

# 1 Einführung in die Mikrowellentechnik

## 1.1 Mikrowellenröhren

Elektronenröhren - wie sie in der Radio- und Fernsehtechnik vorkommen - sind nur bis zu bestimmten Frequenzobergrenzen einsetzbar, weil bei noch höheren Frequenzen die endliche Laufzeit der Elektronen eine Verstärkung verunmöglicht. Die obere Frequenzgrenze der dichte- bzw. intensitätsgesteuerten Röhren wird bestimmt durch die inneren Röhrenkapazitäten, die Zuleitungsinduktivitäten der Elektroden und die Elektronenlaufzeit. Aus diesem Grunde wurden sog. Laufzeitröhren entwickelt.

Siehe:

Meinke/Gundlach, "Taschenbuch der Hochfrequenztechnik" (Springer)

Der Emissionsstrom kann auf verschiedene Weise beeinflusst werden, wenn man sich das folgende Grundtheorem näher anschaut:

$$I = \rho \cdot A \cdot v$$

$\rho$  Ladungsdichte  
 $A$  wirksame Emissionsfläche  
 $v$  Geschwindigkeit

Mit einem Steuergitter lässt sich die Ladungsdichte beeinflussen, so dass eine Intensitäts- oder Dichtemodulation resultiert. Dies wird bei den konventionellen Elektronenröhren (Trioden) praktiziert.

Eine weitere Möglichkeit der Beeinflussung besteht in einer Geschwindigkeitsmodulation (und somit der Steuerung der Laufzeit). Das wird bei den Mikrowellenröhren im Gigahertzbereich (cm-Wellen) gehandhabt.

Zu den Laufzeitröhren zählen:

### 1) Driftröhren (Klystron)

Einsatz in Radaranlagen, Teilchenbeschleuniger und als Richtstrahlverstärker.

a) Das *Mehrkreisiklystron* dient als schmalbandiger Leistungsverstärker bis 10 GHz (Dauerstrichleistung > 1 MW, Pulsbetrieb bis 150 MW)

b) Das *Reflexklystron* (1 bis 30 GHz) wird als Oszillator verwendet.

### 2) Lauffeldröhren

a) *Wanderfeldröhre* bis 20 GHz (Leistung bis 1 MW) zur Verwendung als rauscharmer Breitbandverstärker.

b) *Karzinotron*, eine Rückwärtswellenröhre (bis 5 GHz) zur Verwendung als Oszillator

### 3) Kreuzfeldröhren

a) *Magnetron* bis 20 GHz (Leistung bis 10 MW) zur Verwendung als leistungsstarker Mikrowellengenerator.

b) *Amplitron* (Kreuzfeldverstärker) zur Verwendung in Radaranlagen und (als Impuls-Amplitron) in Teilchenbeschleunigern.

Nachfolgend soll am Beispiel von Klystron, Wanderfeldröhre und Magnetron das Wesentliche über Mikrowellenröhren vermittelt werden.

## 1.2 Topfkreise und Hohlraumresonatoren

Um die Mikrowellentheorie besser zu verstehen, muss zuerst etwas über **Topfkreise** und **Hohlraumresonatoren** gesagt werden.

Topfkreise sind Schwingkreise von hoher Güte. Historisch gesehen stammen Topfkreise aus dem Anwendungsbereich der Radio-, Fernseh- und Radartechnik. Sie finden bereits im UHF-Bereich (dm-Wellen) Verwendung. Je grösser die Resonanzfrequenz ist, um so kleiner fallen die LC-Glieder bekanntlich aus.

Die Resonanzfrequenz berechnet sich nach der Schwingkreisformel von Thomson; kleine LC-Glieder haben eine hohe Eigenfrequenz).

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

f = Resonanzfrequenz in Hertz (Hz)  
L = Induktivität in Henri (H)  
C = Kapazität in Farad (F)

Reduziert man gedanklich die Spule eines Parallelschwingkreises auf einen Drahtbügel und plaziert man viele solcher Bügel rotationssymmetrisch um den axialen Kondensator, entsteht ein Topfkreis (Abb. 1-1). Anstelle der Drahtbügel wird in praxi ein Becher (Hohlzylinder, Hohlkubus) mit innen versilberter Oberfläche und allseitig geschlossenen Stirnflächen verwendet.

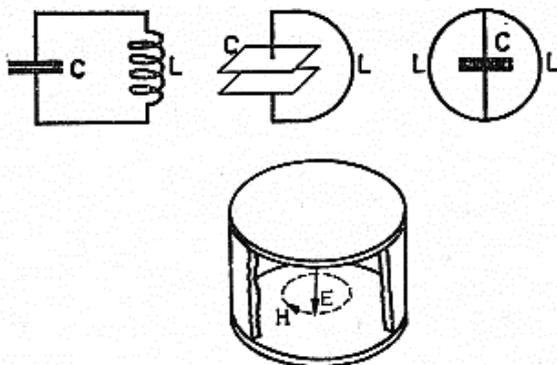


Abb. 1-1

Vom LC-Schwingkreis zum Topfkreis

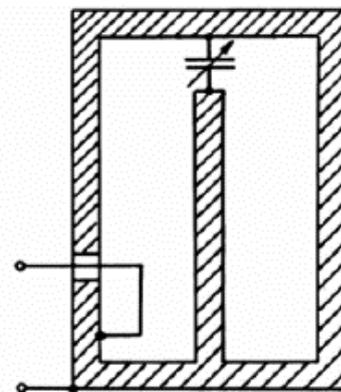


Abb. 1-2

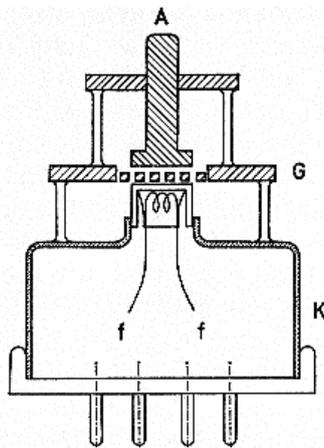
Topfkreis mit mit induktiver Ankkopplung und Abstimmkapazität

