Gitter austretenden Elektronen auffing. Zur Vermeidung störender Sekundäremission lag sie bei sämtlichen Messungen auf einem um 50 - 100 V positiven Potential als das Gehäuse. Die aus der Abbildung ersichtlichen Durchführungen (aufgekittete Glashütchen) dienten dazu, einestells die Rückkopplungsleitung anzuschließen, anderenteils mittels einer konzentrischen Rohrleitung den Steuerkreis verstimmen bzw. am Auskoppelkreis die Last anbringen zu können. Als Last verwendeten wir Glühlämpchen mit gestrecktem Wolframdraht von etwa $15 \mu \varnothing$ (Gleichstromwiderstand etwa 100 Ohm) teils mit, teils ohne Wasserstofffüllung, die im Zuge einer konzentrischen am Ende kurzgeschlossenen Rohrleitung angeordnet wurden. Variation der Leitungslänge vor und hinter den Widerstand ermöglichte die Last an den Generator anzupassen. Die Hochfrequenzenergie bestimmten wir mittels Photozelle und Galvanometer.-An jedem Schwingkreis war ferner ein aus der Abbildung nicht ersichtlicher Detektor angebracht, um

die Hochfrequenzwechselspannungen in den beiden Räumen miteinander verglichen und Rückschlüsse auf die Betriebsweise ziehen zu können. Die Bündelung des Elektronenstrahls erfolgte durch Magnetspulen.

Es ist nötig, einige Ausführungen über die von uns gewählte Art der Rückkopplung zu machen. Aus Gründen des einfachen Aufbaues bedienten wir uns zum Unterschiede von dem System der Gebrüder Varian, die eine im Vakuum drehbare Koppelschleife geringer Länge vorsahen, der Rückkopplung über eine Rohrleitung verhältnismäßig großer Länge mit konstanter Ankopplung. Damit wird aus dem Zweikreis- ein Dreikreis- System, da die Leitungslänge nicht mehr zu vernachlässigen ist. Modelluntersuchungen haben zunächst gezeigt, daß der Rückkopplungsfaktor durch Variation der Leitungslänge in ziemlich weiten Grenzen geändert werden kann, wobei die beiden Kreise nicht einmal aufeinander abgestimmt zu sein brauchen. Den drei gekoppelten Kreisen entsprechen drei Resonanzfrequenzen. Bei Längenänderungen der Rückkoppelung wandert die ihr entsprechende Resonanzfrequenz im gleichen Verhältnis, während die den beiden Schwingkreisen zugeordneten Resonanzfrequenzen sich nur um geringe Beträge verschieben. Die Änderung der Amplituden an den beiden Kreisen kann indessen sehr beträchtlich sein. Die rechte Seite der Abbildung 2 zeigt die Verhältnisse schematisch. Bei einer bestimmten Länge l_{RK} der Rückkoppelleitung sind die beiden Schwingkreisamplituden über der Wellenlänge aufgetragen (oberstes Bild). In unserem Fall lagen die Koppelwellen bei 24,8 cm und 25,2 cm, und es soll die voll ausgezogene Linie z.B. dem Steuerresonator, die strichlierte dem Auskoppelkreis entsprechen. Bei der Resonanzstelle 24,8 cm wäre demnach der Rückkopplungsfaktor kleiner als 1, in der anderen Resonanzlage größer als 1. In beiden Fällen kann man diese Größe willkürlich beeinflussen, indem die Leitung z.B. um ein Stück $\Delta l < \lambda/2$ verlängert wird (mittleres Bild). Dann haben sich die beiden Resonanzstellen nur wenig verschoben, hingegen sind die Amplitudenver-

hältnisse völlig verändert. Die kurzwellige Resonanzstelle besitzt nun einen Rückkopplungsfaktor größer als 1 und die langwellige kleiner als 1. Durch Längenänderung der Leitung kann also der Rückkopplungsfaktor für beide Resonanzstellen - bei gleichzeitiger Änderung seines Phasenwinkels - von Werten unter 1 stetig in Werte über 1 übergeführt werden. (In einer bestimmten Leitungsstellung besitzt der Faktor genau den Wert 1, was dem Betriebszustand des Heylischen Generators entsprechen würde. Es müßte demnach möglich sein, an einem Rohr sämtliche Laufzeittröhrentypen experimentell miteinander zu vergleichen). Bei einer weiteren Verlängerung der Leitung auf den Wert $l_{RK} + \lambda/2$ erreicht man dann wieder den Ausgangszustand (unterstes Bild). Die Rückkopplungsfaktoren sind hinsichtlich ihres Betrages die gleichen wie im obersten Bild, doch unterscheiden sich die Phasenwinkel um 180° . Die periodische Wiederkehr des Ausgangszustandes spielt sich nun in der Weise ab, daß die langwellige Resonanzstelle des mittleren Bildes immer weiter nach längeren Wellen abwandert, die kurzwellige sich an Stelle der langwelligen schiebt und ihre Stelle wieder durch eine neu aus dem noch kurzwelligeren Gebiet kommende eingenommen wird. Bei diesem Vorgang geht demnach der Schwingungszustand der Resonanzstelle 24,8 cm stetig in den Schwingungszustand bei 25,2 cm über.

