

Radartutorial

Buch 5 „Laufzeitröhren“

Die vorliegende Ausbildungshilfe ist eine Zusammenfassung von Seiten der Internetpräsentation „Radargrundlagen“ auf www.radartutorial.eu.

Inhaltsverzeichnis:

| | |
|---------------------------------------------------|----|
| Radartutorial..... | 1 |
| Lernziele:..... | 1 |
| Laufzeitröhren | 2 |
| Magnetron | 3 |
| Grundlagen der Arbeitsweise eines Magnetrons..... | 3 |
| Arbeitsmodi des Magnetrons..... | 5 |
| Auskopplung der Energie am Magnetron | 6 |
| Frequenzänderung am Magnetron | 6 |
| Kreuzfeldverstärker (Amplitron)..... | 7 |
| Aufbau des Amplitrons | 7 |
| Besonderheiten beim Betrieb | 8 |
| Stabilotron | 8 |
| Klystron..... | 8 |
| Zweikammer- Klystron..... | 9 |
| Mehrkammer- Klystron | 9 |
| Reflexklystron | 10 |
| Wanderfeldröhren..... | 11 |
| Aufbau und Funktion | 11 |
| Charakteristische Eigenschaften | 12 |
| Carzinotron..... | 13 |
| Wissenstest..... | 14 |

Lernziele:

Die hier genannten Lernziele sollen einen Überblick über die zu erwartenden Themen in diesem Kapitel geben. Das Kapitel „Laufzeitröhren“ vermittelt die Kenntnisse zum Verständnis der Arbeitsweise vieler noch in der Radartechnik eingesetzter Mikrowellenröhren. Am Ende dieses Kapitels sollte der Lernende

- die Einteilung von Laufzeitröhren kennen
- einzelne Röhrentypen den Laufzeitröhren zuordnen können;
- die Geschwindigkeitsmodulation als Grundlage der Arbeitsweise von Laufzeitröhren erläutern können.

Laufzeitröhren

Je höher die Hochfrequenz ist, gewinnt in den Röhren für die Erzeugung/Verstärkung von Hochfrequenz die Laufzeit der Elektronen in der Röhre mehr und mehr an Bedeutung. Die Umwandlung von Gleichstrom in Hochfrequenz wird durch die Ausnutzung von Laufzeit und Geschwindigkeitsmodulation der Elektronen sowie von verlustarmen Hohlraumresonatoren charakterisiert

Als Laufzeitröhren bezeichnet man Röhren, bei denen die Laufzeit der Elektronen zur Verstärkung bzw. zur Schwingungserzeugung ausgenutzt wird. In Linearstrahlröhren verläuft die Richtung des Elektronenstrahls und des statischen elektrischen Feldes zueinander parallel (linear). Dagegen stehen bei den Kreuzfeldröhren die den Elektronenstrahl beeinflussenden Felder senkrecht zum Elektronenstrahl.

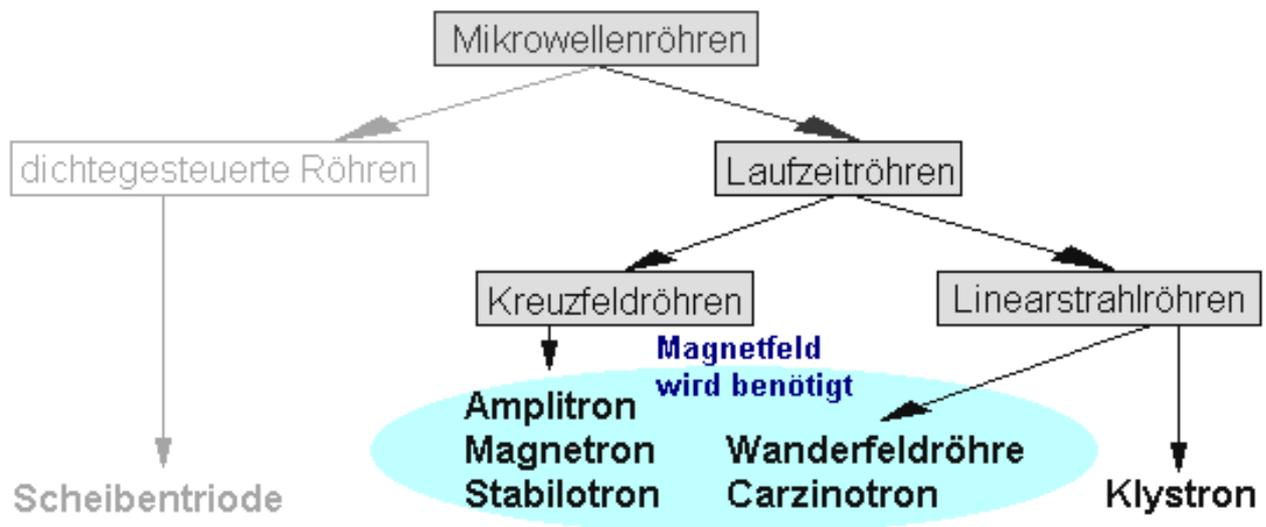


Abb. 1: Einteilung von Mikrowellenröhren

Die folgende Tabelle stellt charakteristische Kenngrößen der in der Radartechnik verwendeten Laufzeitröhren gegenüber. Obwohl die Scheibentriode keine Laufzeitröhre ist, wurde sie in diese Tabelle zum Vergleich mit aufgenommen.

| | Klystron | Wanderfeldröhre | Magnetron | Carcinotron | Scheibentriode |
|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Frequenzbereich | bis 10 GHz | bis 20 GHz | bis 20 GHz | bis 5 GHz | bis 1000 MHz |
| Bandbreite | 2 - 4 % | 10 - 20 % | wenige MHz | 2 GHz | 30 - 50% |
| Ausgangsleistung | bis 50 MW | bis 1 MW | bis 10 MW | 1 W | bis 1 MW |
| Leistungsverstärkung | bis 60 dB | bis 50 dB | - | - | bis 20 dB |
| Funktion | schmalbandiger Leistungsverstärker | breitbandiger, rauscharmer Verstärker | Leistungoszillator mit einer Sendefrequenz | geregelter Oszillator (VFO) | Verstärker, Oszillator |

Magnetron

Das Magnetron wurde durch Albert Wallace Hull schon im Jahre 1921 als leistungsfähige Mikrowellensenderöhre entwickelt. Aber erst 1940 wurde es der Öffentlichkeit vorgestellt.

