

Magnetron

Das **Magnetron** ist eine Vakuumröhre zur Erzeugung hochfrequenter Schwingungen und wird oft genutzt um die in Radargeräten geforderte hohe Impulsleistung zu produzieren. Die Funktion beruht auf einer Geschwindigkeitsmodulation von Elektronen in einem Laufraum. Das Magnetron wird deshalb zu den Laufzeitröhren zugeordnet. Das Magnetron ist ein selbsterregender Oszillator, der anders als Linearstrahlröhren wie etwa die Wanderfeldröhre oder das Klystron arbeitet. Der relativ einfache Aufbau hat den Nachteil, dass das Magnetron meist nur auf einer festen Frequenz arbeiten kann. Diese kann zwischen 600 MHz bis weit über 30 GHz liegen. Ein elektrisches und ein starkes magnetisches Feld werden beim Magnetron senkrecht aufeinander (kreuzförmig) angeordnet. Deshalb wird das Magnetron in älteren Publikationen auch „**Kreuzfeldgenerator**“ oder „**Kreuzfeldoszillator**“ genannt.



Bild 1: Magnetron MI 29F des russischen Radargerätes P-37

Aufbau des Magnetrons

Das Magnetron ist eigentlich eine Diode, da es keinerlei Gitter zur Steuerung benutzt. Die Anode besteht aus einem massiven Kupferblock. In der Mittelbohrung des Anodenblockes befindet sich die von den Zuleitungen für die Heizung im Zentrum gehaltene zylindrische Kathode, eine indirekt geheizte Oxidkathode hoher Emissionsfähigkeit. Da die Anode meist an Massepotenzial liegt, muss die Kathode eine sehr hohe negative Spannung führen. Das bedeutet für die Heizung, dass sie ebenfalls auf diesem negativen Potenzial liegen muss. Es ist dann eine direkte Heizung, das heißt, die Kathode ist an eine Heizungszuleitung direkt angeschlossen. Die Zuleitungen müssen groß und stabil genug sein, um Kathode und Heizung in Position zu halten. Parallel zur Kathode befindet sich ein kräftiges magnetisches Feld eines Permanentmagneten.

Inhaltsverzeichnis:

1. Aufbau des Magnetrons
2. Funktionsweise eines Magnetrons
 - Erzeugung und Beschleunigung eines Elektronenstromes
 - Geschwindigkeitssteuerung der Elektronen durch ein HF-Feld
 - Dichtemodulation der Elektronenströmung
 - Energieabgabe an das bremsende elektrische HF-Feld
3. Einschwingvorgang
4. Arbeitsmoden des Magnetrons
5. Auskopplung der Energie am Magnetron
6. Frequenzänderung am Magnetron

