

Elektronenröhre

Eine **Elektronenröhre** ist ein elektronisches Bauelement, das aus einem evakuierten oder gasgefüllten Kolben aus Glas, Stahl oder Keramik besteht, in den mehrere Elektroden, mindestens eine beheizte Kathode und eine Anode, eingelassen und von außen kontaktiert sind. Sie dient zur Gleichrichtung, Erzeugung, Verstärkung oder zur Modulation von elektrischen Signalen.

Im Inneren der Röhre treten Elektronen aus einer Glühkathode als freie Elektronen aus (Elektronenemission) und fliegen unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes zu einer Anode. Durch ein Steuergitter zwischen Kathode und Anode lässt sich der Strom beeinflussen, denn durch unterschiedliche Gitterspannungen bzw. elektrische Felder kann der Elektronenfluss gehemmt oder verstärkt werden. Darauf beruht die Verwendung der Elektronenröhre als Verstärkerröhre oder Oszillator.

Elektronenröhren waren bis zur Einführung des Transistors die einzigen schnellen aktiven (steuerbaren) Bauelemente der Elektronik. Bis dahin standen als aktiver Vierpol lediglich Magnetverstärker und Relais zur Verfügung; wobei letztere nur zwei Zustände (ein/aus) kannten und deren Schaltgeschwindigkeit durch die bewegte Masse begrenzt war. Elektronen weisen eine weitaus geringere Masse auf, daher können mit ihrer Hilfe weitaus höhere Frequenzen verarbeitet werden.

Je nach Röhrentyp ist ein Gas niedrigen Drucks enthalten, das eine zusätzliche Ionenleitung bewirkt und die Wirkung der Raumladung kompensiert.

Auch heute sind in vielen Gebieten noch Röhren im Einsatz. Starke Sendeanlagen werden mit Elektronenröhren betrieben, Magnetrons werden in Radaranlagen und Mikrowellengeräten eingesetzt. Ältere Fernsehgeräte und Computermonitore verwenden eine Kathodenstrahlröhre. Hi-Fi-Verstärker werden mit ihnen bestückt und betrieben. Auch viele E-Gitarristen schätzen den charakteristischen Klang eines Röhrenverstärkers. Vakuum-Fluoreszenzanzeigen dienen zur optischen Signalisierung von Gerätezuständen von Geräten wie CD-Playern, Videorecordern, usw., werden aber immer weiter durch Flüssigkristallbildschirme und organische Leuchtdioden verdrängt.

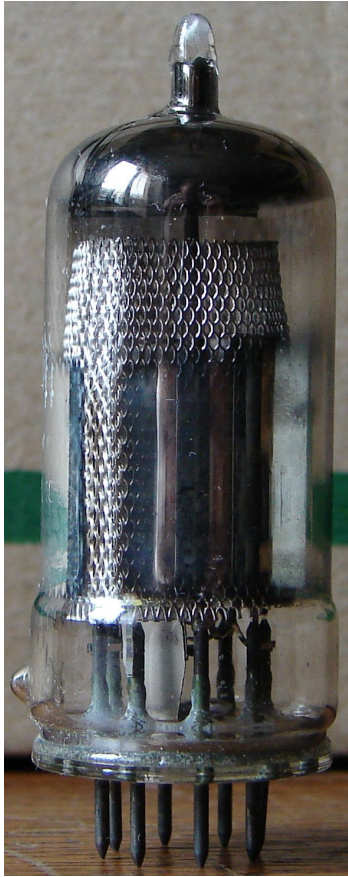
Einige Röhrentypen mit entsprechender Nachfrage wie zum Beispiel 6L6 oder EL34 werden heute noch als Neuware produziert.



Radoröhren: ECC85, EL84 und EABC80



Eine Auswahl an Elektronenröhren



Die Rimlockpentode EF42



6L6GC-Röhren: links General Electric zirka 1960, rechts Svetlana Electron Devices, Russland zirka 2000

Geschichte

Thomas Alva Edison entdeckte die Glühemission bei Versuchen mit Glühlampen, die eine zusätzliche Elektrode im Glaskörper enthielten. Dabei erkannte er, dass der Elektronenfluss zwischen Glühfaden und Elektrode mit dem Heizstrom zunimmt. Diese Gesetzmäßigkeit ist *Edison-Richardson-Effekt* benannt worden. Die erste elektronische Schaltung, die diesen Zusammenhang ausnutzte, war ein Gleichspannungs-Spannungsregler, den Edison 1883 patentierte.^[1]

Der US-Amerikaner Peter Cooper Hewitt patentierte im Jahre 1902 einen Quecksilberdampfgleichrichter für Drehstrom.^[2] Die Gasentladungs-Röhren wurden später zum Thyatron weiterentwickelt und beherrschten bis Anfang der 1970er Jahre die Leistungselektronik.



Telefunken Triode RE144 der 1920er/30er Jahre

Die Vakuum-Diode wurde 1904 vom englischen Physiker John Ambrose Fleming patentiert.^[3] Auf der Suche nach einem verbesserten Detektor für Radiowellen entdeckte Fleming, dass der Edison-Richardson-Effekt zur Detektion genutzt werden konnte.

Der österreichische Physiker Robert von Lieben^[4] entwickelte eine quecksilberdampfgefüllte Verstärkerröhre mit zwei Elektroden und elektrostatischer oder elektromagnetischer Beeinflussung von außen – die sogenannte Liebenröhre – und meldete sie am 4. März 1906 beim Kaiserlichen Patentamt des Deutschen Reiches als Kathodenstrahlrelais zum Patent an.^[5] ^[6] Lieben, zusammen mit Eugen Reiß und Siegmund Strauß, deren vorrangiges Ziel ein Telefonverstärker war, formuliert in seinem Patent explizit die Verstärkung des elektrischen Signals als Erfindungszweck.

Unabhängig von Lieben entwickelte der US-amerikanische Erfinder Lee de Forest die Audionröhre und meldete diese gasgefüllte Röhre, die über eine zusätzliche dritte Elektrode als Steuergitter verfügte, am 25. Oktober 1906 als Patent^[7] an. Dies zog einen jahrelangen Rechtsstreit zwischen Lieben und De Forest nach sich.

De Forest stellte der Firma Bell Telephone Laboratories im Oktober 1912 einen Röhrenverstärker vor. Innerhalb eines Jahres wurde diese Technologie markttauglich gemacht, indem es gelang, in den Röhren ein Hochvakuum zu erzeugen. Harold D. Arnold von Western Electric benutzte eine Vakuumpumpe nach Wolfgang Gaede. Irving Langmuir von General Electric benutzte zusätzlich noch eine Kühlfalle mit flüssiger Luft. 1913 wurde die Hochvakuum-Triode Type A bei Western Electric gebaut.^[8] *Pliotron* war der Name den General Electric für seine ersten Hochvakuum-Trioden wählte.^[9] Die ersten Röhrenverstärker wurden Ende 1913 auf Telefonverbindungen zwischen New York und Baltimore und ab Ende 1914 zur Verstärkung der Signale auf dem Atlantik-Seekabel eingesetzt.

1914 patentierte das Lieben-Konsortium eine Quecksilberdampf gefüllte Röhre mit Steuergitter und Wärmeschutzmantel.^[10] Trotz dieser Bemühungen um gasgefüllte Röhren setzten sich die Vakuumröhren durch.

Bei Siemens & Halske in Deutschland entwickelte Walter Schottky 1916 die Tetrode (Schirmgitterröhre).^[11] Die frühen Tetroden wie die SSI von 1917 hatten eine bessere Verstärkung als Trioden, waren aber nur für Niederfrequenz-Verstärker geeignet.

Henry Joseph Round entwickelte 1916 bei der Marconi Company in England die Hochfrequenztriode V24. HF-Verstärker zur Funkpeilung wurden von britischer Seite bei der Skagerrakschlacht eingesetzt.^[12]

Hendrik van der Bijl aus Südafrika entwickelte 1919 die erste Miniaturröhre, die ab 1923 von Western Electric als 215A vertrieben wurde. RCA vertrieb ab 1934 die Eichelröhre (acorn tube) 955 als erste Allglas-Röhre. Die Allglas-Bauform erlaubte den Betrieb bis in den UHF-Bereich, was für Radaranlagen wichtig war. Weitere Miniaturisierung führte 1948 zur bleistiftdünnen Subminiaturröhre DF70 für Hörgeräte.

Die französische Firma Métal produzierte ab 1924 die Doppelgitter-Röhre (Bigrille) RM als Mischröhre die besonders in Radioempfängern der Firma Eugène Ducretet (heute Thales Group) eingesetzt wurden.^[13] Die Entwicklung der Mischröhre für die Frequenzumsetzung von Radiofrequenz auf Zwischenfrequenz im Superhet dauerte am längsten. Erst die ECH81 von 1952 erfüllte alle Anforderungen im gewünschten Maße.

Bei Philips in Holland entwickelte Bernard Tellegen 1926 die Pentode zur Serienreife. Die NF-Endpentode B443 war ab 1927 lieferbar. Die Pentode wurde zum Standard-Verstärkerelement der Röhren-Ära. Trioden in Kaskode-Schaltung wurden allerdings nach einigen Experimenten mit Pentoden in der Eingangsstufe von UKW- und Fernsehempfängern wiederum benutzt, da diese kein Stromverteilungsrauschen aufweisen. Pentoden und Beam-Power-Tetroden wurden in der Ausgangsstufe von Niederfrequenz-Verstärkern eingesetzt.