Das Magnetron ist ein selbsterregender Oszillator, der anders als Linearstrahlröhren wie etwa die Wanderfeldröhre oder das Klystron arbeitet. Ein elektrisches und ein starkes magnetisches Feld werden beim Magnetron senkrecht aufeinander (kreuzförmig) angeordnet, um die in Radargeräten geforderte hohe Sendeleistung zu produzieren. Deshalb wird das Magnetron in älteren Publikationen auch „Kreuzfeldgenerator“ oder „Kreuzfeldoszillator“ genannt.

Aufbau des Magnetrons

Das Magnetron ist im Schaltbild eigentlich eine Diode, da es keinerlei Gitter zur Steuerung benutzt. Das Magnetron besteht aus einem massiven Kupferblock, der als Anode geschaltet ist. 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. Die Zuleitungen müssen groß und stabil genug sein, um Kathode und Heizung in Position zu halten. In den Anodenblock sind 8 bis 20 Hohlräume eingearbeitet, welche die frequenzbestimmenden Hohlraumresonatoren darstellen und als eine in sich geschlossene Verzögerungsleitung wirken. Diese Resonatoren haben über einen schmalen Schlitz Verbindung zum Raum zwischen Anode und Kathode.

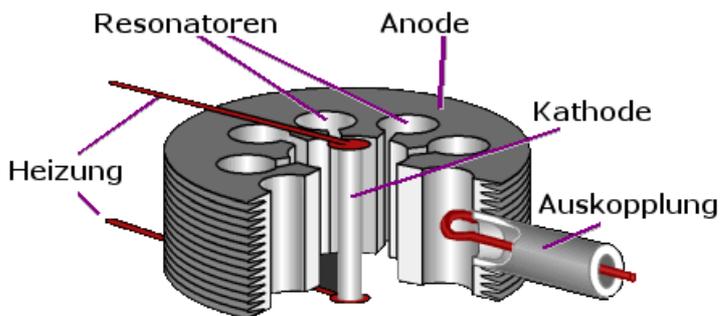


Abb. 2: Schnittmodell eines Magnetrons

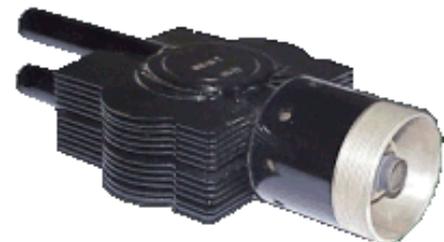


Abb. 3 Magnetron MI29G

Der Raum zwischen Anode und Kathode wird Laufraum genannt. In diesem Raum wirken das elektrostatische und das magnetische Feld auf die Elektronenbahn. Parallel zur Kathode befindet sich ein kräftiges magnetische Feld eines Permanentmagneten.

Mögliche Formen von Resonatoren zeigt Abbildung 4. Aus einem dieser Resonatoren wird die erzeugte HF-Leistung ausgekoppelt, entweder durch eine Koppelschleife und Koaxialleitung oder durch Koppelöffnung und Hohlleiter.

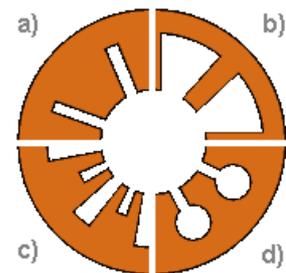


Abb. 4: Anodenformen von Magnetrons

- a) Schlitz- Typ
- b) Kreissektor- Typ
- c) Rising Sun- Typ
- d) Loch- Typ

Grundlagen der Arbeitsweise 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
3. Vorgang: Dichtemodulation der Elektronenströmung
4. Vorgang: Energieabgabe an das bremsende elektrische HF-Feld

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. Abbildung 5 zeigt die Bahn eines einzelnen Elektrons in Blau.

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 (in der Abbildung 5: die grüne Bahn).

Die Flussdichte, bei der die Elektronenbahn gerade die Anode tangiert, (rot dargestellt) nennt man kritische Flussdichte. Als praktischen Betriebsfall wählt man eine höhere Flussdichte als die kritische (oliv dargestellt), bei dem das Elektron die Anode nicht erreicht. Es würde auch kein Anodenstrom fließen.

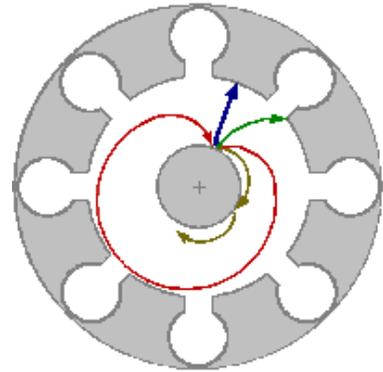


Abb. 5: Bahnverlauf eines Elektrons unter Wirkung des elektrostatischen und des magnetischen Feldes für verschiedene magnetische Flussdichten.

2. Vorgang: Geschwindigkeitssteuerung der Elektronen

Durch die an den Schlitzen der Hohlraumresonatoren vorbeifliegenden Elektronen werden diese zum Schwingen angeregt. Es entsteht eine umlaufende elektromagnetische Welle auf der Verzögerungsleitung. Da das Magnetfeld im Inneren der Resonatoren wirkt, wird lediglich das in den Resonatorschlitzen konzentrierte elektrische Feld im Laufraum wirksam und beeinflusst die Elektronenbewegung.