Schliesslich lässt sich auch der Kondensator zu einem gestreckten Draht reduzieren, welcher nur noch einseitig mit dem Bechergehäuse verbunden wird (Abb. 1-2). Draht und Luftspalt (Dielektrikum) bilden jetzt die Kapazität, während die Innenwandung des Hohlkörpers die Induktivität darstellt. Am Innenleiter findet man die bereits vom  $\lambda/4$ -Lecherkreis bekannte Strom- und Spannungsverteilung, d.h. Strommaximum an dem mit dem Becher verbundenen Ende und Spannungsmaximum am freien Ende. Dazu kommt wegen der "verteilten Kapazität" eine "elektrische Verlängerung", so dass der Innenleiter physisch gesehen wesentlich kürzer ausfällt als es sonst der Fall wäre.

Durch axiales Verschieben des Innenleiters kann die Kapazität innerhalb bestimmter Grenzen beeinflusst werden, so dass eine exakte Abstimmung auf die Resonanzfrequenz möglich ist.

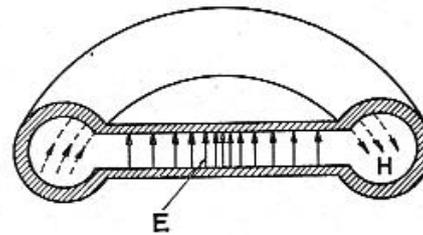
Andere Ausführungsformen wie bspw. der UHF-Tuner (Kanalwähler von Loewe-Opta, 1961) verwenden zur Abstimmung einen Drehkondensator, der mit dem losen Drahtende verbunden ist. Die baulichen Abmessungen bestimmen dabei grundsätzlich die Kreisfrequenz. Bei rundherum geschlossenem Kreis verlaufen sämtliche Feldlinien im Innern, so dass nach Aussen keine Abstrahlung erfolgt.

Um die geometrischen Abmessungen möglichst gering zu halten, werden aktive Elemente mit dem Topfkreis zu einer Einheit verbunden.



**Abb. 1-3:**  
Scheibentriode

(infolge der kreisflächenförmigen Elektroden entstehen nur geringe parasitäre Reaktanzen)



**Abb. 1-4**  
Rumbatron als Mikrowellen-Hohlraumresonator

Beim VHF-Radar (150 MHz bis etwa 1 GHz) werden anstelle des klassischen Schwingkreises sog.  $\lambda/4$ -Leitungen verwendet. Zusammen mit einer *Scheibentriode* entsteht daraus ein Topfkreis, dessen Resonanzfrequenz mittels Kurzschlußschiebern eingestellt wird. Die Ankopplung der Feldenergie erfolgt über Kopplungsschleifen (Koaxialkabel) oder Kopplungsschlitze (Hohlleiter). Bei noch höheren Frequenzen (SHF) besteht ein Topfkreis nur noch aus einem geschlossenen Hohlkörper. Man spricht dann sinnvollerweise von einem *Hohlraumresonator*.

Eine spezielle Variante des Hohlraumresonators ist das *Rumbatron*, das auch im Klystron Verwendung findet. Die inhomogene elektrische Feldverteilung führt zu einer Feldstärkekonzentration im Zentrum; das magnetische Feld verläuft geschlossen im Aussenring (Abb. 1-5).

## 2 Laufzeitröhren

### 2.1 Klystron

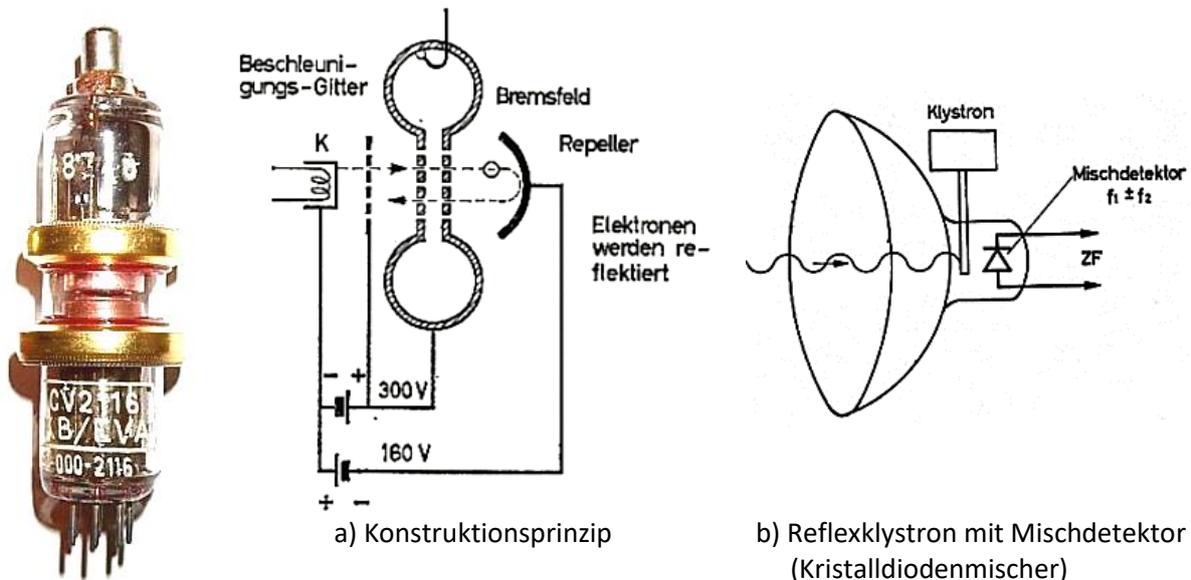
Das Wort "Klystron" stammt aus dem Griechischen ( $\kappa\lambda\upsilon\sigma$ ), was das Brechen der Wellen am Strand andeuten soll und der Endsilbe "tron" (von elektron).

