

geblich an der Entwicklung beteiligt war, schildert in seinem Bericht im AEÜ (siehe Literaturverzeichnis) die vielfachen Wege und Schwierigkeiten. Interessant ist zu diesem Abschnitt die erstaunliche Parallelität der Entwicklungen, die in den verschiedenen Ländern ohne Kenntnis voneinander verlief. Es ist zu bemerken, daß die 1940 von den sowjetischen Wissenschaftlern *Alexejew* und *Malearow* angegebenen

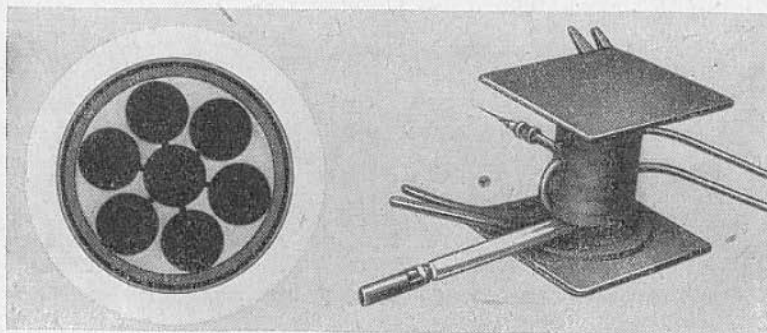


Bild 3.135 Birmingham-Magnetron

Vollanoden mit Bohrungen sowohl in Deutschland als auch in England genau nach den angegebenen Maßen gebaut wurden. England ersetzte die sowjetische Reinmetallkatode durch eine moderne Bariumoxydkatode und hatte so mit einem Schlage das Hochleistungsmagnetron. Auch die nach dem Kriege in Deutschland weitergeführten Forschungsarbeiten sind von *K. Fritz* beschrieben worden. Man hat hier vor allem das Dauerstrichmagnetron weiterentwickelt. In seiner heutigen Form erweist sich das Magnetron als außerordentlich wirksamer cm-Wellen-Generator. Mit seiner Hilfe kann man noch Schwingungen von 4 mm Wellenlänge erzeugen.

3.221 *Die Theorie des Magnetrons.* Zur Vereinfachung soll angenommen werden, daß es sich um ein ebenes Magnetron handelt, daß die Raumladung vernachlässigt wird und die Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen Null ist. Im Bild 3.136 sind die sich so ergebenden Bahnkurven dargestellt. Man erkennt, daß es sich um Zykloiden handelt, die von einem Punkt auf einem Kreis des Radius  $R = m\mathcal{E}/e\mathcal{B}^2$  erzeugt werden. Dieser Kreis rollt mit einer Winkelgeschwindigkeit von  $\omega = \mathcal{B}e/m$  ab. Die drei Bahnen ergeben sich für verschiedene

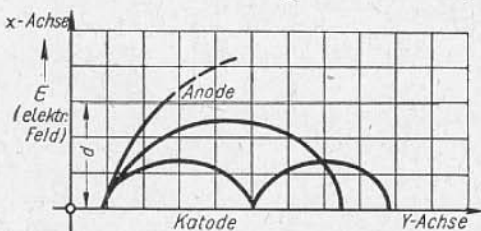


Bild 3.136 Bahnkurven im ebenen Magnetron

Werte von  $\mathcal{E}/\mathcal{B}^2$ . Es ist zu bemerken, daß die kinetische Energie der Elektronen in den Umkehrpunkten nahe der Katode Null ist, während sie im anderen Falle (am weitesten von der Katode entfernt) ein Maximum ist. Die Lage des Elektrons kann in einem sich mitbewegenden Koordinatensystem folgendermaßen angegeben werden:

$$x' = R \cos \omega t; \quad y' = R \sin \omega t. \quad (3.101)$$

Wenn dem stetigen Gleichfeld ein Wechselfeld überlagert wird, dann ändern sich die Elektronenbahnen. Das Wechselfeld soll eine Periode von  $2\pi/\omega$  haben. Wenn

das Wechselfeld in Phase mit den Komponenten der Elektronenbewegung ist, leistet das Feld Arbeit und vergrößert die Bewegungsenergie des Elektrons. Im anderen Falle leistet das Elektron Arbeit. Die sich ergebenden Zustände sind in Bild 3.137 dargestellt. Die vom Gleichfeld an das Elektron abgegebene Arbeit ist

$$\mathcal{E} e R = \mathcal{E} e \frac{m \mathcal{E}}{e \mathfrak{B}^2} = m \frac{\mathcal{E}^2}{\mathfrak{B}^2}. \quad (3.102)$$

Dies ist gleich dem doppelten Wert der kinetischen Energie der Bewegung. Im günstigsten Falle kann also das Elektron die Hälfte seiner vom Gleichfeld aufgenommenen Energie an das Wechselfeld abgeben. Die meisten dieser Elektronen landen aber nach einer Periode auf der Katode, weil sich ihre Geschwindigkeit ändert.

Auf Grund dieses einfachen Falles kann man die Arbeitsweise des Nullschlitzmagnetrons verstehen. Von der Katode werden Elektronen in allen Phasen emittiert, nahezu die Hälfte sind „absorbierende Elektronen“, diese nehmen Energie vom Wechselfeld auf, werden aber nach einer Periode entfernt und dämpfen deshalb nur wenig. Der Rest der Elektronen besteht aus „erregenden Elektronen“, diese geben ihre vom Gleichfeld aufgenommene Energie ab und halten die Schwingungen aufrecht.