In der Abbildung 6 wird nur das hochfrequente elektrische Feld der umlaufenden Welle und die dazugehörige Ladungsverteilung auf den Anodensegmenten zu einem bestimmten Zeitpunkt betrachtet. HF- Feld und Ladungen wirken zusätzlich zum ständig vorhandenen elektrostatischen Feld.

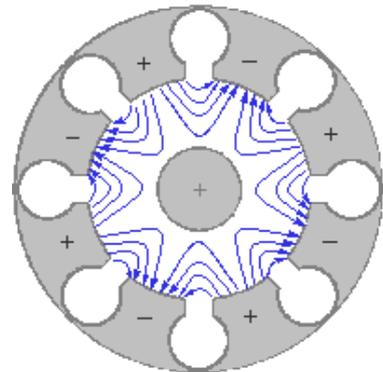


Abb. 6: Verlauf des elektrischen Feldes der umlaufenden Welle

Die umlaufende Welle verändert demzufolge die Potentiale der Anodensegmente auf Werte, die etwas größer (positiver) oder etwas kleiner (negativer) als das Anodengleichspannungspotential sind. 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

Auf Grund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten der verschiedenen Elektronengruppen kommt es zu Laufzeiteffekten während des Elektronenumlaufes.

Die schnelleren Elektronen holen die langsameren Elektronen ein und es kommt zu einer Elektronenanhäufung in Form eines „Speichenrades“. Zum dargestellten Zeitpunkt befindet sich eine der Speichen gerade an einem Anodensegment, welches durch das der Anodengleichspannung überlagerte HF- Wechselfeld etwas negativer geladen ist. Die Elektronen werden also gebremst und geben diese Energie an das HF- Wechselfeld ab. 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.

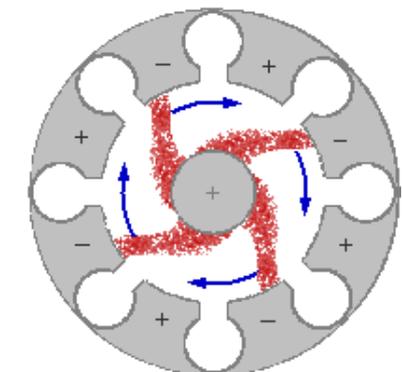


Abb. 7: Dichtemodulierte Elektronenströmung, das „Speichenrad“

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

Die Elektronen werden auf ihrem Weg zwischen Kathode und Anode in der Speiche mehrfach gebremst, bevor sie das jeweilige (dann negativere) Anodensegment erreichen. Bei diesem Abbremsen geben sie Energie an die hochfrequente Schwingung ab. Über einen längeren Zeitraum betrachtet, beschreibt ein einzelnes Elektron die in Abbildung 8 gezeigte Bahn. Durch die mehrfache Abbremsung des Elektrons wird die Energie des Elektrons optimal ausgenutzt und man erreicht Wirkungsgrade bis zu 80%.

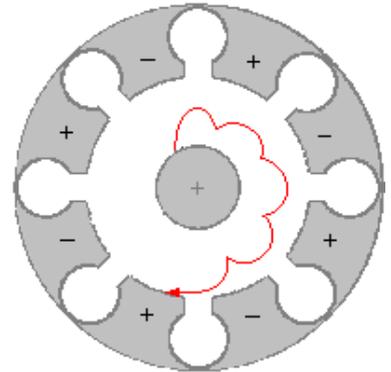


Abb. 8: Bahnverlauf eines Elektrons

Arbeitsmodi 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.

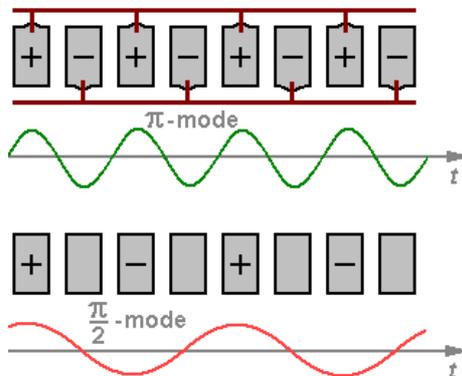


Abb. 9: Schwingungsformen des Magnetrons (Anodensegmente sind „abgewickelt“ dargestellt.)

Kurzschlussringe

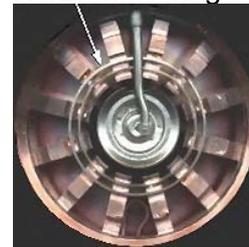


Abb. 10: aufgeschnittenes Magnetron, die Kurzschlussringe sind gut zu erkennen

In der Abbildung 9 sind zwei der vier möglichen Schwingungsformen (Modi) eines 8- Resonator Magnetrons dargestellt. Beim Betrieb des Magnetrons in einer der anderen Modi ($3/4\pi$, $1/2\pi$, $1/4\pi$) sinkt die Leistung bzw. der Wirkungsgrad und die Frequenz.

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

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

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 (Abbildung 11, Ansicht a). Bei höheren Frequenzen ist die Anordnung dieser Koppelschleife außerhalb des Resonators (Ansicht b) effektiver.

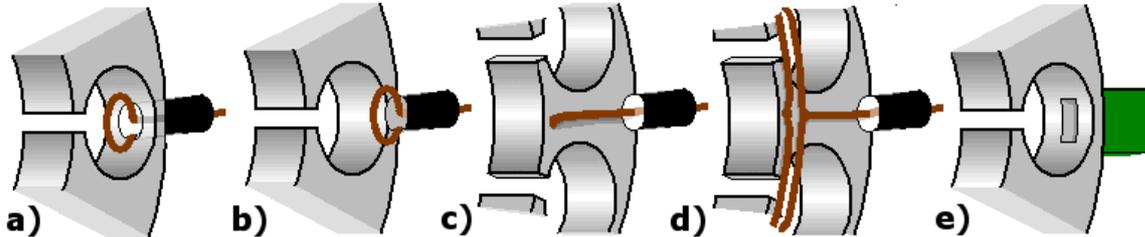


Abb. 11: Möglichkeiten der Auskopplung der Energie am Magnetron

Die Speisung der Auskopplung durch die HF- Spannung eines Segmentes zeigt Abbildung 11, (Ansicht c). Die Leitung erfasst ebenfalls das zwischen den Resonatoren auftretende magnetische Feld. Eine Kopplung an einen Kurzschlussring ist ebenfalls möglich (Ansicht d). Die Methode, über ein Koaxialkabel die Energie auszukoppeln, ist günstig, weil die Durchführung durch den Anodenblock luftdicht (Vakuumpöhre!) 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 (Ansicht e).