Das früher in der Radartechnik für Oszillatorstufen beliebte Reflexklystron besteht als bestimmendem Element aus einem Resonator und dem Repeller. Für Amplifier werden Zweikreisklystrons eingesetzt. Inzwischen wurde das früher in terrestrischen UKW-Sendern eingesetzte Klystron mehr und mehr von IOT's (Inductive Output Tube) und von Halbleitern verdrängt. In

der Beschleunigerphysik kommen noch immer Mehrkreisklystrons zum Einsatz, um die Kavitäten mit elektromagnetischer Feldenergie zu versorgen.

### 2.1.1 Reflexklystron

Der gewissermassen nebenbei erfundene Vorläufer des Reflexklystrons ist die Barkhausen-Kurz-Röhre. Diese, von Barkhausen und Kurz (1920) erfundene Röhre, hat nur noch eine historische Bedeutung. Das eigentliche Reflexklystron besteht aus Elektronenkanone, einem Hohlraumresonator (Rumbatron) und dem Repeller (Reflektor).



**Abb. 2-1**  
Reflexklystron

Die von der Kathode emittierten Elektronen werden zunächst durch ein Beschleunigungsgitter auf die erforderliche Geschwindigkeit gebracht, durchfliegen dann den Resonator und werden durch ein Bremsfeld (Repeller) zurück zum Resonator gelenkt. Beim ersten Durchflug erfolgt bereits eine Geschwindigkeitsmodulation, wodurch es nach dem Resonator zu einer Elektronenverdichtung bzw. Phasenfokussierung kommt. Durch das negative Potential des Repellers werden die Elektronen rechtzeitig zur Umkehr gezwungen, so dass die Elektronenpakete auf ihrem Rückflug gerade in der richtigen Phasenlage in den Resonator eindringen, wo sie durch das Steuerfeld abgebremst werden. Dadurch wird kinetische Energie in Feldenergie umgewandelt, die im Resonator rückgekoppelt wird. Weil für Eingangs- und Ausgangssignal nur ein einziger Kreis vorhanden ist, funktioniert das Reflexklystron ausschliesslich als (selbsterregter) Oszillator. Bei richtiger Bemessung und Abstimmung des Systems beginnt das Reflexklystron somit zu schwingen.

Das Reflexklystron eignet sich nur für kleine Leistungen, wie man sie für Mischstufen in Superhet-Empfängern von Radaranlagen benötigt. Mittlerweile hat die Gunn-Diode das Reflexklystron weitgehend ersetzt.

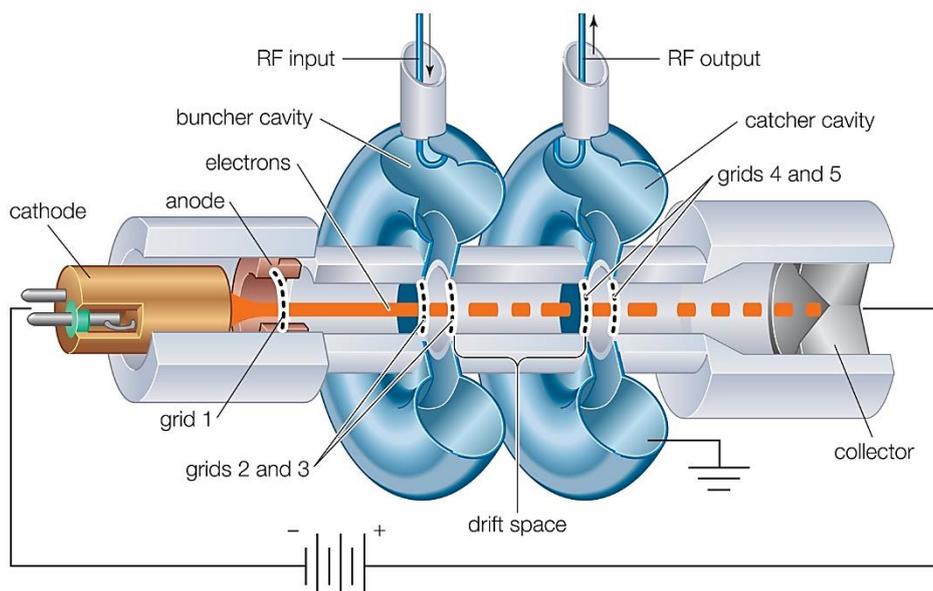
Moderne Mikrowellenoszillatoren (CRM) werden mit Gyrotrons (5 bis 170 GHz; Ausgangsleistung  $> 1$  MW) realisiert. Deren Prinzip beruht auf der Elektronen-Zyklotron-Maser-Instabilität. Die Mikrowellenleistung wird aus der durch ein axiales Magnetfeld verursachten relativ-

stischen Kreiselbewegung der Elektronen entnommen. Hochleistungsgyrotrons werden insbesondere in der Fusionsforschung (Stellarator- und Tokamakanlagen) eingesetzt. Deutschland ist in der Gyrotronentwicklung führend.