Manfred von Ardenne entwickelte 1926 gemeinsam mit Siegmund Loewe (Patentinhaber) in Deutschland eine der ersten Mehrsystemröhren (die sogenannte Dreifachröhre, Type 3NF), in der außer drei Triodensystemen auch vier Widerstände und zwei Kondensatoren untergebracht waren.^[14] Sie stellte somit eine Art integrierten Schaltkreis dar und wurde im Radioempfänger Loewe OE333 eingesetzt.

In Rundfunkempfängern, Verstärkern und Fernsehern wurden ab den späten 1950er Jahren die Elektronenröhren immer häufiger durch Transistoren ersetzt. Dieser Übergang erfolgte aber sehr allmählich, so dass einige Geräte der Unterhaltungselektronik bis in die 1970er Jahre zumindest teilweise mit Röhren ausgestattet blieben. Die Bildröhre von Fernsehern und Computermonitoren wird erst seit zirka dem Jahr 2000 vermehrt durch Geräte mit Plasma- und LCD-Flachbildschirme abgelöst.

Aufgrund ihrer Resistenz gegen kosmische Strahlung und den EMP währte die Entwicklung von Verstärkerröhren auf dem Gebiet der Raumfahrt und des Militärs bis in die 1970er Jahre, besonders in der UdSSR. Ein MiG-25-Jet, der 1976 von einem Deserteur nach Japan geflogen wurde, verfügte über zahlreiche Subminiatur-Röhren.

Mechanischer Aufbau

Die klassische Hochvakuum-Elektronenröhre besteht aus einem geschlossenen Kolben, in dem das Elektrodensystem eingebaut ist. Durchführungsdrähte stellen die elektrische Verbindung mit der Schaltung her.

Die Stoffe der Einzelteile müssen in einer hohen Reinheit vorliegen. Je nach Kombination können schon Spuren von Fremdstoffen die Lebensdauer einer fertigen Röhre nachhaltig verschlechtern. Während der Formgebung werden immer wieder Reinigungsschritte durchgeführt, sei es durch mechanische Bearbeitung, Glühen, Oxidieren oder Lösen der unerwünschten Oberflächenschichten.

Bei der Herstellung der Einzelteile als auch beim Zusammenbau ist Sauberkeit unabdingbar. Fett und Schweiß der Hand, Staub, Fusseln der Umgebung wirken sich bei späteren Herstellungsschritten langfristig vakuumverschlechternd aus oder es bilden sich durch die Erhitzung chemische Verbindungen, die später die Emissionsfähigkeit der Kathode beeinträchtigen.

Einzelheiten zu den meist konzentrisch aufgebauten Röhrensystemen finden sich in den Fachabschnitten zu den jeweiligen Elektroden: Kathode, Anode bzw. weitere Elektroden.

Äußerer Aufbau

Anfangszeiten

In der Anfangszeit der Röhren bestand der Kolben ausschließlich aus Glas. Das waagrecht liegende Elektrodensystem wurde an stabile Haltedrähte in einem Quetschfuß angeschweißt. Diese Haltedrähte wurden mit Durchführungsdrähten durch die Quetschverbindung geführt und schlussendlich in einen Sockel aus Bakelit eingefädelt und mit dessen Kontakten verlötet. Der Sockel wurde mit dem Glaskolben verkittet. Dieser Aufbau war eine direkte Weiterentwicklung der Glühlampenfabrikation und ermöglichte einen hinreichend stabilen Aufbau des Systems.

Die besondere Herausforderung besteht in einer vakuumdichten Verbindung von Durchführungsdraht und Kolben. Im Laufe der Zeit wurden hier Verbundmetalldrähte entwickelt, die beim Schmelzvorgang durch die Glasmasse gut benetzt werden und somit keine nennenswerten Lücken für Diffusion von Gasmolekülen hinterlassen. Auch die Glasgemische wurden weiterentwickelt, bis sich die Wärmeausdehnung von Anschlussdraht und Glaskolben nur noch unerheblich unterschieden.

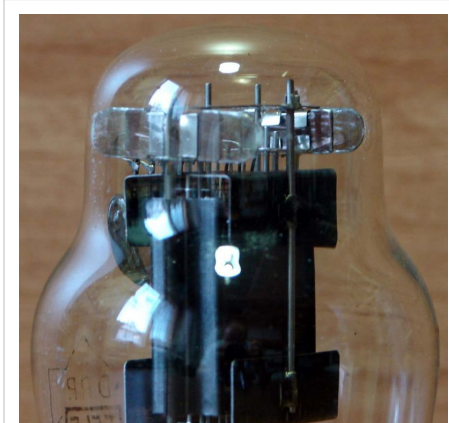
Im Laufe der Zeit wurde die freitragende Montage aufgegeben, da die Elektroden im Röhrensystem sehr empfänglich für Mikrofonie waren. Stattdessen wurde der *Domkolben* etabliert. Dessen Höhe war der Höhe des jetzt senkrecht aufgebauten Elektrodensystems genau angepasst; an der Oberseite des Systemaufbaus waren Glimmerflügel angebracht, die seitlich an die Kolbenwand drückten und somit das System schwingungsarm im Kolben fixierten.

Durch diesen Quetschfußaufbau ergaben sich vergleichsweise lange Anschlussdrähte. Deren Eigeninduktivität sowie Kapazitäten durch die Parallelführung der Drähte in den Kolben hinein verweherten diesen Röhren einen sinnvollen Einsatz im UKW-Frequenzbereich und darüber. Eine weitgehende Entkopplung des Gitteranschlusses über eine am Kolbenkopf angebrachte Anschlusskappe verkomplizierte die Fertigung der Röhren, ermöglichte aber auch höhere Verstärkungen.

Parallel zum Glaskolben wurden auch Röhren mit Stahlkolben gebaut.

Moderner Aufbau

Auch während der Stahlröhrenepoche blieb die Glasröhrenentwicklung nicht stehen. Die weitere Verfeinerung der Herstellungstechniken ermöglichte eine starke Reduzierung der Kolbenabmaße:



Domkolbendetail einer AL1



Quetschfußaufbau einer AL1

Röhre	Höhe	Durchmesser
EF12	58 mm	47 mm
RV12P2000	43 mm	27 mm

Prominentestes Beispiel ist die RV12P2000, die wiederum einen senkrechten Systemaufbau im zylindrischen Glaskolben zeigt. Für die mechanische Fixierung des Systems sorgen an den Ober- und Unterseiten des Systems angebrachte Glimmerplättchen mit gefiedertem Außenrand, die ein seitliches Schwingen im Kolben weitestgehend unterbinden. Als grundlegende Neuerung ist die Benutzung eines Pressglastellers für die Anschlussdurchführungen erwähnenswert, welcher den herkömmlichen, hochfrequenztechnisch problematischen Quetschfuß-Aufbau ablöste.

Unter steigendem Druck der Herstellungskosten bildete sich Anfang der 1940er Jahre auf breiter Front die heute übliche Allglasröhre mit Pressglassockel heraus. Die sehr kurzen Anschlussstifte aus Chromeisen oder Nickel ermöglichen den Einsatzbereich dieser Sockelung bis in den UHF-Bereich hinein und ermöglichen durch stabile Schweißverbindungen mit dem übrigen System eine Lagestabilisierung auch in der Senkrechten. Dieser Aufbau wurde Anfang der 1940er Jahre mit den *Loktalröhren* (Philips, Tungstam) eingeführt^[15] und mit den *Rimlockröhren* (Philips/Valvo, 1947) weiter miniaturisiert.^[16]

Der 1940 eingeführte Miniatursockel^[17] und der 1951/52 etablierte Novalsockel zeigen durch eine Lücke im Stiftkreis ohne externe Hilfsmittel die richtige Ausrichtung in der Fassung an und sind auch heute noch Stand der Technik bei Kleinsignalröhren.

Details zur Sockelung siehe im Abschnitt Anschlüsse.

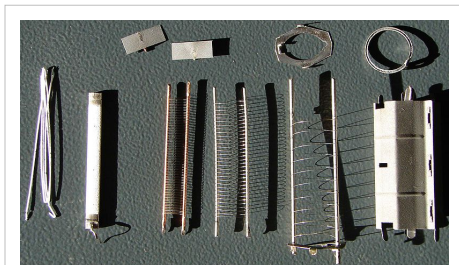
Röhren größerer Leistung weisen wegen besserer Isolation und Materialkostensparnis oftmals einen weniger schwingungsfreien Aufbau auf. So ist bei Senderöhren (und bei Hochspannungsröhren, PD500, DY8...) oftmals die Anode nur durch eine Durchführung durch den Glaskolben fixiert. Durch die generell größeren Elektrodenabstände in diesen Röhren wirkt sich ein eventuell mechanisches Schwingen der Elektroden allerdings nicht vergleichbar stark zu Kleinsignalröhren aus.

Ebenfalls gab es Weiterentwicklungen der Keramiktechnologie, die in den nur noch fingerhutgroßen *Nuvistorröhren* mündete. Zu diesem Zeitpunkt war die Halbleitertechnologie aber schon soweit auf dem Vormarsch, dass diese Typen sich nicht mehr in nennenswertem Umfang verbreiten konnten.