In quantitativer Hinsicht sind die Verhältnisse natürlich durch Kopplungsgrad, Verstimmung und Dämpfung der Kreise noch weiter zu beeinflussen, doch seien diese Einzelheiten einem eigenen Bericht vorbehalten.

Die experimentelle Bestätigung dieser Modellversuche ist auf der linken Hälfte der Abbildung 2 gezeigt. Es ist hier die ausgekoppelte Hochfrequenzleistung über der Länge l_{RK} der Rückkoppelleitung aufgetragen. Anodenstrom- und Spannung sowie Anpassung sind konstant gehalten. Man ersieht aus dem oberen Bild, das dem Schwingungszustand mit dem statischen Laufzeitwinkel $\Theta_L = 5,3\pi$ im Laufraum entspricht, wie die Welle von 24,8 cm bis 25,2 cm durch Leitungsverlängerung gezogen werden kann, um schließ-

lich bei zu ungünstigen Werten des Rückkopplungsfaktors in günstigere Selbsterregungsbedingungen umzuspringen. Das gleiche Leistungsbild ergibt sich bei den entsprechenden Längen $l_{RK} + \lambda/2$, sofern nur die Phasendrehung des Rückkopplungsfaktors durch Änderung des Laufzeitwinkels berücksichtigt wird ($\Theta_L = 4,3 \pi$ bzw. $6,3 \pi$).

Mit dem geschilderten Aufbau erhielten wir je nach Größe des Laufzeitwinkels im Laufraum eine ganze Reihe gut ausmeßbarer Schwingbereiche. Entsprechend den Anodenspannungen von 500 - 3000 V, der Wellenlänge von rund 25 cm und den zwei Laufraumlängen von 56 und 28 mm konnten wir die Schwingbereiche zwischen $\Theta_L = 2,5 \pi$ und $\Theta_L = 10 \pi$ untersuchen. Im Leerlauf schwang das Rohr bei einem inneren Widerstand der Entladungsstrecke von rund $4 \cdot 10^5$ Ohm an. Infolge des von der Kreisdämpfung abhängigen Rückkopplungsfaktors war es aber nicht möglich gewesen, beim Übergang von einem Schwingbereich zum anderen die Rückkopplung bei gleichbleibender Leitungslänge konstant zu halten, da der Steuerresonator bei steigender Anodenspannung immer weniger bedämpft wurde. Abb. 3 zeigt eine diesbezügliche Meßreihe. Hatte z.B. bei $\Theta_L = 10 \pi$ das Verhältnis von Detektoranzeige D_S des Steuerresonators zu Anzeige D_A des Auskoppelkreises den Wert K, so stieg er bei $\Theta_L = 4,3 \pi$ bis auf den 3,7 fachen Wert an. Hierbei verkleinerte sich nämlich der Wert des Laufzeitwinkels Θ_{St} der Elektronen im Steuerfeld von $0,83 \pi$ auf $0,36 \pi$, und an Hand des in Abbildung 3 gezeigten Diagramms der Dämpfungs- und Entdämpfungsbereiche einer Elektronenströmung im elektrischen Längsfeld ist somit das Ansteigen des Rückkopplungsfaktors leicht verständlich³⁾. Abb. 4 zeigt schließlich die erzielten Wirkungsgrade bezogen auf den zur Anode gelangenden Strom über dem Verhältnis R_1 / R_2 für die durch die einzelnen Werte von Θ_L gekennzeichneten Schwingbereiche. Dabei bedeutet R_1 den Gleichstromwiderstand des Elektronenstrahles und R_2 den Ohmschen Widerstand der Last. Dem Kurvenbild liegt der Gedanke zugrunde, den Zustand bester Anpassung der Last an die

3) Fußnote siehe nächste Seite.

Elektronenströmung aufzusuchen. Da wir experimentell festgestellt hatten, daß die Größe des Belastungswiderstandes R_a einen merklichen Einfluß auf die auskoppelbare Energie ausübte, haben wir statt R_i den Quotienten R_i/R_a auf der Abszisse aufgetragen, um damit die Änderungen des Glühlampewiderstandes, der je nach Leistungsaufnahme beinahe im Verhältnis 1 : 2 schwanken konnte, auszuschalten. Da R_a in der Größenordnung von je 100 Ohm lag, geht aus der Abbildung hervor, daß die Strahlwiderstände zwischen $5 \cdot 10^4 - 25 \cdot 10^4$ Ohm lagen. Sämtliche Kurven zeigen, daß mit einer weiteren Anodenstromerhöhung der Wirkungsgrad verbessert worden wäre. Das Anpassungsoptimum muß darnach bei noch kleineren Entladungswiderständen gesucht werden. Bei den Schwingbereichen mit kleinen Laufzeitwinkeln konnten dennoch Wirkungsgrade von über 30 % erzielt werden.