### 2.1.2 Zweikammerklystron

Das Klystron beruht einerseits auf Ideen des Ehepaars A. und O. Heil (Über eine neue Methode zur Erzeugung kurzer ungedämpfter elektromagnetischer Wellen großer Intensität, 1935). In der genannten Arbeit wurde erstmalig gezeigt, wie die für die Funktion einer Verstärkerröhre erforderliche Dichtemodulation nicht durch eine Gittersteuerung, sondern durch eine Geschwindigkeitssteuerung der Elektronen mit anschließender Phasenfokussierung erzeugt wird. Der Heilsche Generator arbeitet noch mit einem äusseren (getrennten) LC-Schwingkreis. Völlig unabhängig davon haben die Gebr. Varian in den USA im Jahre 1937 das eigentliche Klystron (nämlich einen funktionsfähigen Zweikammer-Rumbatron-Oszillator) erfunden. Das Versuchsmodell erzeugte 13 cm Wellen. Nach dem Krieg gründeten die beiden Brüder die Firma 'Varian Associates', wo sie Klystrons für Fernsehsender und Radaranlagen fabrizierten.

Das Varian-Klystron besitzt die typischen Rumbatrone (Hohlraumresonatoren), die am Anfang und am Ende des Laufraumes (Driftstrecke) angeordnet sind. Der (feldfreie) Driftraum ist 3 bis 9 Wellenlängen lang. Die Hohlraumresonatoren sind im Zentrum mit Löchern oder Schlitzen versehen (und bilden damit gewissermassen zweimal zwei Steuergitter,  $g_2+g_3$ ,  $g_4+g_5$ ), um die Elektronen durchzulassen. Jede fertig zusammengebaute Driftröhre wird selbstverständlich luftleer gepumpt.



**Abb. 2-2**  
Zweikammerklystron<sup>1</sup>

Am Eingang des ersten Resonators (Buncher cavity) wird das RF-Steuersignal eingekoppelt; dessen Wechselpotential bewirkt eine Geschwindigkeitsmodulation der durchfliegenden Elektronen, welche im Wechsel der Eingangsspannung beschleunigt und verzögert werden. Es kommt zum "Einholeffekt". Im Laufraum holen die schnelleren Elektronen die langsameren

<sup>1</sup> Bildquelle: Encyclopaedia Britannica

ein, so dass sich eine Dichtewelle mit ausgeprägter Elektronenpakettierung (Bunching) ausbildet. Verdichtungen und Verdünnungen folgen einander periodisch.

Die Dichtewelle kann als DC-Strahl mit überlagerter, nichtsinusförmiger AC-Komponente aufgefaßt werden. In der zweiten Kammer (Catcher cavity) - wo die Dichtewelle ihre maximale Elektronendichte einnimmt - geben die Elektronen ihren hochfrequenten Feldanteil an den Resonator ab. An dessen Ausgang wird das (nun verstärkte) RF-Signal ausgekoppelt. Damit wird das Zweikammerklystron zum geeigneten Mikrowellenverstärker. Nach dem Durchfliegen des letzten Resonators wird der Elektronenstrahl von einem Kollektor aufgefangen, wo die restliche kinetische Energie in Wärme umgewandelt wird. Der Kollektor ist kein Teil des RF-Kreises. Verbindet man den Mikrowellenausgang mit dem -eingang (Rückkopplungsschleife), entsteht ein HF-Generator. Aus diesem Grunde ist das Zweikammerklystron vielseitiger verwendbar als das Reflexklystron.

### 2.1.3 Mehrkreisklystron

Um die Abgabeleistung zu steigern, werden Klystrons mit mehreren Kammern (3 bis 6 Kreise) gebaut. Im Impulsbetrieb werden auf diese Weise ausserordentlich grosse Leistungen erzielt. Wegen der erforderlichen Driftstrecken werden solches Mehrkreisklystrons bis zu 3 m lang. Um den Elektronenstrahl auf der gesamten Länge zu fokussieren, werden Elektromagnete verwendet. Derartige Hochleistungsklystrons sind bei Teilchenbeschleunigern anzutreffen.

a) Linac-Klystron, DELTA (Pulsbetrieb:  $U = 270 \text{ kV}$ ;  $I = 270 \text{ A}$ ):

[http://www.home.datacomm.ch/chs/Container/Elektronenroehren/linac-klystron\\_1.jpg](http://www.home.datacomm.ch/chs/Container/Elektronenroehren/linac-klystron_1.jpg)

(gut erkennbar ist auch der Rechteckhohlleiter, der die RF-Energie fortleitet)

b) Klystron am Kranhaken (Revision):