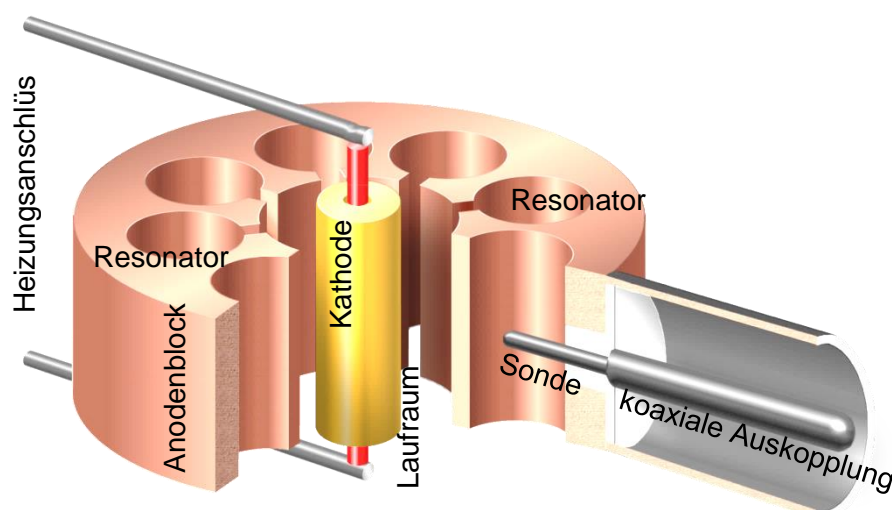


Bild 2: Schnittmodell eines Magnetrons

In den Anodenblock sind 8 bis 20 Hohlräume eingearbeitet, welche die frequenzbestimmenden Hohlraumresonatoren darstellen. Wenn ein Resonator schwingt, dann regt er auch den benachbarten Resonator zum Schwingen an, aber mit einer Phasenverzögerung von 180° . Wegen dieser Verzögerung von Resonator zu Resonator wirkt der Anodenblock als eine in sich geschlossene Verzögerungsleitung. Aufgrund dieser Verzögerungsleitung wird in manchen Publikationen diese Bauform auch "Multicavity Travelling Wave Magnetron" genannt.

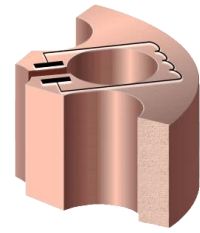


Bild 3: Ein Resonator im Anodenblock hat die Funktion eines Parallelschwingkreises: Die am Schlitz gegenüberliegenden Anodenwände sind der Kondensator, der Umweg um das Loch ist die Induktivität (mit nur einer Windung).

Diese Resonatoren haben über einen schmalen Schlitz Verbindung zum Raum zwischen Anode und Kathode. Die wirksame Fläche der Anode wird damit in verschiedene Abschnitte unterteilt, deren Anzahl der der Resonatoren entspricht. Der Raum zwischen Anode und Kathode wird Laufraum genannt. In dem Laufraum wirken das elektrostatische und das magnetische Feld auf die Elektronenbahn.

Mögliche Formen von Resonatoren zeigt Bild 4, welches vier verschiedene Anodenformen in jeweils einem Quadranten darstellt.

- a. Schlitz- Typ
- b. Kreissektor- Typ (oder Steg- Typ)
- c. *Rising Sun*- Typ
- d. Loch- Typ

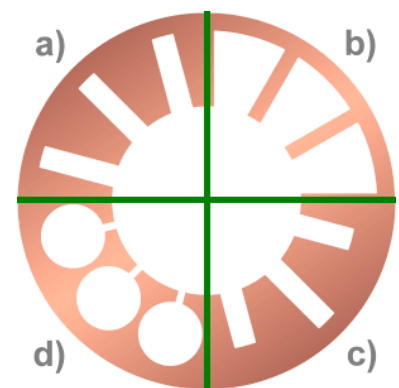


Bild 4: Anodenformen von Magnetrons

Die klassische Bauform ist der Lochtyp, der aus einem massiven Kupferblock herausgebohrt und gefräst wird. Das erste Magnetron, welches in einer Massenproduktion hergestellt wurde, war ein solcher Lochtyp. Die beiden Schlitztypen werden ebenfalls gefräst. Das Fräsen von dem relativ weichen Kupfer ist ein sehr aufwändiges Herstellungsverfahren, da die Fräse immer nur sehr wenig Material abtragen kann ohne dabei das übrige Material zu verbiegen. Um diese Fräsarbeiten zu minimieren entstand der Kreissektortyp. Dieser wird hergestellt, indem die Stege aus Kupfer (deshalb auch *Steg-Typ*) in vorbereitete kurze Schlitzte eingepresst werden. Die Resonanzfrequenz dieser Hohlräume kann schon während der Herstellung geprüft und durch das Einfräsen von Kerben in die Stegkanten korrigiert werden. Heutige Magnetrone sind meist solche Steg-Typen, da bei deren Herstellung die geringsten Kosten anfallen.