Frequenzänderung am Magnetron

Abstimmbare Magnetrone erlauben eine präzisere Sendefrequenz innerhalb eines konstruktiv vorgegebenen Frequenzbandes. Die Resonanzfrequenz wird durch entweder kapazitiv oder induktiv wirkende mechanische Änderungen der Resonatoren bewirkt.

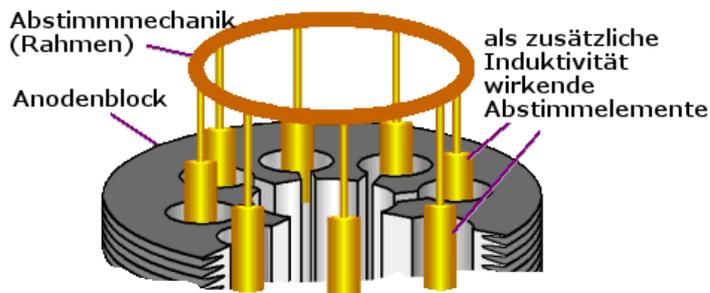


Abb. 12: Induktive Abstimmung

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 abstimmbar sein. Dieses Magnetron ist mit einem Abstimmmechanismus versehen, um die Sendefrequenz der ASR-910 genau einzustellen.



Abb. 13: Magnetron M5114B der ASR-910



Abb. 14: Magnetron VMX 1090 für eine Festfrequenz, eingesetzt im PAR-80. Dieses Magnetron enthält sogar die zur Arbeit nötigen Permanentmagneten.

Kreuzfeldverstärker (Amplitron)

Für das Amplitron werden in der Literatur auch andere Bezeichnungen verwendet, die manchmal auch unterschiedliche Einsatzzwecke markieren:

- **Platinotron**, Oberbegriff für Rückwärtswellenröhre mit geschlossenem Elektronenstrom und unterbrochenem Verzögerungssystem;
- **Amplitron**, Platinotron als nichtlinearer Leistungsverstärker;
- **Stabilotron**, Sonderform des Amplitrons mit Rückkopplung und Resonanzkreis als stabiler HF-Generator;
- **Magnetronverstärker**, (Trivialname)
- **Kreuzfeldverstärker**, älterer funktionsbezeichnender Name

Aufbau des Amplitrons

Das Amplitron gehört wie das Magnetron zur Gruppe der Laufzeitröhren, bei denen die Elektronenströmung mit einer längs einer Verzögerungsleitung laufenden elektromagnetischen Welle in Wechselwirkung tritt. Es ähnelt in seinem Aufbau stark dem Magnetron. Wie dieses besteht das Amplitron aus der Kathode (1), dem konzentrisch dazu angeordneten Anodenblock (2) mit dem Verzögerungssystem (4) und einem Magnetsystem.

Der wesentliche Unterschied zwischen Magnetron und Amplitron besteht darin, dass letzteres kein geschlossenes Verzögerungssystem mit nur einem Ausgang hat, sondern sowohl über einen Eingang als auch einen Ausgang verfügt, das Verzögerungssystem unterbrochen ist und dass das Amplitron eine **ungerade Anzahl von Resonatoren** an der Anode aufweist.

Das zwischen Oxidkathode und der Innenfläche der Resonanzelemente an der Anode bestehende elektrische Feld und das senkrecht dazu wirkende Magnetfeld eines starken Permanent- oder Elektromagneten schaffen die Bedingungen für die Wechselwirkung von Elektronenstrom und elektromagnetischer Welle. Die Elektronen bewegen sich unter dem Einfluss des radial zwischen Kathode und Anode wirkenden elektrischen Feldes und des senkrecht dazu wirkenden magnetischen Feldes auf Epizykloidenbahnen und gruppieren sich zu speichenförmigen Raumladungsspitzen (3).

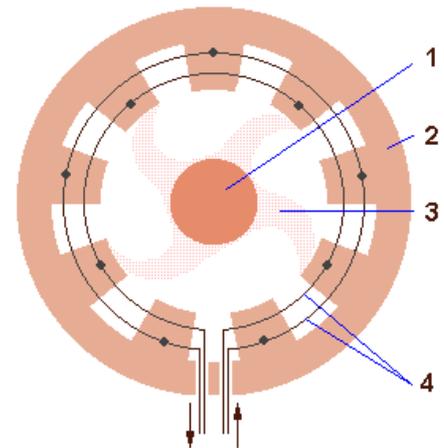


Abb. 15: Schematische Darstellung eines Amplitrons

Eine Verstärkung wird im Amplitron dadurch erreicht, dass die von den am Eingang angelegten HF-Schwingungen hervorgerufene Welle verzögert wird und mit der Raumladung in Wechselwirkung tritt. Dabei muss die Geschwindigkeit der Elektronen (Gruppengeschwindigkeit) in der Nähe der Verzögerungslamellen und die Phasengeschwindigkeit der verzögerten Welle gleich sein. Die Geschwindigkeit der Elektronen hängt von der Anodenspannung, der Induktion des magnetischen Feldes und den Abmessungen des Raumes ab, in dem die Wechselwirkung stattfindet. Bei synchroner Wechselwirkung wächst die Amplitude des hochfrequenten Feldes infolge der Abgabe potentieller Energie der Elektronen. Dieser Verstärkerprozess endet am Ausgang des Verzögerungssystems. Als Mittler der Energieabgabe von der Gleichstromquelle an das HF-Feld dienen die „Raumladungsspitzen“. Das Ergebnis ist die Verstärkung der Leistung des HF-Signals.