[http://www.home.datacomm.ch/chs/Container/Elektronenroehren/linac-klystron\\_3.jpg](http://www.home.datacomm.ch/chs/Container/Elektronenroehren/linac-klystron_3.jpg)

c) Senderhalle HERA-West mit Klystrongeneratoren:

<http://www.home.datacomm.ch/chs/Container/Elektronenroehren/senderhalle.jpg>

## 2.2 Lauffeldröhren

### 2.2.1 Wanderfeldröhren

1) Die **Wanderfeldröhre** (Travelling Wave Tube) wurde von Rudolf Kompfner während des zweiten Weltkrieges (1943) in England erfunden. Ende 1951 ging Kompfner - inzwischen zum PhD avanciert - zu den Bell Labs (USA), um zusammen mit Pierce seine Erfindung weiter zu entwickeln. Mit Wanderfeldröhren erreicht man Verstärkungsfaktoren zwischen  $5e4$  bis  $1e5$  und eine Dauerausgangsleistung von bis zu  $10 \text{ kW}$ . Im Impulsbetrieb sogar bis zu mehreren MW.

Travelling-Wave-Röhren - wie sie auch genannt werden - werden häufig als Leistungsverstärker in Kommunikationssatelliten eingesetzt (Bandbreite einige hundert MHz). Halbleiterverstärker auf SiGe-Basis haben die Wanderwellenröhre teilweise verdrängt. Zunehmends setzen sich bei kleineren Leistungen auch sog. III/V-Halbleiter aus GaAs und Indiumphosphid durch.

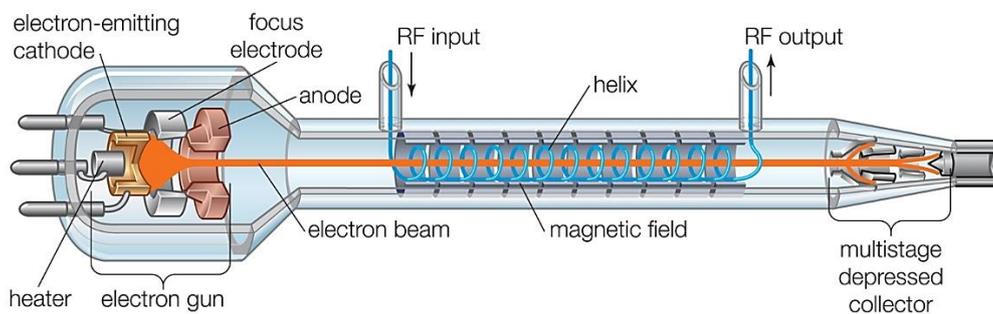
Die Wirkungsweise der Röhre als Verstärker beruht auf der Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit dem Feld einer entlang einer Helix (Drahtwendel) fortschreitenden Welle, deren axiale Geschwindigkeit ca. 1/10 der Vakuumlichtgeschwindigkeit beträgt:

$$v_{axial} = \frac{c \cdot S}{D \cdot \pi}$$

S = Steigung der Helix  
D = Durchmesser der Helix  
c = Wellengeschwindigkeit im Leiter

Die Helix stellt somit eine konstruktiv problemlos zu realisierende Verzögerungsleitung dar. Für die Erzeugung von mm-Wellen ersetzt man die Helix durch eine Filterleitung (Kettenleiter), im Prinzip ein Rohr mit innen eingefrästen Nuten.

Der Kathodenstrahl wird durch eine Lochanode hindurch entlang der Helixachse geführt. Ein magnetisches Längsfeld bewirkt die erforderliche Zylinderfokussierung. Am Röhrenende sammelt ein Kollektor die Strahlelektronen ein.



**Abb. 2-3**  
Wanderfeldröhre<sup>2</sup>

Der Helix wird am Wendelanfang ein hochfrequentes Eingangssignal zugeführt. Dieses beschleunigt - je nach Phasenlage - die Elektronen zu Gruppen (Phasenfokussierung), welche ihrerseits auf der Wendel ein fortschreitendes elektrisches Feld influenzieren, das sich mit dem Steuerfeld derart überlagert, dass eine zunehmend exponentielle Verstärkung eintritt.

Die durch periodische Bremsung und Beschleunigung bewirkte Geschwindigkeitsmodulation hat eine Dichtemodulation (Bunching) des Elektronenstrahls zur Folge. Durch die gewählte Steigung der Helix und durch die mit der Anodenspannung bestimmte Größe der Elektronenfluggeschwindigkeit wird erreicht, dass die axiale Wandergeschwindigkeit des Höchstfrequenzfeldes etwas niedriger ist als die Geschwindigkeit der Elektronen im Strahl. Während nun das Höchstfrequenzfeld durch den Energieaustausch zwischen Kathodenstrahl und Wanderfeld zunehmend verstärkt wird, nimmt die mittlere kinetische Energie der Elektronen auf ihrem Wege durch die Helix ab. Der Überschuss an kinetischer Energie der etwas schneller als die Wanderwelle fortschreitenden Elektronenpakete ist dabei massgebend für den Verstärkungsgrad der Röhre.

Am Wendelende wird das (verstärkte) Hochfrequenzsignal in einen Hohlleiter geleitet. Um die Rückkopplungsneigung zu unterdrücken, erhält der Wendelträger im Ausgangsbereich eine schwach leitende Dämpfungsschicht.