Funktionsweise eines Magnetrons

Wie bei allen Laufzeitröhren kann man auch bei einem Magnetron die elektronischen Vorgänge bei der Erzeugung höchstfrequenter Schwingungen in vier Phasen unterteilen:

1. Vorgang: Erzeugung und Beschleunigung eines Elektronenstromes
2. Vorgang: Geschwindigkeitssteuerung der Elektronen durch ein Wechselfeld
3. Vorgang: Dichtemodulation der Elektronenströmung
4. Vorgang: Energieabgabe an das bremsende elektrische Wechselfeld

1. Vorgang: Erzeugung und Beschleunigung eines Elektronenstromes

Legt man bei geheizter Kathode die Anodenspannung an das Magnetron, so bewegen sich die Elektronen auf radialen Bahnen zur Anode. Durch das starke statische elektrische Feld werden die Elektronen beschleunigt und nehmen so Energie auf. Bild 5 zeigt die Bahn eines einzelnen Elektrons ohne Einfluss eines magnetischen Feldes in dunklem Blau, es fliegt auf geradem Kurs von der Kathode zur Anode.

Durchsetzt nun ein Magnetfeld axial den Raum zwischen Anode und Kathode (E- und H-Feld stehen also senkrecht aufeinander), werden die Elektronen auf Epizykloidenbahnen abgelenkt. Je stärker die magnetische Flussdichte, um so stärker auch die Ablenkung. Die Flussdichte, bei der die Elektronenbahn gerade die Anode tangiert, (in rot dargestellt) nennt man kritische Flussdichte. Als praktischen Betriebsfall wählt man eine sehr viel höhere Flussdichte als die kritische (in orange dargestellt). Die Elektronen können die Anode nicht erreichen. Es würde auch kein Anodenstrom fließen.

Wenn kein Anodenstrom fließen kann, dann haben die Elektronen jedoch nicht genug Energie um einen Schwingvorgang in den Resonatoren trotz Leistungsentnahme aufrecht zu erhalten. Durch eine wesentliche Erhöhung der Anodenspannung erhalten die Elektronen eine größere Anfangsbeschleunigung in Richtung Anode. Je stärker die Anodenspannung, um so schneller (also energiereicher) sind die Elektronen. Das Magnetfeld kann dann nicht lange genug auf die Elektronen einwirken, um sie über den kritischen Bahnverlauf hinaus abzulenken. Somit wird dann doch ein Anodenstrom messbar. Die Elektronenbahn würde dann theoretisch etwa so verlaufen, wie im Beispiel mit der Farbe Lila dargestellt. Dieser Anodenstrom liegt trotz der Impulsleistungen im Megawattbereich nur im Bereich von einigen zehn Milliampere. Das liegt daran, dass der Anodenstrom wegen der Trägheit der Messinstrumente nur als Durchschnittswert gemessen wird. Der Spitzenstrom liegt weitaus höher. Praktisch könnte ein solcher Bahnverlauf jedoch nur auftreten, wenn die Anode keine Resonatoren hat (oder diese kurzgeschlossen sind, wie im Bild 5 gezeichnet).

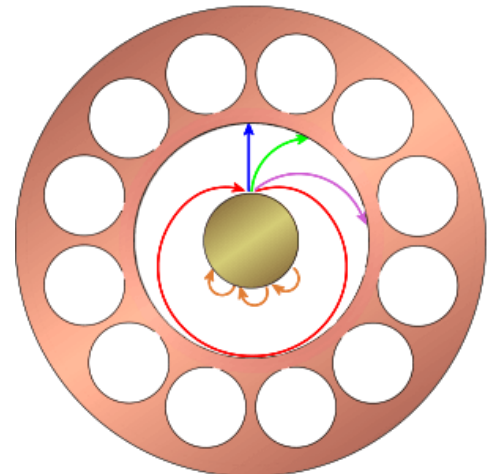


Bild 5: Bahnverlauf eines Elektrons unter Wirkung des elektrostatischen und des magnetischen Feldes für verschiedene magnetische Flussdichten.