Ein auf diese Weise arbeitendes Magnetron erzeugt HF-Leistung bei einer Wellenlänge von

$$\lambda = 2\pi c/\omega = 2\pi m c/e \mathfrak{B}. \quad (3.103)$$

Es gilt dann, wenn man die Werte aller Konstanten einsetzt,

$$\lambda \mathfrak{B} = 10600 \quad (\lambda \text{ in cm, } \mathfrak{B} \text{ in Gauß}). \quad (3.104)$$

Diese Gleichung gilt für Nullschlitz- und Mehrschlitzmagnetrons, die für kleine Schwingleistungen auch heute noch in Gebrauch sind.

**3.222 Das Multiresonatormagnetron.** Die Schwingleistung des Magnetrons konnte durch Einbau der Hohlraum-schwingkreise in den Anodenblock wesentlich erhöht werden. Hier ist aber eine Theorie nicht einfach anzugeben, da das Problem zylindersymmetrisch wird und sich Zusatzfelder über den Koppelschlitzten der Hohlraumkreise ergeben. Bis heute steht eine genaue Theorie noch aus, aber zur Lösung dieses Problems sind verschiedene erfolgreiche Versuche gemacht worden, die aber hier nicht im einzelnen besprochen werden können. Die Verbindung Magnetron-Travelling Wave Tube scheint gegenwärtig aussichtsreich zu sein. Man kann mittels dieser Theorie viele Eigenschaften voraussagen.

Hier nur das Einfachste: Die Elektronen bewegen sich auch im MRM (Multiresonatormagnetron) in zyklidenähnlichen Bahnen und sind entweder „absorbierend“ oder „erregend“. Wenn die Elektronengeschwindigkeit so groß ist, daß die Schlitzte in gleicher Phase passiert werden, dann werden die absorbierenden Elektronen entfernt und die erregenden Elektronen treffen die Anode mit einer kleinen Restenergie. In Bild 3.138 sind Elektronenbahnen im Magnetron angegeben, aus denen man ersehen kann, daß das physikalische Bild der Elektronenwolke einem

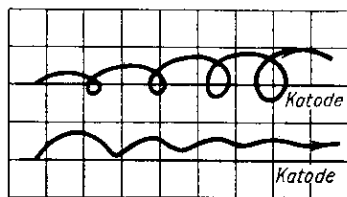


Bild 3.137 Feldbilder im Magnetron

Speichenrad entspricht, das mit der Geschwindigkeit der wandernden Anodenspannungswelle umläuft. Jede Speiche liegt in einer Bremsfeldzone, und die Leitbahnen aller Elektronen in ihrem Innern sind von der Katode zur Anode hin gerichtet. Beim Vorbeilaufen an den Schlitzten der Hohlraumkreise induzieren diese Raumladungsspeichen in den Resonatoren Ladungsverschiebungen, die das hochfrequente Feld unterhalten. Der Wirkungsgrad dieses Schwingensystems ist hoch, er setzt sich aus dem elektronischen Wirkungsgrad und dem Kreiswirkungsgrad zusammen; es gilt:

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{el}} \eta_{\text{KR}} \quad (3.105)$$

Der Gesamtwirkungsgrad liegt bei 30 bis 60 %. Der Problemkreis beim MRM kann geteilt werden, das Verhalten der Resonatoren und die Elektronenbahnen können getrennt untersucht werden. Die Elektronenbahnen lassen sich durch die von *Stater* entwickelte Methode der Feldübereinstimmung berechnen (self-consistent field). Er schreibt dazu: Die Problemstellung lautet: Gegeben ist eine Grenzbedingung in

der Form des Feldes an der Anodenoberfläche, wie muß dann das elektrische Feld im Anoden-Katoden-Raum sein, das die Bewegung der Elektronen hervorruft, die wiederum die zur Erzeugung dieses Grenzbedingungsfeldes notwendige Raumladung bewirken? Diese Methode stellt also eine sukzessive Approximation mit numerischen Integrationen dar. Man nimmt ein Feld an, berechnet die Elektronenbahnen und Raumladungen und leitet daraus ein Feld ab. Aus dem Feld berechnet man dann wieder die sich ergebenden Elektronenbahnen, vergleicht mit den Anfangswerten usf. Das Verfahren konvergiert und liefert dann als Lösung das „self-consistent field“.

Das andere Problem beim MRM ist das Verhalten der Resonatoren. Wenn man ein Magnetron mechanisch genau baut, so können sich trotzdem mehrere benachbarte Frequenzen erregen. Wenn man ein MRM mit 12 Hohlräumen annimmt, dann sind folgende Spannungsverteilungen möglich:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	$n = 6$
+	0	-	0	+	0	-	0	+	0	-	0	$n = 3$

Im ersten Falle beträgt die Phasendifferenz  $\pi$ , im anderen  $\pi/2$ . Die Schwingmöglichkeiten heißen „Modi“ (modus), der erste „ $\pi$ -Modus“. Um nur einen Schwingzustand zu erzielen, muß man die Hohlraumkreise im Magnetron geeignet untereinander verbinden. Durch diese Kreiskopplungen wird Einwelligkeit und höhere Leistung erreicht. Man kann die geeignete Kopplung durch Messung im kalten Zustand ausfindig machen, indem man den Anodenblock als dezimetrisches

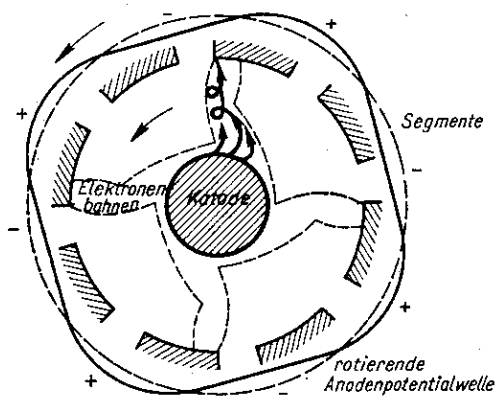


Bild 3.138  
Elektronenbahnen im Multiresonatormagnetron

Bandfilter betrachtet. Der vorgezogene Schwingungsmodus, in dem fast alle ausgeführten Magnetrons schwingen, ist der  $\pi$ -Modus.