Für eine optimale Leistungsverstärkung müssen Eingangs- und Innenwiderstand der Schaltung

<sup>2</sup> Bildquelle: Encyclopaedia Britannica

angepasst werden. Der Elektrotechniker spricht vom komplex konjugierten Impedanzwert. Dies bedeutet nichts anderes als eine Gleichheit der Realanteile (Wirkwiderstände) bei gleichzeitiger Aufhebung der Imaginäranteile (kompensierter Blindwiderstand). Im Hohlleiter lässt sich dies relativ einfach mittels Blenden oder verschiebbaren Reflexionsabschlüssen erzielen.

2) Eine Sonderform der Wanderfeldröhre ist die **Elektronenwellenröhre**. Die Aufgabe der Verzögerungsleitung übernimmt hier ein zweiter Elektronenstrahl. Der Verstärkungseffekt kommt durch die Wechselwirkung der beiden Strahlen zustande.

### 2.2.2 Karzinotron

Eine weitere auf dem Wanderwellenprinzip basierende Röhre ist das **Karzinotron** (Backward Wave Tube). Diese ist eine über eine ganze Oktave abstimmbare Oszillatordröhre (Frequenzbereich 5 - 10 GHz), die ausser der Helix keine weiteren Abstimmelemente benötigt. Das Fokussierfeld wird durch eine um die Röhre gewickelte Spule erzeugt. Die Wanderwelle läuft bei diesem Röhrentypus dem Elektronenstrahl entgegen.

## 2.3 Kreuzfeldröhren

### 2.3.1 Magnetron

1) Das **Magnetron** (frühere Bezeichnung "Magnetfeldröhre") gehört - wie auch das Amplitron - zu den Kreuzfeldgeneratoren und ist insbesondere in Radarsendern als Diodenoszillator anzutreffen. Erfunden wurde es einerseits von Hull bei General Electric (1921), der sich dabei auf Arbeiten von Greinacher stützte. Hull erfand auch das Dynatron. Auch Habann (Jena) und Žáček (Prag) erfanden im selben Jahr (1921) ein Magnetron. Aber erst Spencer setzte das Hull-Magnetron als Mikrowellengenerator ein. Die Schlitz-Anode stammt von Okabe (1929). Hollmann (1935) meldete seinerseits ein Vielschlitz-Magnetron zum Patent an.

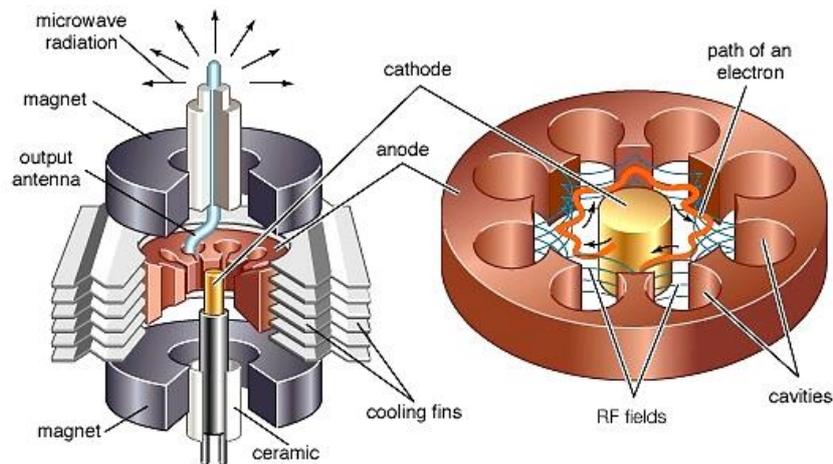
Das Radarprinzip geht auf Hülsmeier (Telemobiloskop, 1904) und vermutlich auch auf Tesla zurück, geriet aber wieder in Vergessenheit, bevor es in den dreissiger Jahren durch Kühnhold (GEMA) und Runge (Telefunken) sowie weitere deutsche Funkgerätefirmen erneut propagiert wurde. Bereits 1938 wurde das Pulsradar der "Freya"-Reihe von der deutschen Marine zur Küstenüberwachung eingesetzt. Die britische Radarentwicklung setzte um 1935 mit dem Versuch von Watson-Watt ein. Einen Meilenstein in der Radarentwicklung bildete das 3 GHz Hohlraum-Magnetron von Randall und Boot (1940), das für die danach folgenden Mikrowellenradars wegweisend wurde.

In der einfachsten Form handelt es sich beim Kreuzfeldoszillator um zwei gegenüberliegende Metallplatten, von denen eine als Anode dient, während sich in der zweiten die Kathode befindet. Bemerkenswert sind die gekreuzten E- und H-Felder, die senkrecht aufeinander stehen. Ansonsten würde das System auch nicht funktionieren.

2) Beim **Linearmagnetron** zwingt der das elektrische Feld kreuzende magnetische Fluss die Elektronen durch die Lorentzkraft auf Zykloidenbahnen. Die Frequenz ist nur von der Flussdichte abhängig. Die elektrische Feldstärke verändert aber den Rollkreisdurchmesser.