2. Vorgang: Geschwindigkeitssteuerung der Elektronen

Durch die an den Schlitzen der Hohlraumresonatoren vorbeifliegenden Elektronen werden diese zum Schwingen angeregt. Schon der erste schwingende Resonator regt auch den benachbarten Resonator an, der aber um 180° verzögert schwingt. Dieser hingegen regt auch den nächsten Resonator an und so weiter. Die gesamte Reihe von Resonatoren bildet eine Verzögerungsleitung. Es entsteht eine umlaufende elektromagnetische Welle auf dieser Verzögerungsleitung. Da das Magnetfeld dieser Welle nur im Inneren der Resonatoren wirkt, wird lediglich das in den Resonatorschlitzen konzentrierte elektrische Feld im Laufraum wirksam und beeinflusst die Elektronenbewegung.

Im Bild 6 wird nur das hochfrequente elektrische Feld der umlaufenden Welle und die dazugehörige Ladungsverteilung auf den Anodensegmenten zu einem bestimmten Zeitpunkt betrachtet. Die grünen Pfeile symbolisieren die durch die HF-Schwingung bedingten Elektronenbewegungen innerhalb des Anodenblocks. Das an den

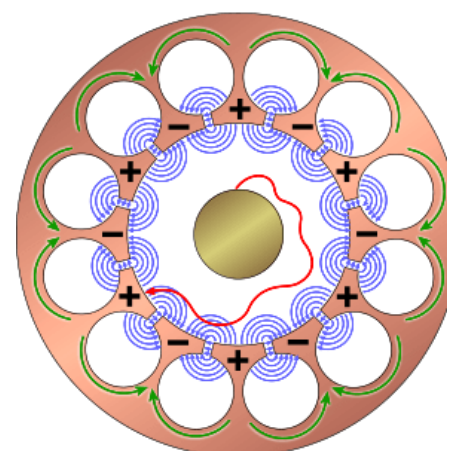


Bild 6: Verlauf des elektrischen Feldes der umlaufenden Welle

Resonatorschlitzten auftretende HF- Feld und die Ladungen an den Anodensegmenten wirken zusätzlich zum ständig vorhandenen statischen elektrostatischen Feld.

Die umlaufende Welle verändert demzufolge die Potentiale der Anodensegmente auf Werte, die etwas größer (positiver) oder etwas kleiner (negativer) als das Anodengleichspannungspotential sind. Diese Ladungsdifferenzen sind für diesen einen Moment mit den „+“ und „-“ Zeichen gekennzeichnet.

Die Elektronen, die aus der Kathode in Richtung auf die momentan positiver geladenen Anodensegmente fliegen, werden also zusätzlich beschleunigt. Dadurch wird die magnetische Rechtsablenkung stärker, und die Elektronen erhalten eine höhere Tangentialgeschwindigkeit.

Andererseits werden die Elektronen, die in Richtung auf die momentan negativer geladenen Segmente fliegen, verzögert. Sie werden nicht so stark nach rechts abgelenkt und erhalten folglich eine kleinere Tangentialgeschwindigkeit.

3. Vorgang: Dichtemodulation der Elektronenströmung

Es bewegt sich aber nicht nur ein einzelnes Elektron auf der im Bild 5 beschriebenen Bahn. Die Kathode emittiert sehr viele davon in alle Richtungen. Die Verteilung ist anfangs auch sehr gleichmäßig. Erst der Einfluss der elektrischen Felder der Resonatoren bewirkt eine Geschwindigkeitsmodulation der Elektronen.

Auf Grund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten der verschiedenen Elektronengruppen kommt es zu den Laufzeiteffekten während des Elektronenumlaufes. Die schnelleren Elektronen holen die langsameren Elektronen ein. Je dichter sie an die Anode kommen, desto stärker werden sie gebündelt und es kommt zu einer Elektronenanhäufung in Form eines sich drehenden „Speichenrades“.

Da dieser Zustand nicht statisch ist, weil sowohl die Welle (und somit die Feldverteilung an den Resonatoren) als auch das Speichenrad ständig umlaufen, müssen die Tangentialgeschwindigkeit der Elektronenspeichen und die Umlaufgeschwindigkeit der Welle in Übereinstimmung gebracht werden. Diese Regelung der Geschwindigkeit der Elektronen geschieht, indem der Radarmechniker den in der Betriebsanleitung vorgeschriebenen Anodenstrom einstellt.