Im englischen Sprachgebrauch nennt man die Kopplung „strapping“. Man kennt verschiedene Formen der Verbindungen, die im Bild 3.139 dargestellt sind. Durch unsymmetrische Verbindungen (incomplete strapping) kann man benachbarte Störschwingungen gut unterdrücken. Ein weiterer Vorteil ist, daß man durch die Verbindung der Kreise die Schwingfrequenz des Magnetrons im kalten Zustande leicht (durch Verbiegung der Verbindungsdrähte) verschieben kann.

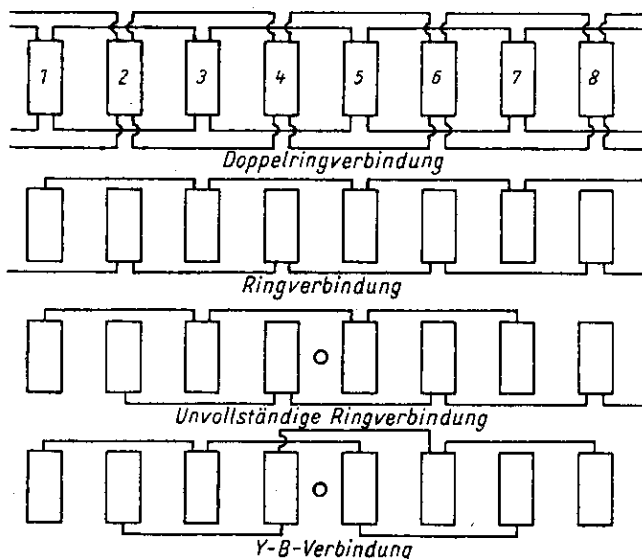


Bild 3.139 Segmentverbindungsarten zur Unterdrückung unerwünschter Schwingungsmodi

Für die Bemessung eines Magnetrons existieren keine genauen Regeln, man bemißt das MRM halbempirisch. Dabei sollen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Die Elektronengeschwindigkeit ist so groß, daß jeder Schlitz in gleicher Phase durchlaufen wird.
2. Der Schlitzabstand ist gleich dem Anoden-Katoden-Abstand.
3. Das magnetische Feld ist etwas stärker als das Sperrfeld. (Das Sperrfeld ist diejenige Feldstärke, bei der der Anodenstrom gerade zu Null geworden ist.)

Für das MRM gelten folgende Gleichungen:

$$U_a = \frac{300}{n\lambda} (r_a^2 - r_k^2)^2 \left( \mathfrak{B} - \frac{0,0106}{n\lambda} \right) \cdot 10^6, \quad (3.106)$$

$$U_a = 22204 \mathfrak{B} \frac{(r_a - r_k)^2 (r_a + r_k)^2}{r_k^2} \cdot 10^6, \quad (3.107)$$

$$\frac{r_k}{r_a} = \frac{\left(1 - \frac{4}{N}\right)}{\left(1 + \frac{4}{N}\right)}. \quad (3.108)$$

Dabei sind  $U_a$  die Anodengleichspannung,  $\mathcal{B}$  die magnetische Feldstärke,  $\lambda$  die Magnetronwellenlänge,  $r_a$  und  $r_k$  sind die Anoden- und Katodenradien,  $n$  ist die Moduszahl oder Zahl der Spannungswiederholungen rund um die Anode und  $N$  ist die Zahl der Anodenhohlräume. In diesen Gleichungen ist allerdings nichts über die Katodenmission, den Anodenstrom und die Verlustleistung gesagt.

Man kann im  $I_a$ - $U_a$ -Diagramm des Magnetrons Leistungskurven, Wirkungsgradkurven und Feldstärkekurven einzeichnen. Ein Beispiel zeigt das Bild 3.140. Hierin sind die eingezeichneten  $U_a$ - und  $I_a$ -Werte Impulswerte. Aus diesen Magnetronkennlinien kann man alle interessierenden Werte ablesen, Unregelmäßigkeiten und Sprünge in den Kurven deuten auf Mehrfachschwingungen (Schwingungen in mehreren Modi) hin. Auch der Magnetrongleichstromwiderstand kann abgelesen werden.