3) Das weiterentwickelte **Radar-Magnetron** mit Mehrschlitz-Anode (z.B. VMX 1090) ist zylindersymmetrisch aufgebaut. Im Zentrum des massiven Kupferblocks (Anode) befindet sich eine

Glühkathode. Die Anode ist mit Schlitzen oder Bohrungen versehen, die als frequenzbestimmende Hohlraumresonatoren dienen. Es gibt unterschiedliche Anodenausfräsungen wie Schlitz, Sektor und Rising-sun. Beim Lochtyp - auf den wir uns nachfolgend konzentrieren - sind Schlitz und Bohrungen vorhanden. Die parallelen Schlitz wirken als Kapazität, der Lochumweg als Induktivität. Die Resonatoren verhalten sich deshalb wie in Reihe geschaltete LC-Kreise und somit als Verzögerungsleitung.



**Abb. 2-4**  
Magnetron <sup>3</sup>

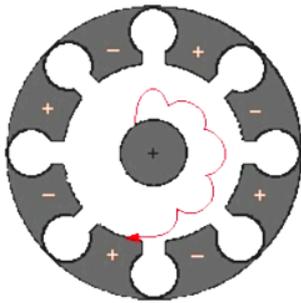
Der Raum zwischen Kathode und Anode wird als Laufraum bezeichnet. Das elektrostatische Radialfeld wird von einem axialen Magnetfeld eines Permanentmagneten gekreuzt. Ohne Magnetfeld würden sich die aus der Kathode emittierten Elektronen unter dem Einfluss der Coulombkraft strahlenförmig zur aussenliegenden Anode bewegen.

Das axiale Magnetfeld bewirkt auch hier eine Bahnkrümmung. Je größer die Flussdichte, um so größer ist auch die Krümmung. Bei zu großer Krümmung gelangen die Elektronen wieder zur Kathode zurück und es fließt kein Anodenstrom. Somit muss der kritische Zustand angestrebt werden. In praxi geht man etwas über den kritischen Zustand hinaus; dabei nähert sich das Elektron in mehreren Zykloidenbögen der Anode.

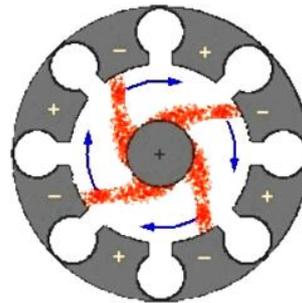
Beim Vorbeifliegen der Elektronen werden die Hohlraumresonatoren (Kavitäten) zum Schwingen angeregt, so dass sich auf der Verzögerungsleitung eine umlaufende elektromagnetische Welle ausbildet. Dadurch entstehen entlang der Anodensegmente abwechselnde Plus- und Minuspotentiale, die mit dem Hochfrequenzfeld umlaufen. Die Elektronen werden dadurch periodisch beschleunigt und abgebremst, so dass sich eine Dichtemodulation (Pakettierung) einstellt. Es entsteht ein rotierendes Speichenrad.

Auf ihrem komplizierten Weg von der Kathode zur Anode werden die Elektronen in der Speiche mehrmals abgebremst. Dabei geben sie jedesmal Energie an das Wechselfeld ab. Über eine Kopplungsschleife oder einen Wellenleiter wird die RF-Energie schlussendlich dem Magnetron entnommen.

<sup>3</sup> Bildquelle: Encyclopaedia Britannica



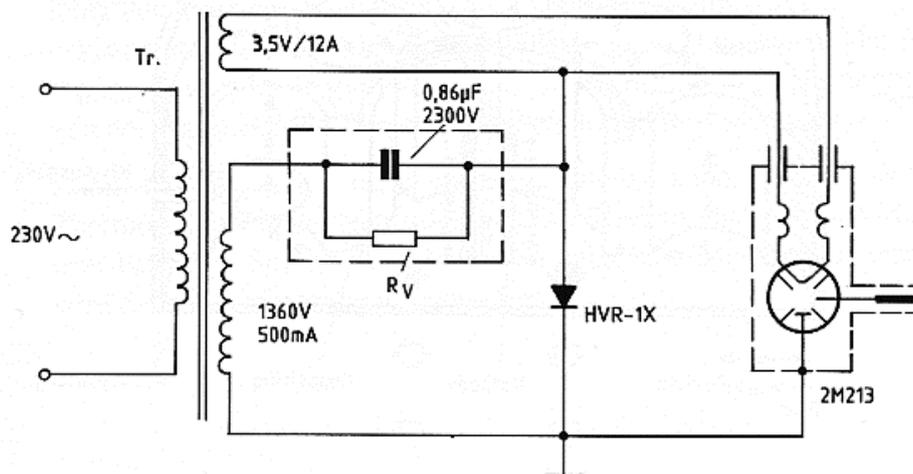
**Abb. 2-5**  
Zykloidsprünge



**Abb. 2-6**  
Speichenradpakettierung

Um die Resonanzfrequenz abzugleichen und einen effizienten Betriebszustand (sog.  $\pi$ -Modus) zu erzielen, werden an den Anodensegmenten Kurzschlussringe angebracht. Dabei werden sowohl die geradzahligen als auch die ungeradzahligen Segmente jeweils miteinander verbunden. Eine andere Methode besteht in der Verwendung von Resonatoren unterschiedlicher Eigenfrequenz (Rising-sun-Anode). Der Wirkungsgrad beträgt bis zu 80 %. Abstimmbare Magnetrons (z.B. M5114B) enthalten eine Abstimmmechanik mit zusätzlichen Induktivitäten.

Nicht nur in der Radartechnik (als Impulsmagnetron), sondern auch im heimischen Mikrowellenofen findet das Magnetron Verwendung.