Innerer Aufbau

Das eigentliche Elektrodensystem der Röhre wurde in der Anfangszeit freitragend auf dem Quetschfuß aufgebaut (s. o.). In Einzelfällen wurde über dem Röhrensystem noch eine Glasbrücke eingearbeitet, welche die Röhrenelektroden auch von oben her auf maßhaltigen Sitz sichern sollte.

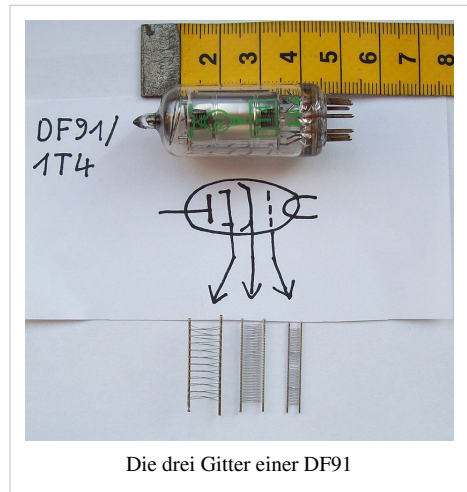
Später ging man bei der Domkolbenbauweise auf einen keramikbrückenbasierten Aufbau über, da die Glasbrücken verlustbehaftet waren, Kapazitätserhöhungen mit sich zogen und die Mikrofonieempfindlichkeit nicht spürbar reduzierten. Die einzelnen Systembestandteile wie Gitter und Kathode werden mit ihren Enden in Aussparungen der Brücken eingeführt und somit gegen seitliches Verrutschen fixiert. Die Keramikbauteile wiesen allerdings eine sehr hohe Neigung zur Sekundärelektronenemission auf, weswegen bald Glimmerplättchen (Muskovit) an Stelle der Keramik traten. Es müssen



Die Einzelteile einer Valvo-EL84

zudem keine thermischen Ausdehnungsfragen der Elektroden beachtet werden, weil Glimmer im Vergleich zu Keramik in geringem Maße elastisch ist. Aus dem gleichen Grund können die Stanzlöcher in den Glimmerplättchen eher knapp bemessen werden, sodass die Elektroden sehr stramm sitzen, was wiederum mechanische Schwingungen (Mikrofonie) unterbindet. Abschließend dient die meist zylindrisch oder kastenförmig ausgebildete Anode als waagerechte Fixierung der Glimmerplättchen zueinander.

Wie sehr die Miniaturisierung in wenigen Jahren fortgeschritten ist, zeigt die folgende Tabelle:



Die drei Gitter einer DF91

	AF7 (1935 ^[18]))	EF12 (1938 ^[19]))
Kathoden- ϕ	1,8 mm	0,8 mm
Abstand k- g_1	0,4 mm	0,23 mm
Abstand g_1 - g_2	1,05 mm	0,55 mm

Einzelheiten zu den meist konzentrisch aufgebauten Röhrensystemen finden sich in den Fachabschnitten zu den jeweiligen Elektroden: Kathode, Anode bzw. weitere Elektroden.

Das komplett zusammengebaute System wird mit den Sockelanschlüssen punktverschweißt und der Kolben danach mit dem Sockelteller bzw. Quetschfuß verschmolzen.

Evakuierung

Die Röhre muss nun ausgepumpt werden. Das Vakuum in der Röhre ist notwendig, damit die Elektronen eine ausreichende freie Weglänge haben und nicht durch Gasmoleküle abgebremst werden. Auf der inneren Wandung vieler Röhren ist zumeist im oberen Teil ein spiegelnder Belag zu sehen, der durch das sogenannte Getter hervorgerufen wird.

Nach dem Abschmelzen der Röhrenkolben wird die Röhre über das Pumpröhrchen an eine Vakuumpumpe angeschlossen. Während des Pumpvorganges beginnt ab einem gewissen Unterdruck in der Röhre das so genannte *Ausheizen*. Dazu wird die Röhre mittels des eigenen Heizfadens erwärmt; gleichzeitig werden über ein leistungsfähiges Hochfrequenzfeld (einige 100 kHz) ähnlich wie in einem Mikrowellenofen gezielt die metallischen Innenteile des Röhrensystems zum Glühen gebracht, während der Getter ausgespart wird. Das Verfahren dient dazu, die durch Adsorption an den Oberflächen sowie durch die Van-der-Waals-Kräfte physikalisch gebundenen Gasmoleküle schneller abzulösen und mit abzupumpen. Damit wird die Evakuierzeit verkürzt, die über die geplante Lebensdauer der Röhre verbleibende Qualität des Vakuums verbessert und somit der Einsatz von Gettermaterial verringert.



Getter-Ring und Getterspiegel in einer Elektronenröhre, Glimmerplättchen zur Elektrodenfixierung

Um die Qualität des Vakuums über die Betriebszeit zu erhalten, ist es unabdingbar, dass die Röhre im Regelbetrieb keine höheren Temperaturen als beim Ausheizen erleiden muss. In den einzelnen Elektrodenteilen können durchaus noch Gasreste vorhanden sein, die sich aber nur bei höheren Temperaturen ausheizen ließen. Die Ausheiztemperatur ist ein Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit (Ausheizdauer- und Temperatur: Leistungsaufnahme der HF-Generatoren und Pumpen) und Vakuumbüte über die Lebensdauer und Beschädigungen (Weichwerden und Verziehen des Kolbenglases oder innerer Elektronen durch zu hohe Temperaturen). Wird die Röhre überlastet, wird die verbliebene Restgasmenge (je nach Dauer und Temperatur teilweise) ausgetrieben und verschlechtert das Vakuum permanent.

Abschließend wird das Pumpröhrchen abgeschmolzen, zurück bleibt der charakteristische Glaszapfen. Als nächster Schritt wird gezielt das Getter „gezündet“, das im Regelbetrieb der Röhre freiwerdende oder von außen eindiffundierende Gase bindet. Hat eine Röhre durch Beschädigung Luft gezogen, reagiert das Getter mit den eingetretenen Gasen. Das wird durch den Schwund der spiegelnden Schicht und dem daraus verbleibenden, milchig weißen Belag offensichtlich. Andere Gettertypen wurden etwa bei Hochspannungsröhren verwendet, welche ohne Glasspiegel direkt mögliche Gasreste binden.

Abschluss der Fertigung

Danach wird die Röhre noch künstlich gealtert, damit ihre Betriebsparameter über den Zeitraum der erwarteten Lebensdauer stabil bleiben. Nach einer abschließenden Qualitätskontrolle werden die Röhren gestempelt, verpackt und versendet.

Funktionsweise

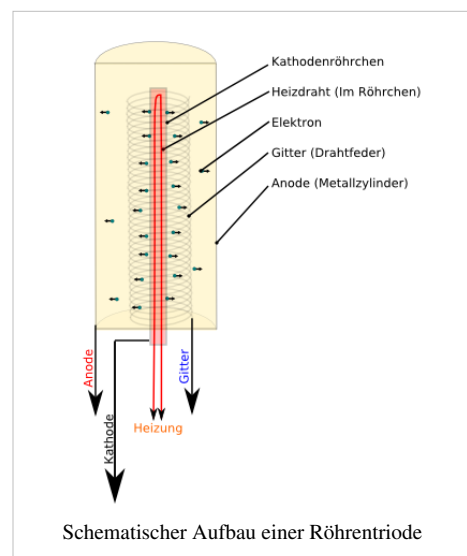
Elektronenstrom

Der Elektronenstrom, der bei Anlegen der Anodenspannung zwischen Kathode und Anode den luftentleerten Raum durchfließt, kann in seiner Richtung und Stärke durch die Einwirkung elektrischer (Steuer Spannungen) und magnetischer Felder (Ablenkspulen) beeinflusst werden. Ein gerichteter Elektronenstrom wird als Elektronenstrahl bezeichnet.

Die Elektronen werden thermisch an der beheizten Kathode emittiert (ausgesandt) und durch ein elektrisches Feld zwischen Anode und Kathode Richtung Anode beschleunigt und ermöglichen die Funktion der Elektronenröhre.

Auch die gleichrichtende Wirkung der Elektronenröhre, insbesondere der Röhrendiode, basiert auf diesem Effekt: Während die Kathode beheizt wird und somit relativ viele Elektronen emittieren kann, kann bei umgekehrter Polung die dazu kühle Anode keinen nennenswerten Elektronenstrom emittieren.

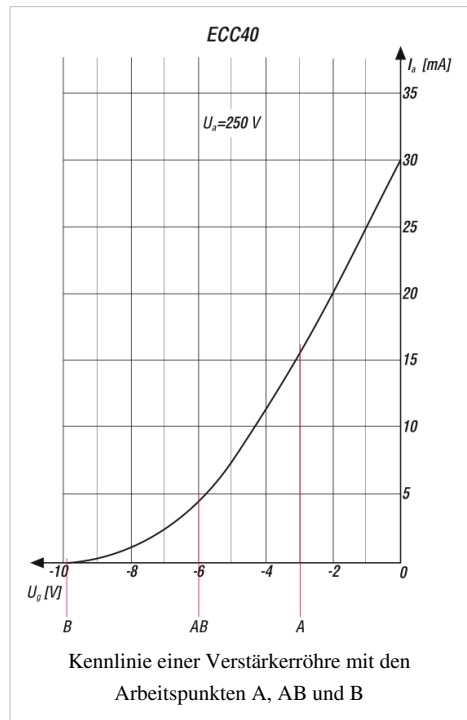
In Sonderfällen wird Feldemission einer spitz geformten Kathode eingesetzt. Meistens möchte man jedoch Feldemission vermeiden, wofür man insbesondere bei hohen Spannungen die Elektrodenkanten abrundet.