Besonderheiten beim Betrieb

Das Amplitron arbeitet erst dann als Verstärker, wenn seine Eingangsleistung eine bestimmte Größe überschreitet. Bei zu kleiner oder fehlender Eingangsspannung wirkt das Amplitron als Rauschgenerator.

Das Amplitron kann nicht zur Verstärkung amplitudenmodulierter Schwingungen verwendet werden, da der Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Eingangsleistung nichtlinear ist. Von einer bestimmten Größe der Eingangsleistung an steigt die Ausgangsleistung nur noch unwesentlich (Sättigung).

Bei fehlender Anodenspannung wirkt das Amplitron als passiver Vierpol mit sehr geringer Dämpfung, lässt die Eingangssignale fast ungehindert passieren.

Für den stabilen Betrieb muss das Amplitron ein- und ausgangsseitig angepasst sein.

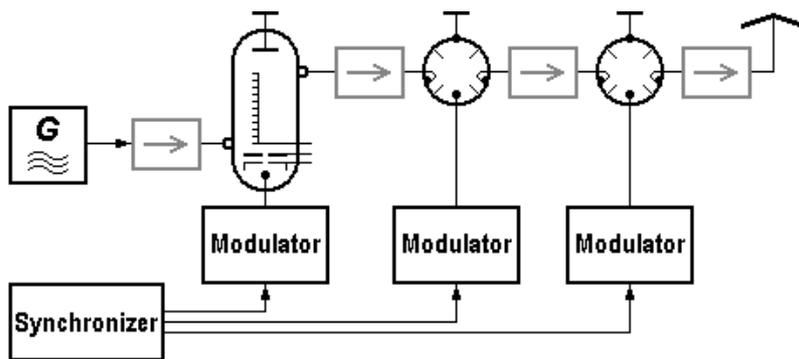


Abb. 16: Übersichtsschaltplan eines Senders mit zwei Amplitronen



Abb. 17: Amplitronsender mit 4 Amplitronen

Da immer erst die Eingangsleistung anliegen muss ehe der jeweilige Modulator die Anodenspannung zuschalten darf, müssen die Modulatoren mit immer schmalere Impulsen gesteuert werden.

Stabilotron

Das Stabilotron ist eine Spezialanwendung des Amplitrons. Im Stabilotron wird die notwendige Rückkopplung mit einem speziellen Reflektor am Ausgang und die Frequenzstabilität mit einem äußeren Resonanzkreis am Eingang erreicht. Ein Teil der am Ausgang reflektierten Energie kehrt zum Eingang zurück und führt dort zur Aufrechterhaltung der Schwingungen.

Da der äußere Resonanzkreis eine große Güte haben kann, ist es möglich, mit dem Stabilotron eine Frequenzstabilität zu erreichen, die um eine Zehnerpotenz höher als beim Magnetron ist.

Klystron

Klystrone sind Hochleistungsverstärker, die im GHz - Bereich arbeiten und sehr hohe Ausgangsleistungen erbringen können. Alle Klystrone arbeiten aber nach dem Prinzip der Laufzeitröhren, also mit einer (wie schon beim Magnetron beschriebenen) Dichtemodulation von Elektronen auf Grund ihrer unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Unter der Bezeichnung „Klystron“ arbeiten zwei Röhrentypen mit unterschiedlichen Wirkungsprinzipien:

- Mehrkammer- Klystron
- Reflex- Klystron

Zweikammer- Klystron

Der Verstärkungseffekt eines Zweikammer - Klystrons beruht auf dem Prinzip der abwechselnden Beschleunigung und Verzögerung von Elektronen im Rhythmus des Eingangssignals. Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeit der Elektronen (Geschwindigkeitsmodulation) ergeben sich an bestimmten Orten in Ausbreitungsrichtung Anhäufungen von Elektronen (Dichtemodulation). Wird an diesem Punkt die Energie abgegriffen, so stellt man eine hohe Verstärkung gegenüber dem Eingangssignal fest.

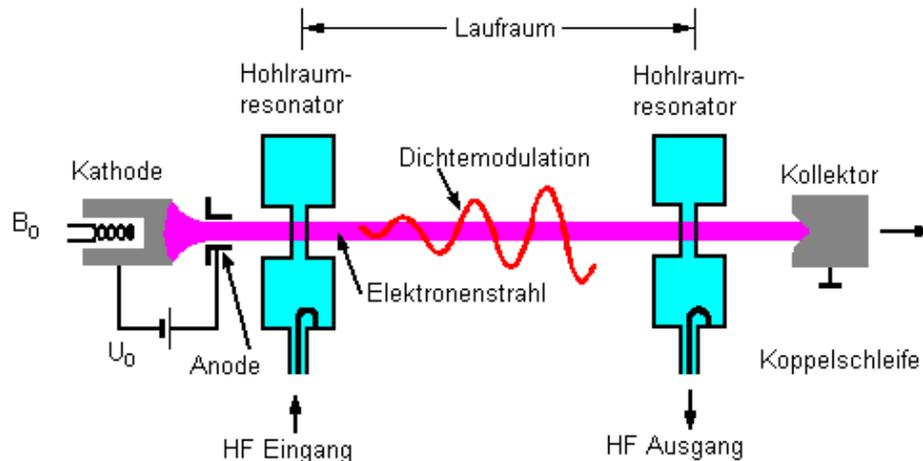


Abb. 18: Schematische Darstellung eines Zweikammer- Klystrons

Elektronen, von der Kathode ausgeschickt und über die Anode beschleunigt, setzen ihren Weg über den Laufraum zum Kollektor fort. Bei anliegendem HF - Eingangssignal werden die Elektronen im Wechsel der Eingangsspannung beschleunigt und verzögert. Im Ausgangsresonator entstehen Elektronenpakete, die sich im Rhythmus der Eingangsschwingung wiederholen.

