

Klystron

Klystrone sind Hochleistungsröhren für den Mikrowellen-Bereich. Es handelt sich um laufzeitgesteuerte Elektronenröhren, die in Radargeräten als Verstärker oder Oszillatoren eingesetzt werden. Ein Klystron nutzt die kinetische Energie von Elektronen, um eine hochfrequente Schwingung zu verstärken. Klystrone nutzen den Laufzeit-Effekt, indem sie die Geschwindigkeit der Elektronen im Elektronenstrahl variieren. Ein Magnetfeld wird nur zur Fokussierung des Elektronenstrahls genutzt. Dieses ist parallel zum Elektronenstrahl ausgerichtet, somit gehört das Klystron zu den Linearstrahlröhren. Ein Klystron hat eine oder mehrere Hohlraumresonatoren, die um die Längsachse der Röhre herum angeordnet sind und die das statische elektrische Feld zusätzlich modulieren. Anhand der Anzahl der Hohlraumresonatoren werden Klystrone in Zweikammer-Klystrone, Mehrkammer-Klystrone und Reflexklystrone eingeteilt.

Der Verstärkungsfaktor von als Verstärker eingesetzten Klystronen kann sehr hoch sein (manchmal mehr als 60 dB) bei möglichen Ausgangsleistungen von bis zu mehreren zehn Megawatt. Aber Klystrone haben nur eine begrenzte Bandbreite (oft weniger als 2%), da sie resonante Bauteile nutzen müssen. Sie benötigen hohe Versorgungsspannungen im Bereich von Hunderten von Kilovolt. Wie bei Vakuumröhren zu erwarten ist, haben sie eine durchschnittliche Ausfallwahrscheinlichkeit nach 5 000 bis 75 000 Betriebsstunden.

Zweikammer-Klystron

Das Zweikammer-Klystron ist eine noch weit verbreitete Verstärkerröhre. Es kann auch als Oszillator genutzt werden, wenn die Hochfrequenz aus dem zweiten Hohlraumresonator mit einem Koaxialkabel oder Hohlleiter auf den ersten Resonator zurückgeführt wird. Diese Verbindung muss jedoch eine genau definierte Verzögerung aufweisen, damit die Schwingungen in den Hohlraumresonatoren zueinander in Phase sind und so eine positive Rückkopplung entsteht. Ein solcher Klystron-Oszillator ist jedoch unzuweckmäßig im Gebrauch, da bei einer Änderung der Frequenz die Resonanzfrequenz jedes Hohlraumresonators und auch die Phasenverschiebung der Rückkopplungsleitung mechanisch nachgestimmt werden müssen. Für solche Fälle ist ein Reflexklystron besser geeignet.

Aufbau

Die mechanische Größe eines Klystrons wird durch die Größe der Hohlraumresonatoren bestimmt. Ein Zweikammer-Klystron besteht aus einer Elektronenkanone, zwei Hohlraumresonatoren, einem Magnetsystem zum Fokussieren des Elektronenstrahls und einem Kollektor. Um hohe Leistungen zu erreichen, muss diese Elektronenkanone eine große Anzahl von Elektronen emittieren. Ein Zweikammer-Klystron verwendet zwei Hohlraumresonatoren um die Achse der Röhre, die das elektrische Feld modulieren. In der Mitte dieser Hohlräume befindet sich ein Gitter oder ein Lochraster, das den Elektronenstrahl passieren lässt. Der erste Hohlraum mit der Einkopplung des zu verstärkenden Signals wird als Steuerresonator bezeichnet (engl.:

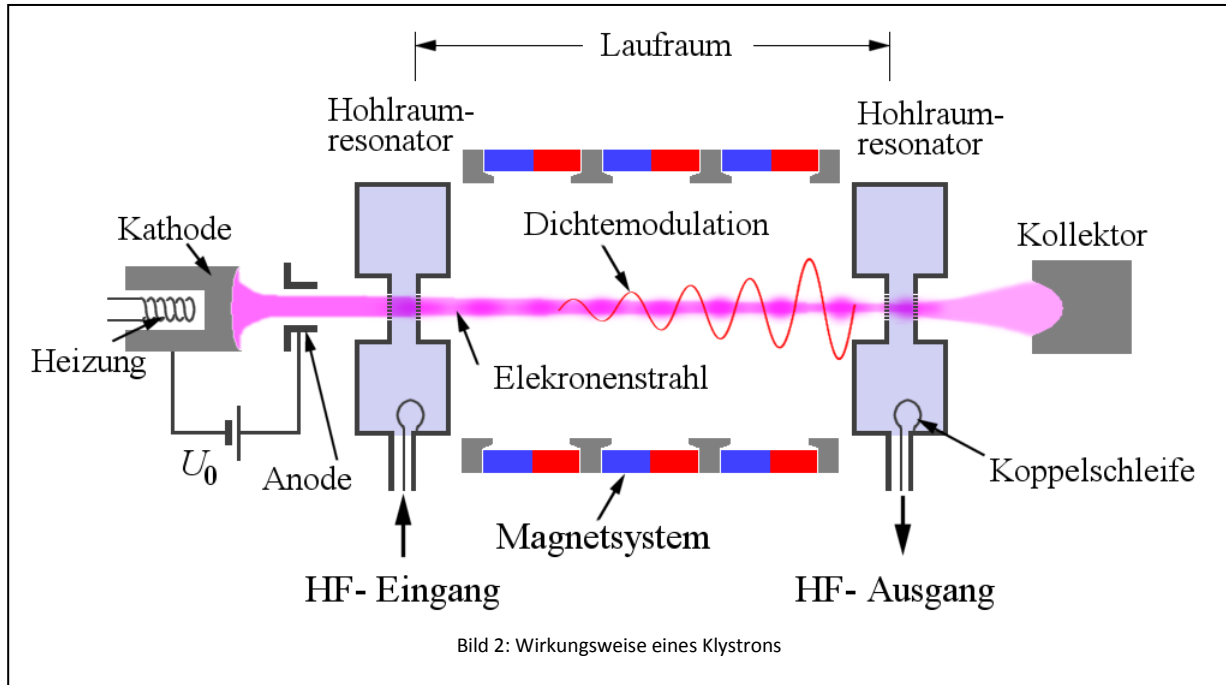


Bild 1: Klystron Typ NSN 662-5861 der Fa. English Electric Valve Co Ltd., mit freundlicher Genehmigung von [OSTRON](#), Schwerin)

Inhaltsverzeichnis „Klystron“

1. [Zweikammer-Klystron](#)
 - [Aufbau](#)
 - [Funktionsbeschreibung](#)
 - [Technische Daten](#)
2. [Mehrkammer-Klystron](#)
3. [Multibeam-Klystron](#)
4. [Sheet-beam Klystron](#)
5. [Reflexklystron](#)
6. [Anwendungen](#)
7. [Geschichte des Klystrons](#)

„buncher“). Der zweite Hohlraum mit seiner Auskopplung wird Verstärkungsresonator genannt (engl.: „catcher“). Der Bereich zwischen den Hohlraumresonatoren wird als „Trifraum“ oder „Laufraum“ bezeichnet. Der Kollektor nimmt die verbliebene Energie des Elektronenstrahls auf und wandelt sie in Wärme um.



Funktionsbeschreibung

Der Kollektor ist auf Massepotenzial geklemmt. Demgegenüber haben die Kathode und die Anode eine sogenannte Strahlspannung von bis zu mehreren hundert Kilovolt, weswegen der Kollektor eine Röntgenstrahlung erzeugt und abgeschirmt werden muss. Die von der Kathode emittierten Elektronen werden zunächst durch eine hohe Gleichspannung (mehrere hundert Volt Spannungsdifferenz) zwischen Anode und Kathode beschleunigt, bevor sie mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in den Bereich des Steuerresonators gelangen.

Das im Steuerresonator eingekoppelte Signal erzeugt ein zusätzliches lokales elektrisches Feld. Die Richtung des elektrischen Feldes ändert sich mit der Frequenz des Signals im Steuerresonator. Diese Veränderungen beschleunigen und verzögern abwechselnd die Elektronen des Elektronenstrahls. Die Elektronen, die den Steuerresonator an Nullpunkten der Signalspannung passieren, passieren ihn mit unveränderter Geschwindigkeit; diejenigen, die ihn während der positiven Halbwellen der Signalspannung passieren, erfahren eine Beschleunigung; diejenigen, die ihn während der negativen Halbwellen der Signalspannung passieren, werden abgebremst. Diese Änderung der Elektronengeschwindigkeit im Trifraum wird als Geschwindigkeitsmodulation bezeichnet. Die schnelleren Elektronen holen die langsameren Elektronen ein. An dieser Stelle häufen sich die Elektronen und ergeben eine Dichtemodulation.