Kennlinie der Verstärkerröhre

Die im nebenstehenden Bild dargestellte Kurve stellt den typischen Zusammenhang zwischen Anodenstrom und Gitter-Spannung dar. Die genaue Lage der Kurve hängt vom jeweiligen Röhrentyp und der Anodenspannung ab. Gemeinsam sind folgende Eigenschaften:

- Ab einer gewissen Gitter-Spannung sperrt die Röhre den Elektronenstrom zur Anode; Der Wert der „Abschnürspannung“ ist konstruktionsbedingt und liegt zwischen -300 V bei der 4CX3000A und -2 V bei der EC8020. Bei noch negativeren Spannungen fließt kein Anodenstrom. Zu große negative Spannungen können zu mechanischen Verformungen der feinen Gitterwindungen im Röhrensystem sorgen, was nicht nur die elektrischen Parameter ändert, sondern für Kurzschlüsse sorgen kann.
- Wenn das Steuergitter zu positiv wird, steigt der Anodenstrom nicht unbegrenzt. Dafür gibt es mehrere Gründe:
 - Die Kathode kann – abhängig von Temperatur, Fläche und Material – nicht beliebig viele Elektronen abgeben,
 - Bei positivem Gitter fließt besonders viel Anodenstrom, deshalb fällt am Außenwiderstand besonders viel Spannung ab, die vor der Betriebsspannung subtrahiert werden muss. Aus diesem Grund ist nun die Anodenspannung besonders klein und zieht nur wenige Elektronen an,
 - Der Anodenstrom kann sogar sinken, wenn mehr Elektronen zum (positiven) Gitter fliegen als zur Anode. Dann kann das Gitter thermisch überlastet werden und sich verformen oder sogar schmelzen.
- Wenn das Steuergitter positiv wird, ist der Eingangswiderstand der Röhre nicht mehr unendlich groß, sondern wirkt wie ein Widerstand von einigen 1000 Ohm . Dadurch entstehen meist starke Signalverzerrungen, weil die vorhergehende Verstärkerstufe plötzlich und nur bei positiven Spannungsspitzen belastet wird. Bei NF-Verstärkern wird dieser Zustand deshalb vermieden und ist bei den üblichen Kleinsignalröhren auch nicht spezifiziert.
- Es gibt einen relativ schmalen Bereich, in dem der Zusammenhang Anodenstrom/Gitterspannung einigermaßen linear ist, in diesen Bereich wird üblicherweise der Arbeitspunkt der Schaltung gelegt. Es fließt ständig Strom zur Anode (Ruhestrom) – auch dann, wenn kein Signal verstärkt werden soll. Dieser Zusammenhang wird bei großen Steuerspannungen am Gitter nichtlinear, die Verstärkerstufe verzerrt dann.



Die Abhängigkeit des Anodenstromes von der Gitterspannung ist grundsätzlich nicht linear. Die Nichtlinearität resultiert aus der Rückwirkung (Durchgriff) der Anodenspannung durch das Gitter auf die Raumladung der Elektronenwolke um die Kathode. Dieses Raumladungsgesetz lässt sich in der Formel

$$I_{\text{Kathode}} = k \cdot \sqrt[3]{U_{\text{st}}^3} = k \cdot (U_{\text{st}})^{\frac{3}{2}}$$

ausdrücken, wobei k eine konstruktionsspezifische Konstante ist und U_{st} aus der negativen Gitterspannung und der positiven Anodenspannung errechnet wird.

Der Vierpolparameter *Durchgriff* beschreibt die Rückwirkung eines sich ändernden Anodenpotenzials auf den Anodenstrom. Ein hoher Durchgriff, das heißt eine starke Rückwirkung des Anodenpotenzials, wirkt wie eine „eingebaute“ Gegenkopplung.

Will man in einem Leistungsverstärker die Röhre voll ausnutzen und den Wirkungsgrad maximieren, so wählt man zwei gleiche Röhren im Gegentakt-B-Betrieb. Jede Röhre verstärkt nur *eine* Halbwelle und ein symmetrischer Ausgangstransformator setzt beide Anteile wieder zusammen. Dadurch ist ein Wirkungsgrad ohne eingerechnete

Heizleistung bis zu 75 % erreichbar. Die Verzerrung durch den nichtlinearen Verlauf der Kennlinie kann durch eine Gegenkopplung weitgehend ausgeglichen werden.

Beim Gegentakt-B-Betrieb kann man zwar Ruhestrom sparen, riskiert aber Übernahmeverzerrungen. Das ist der Bereich, in dem eine Röhre bereits sperrt, die andere aber noch nicht ausreichend durchgesteuert wird. Diese Übernahmeverzerrungen können durch messtechnisch selektierte Pärchen der jeweiligen Röhren und individuell eingestellte Ruhestrome minimiert werden.

Eine andere Möglichkeit ist, den Arbeitspunkt zwischen den A- und B-Punkt zu legen. Bei kleinen Signalamplituden arbeitet die Schaltung auf Kosten eines geringeren Wirkungsgrades wie eine Gegentaktschaltung im A-Betrieb, der sich bei größeren Amplituden zum B-Betrieb hin verschiebt. In der Praxis wird die Gittervorspannung bei AB-Betrieb nicht festgesetzt, damit dieser Effekt der höheren Gitterspannung durch höheren mittleren Strom durch die Endstufe noch verstärkt wird.

Bei Hochfrequenzverstärkern in Sendern spielen die Verzerrungen im B-Betrieb keine Rolle, da mit den folgenden Filterstufen die in den Röhren erzeugten Oberwellen wieder entfernt werden. Zur weiteren Erhöhung des Wirkungsgrades wählt man sogar den C-Betrieb mit so hoher Steuerspannung, dass Gitterstrom fließen kann. Durch dieses abrupte Ein- und Ausschalten des Anodenstromes erreicht man Wirkungsgrade um 87 %, da die vollständig gesperrten Röhren auf den Schwingkreis im Anodenzweig nicht dämpfend wirken.

Heizung

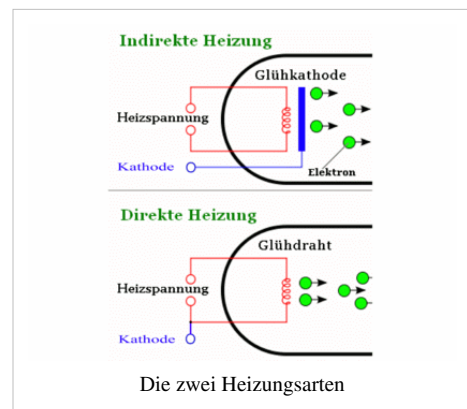
Um genügend Elektronen aus dem Material der Kathode austreten zu lassen ist eine Beheizung der Kathode im Regelfall notwendig. Dabei spielt auch die Austrittsarbeit, welche unter anderem von dem verwendeten Kathodenmaterial abhängt, eine Rolle. Durch die Beheizung wird eine Glühemission von Elektronen ausgelöst, welche auch unter dem Begriff Edison-Richardson-Effekt bekannt ist.

Direkte und indirekte Heizung

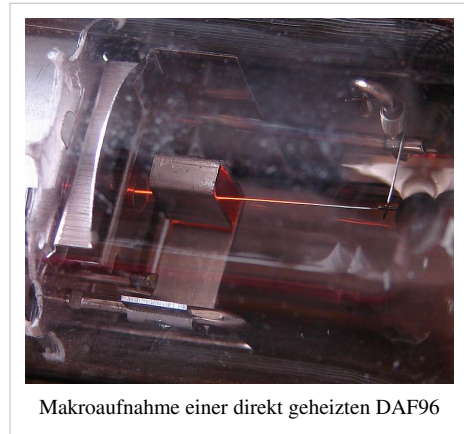
Es wird zwischen direkter und indirekter Heizung unterschieden.

- Bei der direkten Heizung wirkt der Heizdraht gleichzeitig als Kathode. Der Heizstrom fließt direkt durch die draht- oder bandförmige Kathode.
- Bei der indirekten Heizung fließt der Heizstrom durch einen separaten Heizdraht (meistens eine Wolfram-Glühwendel), der durch Alundum isoliert innerhalb des Kathodenröhrchens liegt. Die Wärmeleistung wird über Wärmeleitung und -strahlung auf das Kathodenröhrchen übertragen.

Die galvanische Trennung der Heizung zur Kathode bei indirekter Heizung erlaubt Schaltungsvarianten, die mit direkt geheizten Röhren nicht ohne wesentlich höheren Schaltungsaufwand realisierbar sind. Indirekt geheizte Kathoden können daher mit Serienheizung (die Heizwendeln mehrerer Röhren sind in Reihe hintereinander geschaltet) betrieben werden. Indirekt geheizte Röhren werden zur Verstärkung kleiner Signale (ältere Fernseher, Messgeräte und Radioempfänger) und heute noch in Audioverstärkern eingesetzt. Bildröhren sind grundsätzlich indirekt geheizt.