Diese HF - Schwingung ist gegenüber dem Eingangssignal wesentlich verstärkt und wird über den schwingenden Hohlraumresonator ausgekoppelt. Der Kollektor nimmt die restliche Energie auf und wandelt sie in Wärme und Röntgenstrahlung um.

Mehrkammer- Klystron

Die Verstärkung des Klystrons, seine Ausgangsleistung und seine Effizienz kann durch zusätzliche Hohlraumresonatoren entlang des Elektronenstrahls wesentlich erhöht werden. Zusätzliche Hohlraumresonatoren verstärken die Geschwindigkeitsmodulation der Elektronen und bewirken eine höhere entnehmbare Ausgangsleistung.

Reflexklystron

Eine weitere Laufzeitröhre, die häufig als Hochfrequenzoszillator verwendet wird, ist das Reflexklystron. An Stelle der bei Mehrkammerklystrons verwendeten Kollektoren enthält das Reflexklystron eine negativ geladene Reflektorplatte. Der Elektronenstrahl wird durch einen in Eigenresonanz schwingenden Hohlraumresonator in bekannter Weise geschwindigkeitsmoduliert. Die für eine ungedämpfte Schwingung nötige Rückkopplung erfolgt, indem die durch die Geschwindigkeitsmodulation entstandenen Elektronenpakete durch die negative Reflektorplatte zum Hohlraumresonator zurückgeschickt werden und dort ihre Energie an den Hohlraumresonator wieder abgeben. Diese negativ vorgespannte Reflektorplatte wird in englischsprachigen Quellen „Repeller“ genannt. Wegen der Reflexion des Elektronenstrahls wird diese Laufzeitröhre „Reflexklystron“ genannt.

Drei Spannungsquellen sind für den Betrieb des Reflexklystrons erforderlich:

- Heizspannung,
- positive Anodenspannung am Hohlraumresonator (oft Strahlspannung genannt) für die Beschleunigung des Elektronenstrahls und
- die negative Spannung am Reflektor welche die Elektronenpakete zum Hohlraumresonator reflektiert.

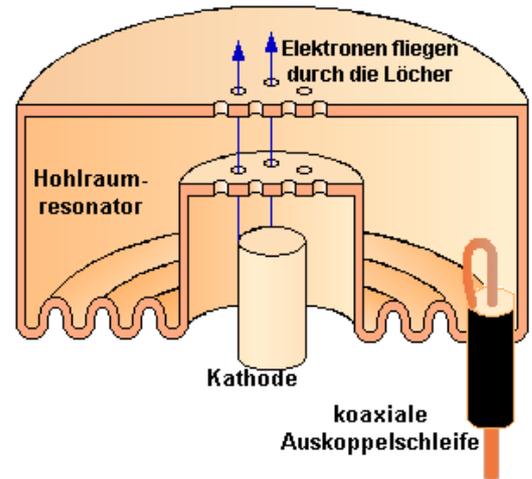


Abb. 19: Hohlraumresonator eines Reflexklystrons

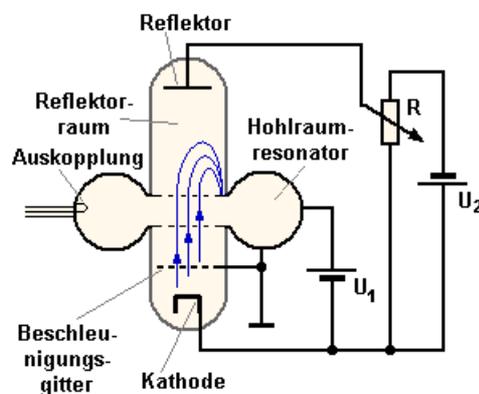


Abb. 20: Betriebsspannungen eines Reflexklystrons



Abb. 21: Reflexklystron K806

Die Fokussierung der Elektronen zu einem scharf gebündelten Strahl geschieht ebenfalls durch das vom positiven Resonatorpotential im Inneren der Röhre erzeugte elektrostatische Feld.

Reflexklystrone werden als Hochfrequenzgeneratoren für kleine bis mittlere Leistung verwendet. Das in der Abbildung 20 gezeigte Klystron K 806 ist aus einem alten russischen Messgerätesatz

Wanderfeldröhren

Wanderfeldröhren (TWT = Travelling Wave Tubes) sind breitbandige Verstärker. Sie nehmen daher eine Sonderstellung unter den Laufzeitröhren ein. Zusätzlich lassen sie sich, auf Grund der besonderen Rauscharmut, als aktives HF- Verstärkerelement in Empfängern einsetzen. Entsprechend ihrer Anwendung unterscheidet man zwei Gruppen von Wanderfeldröhren.

- **Eingangswanderfeldröhren** werden eingesetzt als hochempfindliche, rauscharme und breitbandige Eingangsverstärker in Radaranlagen
- **Leistungswanderfeldröhren** verwendet man vor allem als Vorverstärker für Senderendstufen.



Abb. 22: Wanderfeldröhre YB-15 aus russischer Produktion mit Oktalsockel

Aufbau und Funktion

Wanderfeldröhren sind rauscharme und breitbandige Mikrowellenverstärker mit einer großen Verstärkung. Es sind Verstärkungsfaktoren bis zu 40 dB bei einer Bandbreite von mehr als einer Oktave üblich. Wanderfeldröhren werden für Frequenzen ab 300 MHz bis zu Frequenzen von mehr als 50 GHz gebaut. Die Wanderfeldröhre ist in erster Linie ein Spannungsverstärker. Die hohe Bandbreite und der große Verstärkungsfaktor machen die Wanderfeldröhre zu einem weit verbreiteten Bauteil in der Radartechnik.