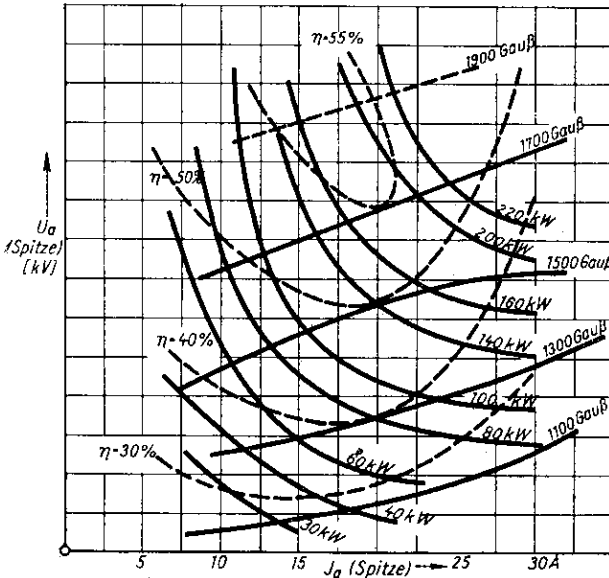


Bild 3.140  $I_a$ - $U_a$ -Diagramm eines Multiresonator-Magnetrons

Obgleich das Magnetron im allgemeinen für eine feste Frequenz bemessen ist, sind Frequenzschwankungen durch Laständerung oder Erwärmung der Anode unvermeidlich. Die erzeugte HF des MRM verteilt sich auf ein Frequenzband, sie bildet ein HF-Spektrum. Damit höchste Wirksamkeit erzielt wird, muß die gesamte Magnetronenergie auf ein schmales Band konzentriert werden (Kontrolle mit RFEI-Gerät, siehe 3.9). Den Einfluß der Abschlußimpedanz auf die Magnetronfrequenz zeigt das sogenannte Rieke-Diagramm, in dem in Polarkoordinaten der Reflexionskoeffizient als Funktion des Abstandes des Spannungsknotens vom Bezugspunkt angegeben wird. Im Bild 3.141 ist  $r = |K|$  und  $\varphi = 2\theta$ . Im gezeigten Diagramm würde der beste Arbeitspunkt nahe der Mitte bei etwa 60 W liegen. In diesem Bereich bewirkt eine Änderung des Reflexionsfaktors von 1 bis 1,5 eine Frequenzverwerfung von etwa 5 MHz nach beiden Seiten. Man kann die Lastabhängigkeit der Frequenz durch Einschaltung eines Resonanzhohlraumes zwischen Magnetron und Verbraucher weitgehend verringern.

Für manche Anwendungen ist es wichtig, daß sich das Magnetron über einen gewissen Frequenzbereich ziehen läßt. Beim Schlitzmagnetron mit äußerem Resonator ist dies leicht möglich, indem man z. B. das außen angeschlossene Lechersystem abstimmt. Das Hohlraum-magnetron hat dagegen eingebaute Resonatoren (eben die Hohlräume im Anodenblock), die feste Abmessungen besitzen. Es ist hier viel schwieriger, eine Abstimmung durchzuführen. Für die Durchführung der Abstimmmaßnahmen gibt es folgende Möglichkeiten: 1. Die mechanischen Abmessungen der

Resonatoren werden verändert, z. B. durch gleichzeitig in alle Hohlräume eintauchende Abstimmstempel. 2. Die Kapazität der Strapping-Kreise wird verändert, indem z. B. ein Ring dem anderen genähert wird. 3. Ein mit dem Resonatorsystem gekoppelter Hilfs-Hohlraumkreis wird abgestimmt. Hierbei ist nur ein Abstimmkolben notwendig; die Leistung sinkt aber rasch ab, wenn abgestimmt wird.

Bei allen Abstimmungen sind die Grenzen durch Hochspannungsfestigkeit, mechanische Genauigkeitsanforderungen, Verringerung des Wirkungsgrades, parasitäre Schwingungen oder Veränderungen des Schwingungsmodus gesetzt. Ein Abstimmbereich von 1,5 : 1 ist jedoch meist erreicht worden.

Eine kapazitive Abstimmung ist mit einem zwischen die Strapping-Bügel einschleibbaren Ring möglich („cookie-cutter-tuning“).

Führt man in alle Hohlraumresonatoren induktive Abstimmstempel ein, so wird diese Abstimmung als „Dornkronenabstimmung“ bezeichnet. („Crown-of-thorns tuning“.)

Als letzte Form des abstimmbaren Magnetrons sei das „Donutron“ oder „Interdigital-Magnetron“ beschrieben. Hierbei dient als Resonatorsystem ein System ineinandergreifender Finger, die wechselseitig an den beiden Wänden eines

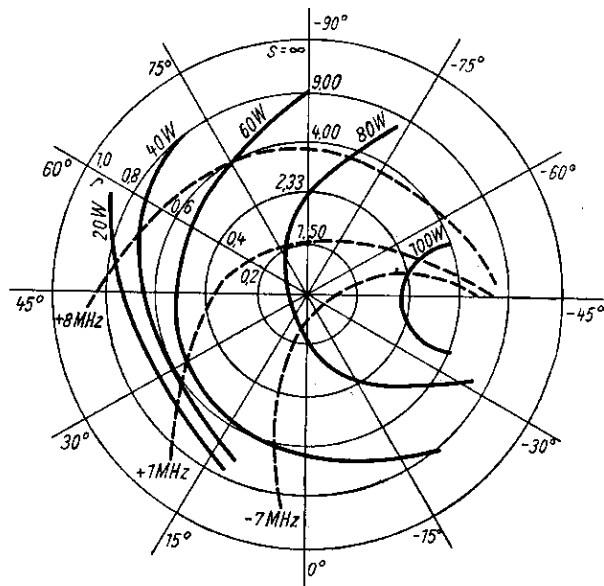


Bild 3.141 Rieke-Diagramm (Beispiel)

Hohlraumresonators befestigt sind und das Aussehen eines Käfigankers haben. Die beiden Stab- oder Fingersysteme werden nun durch Deformation der äußeren Umhüllung axial gegeneinander verschoben. Dadurch ändert sich die Frequenz des Magnetrons. Ein Abstimmbereich von 9 bis 14 cm ist erreicht worden. Crawford und Hare berichten über einen Wirkungsgrad von 40 bis 50 % und einen Abstimmbereich von 1,5 : 1.

3.223 Beispiele für praktisch ausgeführte Magnetrons. Zum Abschluß des Abschnitts über Magnetronsender sollen hier noch einige ausgeführte MRM dargestellt werden. Dabei sind aus Gründen der leichteren Zugänglichkeit englisch-amerikanische Typen gewählt worden.

Ein weitverbreitetes 10 cm-Magnetron ist die englische CV 76, das Rotterdam-Magnetron. Es ist auch in Deutschland nachgebaut worden. Die elektrischen Daten sind:

Arbeitswellenlänge . . . . .	10 cm
Feldstärke . . . . .	1300 Gauss
Anodenspitzenstrom . . . . .	40 A
Spitzenleistung . . . . .	400 kW

Wirkungsgrad . . . . .	50...60%
Impulsbreite . . . . .	0,5 $\mu$ s
Impulsfolgefrequenz . . . .	500 Hz
Lebensdauer . . . . .	etwa 1000 Std.