Die Versuche werden zur Zeit weitergeführt mit dem Ziel, die oben dargestellten Ergebnisse durch Angabe der Wechselspannungsdaten zu ergänzen und darüber hinaus quantitative Aussagen über die Betriebszustände z.B. hinsichtlich Kreisgüte, Kreiswiderstände, Aussteuerungsgrad usw. zu ermöglichen. Auf diesem Wege, insbesondere aber auch durch Anwendung von Fremdsteuerung soll eine ins Einzelne gehende experimentelle Prüfung der Laufzeitröhrentheorien durchgeführt werden.

3) Leider war es infolge der plötzlichen Unterbrechung unserer Arbeiten durch Bombenschaden nicht möglich gewesen, die relativen Empfindlichkeiten der beiden Schwingkreisdetektoren zu bestimmen und daraus Rückschlüsse über das wahre Kopplungsverhältnis zu ziehen. Der gleiche Mangel haftet den in Abb. 4 gezeigten Kurven an. An der Vervollständigung der Messungen in dieser Hinsicht wird zur Zeit gearbeitet.

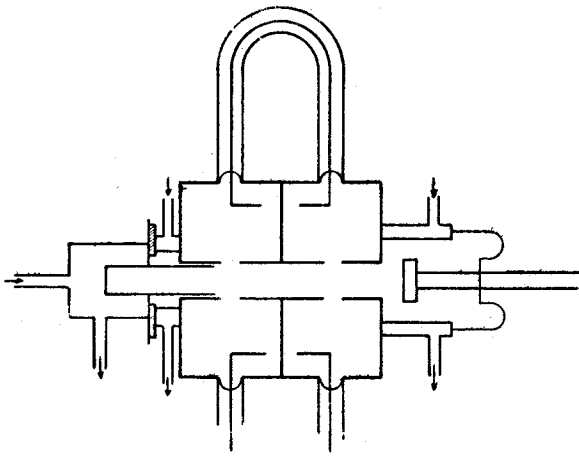


Abb.1: Schematischer Aufbau des Rohres.

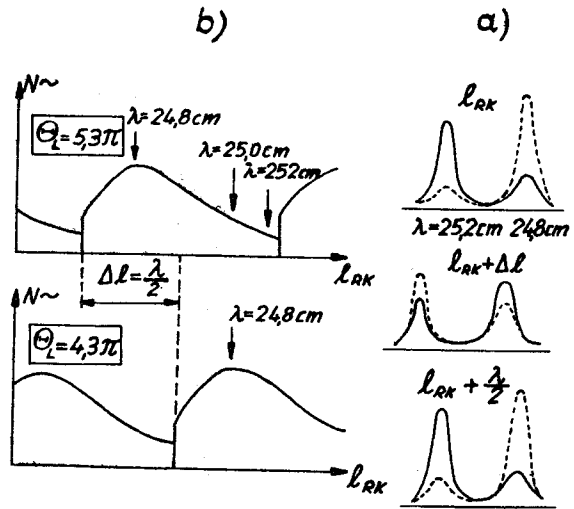


Abb.2: Das Dreikreissystem:
a) Resonanzkurven im Modellversuch
b) Verhalten bei Selbsterregung

Θ_L	10π	$9,2\pi$	$8,2\pi$	$7,3\pi$	$6,3\pi$	$5,3\pi$	$4,3\pi$
$\frac{D_S}{D_A}$	K	1,3K	1,4K	1,8K	2,4K	3,1K	3,7K
Θ_{St}	$0,83\pi$	$0,76\pi$	$0,68\pi$	$0,61\pi$	$0,52\pi$	$0,44\pi$	$0,36\pi$

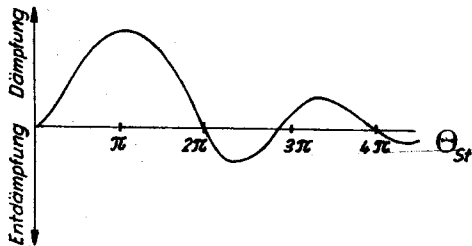


Abb.3: Die Änderung des Rückkopplungsfaktors bei zunehmender Entdämpfung des Steuerresonators

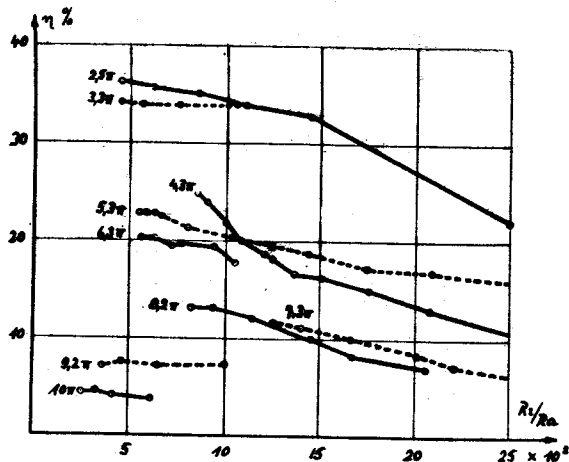


Abb.4: Wirkungsgrade der verschiedenen Schwingbereiche