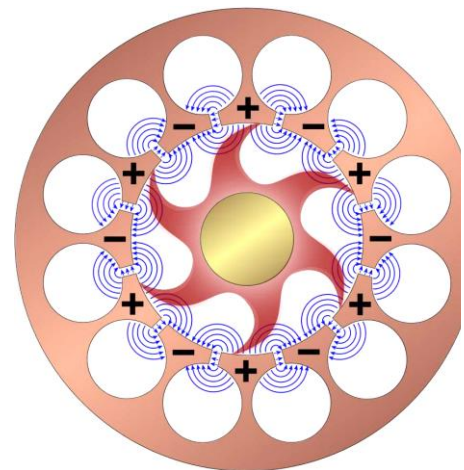


Bild 7: Dichtemodulierte Elektronenströmung ausgeprägt als sich drehendes „Speichenrad“

4. Vorgang: Energieabgabe der Elektronen an das HF-Feld

Wenn sich eine der Speichen gerade an einem Anodensegment befindet, welches durch das der Anodengleichspannung überlagerte HF- Wechselfeld etwas negativer geladen ist, dann werden die Elektronen gebremst und geben ihre Energie an das HF- Wechselfeld ab. Auf ihrem Weg zwischen Kathode und Anode werden die Elektronen in der Speiche mehrfach gebremst, bevor sie das jeweilige (dann negativere) Anodensegment erreichen. Bei jedem Abbremsen und auch beim finalen Auftreffen auf die Anode geben sie Energie an die hochfrequente Schwingung ab. Durch die mehrfache Abbremsung des Elektrons wird dessen Energie optimal ausgenutzt und man erreicht Wirkungsgrade bis zu 80%.

Einschwingvorgang

Nach dem Einschalten der Anodenspannung existiert noch kein hochfrequentes Feld. Das einzelne Elektron bewegt sich unter dem Einfluss des statischen elektrischen Feldes der Anodenspannung und durch die Wirkung des Magnetfeldes wie im Bild 5 (rote Elektronenbahn) gezeigt. Elektronen sind Ladungsträger: im Vorbeiflug an einem Spalt der Hohlraumresonatoren geben sie etwas Energie ab. Der Hohlraumresonator beginnt vorerst noch sehr schwach mit seiner Eigenresonanz zu schwingen. Sofort beginnt auch die Wechselwirkung zwischen diesem HF-Feld (mit anfangs geringer Leistung) und dem Elektronenstrahl. Die Elektronen werden durch das Wechselfeld zusätzlich beeinflusst und es beginnt der unter Vorgang 1 bis 4 beschriebene Ablauf der Wechselwirkung zwischen HF-Feld und den nun geschwindigkeitsmodulierten Elektronen. Sehr schnell wird die maximale Amplitude der Schwingung erreicht.

Das Einschwingen erfolgt leider nicht mit einer vorhersehbaren Phasenlage. Jedes Einschwingen geschieht mit einer zufälligen Phase. Die Sendepulse, die mit einem Magnetron erzeugt werden, sind deshalb untereinander nicht kohärent.

Es ist jedoch möglich, mittels eines kohärenten Oszillators ein Magnetron zu zwingen, mit dessen Phasenlage einzuschwingen.

Arbeitsmoden des Magnetrons

Die Betriebsfrequenz hängt in erster Linie von den Abmessungen der Resonatoren und des Laufraumes zwischen Anode und Kathode ab. Da die einzelnen Resonatoren jedoch über den Laufraum miteinander verkoppelt sind, existieren für das gesamte System (Verzögerungsleitung) mehrere Resonanzfrequenzen.

Im Bild 8 sind drei der vier möglichen Schwingungsformen (Moden) eines 12-Resonator Magnetrons dargestellt. Beim Betrieb des Magnetrons in einer der anderen Moden ($\frac{3}{4}\pi$, $\frac{1}{2}\pi$, $\frac{1}{4}\pi$) sinkt die Leistung bzw. der Wirkungsgrad und die Schwingfrequenz.