Abbildung 23 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Wanderfeldröhre. Ausgehend von der Kathode wird der Elektronenstrahl von dem Wehneltzylinder und einem äußeren permanenten Magnetfeld gebündelt und innerhalb der Wendel bis zum Kollektor geführt. Die in den HF - Eingang eingekoppelte Welle gelangt auf die Drahtwendel und pflanzt sich in Richtung HF - Ausgang fort. Aufgrund des längeren Weges (Wendel) den die Welle zurücklegen muss, wird die hohe Geschwindigkeit der Welle an die niedrigere Geschwindigkeit des Elektronenstrahls angeglichen, so dass sich beide nebeneinander, mit nahezu gleicher Geschwindigkeit auf den HF- Ausgang zu bewegen. Dabei beeinflusst die Welle mit seinen am Wendel entstehenden E- Feld örtlich die Geschwindigkeit des Elektronenstrahls, indem die Elektronen teilweise beschleunigt und teilweise abgebremst werden. Dadurch kommt es zu der von dem Klystron bekannten Dichtemodulation.

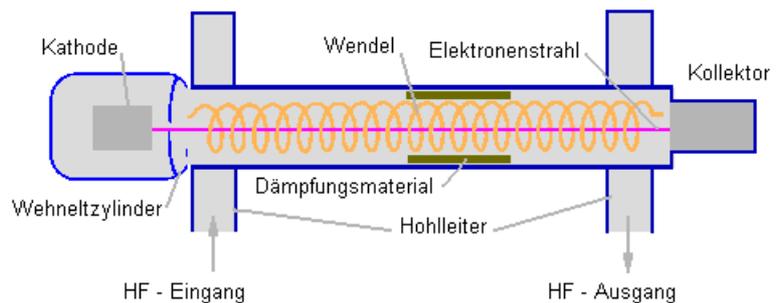


Abb. 23: prinzipieller Aufbau einer Wanderfeldröhre

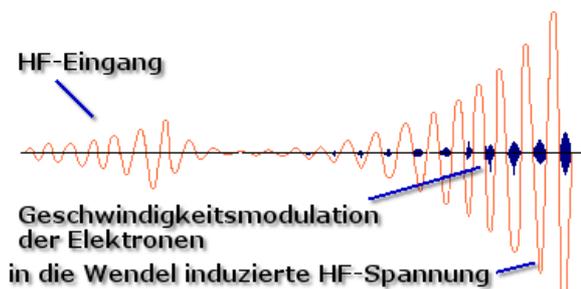


Abb. 24: Verstärktes HF-Signal in der Wendel

Die Abbildung 25 zeigt das durch die Welle erzeugte elektrische Längsfeld im Inneren der Wendelleitung und deutet die Dichtemodulation des Elektronenstrahls an.

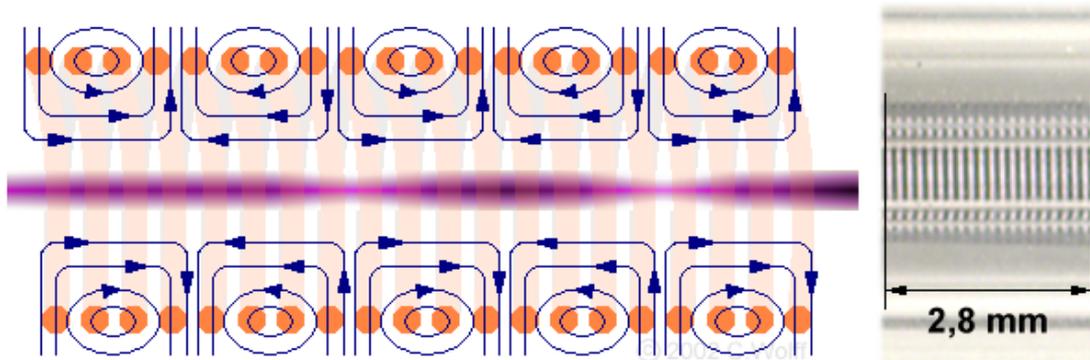


Abb. 25: Geschwindigkeitsmodulation der Elektronen und Detailfoto einer Wendel (Maßangabe für 20 Windungen)

Die Dichtemodulation beginnt bereits am Wendelanfang und erreicht am Wendelende ihre höchste Ausprägung. Die Frequenz der Dichtemodulation ist gleich der Frequenz der eingekoppelten Welle. Die durch die Dichtemodulation entstehenden Elektronenpakete beeinflussen im Gegenzug wiederum die Welle, indem sie ihr im Wechsel Energie entziehen und zuführen. Durch geeignete bauliche Maßnahmen wird erreicht, dass der Welle wesentlich mehr Energie zugeführt als entzogen wird und damit am HF - Ausgang ein erheblich verstärktes HF- Signal ansteht.

Charakteristische Eigenschaften

Die erreichbare Leistungsverstärkung ist im Wesentlichen von folgenden Faktoren abhängig:

- konstruktiver Aufbau (z.B. Wendellänge)
- Elektronenstrahldurchmesser (durch die Flussdichte B des fokussierenden Magnetfeldes einstellbar)
- Eingangsleistung (siehe Abb. 26)
- Wendelspannung UA_2

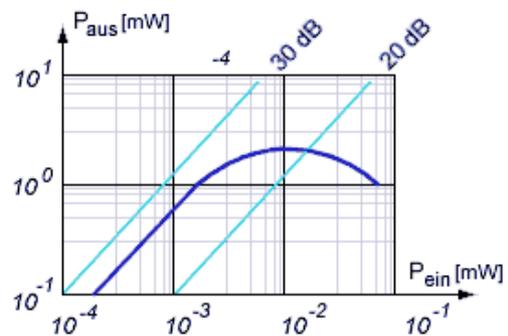


Abb. 26: Kennlinie einer Wanderfeldröhre

Aus Kennlinie in der Abbildung 26 5 ist für kleine Eingangsleistungen ein linearer Bereich und damit eine konstante Leistungsverstärkung von etwa 26 dB erkennbar. Vergrößert man die Eingangsleistung, steigt die Ausgangsleistung nicht weiter mit, das heißt der Verstärkungsfaktor sinkt. Es tritt eine Begrenzungswirkung ein, so dass bei sehr starken Eingangssignalen eine Übersteuerung der nachfolgenden Stufe (z.B. Mischstufe) verhindert wird.