Die Funktion des zweiten Hohlraumresonators, dem Verstärkerresonator, besteht darin, die kinetische Energie aus dem Elektronenstrahl aufzunehmen. Der Verstärkerresonator wird entlang der Achse der Elektronenstrahls an einer Stelle platziert, an der die Dichtemodulation ein Maximum hat. Die Position wird durch die Laufzeit der Bündel bei der Eigenresonanzfrequenz der Hohlräume bestimmt. Die Elektronen verlassen dann mit reduzierter Geschwindigkeit den

Verstärkungsresonator und erreichen den Kollektor. Im Kollektor wird die restliche Energie dieser Elektronen in Wärmeenergie umgewandelt. Der Kollektor hat oft einen sehr komplizierten inneren Aufbau um zu gewährleisten, dass keine Elektronen in den Laufraum zurück reflektiert werden können.

Technische Daten

Der Wirkungsgrad eines Zweikammer-Klystron ergibt sich aus der Verhältnis der Leistung die als (Gleichspannungs-) Stromversorgung dem Klystron zugeführt wird und der abgegebenen Hochfrequenzleistung. Sie liegt bei einem Zweikammer-Klystron bei etwa 40%. Verluste entstehen vor allem durch eine nicht ideale Bündelung der Elektronendichte sowie der restlichen Energie der Elektronen, die im Kollektor in Wärme umgesetzt wird. Die durchschnittliche Ausgangsleistung kann bis zu 500 kW und die gepulste Leistung bis zu 30 MW bei 10 GHz betragen. Als Leistungsverstärkung werden bis zu 30 dB erreicht.

Mehrkammer-Klystron

Die Verstärkung, Leistung und der Wirkungsgrad von Klystronen können durch weitere Hohlraumresonatoren zwischen den Eingangs- und Ausgangsresonator eines Zweikammer-Klystrons erheblich verbessert werden. Zusätzliche Hohlraumresonatoren dienen der zusätzlichen

Geschwindigkeitsmodulation des Elektronenstrahls und erzeugen eine Erhöhung der Ausgangsleistung. Die Elektronenpakete im Elektronenstrahl werden dadurch stärker abgegrenzt. Mehrkammer-Klystrone können verwendet werden, um entweder die Verstärkung oder die Bandbreite der Röhre zu erhöhen. Sie werden oft mit leicht verstimmt Hohlraumresonatoren betrieben, um dadurch (zwar bei reduzierter Verstärkung) eine wesentlich größere Bandbreite von bis zu 8% zu erreichen.

Ein neues Konzept Kladystron (abgeleitet von: **adiabatisches Klystron**) bezeichnet Hochleistungs-klystrone mit einer großen Anzahl von Hohlraumresonatoren (mindestens doppelt so viele wie bei einem herkömmlichen Klystron). Kladystrone werden nicht in Radargeräten verwendet.

Multibeam-Klystron

Multibeam-Klystrone sind Klystrone mit mehreren Elektronenstrahlen, einfach ausgedrückt, eine Anzahl von Klystronen mit je einem einzelnen Elektronenstrahl parallel betrieben, die gemeinsame Ein- und Ausgangsresonatoren verwenden. Die anderen Hohlraumresonatoren und Fokussiersysteme können entweder gemeinsam oder getrennt sein. Multibeam-Klystrone sind in der Lage, höhere Hochfrequenzleistung bei niedrigeren Gleichspannungen (typisch 50 bis 80%) zu liefern. Sie sind wegen der deswegen geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit der Elektronen auch kürzer (typisch 30 bis 60%). Ein weiterer Vorteil von Multibeam-Klystronen ist, dass sie eine größere Bandbreite haben. Multibeam-Klystron werden entweder mit Magnetfeldern oder elektrostatisch fokussiert.

Multibeam-Klystrone erreichen einen Wirkungsgrad von 60 bis 80%. Sie werden vor allem in der Forschung in Teilchenbeschleunigern eingesetzt. (Im Zusammenhang mit dem Begriff Multibeam-Klystron werden Klystrone mit nur einem Elektronenstrahl als *mono-beam klystron* bezeichnet.)