Die deutsche Paralleltype hieß LMS 10 und hatte etwas geringere Leistung:

Arbeitswellenlänge . . . . .	9 cm
Feldstärke . . . . .	1600 Gauß
Anodenspannung . . . . .	18 kV im Impuls
Anodenstrom . . . . .	12 A im Impuls
Spitzenleistung . . . . .	192 kW
Wirkungsgrad . . . . .	15...25%
Impulsbreite . . . . .	1 $\mu$ s
Impulsfolgefrequenz . . . .	1500 Hz

Die Ansicht eines CV 76-Magnetrons zeigt das Bild 3.142. Man sieht hieraus die Konstruktion. Der Anodenblock mit den Hohlräumen wird durch zwei Endplatten

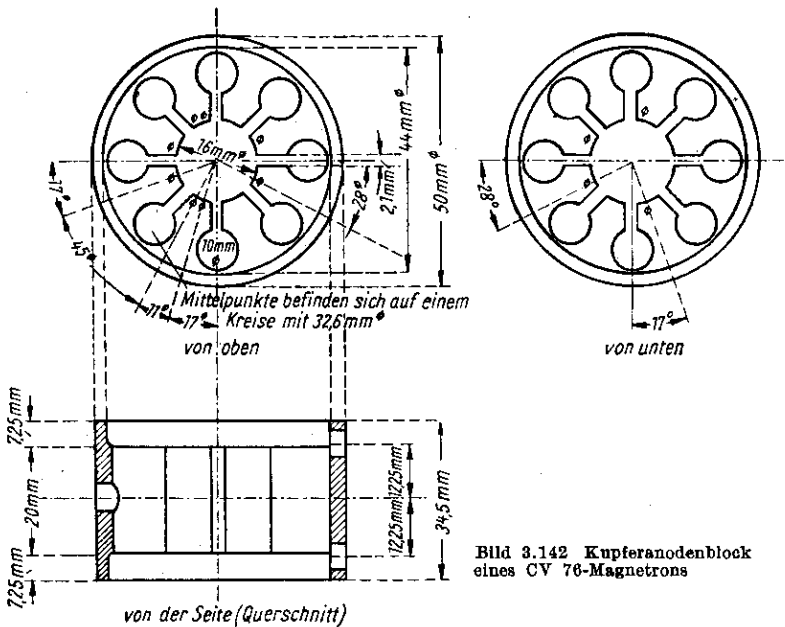


Bild 3.142 Kupferanodenblock eines CV 76-Magnetrons

abgedeckt, die mittels eines Goldringes vakuumdicht mit dem Block verbunden werden. Eine Werkstattzeichnung des Blockes zeigt die extreme Genauigkeit, die bei der Herstellung des Magnetrons eingehalten werden muß. Man dreht den Körper und die mittlere Bohrung, die Hohlräume werden ausgebohrt und die Schlitzte werden gefräst. Die Moduswahl geschieht durch Brücken aus Kupferdraht in der Y-B-Form. Als weitere Ausführungen, die aus dem Körper vakuumdicht erfolgen müssen, sind die Heizanschlüsse und die HF-Auskopplung zu erwähnen. Diese werden durch Schneidenanglasungen Kupfer-Glas dargestellt. Das Bild 3.143 zeigt die Ausführung. Das Katodenröhrchen hat 6 mm Außendurchmesser, 0,5 mm Wandstärke und besteht aus Nickel. Die Katode ist mit Barium-Strontium-Karbonat als

Emissionssubstanz versehen und wird durch eine Wolframwendel geheizt. Die Katode ist einseitig mit der Heizung verbunden und über Wolframeinschmelzdrähte herausgeführt. Die Verbindungen können hartgelötet werden, was aber in Schutz-

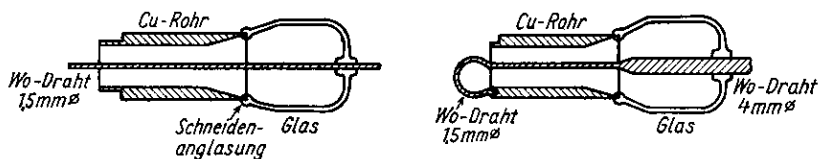


Bild 3.143 Herausführung der Elektroden durch Schneidenanglasung

gasatmosphäre erfolgen muß. Man kann ein Getter, wenn es überhaupt erforderlich ist, als „Blinddarm“ an einen Katodenanschluß seitlich anschmelzen. Bei etwa 500° erfolgt das Pumpen, anschließend die Katodenaktivierung. Die Wärmeabstrahlungsflügel werden mit dem Anodenblock durch Weichlötung verbunden. Man kühlt im praktischen Einsatz das Magnetron durch ein Gebläse, das 4 bis 6 m<sup>3</sup>/min Förderleistung hat. Durch die Rückheizung der Katode kann man nach dem Einschalten die Heizung des Magnetrons abschalten, die Katode wird dann nur durch die rückkehrenden Elektronen aufgeheizt. Um diesen Effekt bei kleinen Hochleistungsmagnetrons zu vermeiden, rüstet man die Katode mit Endplatten aus (auch zur Wärmeableitung). Die Auskopplung der HF-Energie erfolgt über eine Koppelschleife im Hohlraumkreis, die zu einem konzentrischen Anschluß führt. Man koppelt dann den Magnetronkörper mit dem Außenmantel, den Ausgangsstift mit dem Innenleiter der Koaxialleitung. Durch Drosselflansch und  $\lambda/4$ -Anpaßglieder werden geringe Reflexionen erreicht.