**Abb. 2-7**

Schema Mikrowellenherd-Magnetron, direkt beheizt  
(die Anode liegt - wie immer bei solchen Röhren - auf Gerätemasse)

Die Generatorschaltung ist sehr einfach konstruiert und kann von jedem einigermaßen begabten Sekundarschüler problemlos nachgebaut werden. Beim Schrotthändler finden sich immer auch Mikrowellenherde, denen man ihr Herz (Magnetron) entnehmen. Man veranstalte damit aber keinen Unfug!

### 2.3.2 Amplitron

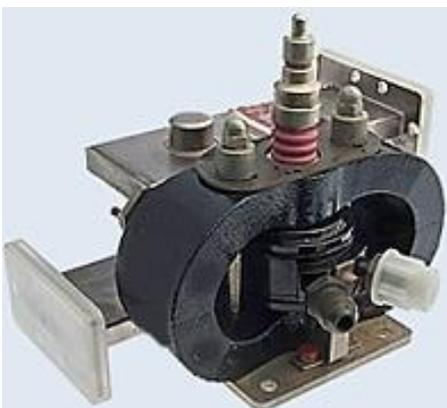
Das **Amplitron** kommt ebenfalls in Radaranlagen zum Einsatz.<sup>4</sup> Diese Mikrowellenverstärker-

<sup>4</sup> Amplitron einer stillgelegte Radaranlage:

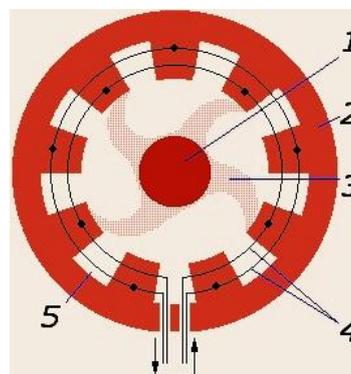
<http://home.datacomm.ch/chs/Container/Elektronenroehren/amplitron.jpg>

röhre ist auch als *Stabilotron* oder *Platinotron* im Einsatz und gehört zu den Kreuzfeldverstärkern (CFA).

Im Unterschied zum Magnetron besitzt das Amplitron eine ungerade Anzahl von Resonatoren und verfügt zudem über einen Eingang. Auch bei dieser Röhre kreuzt ein axiales Magnetfeld das radiale elektrische Feld. Dadurch werden die Elektronen zu Umwegen gezwungen, um auf einer gekrümmten kreisförmigen Bahn die Anode zu erreichen. Das hochfrequente Eingangssignal beeinflusst die Elektronen derart, dass sich durch wiederholtes Beschleunigen und Abbremsen eine Paketierung ausbildet. Zwischen Welle und Raumladung erfolgt somit eine Interaktion. Beim Bremsen geben die Elektronen wiederum Energie an das Hochfrequenzfeld ab. Am Ausgang kann das nun verstärkte Signal entnommen werden. Um die Lebensdauer zu erhöhen, werden für die Kathode oft Platinelektroden eingesetzt, die nach dem Prinzip der Sekundärelektronenemission arbeiten.



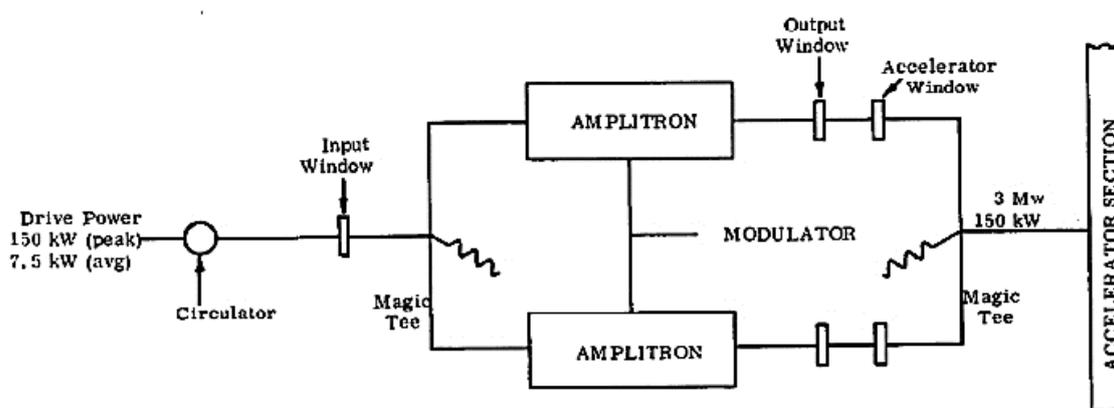
**Abb. 2-8**  
Amplitron



Amplitron (Prinzip)

- 1 Kathode
- 2 Anodenblock
- 3 Elektronenpakete
- 4 Verzögerungsleitung
- 5 Resonator

Nebst ihrem Verwendungszweck in Radaranlagen kommen Amplitrons auch in Teilchenbeschleunigern zum Einsatz. Der Vorteil gegenüber Klystronröhren ist ihre geringe Frequenz- und Phasenabweichung bei veränderlicher Anodenspannung.



**Abb. 2-9**  
Amplitronschaltung für eine Beschleunigersektion  
(Rf Power Source For Long Pulse)

Mit dem Amplitron verlassen wir das anspruchsvolle Gebiet der Mikrowellenröhrentechnik.