Die direkte Heizung benötigt eine geringere elektrische Leistung, um die gleiche Kathodentemperatur zu erreichen. Direkt geheizte Röhren sind in unter zwei Sekunden einsatzbereit, während indirekt geheizte Röhren zwischen zehn Sekunden bis mehrere Minuten benötigen, bis die Kathode ihre Arbeitstemperatur erreicht hat. Gerade bei den Batterieröhren der D-Serie ist der Heizstrom mit 25 mA so gering, dass der Anodenstrom, welcher zusätzlich zum eigentlichen Heizstrom ebenfalls durch den als Kathode fungierenden Heizfaden fließt, für eine sichtbare Zunahme der Fadentemperatur sorgt. Direkt geheizte Kathoden besitzen allerdings eine geringere Wärmeträgheit, dadurch wird der Anodenstrom bei Wechselstromheizung zusätzlich (unerwünschterweise) moduliert.



Makroaufnahme einer direkt geheizten DAF96

Ein weiterer Vorteil der direkten Heizung ergibt sich durch die Möglichkeit, höhere Kathodentemperaturen zu realisieren, als das bei anderen Kathodentypen als der klassischen Oxidkathode der Fall ist. Der bei indirekter Heizung erforderliche Isolierstoff wäre hier einer erheblichen Belastung ausgesetzt. Direkt geheizte Kathoden werden noch heute bei Senderöhren, Gleichrichterröhren und Magnetrons eingesetzt. Auch Vakuum-Fluoreszenzanzeigen in Geräten der Unterhaltungselektronik sind direkt geheizt, hier aber hauptsächlich damit die im Sichtfeld liegende Kathode optisch möglichst nicht stört.

Serien- und Parallelheizung

In moderneren Geräten werden Röhren mit einheitlicher Heizspannung über einen Netztransformator in Parallelschaltung gespeist. Vorteile:

- keine Leitungen mit hoher Wechselspannung quer durch die Schaltung (Minimierung von Störungen)
- bei Ausfall eines Heizfadens ist die fehlerhafte Röhre optisch schnell zu identifizieren.

Allstromgeräte können prinzipbedingt keinen Transformator enthalten, da Gleichstrom nicht transformierbar ist. Damit die Heizung der Röhren mit den damals üblichen Spannungen von 4 V und in der Summe von mehreren Ampere Stromaufnahme nicht unwirtschaftlich wird, wurden Röhrenserien geschaffen, die statt einer einheitlichen Heizspannung einen einheitlichen Heizstrom aufweisen. Dafür ist die Heizspannung der einzelnen Röhren je nach notwendiger Heizleistung unterschiedlich^[20]. Die Röhren einer Serie können in Reihe geschaltet werden, die Differenz zur vorhandenen Netzspannung wird mit einem Vorwiderstand in Wärme umgewandelt.

Siehe dazu auch den Abschnitt über Röhrenserien.

Kathode

Bei den üblichen Verstärkerröhren und größeren Senderöhren sind folgende Kathodentypen gebräuchlich:

- Wolframkathode – der Heizdraht dient gleichzeitig als Elektronenemitter (*direkt geheizte Kathode*) und besteht wie bei einer Glühlampe aus Wolframdraht. Bei älteren Senderöhren höchster Leistung gebräuchlich. Ebenso bei Sonderröhren, wie zum Beispiel Rauschgeneratorröhren. Betriebstemperatur um die 2200 °C.
- thorierte Wolframkathode – wie vorstehend, der Draht ist jedoch mit einer dünnen Thoriumschicht versehen. Das erhöht dessen Fähigkeit, Elektronen zu emittieren bzw. senkt die Austrittsarbeit und damit die erforderliche Temperatur auf 1500 °C. Thoriumkathoden sind bei Senderöhren mittlerer Leistung gebräuchlich.
- Direkt geheizte Oxidkathode – wie vorstehend, aber der Heizdraht ist mit einer dünnen Bariumoxidschicht versehen. Die Beschichtung senkt die erforderliche Temperatur auf < 800 °C. Anwendung bei Batterieröhren, Gleichrichterröhren, Leuchtstofflampen und Vakuum-Fluoreszenzanzeigen.
- Indirekt geheizte Bariumoxidkathode – eine Wolfram-Heizwendel wird elektrisch isoliert in ein Nickelröhrchen eingeschoben. Das Nickelröhrchen besitzt eine Beschichtung aus Bariumoxid und stellt die eigentliche Kathode dar. Anwendung bei den meisten Röhren kleiner Leistung sowie bei Bildröhren und Kathodenstrahlröhren.

Eine Sonderform stellen indirekt-strahlungsgeheizte Kathoden dar. Wegen besonders hoher Anforderungen an die Isolation zwischen Heizfaden und Kathode ist über mechanische Mittel der Heizfaden in der Mitte des im Durchmesser großzügig bemessenen Kathodenröhrchens fixiert. Das Kathodenröhrchen wird ausschließlich über die vom Heizfaden ausgehende Wärmestrahlung geheizt.

Oxidkathoden sind recht empfindlich gegenüber Unter- oder Überheizung:

- Unterheizung setzt Sauerstoff aus der Oxidschicht frei, der sich an der Kathodenoberfläche anlagert und so die Emission der Kathode herabsetzt (Vergiftung der Kathode),
- Überheizung erhöht die Verdampfungsrate von metallischem Barium aus der Oxidschicht, was ebenfalls die Emission herabsetzt.

Eine Toleranz von $\pm 5\%$ sollte daher eingehalten werden.

In speziellen Röhren wie Photomultipliern oder Photozellen wird das Material der Kathode so gewählt, dass die Austrittsarbeit möglichst gering ist. Die Elektronen werden hier durch Licht ausreichend kurzer Wellenlänge freigesetzt.

Anode

Die Anode ist aufgrund des Auftreffens der Elektronen einer starken thermischen Belastung ausgesetzt. Das Material soll möglichst wenig Sekundärelektronen aussenden und einen möglichst hohen Anteil der entstehenden Wärme nach außen abstrahlen. Bei Gleichrichterröhren ist zudem eine hohe Austrittsarbeit sowie eine geringe Neigung zur Feldemission erwünscht. Das wird durch runde, hohle Formen erreicht. Materialien sind aluminiumplattiertes Eisen (sog. P2-Eisen), welches die typische körnige, stark aufgeraute, matte, dunkle, bläulichgrau erscheinende Anodenoberfläche erzeugt, Nickel, ggfs. zur besseren Wärmeabstrahlung geschwärzt, oder – bei sehr hohen Leistungen – Graphit oder Wolfram.

Bei großer Belastung fangen freistehende, strahlungsgekühlte Anoden oft sichtbar an zu glühen. Dieser Betriebszustand ist für die gebräuchlichen Kleinleistungsröhren im Radio- und Fernsehbereich elektrisch bereits als Überlastung spezifiziert. Die Röhre überlebt diesen Zustand zwar eine gewisse Zeit, die Lebensdauer geht stark zurück, da eventuell in den Werkstoffen gebundene Gasreste aus den Elektroden ausgetrieben werden (siehe Abschnitt Evakuierung). Durch die große Hitze werden die glühenden Elektroden weich und können sich daher verformen, was die Röhrendaten verfälscht oder sogar Kurzschlüsse im Innern des Röhrensystems nach sich ziehen kann. Ebenso kann der Glaskolben leiden oder springen. Bei Gleichrichterröhren kann eine sogenannte *Rückzündung* auftreten, die Röhre leitet dadurch in beiden Richtungen, weil die Anode durch ihre hohe Temperatur ebenfalls Elektronen aussendet.

Große Leistungsröhren, Röntgenröhren und Magnetrons besitzen massive, oft luft- oder wassergekühlte Anoden, die direkt mit der Außenluft Kontakt haben. Röntgenanoden bestehen oft aus einem Verbund von Wolfram mit Kupfer, zur besseren Wärmeleitung.



Durch Überlast angeschmolzener Glaskolben einer PL509



Blaue
Lichterscheinung an
der Anode (EF89)



Blaue
Lichterscheinung
am Glaskolben
(PL95)

Im normalen Betriebszustand geben die Elektronen ihre kinetische Energie nicht nur als Wärmeleistung an die Anode ab, sie erzeugen dort schwache Lichterscheinungen. Bei manchen Röhrentypen ist der Systemaufbau nicht vollständig geschlossen, so dass Elektronen auf den Glaskolben weiterfliegen und dort zu Fluoreszenzerscheinungen führen. Lichterscheinungen treten besonders sichtbar bei Leistungsröhren und/oder hohen Anodenspannungen auf. Bei sehr hohen Spannungen entsteht Röntgenstrahlung, die unter anderem durch die in Radaranlagen arbeitenden Schaltröhren zu Gesundheitsschäden beim Menschen führte.