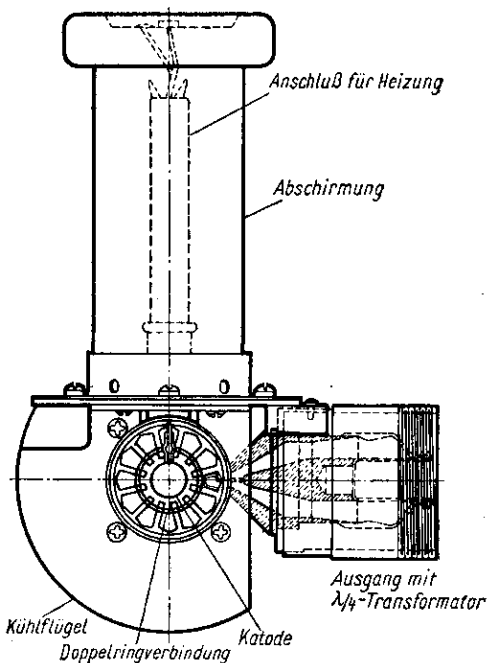


Bild 3.144 Raytheon-Magnetron HK 7

Als weiteres Beispiel soll das Raytheon-Magnetron HK 7 dienen. Den Aufbau zeigt Bild 3.144. Seine Daten sind:

Wellenlänge . . . . .	10 cm
Feldstärke . . . . .	2200 Gauß
Anodenspitzenstrom . . . . .	40 A
Anodenspitzenspannung . . . . .	30 kV
Spitzenleistung . . . . .	750 kW
Wirkungsgrad . . . . .	60...65%



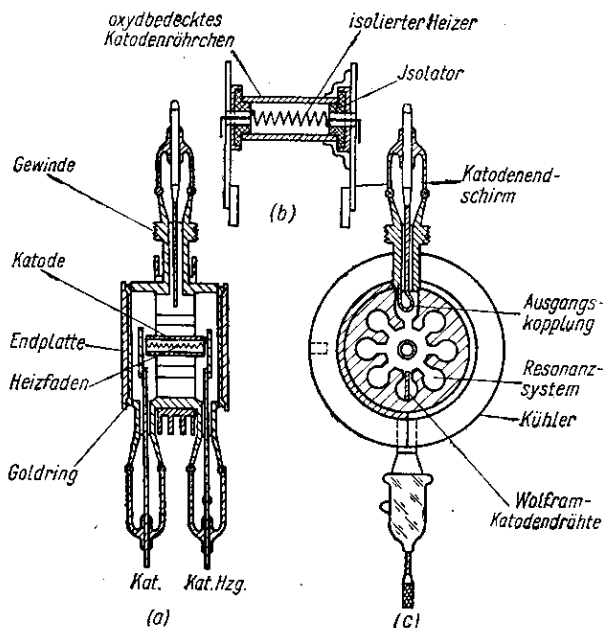


Bild 3.145 Querschnitt durch ein englisches Magnetron

Konstruktionsbesonderheiten dieser Röhre sind: der koaxiale Ausgang, der für hohe Leistungen dimensioniert ist und zur Anpassung des Magnetrons an eine 50- $\Omega$ -Speiseleitung ein Transformationsglied enthält. Die Anode ist aus gestanzten Kupferblechen von 0,15 mm Dicke zusammengesetzt, die dann verlötet werden. Diese Herstellungsart ist für Massenproduktion besser geeignet als das Drehen und Fräsen mit hoher Genauigkeit. Die Heizzuführungen sind sehr lang und mit Koronaringen versehen, damit Überschlüge vermieden werden (Bilder 3.145 bis 3.147).

Aus diesen beiden Beispielen ist das Grundlegende ersicht-

lich. In einem Bericht in Funk und Ton hat Fritz neuere deutsche Magnetrons beschrieben.

Als Abschluß soll hier noch erwähnt werden, was zur Zeit mit Magnetrons im Höchstfalle erreicht werden kann. Bei 10 cm Wellenlänge sind maximal 3,5 Megawatt HF-Energie im Impuls erzielt worden. Bei 3 cm liegt die obere Grenze bei etwa 260 kW und bei 1,25 cm bei etwa 50 kW. Die untere Grenze für HF-Wellen, die durch Magnetrons erzeugt werden, liegt bei 5 mm. Hier sind die mechanischen Schwierigkeiten schon zu groß und die Abmessungen zu gering. Für die Erzeugung aller kürzester Wellen stehen heute andere Möglichkeiten offen, so z. B. die Ausnutzung des relativistischen Dopplereffektes oder der Cerenkov-Strahlung. Als letzter Markstein auf dem Wege zu immer kürzeren ungedämpften Wellen soll die im Columbia Radiation Laboratory erreichte Wellenlänge von 1,1 mm gelten. Man hat an der Columbia University bei 3 mm

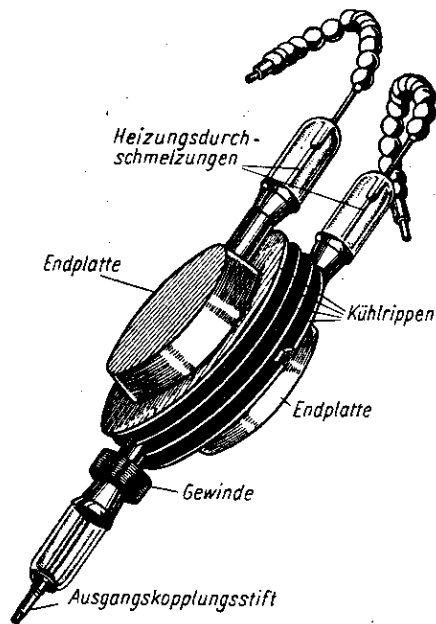


Bild 3.146 Außenansicht eines englischen Magnetrons

Wellenlänge mit einem MRM noch 2kW im Impuls erhalten. Durch Ausbiegung von Oberwellen in der Magnetronschwingung erhielt man die 1,1 mm-Welle mit einer Leistung von einigen Milliwatt. Es ist interessant zu bemerken, daß an dieser Stelle im elektromagnetischen Spektrum eine Schwingungserzeugung Schwierigkeiten bereitet. Die makroskopischen Oszillatoren versagen bei etwa 0,5 mm Wellenlänge, und auch die mikroskopischen Oszillatoren haben hier nur geringe Schwingleistungen. Es ist jedoch zu erwarten, daß auch hier bald neue Forschungsergebnisse vorliegen werden.