Damit sich ein stabiler Betrieb in dem optimalen π -Mode einstellt, sind zwei konstruktive Maßnahmen möglich:

1. **Kurzschlussringe an den Anodensegmenten:** Sowohl die geradzahigen als auch die ungeradzahigen Segmente werden durch Kurzschlussringe miteinander verbunden. Somit erhalten im π -Mode die Anodensegmente gleiches Potential. Andere Moden werden durch Ausgleichsströme über diese Kurzschlussringe unterdrückt.
2. Verwendung von **Resonatoren unterschiedlicher Eigenfrequenz:** Eine solche Variante ist z.B. die Anodenform *Rising Sun*.

Der Typ *Rising Sun* hat Schlitze mit unterschiedlicher Länge. In einem gegebenen Beispiel liegt die Resonanzfrequenz jedes zweiten Resonators auf der dritten Harmonischen der gewünschten Arbeitsfrequenz im π -Mode, also der dreifachen Grundfrequenz. Im Normalfall unterstützt diese Resonanzfrequenz (weil sie ein ungerades Vielfache der Arbeitsfrequenz ist) die Flanken der Schwingung im π -Mode. Wenn das Magnetron zum Beispiel im $\frac{1}{2}\pi$ -Mode arbeitet, dann würde der Stromfluss des Schwingvorganges zwei Resonatoren umfassen, die fest miteinander gekoppelt sind. Ein Resonator würde nun auf

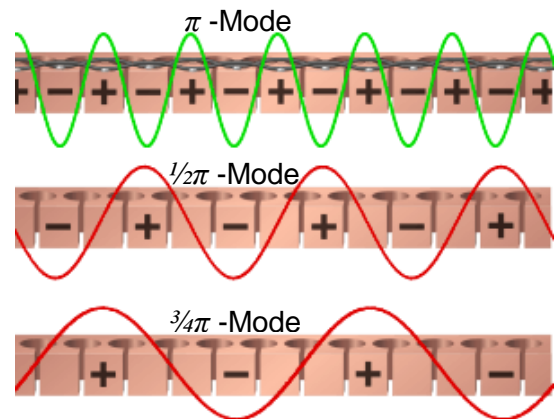


Bild 8: Schwingungsformen des Magnetrons, (Anodensegmente sind „abgewickelt“ dargestellt.)

Kurzschlussringe

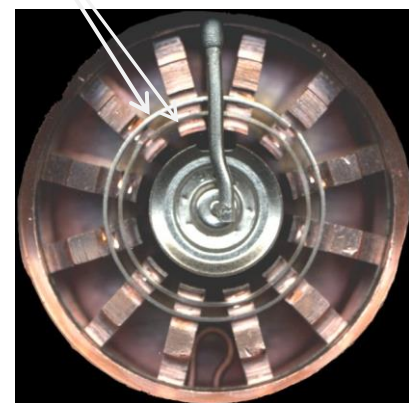


Bild 9: aufgeschnittenes Magnetron, die Kurzschlussringe sind gut zu erkennen

der 2. Harmonischen arbeiten, der andere auf der 6. Harmonischen. Dadurch dass dieser kleinere Resonator jetzt auf einem geradzahigen Vielfachen arbeitet und nach wie vor durch die feste Kopplung eine Phasenverschiebung von 180° vorliegen muss, liegt er nun im Gegentakt zu seinen benachbarten Resonatoren. Damit wird der ohnehin ungünstigere Wirkungsgrad für den falschen Mode noch ungünstiger, die Arbeitsbedingungen somit noch schlechter, bis diese Schwingung in den π - Mode umschlägt.

Damit überhaupt in einem anderen als dem π - Mode eine Schwingung erzeugt wird, muss die Anzahl der Resonatoren zu diesem Mode passen. Zum Beispiel muss für einen $\frac{3}{4}\pi$ - Mode die Anzahl der Resonatoren durch 6 teilbar sein, damit eine umlaufende Welle in diesem Mode zustande kommt. Daher ist die Anzahl der möglichen Moden abhängig von der Anzahl der Resonatoren.