Die auf der Glasinnenwand landenden Elektronen können elektrische Felder hervorrufen, da sie über das üblicherweise nichtleitende Glas schwer abfließen können. Bei Röhren, die naturgemäß Elektronen zur Glaswandung hin beschleunigen (magisches Band, Kathodenstrahlröhren), wird durch verschiedene Maßnahmen eine elektrisch schwach leitfähige Substanz auf die Innenseite des Glaskolbens aufgebracht, welche durch entsprechende Kontaktfedern eine Verbindung mit der Anode erhält, sodass die Elektronen abfließen können (Aquadag, Metallisierung bei Bildröhren, transparente leitfähige Oxidschichten).

Bei nicht derartig behandelten Gläsern führen diese Felder zu einer Konzentration von Ionen an diesen Stellen. Im Laufe der Jahre kann dieses Ionenbombardement zu einer elektrolytischen Zersetzung des Glases, besonders bei Röhren mit hohen Betriebstemperaturen, führen.^[21]

Bei älteren Bildröhren führte diese Ionenbelastung zu einem blinden Fleck in der Mitte des Bildschirms, dem sogenannten Ionenfleck, dem in der Anfangszeit durch die Ionenfalle begegnet wurde, ab Mitte der 1950er Jahre dann durch eine sehr dünne Aluminiumschicht.

Manche unregelmäßige Metallspiegel auf der Kolbeninnenseite rühren aus Abdampfungen der Kathodenbeschichtung her. Diese entstehen hauptsächlich während der Herstellungsprozesse, bei denen das Vakuum bereits im Kolben erzeugt wurde.^[22]

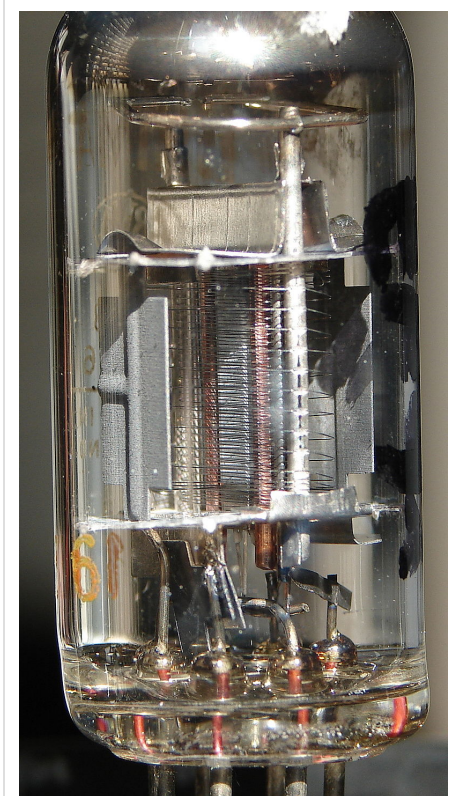
Weitere Elektroden

Eine Elektronenröhre kann zwischen Kathode und Anode noch eine Reihe zusätzlicher Elektroden enthalten, wie Steuergitter, Schirmgitter, Bremsgitter oder elektronenoptisch wirksame Fokussierelektroden.

Steuer- und Schirmgitter bestehen aus Drahtwendeln oder -gittern, Bremsgitter können, wie Fokussierelektroden, die Form von Blechblenden haben. Die Drahtgitter sind meistens aus Molybdän gefertigt, die Blechblenden aus Nickel. Die Haltedrähte bestehen manchmal aus Verbundwerkstoffen, welche eine gute Wärmeleitfähigkeit mit einer hohen mechanischen Festigkeit vereinen.

Im Bild rechts ist eine detaillierte Aufnahme einer HF-Pentode EF91 zu sehen, die die einzelnen Elektroden gut erkennen lässt:

- das Steuergitter ist zur Wärmeableitung auf verkupferten Haltedrähten aufgebracht;
- das Bremsgitter ist weitmaschig, es verhindert den Weg der Sekundärelektronen zurück zum Schirmgitter;
- Die Stäbe dazwischen tragen das Schirmgitter; es hält das elektrische Feld und damit den Elektronenfluss von der Kathode her aufrecht, auch wenn die Anode zum Beispiel betriebsbedingt ein weniger positives Potential annimmt;
- Die graublau Fläche links ist eine Anode;
- die Kathode ist anhand ihres weißen Oxidbelages gut zu erkennen.



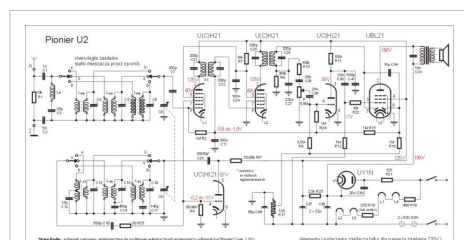
Makroaufnahme einer EF91-Pentode

Insbesondere das Steuergitter darf selbst keine Elektronen emittieren, obwohl es der beheizten Kathode sehr nahe ist und damit der unmittelbaren Gefahr der Aufheizung unterliegt. Es muss daher durch wärmeableitende Haltedrähte und manchmal zusätzlich an diesen befestigte, wärmeabstrahlende Kühlfahnen möglichst kühl gehalten werden. Ein zu heißes Steuergitter oder gar auf dieses gelangende Kathodenmaterial führen zu sogenannter Gitteremission, was eine Arbeitspunktverschiebung oder sogar einen sich thermisch verstärkenden Zerstörungseffekt zur Folge hätte, da das Gitter durch Emission positiver wird und folglich der Anodenstrom steigt, wodurch zusätzliche Wärme entsteht. Dieser Effekt wurde in den 1930er Jahren als das sogenannte „Durchstoßen“ bezeichnet.

Einsatzgebiete

Die meisten Elektronenröhren in der Elektronik sind heute von Halbleiterbauelementen wie Transistoren und Dioden verdrängt worden.

Hochleistungs-Hochfrequenzröhren als Senderöhren in der Radar- und Funktechnik sind jedoch bis heute die günstigste Möglichkeit, Hochfrequenz hoher Leistung zu erzeugen. Hierbei kommen Trioden, luft- und wassergekühlte Tetroden, Klystrons, Magnetrons und Wanderfeldröhren zum Einsatz. Solche leistungsfähigen Röhren werden in der Industrie unter anderem für die Hochfrequenzerwärmung eingesetzt. Das sind Anlagen, die kapazitiv oder induktiv Wärme direkt in einem Werkstück erzeugen. Weitere Anwendungen sind Hochfrequenzgeneratoren zur Plasmaerzeugung (Sputtern oder zur Anregung von Gaslasern). Magnetrons finden unter anderem im Mikrowellenherd und in Radar-Geräten weite Verwendung.



Schaltplan eines historischen Radioempfängers von 1948 mit Elektronenröhren

Vakuum-Fluoreszenzanzeigen (VFD) arbeiten nach dem Prinzip einer Elektronenröhre, haben jedoch eine flache Form; sie werden in sehr vielen Elektronikgeräten als Anzeige eingesetzt.

Die Braunsche Röhre oder Kathodenstrahlröhre ist in Fernsehgeräten, Oszilloskopen und Computerbildschirmen noch nicht komplett von LCDs und Mikrospiegel-Projektionssystemen verdrängt worden.

Röntgenröhren sind die in Medizin, Industrie, Warenabfertigung und teilweise der Forschung eingesetzte Quelle für Röntgenstrahlung.

Zum Kennenlernen der Funktion von Elektronenröhren und Aufbau eigener Schaltungen gab es Bausätze, mit denen man NF-Verstärker, Mittelwellenradios, Kurzwellen-Empfänger, DRM-Empfänger, Quarz-Oszillatoren, Senderschaltungen und andere Grundschaltungen der Röhrentechnik aufbauen kann. Diese Schaltungen arbeiten im Niederspannungsbereich bei Anodenspannungen von beispielsweise sechs Volt.

Röhrenbestückte Audioverstärker

Wegen ihres besonders geschätzten charakteristischen Klirrverhaltens werden auch heute noch weitgehend Elektronenröhren in Gitarrenverstärkern verbaut, bei denen das Schaltungskonzept keineswegs auf ein konsequentes Vermeiden von Verzerrungen abzielt, sondern im Gegenteil eher auf deren Erzeugung, da die besonderen klanglichen Resultate hier durchaus erwünscht sind.

Um eine höhere Ausgangsleistung zu erzielen, arbeiten die Endstufen der Röhren-Gitarrenverstärker zumeist im Gegentaktbetrieb. Das Maß der Gegenkopplung unterscheidet sich stark zwischen den Verstärkern unterschiedlicher Hersteller. Insbesondere bei der Übersteuerung entstehen nichtlineare Verzerrungen, welche hier erwünscht sind und einen Bestandteil der musikalischen Interpretation bilden.^[23] Derartige Besonderheiten des Klanges lassen sich zwar heute mit leistungsstarken Digitalprozessoren simulieren, der außerordentliche Erfolg von Re-Release-Verstärkerserien einiger Hersteller deutet jedoch auf die unumstrittene Führungsrolle der Elektronenröhre in diesem Marktsegment hin.



Doppeltriode vom Typ ECC83 in der Vorstufe eines Gitarrenverstärkers

Während röhrenbestückte Bühnenverstärker für E-Gitarren sich seit den 1950er Jahren unverändert behaupten können, verschwand die Röhre aufgrund der fortschreitenden Transistorisierung der Elektronik allmählich als Bauelement aus den Hi-Fi-Verstärkern. Erst seit etwa Mitte der 1990er Jahre ist wieder ein zunehmendes Interesse an dieser Technik zu beobachten – Hi-Fi-Röhrenverstärker erfreuen sich aus verschiedensten Gründen wachsender Beliebtheit, wobei die ihnen unterstellten klanglichen Vorzüge eine zentrale Rolle spielen. In diesem Zusammenhang sind seit einigen Jahren auch Neuproduktionen von Röhren am Weltmarkt wieder häufiger anzutreffen, selbst völlig neue Typen von Leistungsröhren speziell für Hi-Fi-Anwendungen sind mittlerweile erhältlich.