3.224 *Einige Bemerkungen über Katoden.* Wenn die erstaunlichen Fortschritte bei der Erzeugung hoher Dezimeterschwingleistungen betrachtet werden, so muß nicht zuletzt auch der Katode einige Beachtung geschenkt werden. Es war nämlich erst durch die Schaffung leistungsfähiger Katoden möglich, Impulsleistungen von einigen Megawatt zu erzeugen. An dieser Stelle sollen einige Bemerkungen zur Katodenfrage gemacht werden.

Im Verlaufe der geschichtlichen Entwicklung führte der Weg von der direkt geheizten Wolframkatode über die thorierte Wolframkatode zur Oxydkatode. Damit war eine stetige Leistungssteigerung verbunden. Mit der Oxydkatode ließen sich alle Forderungen erfüllen, die durch die modernen Röhren an sie gestellt wurden. Von einer modernen Katode werden gute Wärmeausnutzung, konstante und lang dauernde Emission und Widerstandsfähigkeit gegen Vergiftungen verlangt. Für Mikrowellenanwendungen kommt hierzu noch die Forderung hoher spezifischer Emission. Beim Vergleich der vorhandenen Katoden ergibt sich für jede ein bestimmtes Anwendungsgebiet. Die verbreitetste Anwendung hat die Ba-Sr-Oxydkatode gefunden. Bei ihrer Anwendung in Magnetrons zeigte sich aber, daß ihre Lebensdauer ungenügend und die Oxydkatode den Impulsbelastungen nicht gewachsen war. Als Nachteile der Oxydkatode sind zu nennen:

1. Leichte Vergiftbarkeit durch geringste Sauerstoffmengen.
2. Barium oder Strontium verdampft und ruft Gitteremission oder Rückzündung hervor.
3. Bei Impulstastung treten hohe Anodenspannungen auf, was zu Spratz- und Sprüherscheinungen führt.
4. Stets vorhandene Ionen zerstören die Emissionsschicht bei längerer Einwirkung.

Hier mußten also neue Katoden entwickelt werden, die diese Nachteile nicht besitzen. Es entstanden so die neuen Vorratskatoden (siehe Tab. 8a und b). In allen diesen Fällen wird ein Reservoir an Emissionssubstanz geschaffen. So ergibt sich z. B.

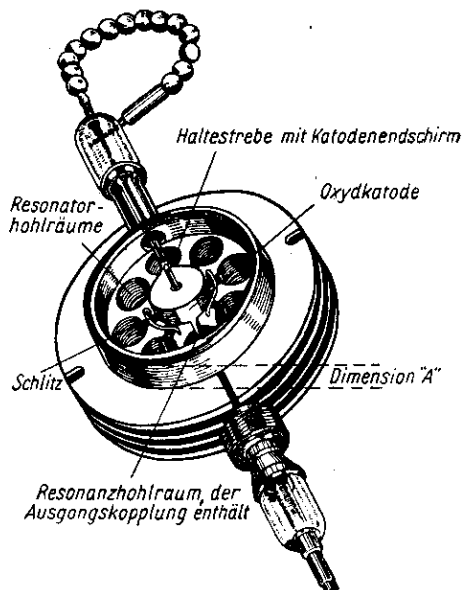


Bild 3.147 Innensicht eines englischen Magnetrons

Tabelle 8a

Wolfram-Reinmetallkatode	Thorierte Wolframkatode	Oxydkatode	Boridkatode	Philips-L-Katode
<i>Betriebstemperatur</i> [C] 2100...2300	1300...1600	700...900	1500...1600	900...1300
<i>Austrittsarbeit</i> 4,54 eV	2,63 eV	1,1...1,5 eV	—	1,6...2 eV
<i>Max. Stromdichte</i> 1 A/cm <sup>2</sup>	2 A/cm <sup>2</sup>	0,5 A/cm <sup>2</sup>	3...7 A/cm <sup>2</sup>	3...20 A/cm <sup>2</sup>
<i>Wirtschaftlichkeit</i> 6 mA/W	70 mA/W	250 mA/W	—	1000... 10000 mA/W
<i>Spannungsfestigkeit</i> hoch	hoch	niedrig	mittel	hoch
<i>Ionenfestigkeit</i> gut	schlecht	kurzzeitig gut	—	gut