Da bei der Wanderfeldröhre der Verstärkungseffekt durch Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und fortschreitender Welle auf einer Verzögerungsleitung erreicht wird, ist für die erreichbare Bandbreite in erster Linie das Frequenzverhalten der Wendel verantwortlich. Eine frequenzunabhängige Feldverteilung auf einer Leitung wird dann erreicht, wenn diese Leitung angepasst betrieben wird. Diese Anpassung kann nur über ein begrenztes Frequenzband aufrechterhalten werden, beträgt aber trotzdem Werte bis zu einer Größenordnung von mehreren Gigahertz.

Der wichtigste Parameter für den Einsatz der Wanderfeldröhre als Eingangsverstärker in Radaranlagen ist die Rauschzahl der Wanderfeldröhre, denn davon wird die Empfindlichkeit des gesamten Empfängers und damit die Reichweite der Radarstation bestimmt. Die Rauschzahl moderner Eingangswanderfeldröhren liegt bei 3 ... 10 dB. Hauptursachen des Rauschens sind:

- Schroteffekt (wie bei den Elektronenröhren);
- Stromverteilungseffekt (wie bei den Mehrgitterröhren);
- ungleichmäßiger Elektronenaustritt aus der Kathode.

Die Rauschzahl ist abhängig von der Größe der meisten Speisespannungen der Wanderfeldröhre. Sind die Spannungen an den Elektroden z.B. um 5% geringer als die Optimalwerte, so verdoppelt sich etwa die Rauschzahl.

Da eine Anpassung der Wanderfeldröhre nicht über das gesamte Frequenzband gewährleistet werden kann, kann es also trotzdem zu Reflektionen zwischen Eingang und Ausgang der Wanderfeldröhre kommen. Um die Gefahr einer Selbsterregung (Schwingen) zu verringern, wird die Wendel zusätzlich bedämpft. Diese Dämpfung wird entweder als:

- konzentrierte Dämpfung (Grafitbelag auf der Wendel oder auf der Wendelhalterung wie in der Abbildung 22 gezeigt) oder als
- kontinuierliche Dämpfung (Wendel aus schlecht leitendem Material, z.B. Eisen, Nickel) realisiert.

Carzinotron

Das Carzinotron ist eine „Rückwärtswellenröhre“. Während in einer Wanderfeldröhre die Richtung der Welle mit dem Elektronenstrahl läuft, ist die Richtung im Carzinotron umgekehrt.

Es ist eine Röhre zur Schwingungserzeugung, die den Vorteil der elektronischen Abstimbarkeit über einen großen Frequenzbereich besitzt. Wenn Welle und Elektronenstrahl einander entgegenlaufen, dann wirkt der Elektronenstrahl als Rückkopplungselement, indem er die induzierten Geschwindigkeitsänderungen vom Ausgang auf den Eingang rückkoppelt.

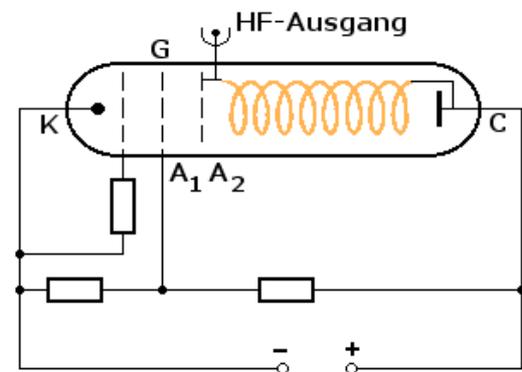


Abb. 27: Schaltungsbeispiel mit Carzinotron

Schwingungen werden dann erzeugt, wenn zwischen Elektronengeschwindigkeit und Phasengeschwindigkeit der Welle auf der Verzögerungsleitung eine Phasendispersion besteht. Durch Änderung der Elektronengeschwindigkeit (Änderung der Anodenspannung!) kann die Frequenz der erzeugten Schwingungen geändert werden.

In der technischen Ausführung besteht ein Carzinotron aus folgenden Teilen:

- der Elektronenkanone, die meist als Tetroden- Strahlensystem ausgeführt ist,
- der Verzögerungsleitung mit Auskopplung,
- der Montageeinheit mit Magnet und Sockel.

Zur Vermeidung unerwünschter Schwingungen ist das Ende der Verzögerungsleitung durch Aufdampfen einer dünnen Eisenschicht bedämpft. Die mit diesen Röhren erzielbaren Leistungen liegen zwischen 50 und 1000 mW.

Wissenstest

1. Welche dieser Röhren aus einem Radarsender sind Laufzeitröhren?
 - Thyratron*
 - Wanderfeldröhre*
 - Platinotron*

2. Wie bei allen Laufzeitröhren kann man auch bei einem Magnetron die elektronischen Vorgänge bei der Erzeugung höchstfrequenter Schwingungen in vier Phasen unterteilen. Welches sind diese vier Phasen?
 - 1.
 - 2.
 - 3.
 - 4.

3. Bei einem Luftverteidigungsradargerät mit einem Amplitronsender mit einer Sendeleistung von 4 Megawatt Impulsleistung hat die Amplitron- Endstufe eine Verstärkung von 12 dB. Die Amplitron- Endstufe erhält durch einen Defekt in der Stromversorgung des Modulators keine Anodenspannung mehr. Was geschieht nun?
 - Das Radargerät ist ausgefallen und kann nicht mehr weiterarbeiten.*
 - Die Sendeleistung verringert sich auf ein Sechzehntel.*
 - Die Reichweite des Radars verringert sich auf die Hälfte.*