Röhrenverstärker im High-End-Sektor werden auch aufgrund ihres Designs geschätzt, bei welchem die Sichtbarkeit der Funktion und des Aufbaues eine Rolle spielt. Ihnen werden von manchen Musikhörern überlegene Klangeigenschaften attestiert, wobei die Ursachen bisher erst teilweise durch schlüssige Erklärungen belegt sind. Ein Ansatz berücksichtigt hauptsächlich deren anders geartete nichtlineare Verzerrungen^[24], die im Vergleich zu Transistorverstärkern als angenehmer empfunden werden sollen.

Gelegentlich werden diese Verstärker mit dem Einsatz besonders wertvoller Materialien oder mit subjektiven Klang-Attributen beworben, was oftmals zu ihren Übertragungseigenschaften in keinem Verhältnis steht. Dennoch besitzt ein sorgfältig gebauter und schaltungstechnisch ausentwickelter Röhrenverstärker eine sehr hohe Klangqualität. Der Qualität kommen auch moderne, weiterentwickelte passive Bauelemente wie Kondensatoren und rauscharme, stabile Widerstände für hohe Spannungen zugute.

Vergleich Röhre und Halbleiter

Der Niedergang der klassischen Röhren wurde durch die Erfindung des Transistors 1947 eingeleitet. Die halbleiterbasierten Transistoren kamen in den 1950er Jahren auf den Markt und lösten in den 1960er Jahren die Röhren in großem Maße ab.

Nachteile von Röhren gegenüber Halbleitern

Röhren haben im Vergleich zur Halbleitertechnik folgende Nachteile:

- Aufwändige Stromversorgung mit Heizspannung (zirka 1,5 bis 40 V) und Anodenspannung im Bereich 50 bis über 1000 V, damit teilweise oberhalb der Kleinspannung, obwohl in Spezialfällen kleinere Anodenspannungen, zum Beispiel 6 bis 12 V möglich sind. Diese sind von den Verstärkungs- und Ausgangsleistungen aber sehr limitiert.
- Mit Röhren lassen sich keine integrierten Schaltungen bauen. Verbundröhren mit drei Systemen in einem Glaskolben sind nicht mit ICs vergleichbar, die bis zu einige Millionen Transistoren enthalten können.
- Zusätzliche Verlustleistung im Heizkreis
- Hohe Temperaturen an der Oberfläche
- Hohe Gesamtwärmeentwicklung
- Verzögerte Betriebsbereitschaft durch Anheizzeit der Kathode
- Hoher Platzbedarf und sehr begrenzte Integrationsmöglichkeit
- Hohe Herstellungskosten durch zahlreiche, aufwändige Produktionsschritte
- Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen (Mikrofonie, Glasbruch und innere Beschädigungen)
- Stärkere alterungsbedingte Veränderungen der elektrischen Werte im Verlauf der Lebensdauer (abhängig von Einsatzbedingungen und Typ)
- Kürzere Lebensdauer (abhängig von Einsatzbedingungen und Typ)
- Keine komplementären Typen analog einem p-Kanal-MOSFET bzw. PNP-Transistor möglich
- Mit Spannungen > 15 kV betriebene Röhren erzeugen bereits weiche Röntgenstrahlung.

Vorteile von Röhren gegenüber Halbleitern

Trotz großer Nachteile gegenüber Halbleiter-Bauelementen können sich Elektronenröhren aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften in bestimmten Bereichen behaupten:

- Meist geringerer Kühlaufwand als bei Halbleitern gleicher Leistung, da Röhren von Natur aus höhere Betriebstemperaturen aufweisen.
- Sie sind unempfindlicher gegenüber manchen Umwelteinflüssen wie kosmische Strahlung und Radioaktivität, Fehlspannungen und resistent gegenüber dem elektromagnetischen Puls (EMP); es gab deswegen zum Beispiel in der Sowjetunion eine militärisch motivierte Weiterentwicklung der Elektronenröhre.
- In der Hochfrequenz-Leistungstechnik und in der Niederfrequenztechnik haben Röhren begehrte Eigenschaften: Hoher Leistungsgewinn, hohe dynamische Bandbreite, konstante Parameter über einen weiten Frequenzbereich, sehr kleine und spannungskonstante innere Kapazitäten, tolerant gegenüber kurzen Fehlanpassungen.
- Sie sind für sehr hohe Leistungen (bis Megawattbereich bei Frequenzen bis etwa 1 GHz) verfügbar.
- Bei Frequenzen oberhalb von etwa 1 GHz und hoher Leistung werden spezielle Röhren (Magnetron, Klystron, Wanderfeldröhre) zur Erzeugung und Verstärkung benutzt.
- Im Bereich von extremen Hochstrom- und Hochgeschwindigkeitsschaltvorgängen sind Wasserstoff-Thyratrons unerreicht leistungsfähig und schnell.
- Röhren sind kurzzeitig (für einige Mikrosekunden) extrem überlastbar (siehe Magnetron).

Röhrentypen

Die verschiedenen Röhrentypen werden durch ihre Funktion und die Anzahl und Anordnung der Elektroden unterschieden, außerdem durch unterschiedliche Stromversorgung (Netzröhren, Batterieröhren und Niederspannungsröhren). Siehe auch das europäische Röhrenbezeichnungsschema.

Grob eingeordnet gehört die *Diode* zu den Gleichrichtern, während *Trioden*, *Tetroden* und *Pentoden* Verstärkerröhren darstellen. *Hexoden*, *Heptoden*, *Oktooden* und *Enneoden* sind Entwicklungen, die den Notwendigkeiten der damaligen Rundfunktechnik angepasst wurden. Diese verstärken zwar ebenfalls Signale, die zusätzlichen Gitter haben aber spezielle Funktionen; siehe dazu auch den Artikel über Überlagerungsempfänger sowie die Fachabschnitte weiter unten.

Eine Sonderrolle nehmen die *Magischen Augen* ein, deren primärer Zweck nicht die Verstärkung oder Manipulation von Signalen darstellt, sondern die Umsetzung einer Signalgröße in ein entsprechendes optisches Äquivalent.

Die einzelnen Typen und ihre Charakteristika werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Diode

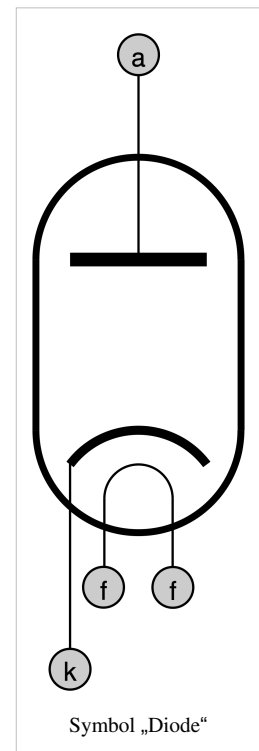
Bei der Röhrendiode sind nur die minimal erforderlichen Elektroden Anode (a) und Kathode (k) vorhanden. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der (geheizten) Kathode und Anode werden die Elektronen durch das elektrische Feld durch das Vakuum hindurch zur Anode hin beschleunigt und von dieser aufgefangen.

Voraussetzung hierbei ist die (oben erwähnte) Polarität der angelegten Spannung: Die Kathode muss gegenüber der Anode negatives Potential aufweisen, damit ein Anodenstrom zustande kommt. Bei fehlender Spannung zwischen Anode und Kathode fließt nur ein minimaler Strom – der sogenannte Anlaufstrom. Dieser kommt zustande, weil viele Elektronen genügend Energie besitzen, um die Distanz zwischen den Elektroden zu überwinden. Dieser Strom ist von der Austrittsarbeit und von der Temperatur der Kathode abhängig.

Hauptanwendungsgebiete: Gleichrichter, Demodulator

Einige früher weitverbreitete Diodentypen:

- EAA91 (Zwei unabhängige Kleinsignal-Diodenstrecken in einem Röhrenkolben, benutzt in Diskriminatoren zur FM-Demodulation und in Fernsehgeräten zur Bildsignal-(AM-)-Demodulation und zur Schwarzwertklemmung)
- EY51, DY86 (Hochspannungs-Gleichrichterdiode für Fernseh-Bildröhren und Oszilloskop-Kathodenstrahlröhren)
- EZ80, EZ81 (Zwei-Wege-Gleichrichter)
- PY88 (Hochspannungs-Boosterdiode für die Zeilenendstufe von Fernsehgeräten)



Triode

Die Triode oder Eingitterröhre verfügt über eine zusätzliche Elektrode, das sogenannte Steuergitter (g_1), welches zwischen Kathode und Anode angebracht ist und das zumeist die Form einer Wendel hat.