durch Einschaltung eines porösen Ni-Mantels um das Katodenröhrchen die „Matrixkatode“, durch Anwendung eines durch Draht abgedeckten Mo-Troges die Metallkapillarkatode usf. Die vielleicht erfolgversprechendste neue Katode ist die L-Katode. Vergleicht man diese mit der Oxydkatode, so ist die wesentlichste Neuerung die Abdeckung der Oxyd-Emissionsschicht nach außen durch eine Schicht porösen Wolframs. Beim Formieren entweicht zunächst Kohlendioxyd, bei weiterer Erhitzung tritt Aktivierung auf. Es bildet sich innen und außen an dem porösen Wolframkörper eine Bedeckung durch Barium. Während die Oxydkatode bei verringerter Lebensdauer nur impulsweise 120 A/cm<sup>2</sup> abzugeben vermag, kann die L-Katode dauernd und auch impulsmäßig etwa 300 A/cm<sup>2</sup> abgeben. Diese hohe Leistung kann aber meist nicht ausgenutzt werden, denn das entspräche einer impulsmäßigen Anodenbelastung von mehreren Megawatt/cm<sup>2</sup>, und man muß für geeignete Wärmeableitvorrichtungen sorgen. In bezug auf die Wirtschaftlichkeit muß man die L-Katode zwischen Oxydkatode und thorierte Wolframkatode einordnen. Die L-Katode wird bei Dauerbelastungen über 1 A/cm<sup>2</sup> am wirtschaftlichsten sein. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften ist die L-Katode viel robuster und maßhaltiger. Beim Einsatz in einem Magnetron ließ sich mit einer L-Katode die zehnfache Lebensdauer erreichen. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, durch Verzicht auf höchste Emissionsleistung höhere Lebensdauer zu erzielen, indem man die Katodentemperatur erniedrigt. Bei 1000 bis 1100° C erhält man etwa 3 A/cm<sup>2</sup> Sättigungsstrom und eine Lebensdauer von 1000 bis 5000 Std. Erhöht man die Katodentemperatur auf 1250° C, dann steigt der Sättigungsstrom auf 100 A/cm<sup>2</sup>, aber die Lebensdauer geht auf 100 bis 1000 Std. zurück. Im Extremfalle kann man bei 1350° C eine Emission von 250 A/cm<sup>2</sup> bei 300 bis 100 Std. Lebensdauer erreichen. Die Anwendung der neuen Methode lohnt sich vor allem bei komplizierten Spezialröhren, für die ein Katodenfehler Verlust des gesamten Aufbaues bedeuten würde. Es ist auch heute noch nicht abzusehen, welche Verbesserungen an den Katoden noch möglich sein werden. Eine Tatsache ist hier aber festzustellen, daß nämlich die technische Entwicklung der neuen Katoden die Kenntnis des physikalischen Verhaltens der Halbleiter und Emissionsstoffe zur Voraussetzung hatte. Es ist in letzter Zeit weniger Wert auf

Tabelle 8b

Katodenart	Prinzipieller Aufbau
Wolfram-Reinmetallkatode	In Drahtform oder Wendelform angeordneter Reinformetall-draht. (Muß heiß gebogen werden, da sehr spröde.)
Thorierte Wolframkatode	Beimischung von höchstens 2% ThO <sub>2</sub> zum Wolfram, anschließend Reduktion bei hoher Temperatur. Th diffundiert dann an die Oberfläche und bildet eine monoatomare Schicht.
Oxydkatode	Als Trägermetall dient reines oder gering legiertes Nickel. Darauf wird Ba- und Sr-Karbonat gespritzt oder kataphoretisch aufgebracht, anschließend beim Formieren in Oxyd verwandelt. Katode hat einen Halbleiter-Emissionsmechanismus.
Matrixkatode (Bell-Ges.) (Vorratskatode)	Aufbau im Prinzip wie Oxydkatode, zusätzlich dazu wird um den Nickelzylinder ein dicker poröser Mantel aus Ni-Pulver festgesintert und mit Ba-Sr-Karbonat-Lösung getränkt. Hohe Spratzsicherheit.
Metallkapillenkatode (Vorratskatode)	Flacher Trog aus Mo, Ta oder Ni, mit Ba-Sr-Karbonat gefüllt und von unten her durch eine Wolframwendel erwärmt. Die Trogöffnung wird durch eine Lage Mo-Draht verschlossen (dicht gewickelt). Ba diffundiert aus der Paste an die Oberfläche der Mo-Drahtlage und erniedrigt deren Austrittsarbeit.
Philips-L-Katode	Ein Molybdängehäuse umschließt einen Vorratsraum für Ba-Sr-Mischung, der durch eine poröse Wolframsinterplatte abgeschlossen wird. Erwärmung erfolgt durch eine Wolframwendel. Ba wird durch W in monoatomarer Schicht gebunden.
Lanthanboridkatode (Vorratskatode)	Vorteil dieser Methode ist, daß bei vollkommener monoatomarer Bedeckung der Oberfläche erst dann neue Metallatome nachdiffundieren können, wenn durch oberflächliche Verdampfung ein Platz frei geworden ist. Als Träger der Katode dient graphitisiertes oder karburiertes Tantal. LaB <sub>6</sub> haftet weder auf Metall noch auf Keramikunterlagen. Freitragende Katodenkörper sind durch Sinterung bei 1400° herstellbar.
Keramikkatode	In einem aus ThO <sub>2</sub> gesinterten Rohr ist eine W-Heizwendel eingebettet und an zwei Mo-Endplatten angeschlossen. Man kann auch W- oder Mo-Pulver dem ThO <sub>2</sub> beimischen und so der Katode eine bestimmte Leitfähigkeit geben, wodurch sie dem Nernststift ähnelt. Man kann auch einen W-Draht kataphoretisch mit ThO <sub>2</sub> -Pulver belegen.

exakte Grundlagenforschung als auf die Bereitstellung einsatzfähiger Geräte gelegt worden. Diese Tatsache führte zu einer langsameren Weiterentwicklung, denn man mußte erst das Versäumte nachholen.

Wenn man die Konstruktion und den Entwurf eines Magnetrons betrachtet, so erkennt man, daß sich hier viele Gebiete berühren. Die Katode muß bestimmten geforderten mechanischen und elektrischen Eigenschaften genügen, der Anodenblock muß den hochfrequenten Gesichtspunkten entsprechen, die Glas-Metall-Verbindungen müssen nach vakuumtechnischen Gesichtspunkten gestaltet sein usw. Alle diese Gebiete greifen in die Gestaltung eines technischen Gerätes ein, und ein Fortschritt auf dem einen Gebiete ruft Fortschritte auf anderen Gebieten hervor.