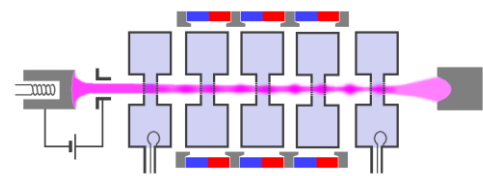


Bild 3: Aufbau eines Mehrkammer-Klystron

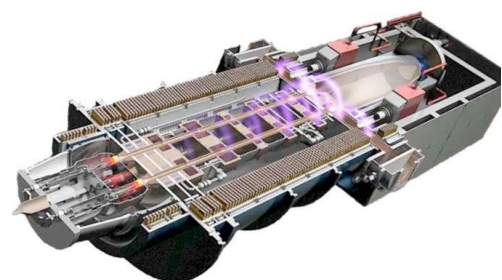


Bild 4: Schnittmodell eines Multibeam-Klystrons mit 8 Elektronenstrahlquellen von TESLA

Sheet-beam Klystron

In den bisher betrachteten Klystronen war der Querschnitt des Elektronenstrahls rund. In einem Sheet-beam Klystron ist er dagegen flach. Das wird durch eine spezielle Form der Elektronenkanone erreicht.

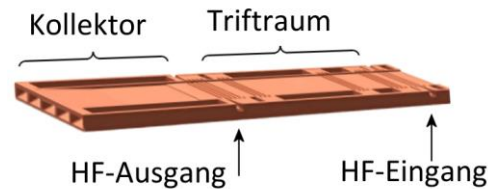


Bild 5: in einen Strangguss gefräste Halbschale für ein Sheet-beam Klystron

Sheet-beam Klystrone nutzen einen Elektronenstrahl mit einer wesentlich geringeren Stromdichte. Da die Belastung der Kathode viel geringer ist, ist auch mit einer längeren Lebensdauer zu rechnen. Sie können auch als Multi-beam-Klystron ausgeführt werden, z.B. indem in einer Röhre zwei flache Elektronenstrahlen übereinander zu einem Double Sheet-Beam Klystron (DSBK) angeordnet werden.

Die Herstellung eines Sheet-beam Klystrons ist viel einfacher und erfordert wesentlich weniger Einzelteile. Alle Hohlraumresonatoren und der Kollektor werden in einen flachen, aus massivem Material bestehenden Strang eingearbeitet. Dieser bildet, mit einem dazu gespiegelt hergestellten Strang übereinandergelegt, das komplette Resonanzgebilde des Klystrons. Eine wesentlich effektivere Kühlung als in klassischen Klystronen ist dadurch möglich.

Reflexklystron

Eine weitere Laufzeitröhre, die häufig als Hochfrequenzoszillator verwendet wird, ist das Reflexklystron. An Stelle der bei Mehrkammerklystronen 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.

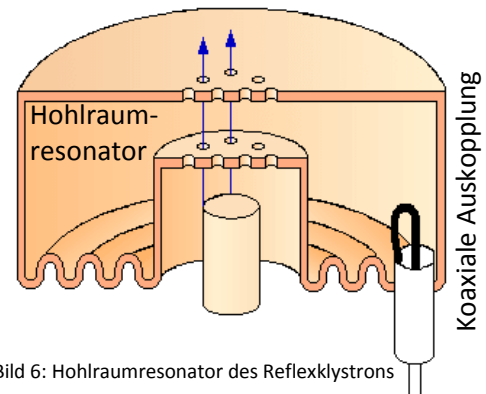


Bild 6: Hohlraumresonator des Reflexklystrons

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 die die Elektronenpakete zum Hohlraumresonator reflektiert.

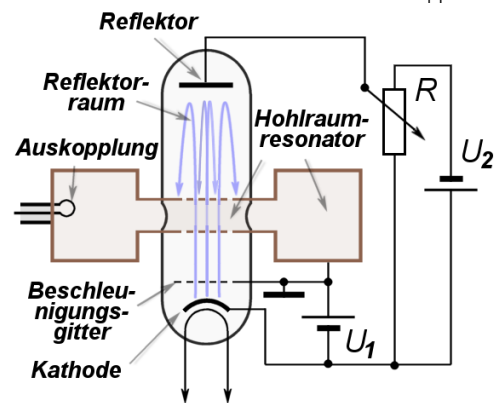


Bild 7: Schaltung mit Reflexklystron

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

Anwendungen

Klystrone haben ein weites Anwendungsgebiet in der Hochfrequenztechnik, da die mit Klystronen erzielbaren Leistungen mit Halbleiterbauteilen nicht erreicht werden können. Deshalb wird die hohe Ausfallwahrscheinlichkeit von Vakuumröhren in Kauf genommen.