Auskopplung der Energie am Magnetron

Die HF- Energie kann dem Magnetron über eine Koppelschleife entnommen werden. Bei Frequenzen unterhalb 10 GHz wird diese Schleife aus dem Mittelleiter des Koaxialkabels geformt und befindet sich innerhalb eines beliebigen Resonators (Bild 10). Bei höheren Frequenzen ist die Anordnung dieser Koppelschleife außerhalb des Resonators (Bild 11) effektiver.

Die Speisung der Auskopplung durch die HF- Spannung eines Segmentes zeigt Bild 12. Die Leitung erfasst ebenfalls das zwischen den Resonatoren auftretende magnetische Feld. Eine Kopplung an einen Kurzschlussring ist ebenfalls möglich (Bild 13). Die Methode, über ein Koaxialkabel die Energie auszukoppeln, ist günstig, weil die Durchführung durch den Anodenblock luftdicht (Vakuumröhre!) ausgeführt werden muss. Dieses Koaxialkabel kann aber direkt einen Hohlleiter speisen. Eine direkte Auskopplung über einen Schlitz ist bei hohen Frequenzen (und demzufolge kleinen Hohlleiterabmessungen) ebenfalls üblich (Bild 14). Der Hohlleiteranschluss muss durch ein Quarzglasfenster mit einer Blende luftdicht verschlossen sein.

Verschiedene Methoden der Auskopplung der Energie am Magnetron:

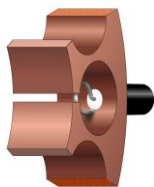


Bild 10: Auskopplung als Koppelschleife im Resonatorraum (sehr feste Kopplung)

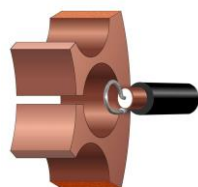


Bild 11: Auskopplung als Koppelschleife oberhalb des Resonatorraum (mehr lose Kopplung)

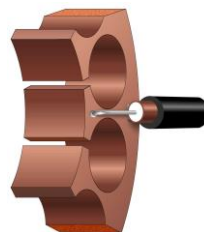


Bild 12: HF-Spannungsabgriff an Resonatorwand

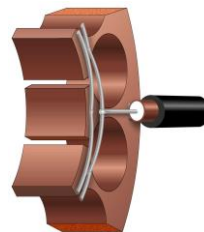


Bild 13: HF-Spannungsabgriff am Kurzschlussring

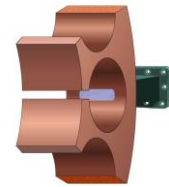


Bild 14: Hohlleiterauskopplung

Frequenzänderung am Magnetron

Abstimmbare Magnetrone erlauben eine präzisere Sendefrequenz innerhalb eines konstruktiv vorgegebenen Frequenzbandes. Die Änderung der Resonanzfrequenz wird durch entweder kapazitiv oder induktiv wirkende mechanische Änderungen der Resonatoren bewirkt. Eine kapazitive Abstimmung ist möglich, indem der Anstand der Kurzschlussbügel verändert wird, zum Beispiel durch einen zwischen die Kurzschlussbügel einschiebbaren Ring. Diese Art Abstimmung wird "cookie-cutter tuning" genannt, wird aber kaum verwendet.