- Klystrone werden bevorzugt eingesetzt in Wetterradargeräten, da dort der Einsatz von intrapulsmodulierten Sendern wegen der zeitlichen Nebenkeulen problematisch ist.
- Klystrone werden genutzt in Teilchenbeschleunigern in der Forschung. Elementarteilchen können mittels hochfrequenter Felder beschleunigt werden. Dazu werden allerdings riesige Hochfrequenz-Leistungen benötigt in der Größenordnung von dem Einsatz von 250 Klystronen, die jeweils im Megawattbereich arbeiten.
- Große Mehrkammer-Klystrone werden in den Sendern von terrestrischen Fernsehsendern im UHF-Bereich verwendet.
- Kleinere Reflexklystrone (wie im Bild 8 gezeigt) wurden in Messverstärkern und Empfängern als stabile Local-Oszillatoren eingesetzt, da sie in kleinem Bereich in der Frequenz abstimbar sein können.
- Anwendungen von Klystronen im W-Band sind derzeit Gegenstand in der labormäßigen Forschung. Die hohe Präzision der Hohlraumresonatoren im Bereich von 2 bis 20 Mikrometern erfordert ein neues Verfahren der Fertigung. Dieses neue Verfahren wird LIGA (Lithographie, Galvanik und Abformung) genannt und ist ein Fotolithografie-Verfahren, das sonst in der Halbleiterindustrie genutzt wird.



Bild 8: Reflexklystron K-806 aus einem Messgerät

Historischer Überblick: Erfindung des Klystrons

1935	Die Idee einer laufzeitgesteuerten Röhre als Mikrowellenoszillator wurde erstmals von Agnessa Arsenjewa-Heil und Oskar Heil in einem in Deutschland veröffentlichten Beitrag beschrieben.
1935	William Webster Hansen, Honorarprofessor für Physik an der Stanford Universität (USA), erfand den Hohlraumresonator. Er nannte seine Erfindung <i>rumbatron</i> .
1937	Unter Zuhilfenahme dieser Hohlraumresonatoren entwickelten die Brüder Russell und Sigurd Varian ein erfolgreiches Modell eines Zweikammer-Klystrons als Oszillator. Das war die erste moderne Röhre für den Mikrowellenbereich. Die Entwicklung wurde Klystron genannt, in Anlehnung an das altgriechische Verb κλύζω (klyzo), welches das Ankommen von Wellen am Strand beschreibt. Leider war zu damaliger Zeit die erzielbare Ausgangsleistung gering, so trat diese Röhre als Senderöhre gegenüber dem Magnetron vorerst in den Hintergrund.
1938	Vadim F. Kovalenko (Ukraine) entwickelte das Flachstrahl-Klystron (<i>Sheet-Beam Klystron</i>)
1939	Oskar Heil komplettierte seinen Hochfrequenzgenerator in der Firma Standard-Lorentz in Berlin. Diese wurde nach ihrem Erfinder „Heil-Röhre“ genannt und wurde in Radargeräten während des 2. Weltkrieges eingesetzt.
1940	R.V. Sutton (England) und N.D. Devyatkov mit V.F. Kovalenko (UdSSR) erfanden unabhängig voneinander das Reflexklystron.
1941	Das Reflexklystron wurde in Superheterodyn-Empfängern von Radargeräten eingesetzt.
1948	In Stanford wurde ein Mehrkammerklystron entwickelt mit drei Hohlraumresonatoren, das eine Ausgangsimpulsleistung von 30 MW bei 1µs Impulsdauer erreichte. Jetzt begann der Durchbruch von Hochleistungsklystronen in Radargeräten.
1984	Das Klystron mit der bisher höchsten Impulsleistung wurde gebaut. Es wurde für einen Teilchenbeschleuniger im Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) entwickelt und stellte 150 MW Impulsleistung im S-Band bereit.

Quelle: [http://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequenzmodulierte Dauerstrichradargeräte.de.html](http://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequenzmodulierte_Dauerstrichradargeräte.de.html)

Autor: Dipl.-Ing. (FH) Christian Wolff

Stand: 29.05.2019