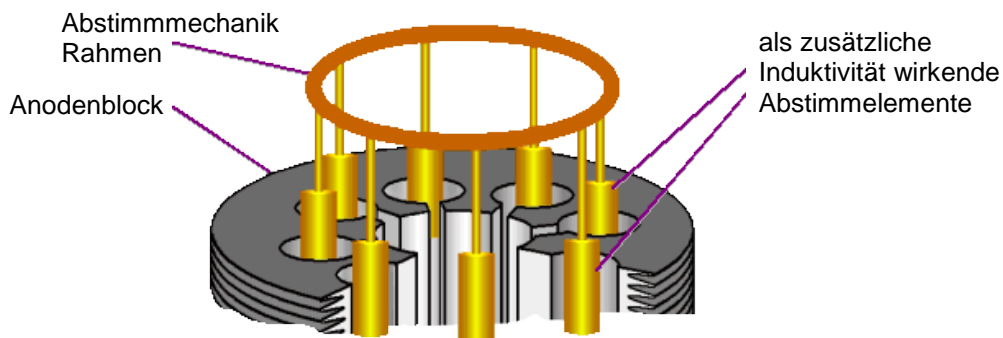
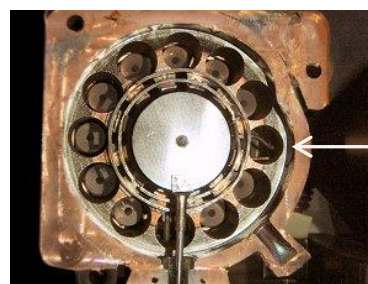


Bild 15: Induktive Abstimmung („Dornenkronen-Abstimmung“)

Meist werden in alle Hohlraumresonatoren gleichzeitig induktive Abstimstempel eingeführt, die an einem Rahmen befestigt sind und von außen justiert werden können. Diese Art wird als „Dornenkronen-Abstimmung“ (*“Crown-of-thorns tuning”*) bezeichnet. Mit dieser Abstimmung kann ein Abstimmbereich von bis zu 1,5 : 1 erreicht werden. Hauptproblem ist bei allen Abstimmvarianten die Übertragung der mechanischen Bewegung in den Vakuumraum der Röhre.

Ein Beispiel für ein abstimmbares Magnetron ist das M5114B der ASR-910. Da die ASR-910 auf verschiedenen zugewiesenen Frequenzen arbeiten kann, um gegenseitige Störungen zu verringern, muss die Arbeitsfrequenz des Senders abstimmbaar sein. Dieses Magnetron ist mit einem Abstimmechismus versehen, um die Sendefrequenz der ASR-910 genau einzustellen.

Bild 16 zeigt die induktiven Abstimmelemente des Magnetrons Typ TH3123. Der Resonator hinter den Zuleitungen für die Heizspannung und der Resonator mit der Auskoppelschleife sind nicht abstimmbaar! Das zeigt dann auch den Nachteil der Abstimmung: Diese beiden Resonatoren müssen breitbandiger sein als die übrigen Resonatoren. Damit sinkt die Effektivität des Magnetrons und eine Frequenzänderung ist nur in sehr engen Grenzen möglich.



Auskoppelschleife

Heizspannungszuführung

Bild 16: Resonatoren eines Magnetrons (Loch-Typ) mit induktiven Abstimmelementen

Nebenbei: das in Bild 16 gezeigte Magnetron wurde mit einer Fräsmaschine geöffnet. An dem verbogenen Abschnitt des sonst kreisförmigen Außenrandes der Anode gleich oberhalb der Auskoppelschleife ist erkennbar, wie schwierig es ist, eine Fräsmaschine zum Bearbeiten von sehr weichem Kupfer einzurichten ohne dass sich das Material verbiegt.

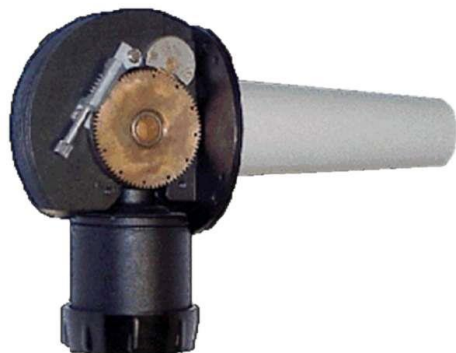


Bild 17: Magnetron M5114B der ASR-910



Bild 18: Magnetron VMX 1090, eingesetzt im PAR-80. Dieses Magnetron enthält sogar die zur Arbeit nötigen Permanentmagneten.