Die Menge der zwischen Kathode und Anode fließenden Elektronen lässt sich durch die Höhe einer am Gitter anliegenden, gegenüber der Kathode negativen Spannung stromlos steuern. Diese leistungslose Steuerung gilt nur bis zu Frequenzen im unteren zweistelligen Megahertzbereich. Danach sinkt der Eingangswiderstand durch Influenzwirkung. Eine Steuerung mit positiven Spannungen ist bei üblichen Verstärkerröhren nicht spezifiziert. Es gibt einige Sonderbauformen wie zum Beispiel die EDD11, die durch konstruktive Maßnahmen den Gitterstrom im positiven Bereich so gering wie möglich halten. Wegen der durch den Gitterstrom auftretenden starken Verzerrungen konnte sich diese Lösung im Niederfrequenzbereich nicht durchsetzen.

Da das Gitter nahe an der Kathode liegt, erzeugen schon kleine Variationen der Gitterspannung große Stromschwankungen zwischen Anode und Kathode, da die Elektronen dort noch langsam sind und daher bereits mit einer kleinen negativen Spannung am Gitter blockiert werden können.

Einige Elektronen gelangen durch das Gitter und werden dann weiter zur Anode beschleunigt. Die Menge dieser Elektronen ist dabei von der Spannung am Gitter abhängig, so dass der Stromfluss Anode-Kathode durch die Spannung am Gitter gesteuert wird und es zu einer Verstärkung kommt.

Das macht die Triode zum historisch ersten elektronischen Verstärker – eine Funktion, in der sie heute meistens durch die kleineren, rausch- und verlustärmeren Transistoren ersetzt wurde.

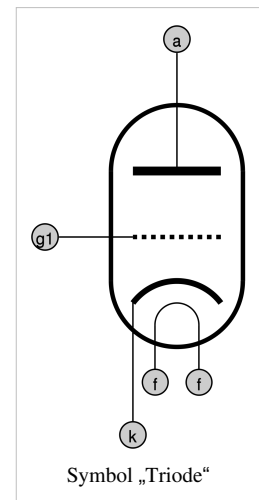
Das Maß der Verstärkung ist die Steilheit (in mA/V). Sie ist umso höher, je näher das Gitter der Kathode ist, je dichter es gewickelt ist und je größer die Kathodenoberfläche ist. Besonders steile Trioden haben sogenannte Spanngitter, welche besonders feine Gitterdrähte aufweisen und sehr nahe der Kathode angeordnet sind.

Heute finden sich Trioden vor allem in Vorverstärkerstufen von Hi-End-Audiogeräten – in Endstufen werden sie nur für höchste Frequenzen, ansonsten aufgrund des geringeren Verstärkungsfaktors nur bei besonderen Anforderungen an die Linearität (Kennlinie ist Kurve erster Ordnung) eingesetzt.

In Leistungsverstärkern der HiFi-Technik sind besonders Endtrioden mit hohem Durchgriff (zum Beispiel Stromregelröhren) beliebt.

Früher weit verbreitete Trioden sind:

- EC92 (VHF-Triode, entspricht weitestgehend einer Hälfte einer ECC81)
- ECC81 (VHF-Doppeltriode)
- ECC82 (NF-Verstärker, Impulstrennstufe in Fernsehempfängern)
- ECC83 (rausch-, kling- und mikrofoniearme NF-Doppeltriode für NF-Verstärker)
- PCC84 (VHF-Doppeltriode, speziell für kleine Anodenspannungen wie sie in Kaskodeschaltungen üblicherweise auftreten)
- PCC88 (VHF-Doppeltriode in Spanngitter-Technik)
- ECC85 (VHF-Doppeltriode, verbessertes Nachfolgemodell der ECC81)
- ECC86 (Niederspannungs-Doppeltriode mit 6 bis 12 Volt Anodenspannung für Autoradios)
- 6N2P (Russische Audio-Doppeltriode mit hohem Verstärkungsfaktor, ähnlich ECC83)
- 6N23P (hochsteile und extrem rauscharme russische Spanngitter-Doppeltriode, unter anderem für Breitbandverstärkung, in ihren technischen Eigenschaften weitgehend der E88CC und dergleichen entsprechend)
- PC88, PC93 (steile Spanngitterröhren für Frequenzen bis zirka 800 MHz, UHF-Bereich)
- 6J5 (Vielzweck-Triode)
- 6SN7 (Doppeltriode mit Oktalsockel, vorwiegend für Audio-Anwendungen)



Besondere Bauformen sind:

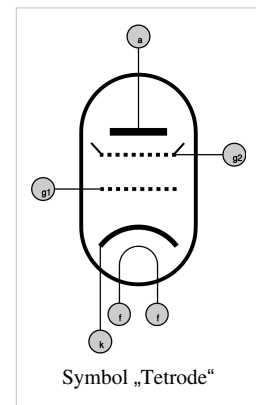
- Scheibentrioden; diese haben flache (scheibenförmige) Elektroden, welche rundum konzentrisch kontaktierbar sind, um sie induktivitätsarm in coaxialen Anordnungen anschließen zu können. Sie werden als HF-Verstärker bis zirka 5 GHz eingesetzt. Eine damit verwandte Röhre ist die Klystrode.
- *Strahltrioden* (siehe Ballasttriode) formen zwischen Kathode/Gitter und Anode einen Elektronenstrahl, der eine größere Entfernung und Spannungsfestigkeit zur Anode zulässt. Anwendung als Regelröhre für sehr hohe Spannungen (zum Beispiel 6BK4A bis 30 (60) kV, Bild oben). Das europäische Pendant ist die PD500 bzw. PD510.



Tetrode

Die Tetrode weist im Gegensatz zur Triode ein weiteres Gitter auf, das sogenannte Schirmgitter (g_2), und hat somit vier Elektroden. Das Einfügen dieses Gitters zwischen Steuergitter und Anode ändert einige fundamentale elektrische Parameter der Röhre. Das Schirmgitter wird mit einer gegenüber der Kathode möglichst konstanten positiven Spannung gespeist und schirmt das Steuergitter von der Anode ab, daher der Name Schirmgitter.

Der Anodenstrom der Tetrode ist ab einem durch Elektrodenabstände und der Schirmgitterspannung festgelegten Schwellwert nahezu unabhängig von der Anodenspannung; das Schirmgitter stellt für das Steuergitter konstante Feldbedingungen her und beschleunigt die Elektronen gleichmäßig Richtung Anode – auch wenn diese eine niedrigere Spannung als das Schirmgitter annimmt. Das erhöht den Innenwiderstand (Quellwiderstand) der Anode beträchtlich. Die unterbundene Rückwirkung der Anodenspannung auf das Steuergitter führt zu einer wesentlich erhöhten Verstärkung.



Leider weist die Tetrode einen Nachteil auf: Wenn die Anodenspannung aussteuerungsbedingt unter die Schirmgitterspannung sinkt, so werden die unvermeidlichen Sekundärelektronen, die vom Hauptanodenstrom aus der Anode herausgeschlagen werden, vom Schirmgitter angezogen und gelangen nicht zur Anode zurück. Das zeigt sich in einer charakteristischen Delle des Anodenstromes im Kennlinienfeld: Der Anodenstrom nimmt ab, obwohl die Anodenspannung zunimmt. Das entspricht rechnerisch einem negativen differentiellen Widerstand. Eine Verwendung im Bereich dieser Delle erzeugt Verzerrungen, da der Anodenstrom hier nicht mehr weitgehend der Gitterspannung am Steuergitter folgt. Das Schirmgitter wird durch den zusätzlichen Elektronenstrom zudem thermisch belastet.

Eine Maßnahme, dieses Problem in den Griff zu bekommen, ist, den Abstand zwischen Anode und Schirmgitter möglichst groß auszulegen – so groß, dass das elektrische Feld der Anode möglichst alle Sekundärelektronen wieder einfangen kann und nur eine unbedeutende Menge zum Schirmgitter gelangt. Das ist zum Beispiel bei manchen Ausführungen der Endröhre EL11 und ECL11 aus DDR-Produktion der Fall.

Eine weitere Maßnahme wird im Folgenden beschrieben.

Tetroden werden heute in der Bauform von Scheibentrioden für Hochfrequenzverstärker großer Leistung eingesetzt.

Pentode

Um die bei der Tetrode auftretenden Probleme mit den Sekundärelektronen zu umgehen, fügten die Konstrukteure ein weiteres Gitter zwischen Anode und Schirmgitter ein, das sogenannte Bremsgitter (g_3). Es ist sehr weitmaschig und liegt elektrisch auf derselben Spannungsebene wie die Kathode. Den von der Kathode kommenden Elektronenstrom beeinflusst es durch seine Weitmaschigkeit praktisch nicht. Die von der Anode kommenden, gegenüber dem Hauptstrom wesentlich langsameren Sekundärelektronen werden davon wieder Richtung Anode gelenkt. Die Pentode hat daher in der Summe fünf Elektroden.

Die Pentode ist die letzte Stufe einer langen Entwicklungsreihe. Dem Vorteil einer sehr hohen Verstärkung steht der Nachteil eines höheren Eigenrauschens entgegen. Da die Elektronen im Laufe ihres Weges zur Anode an verschiedenen Potentialen vorbeikommen, werden sie wechselweise beschleunigt, gebremst und sogar aus ihrer geradlinigen Bahn abgelenkt. Das erzeugt eine Rauschspannung (Verteilungsrauschen) an der Anode.

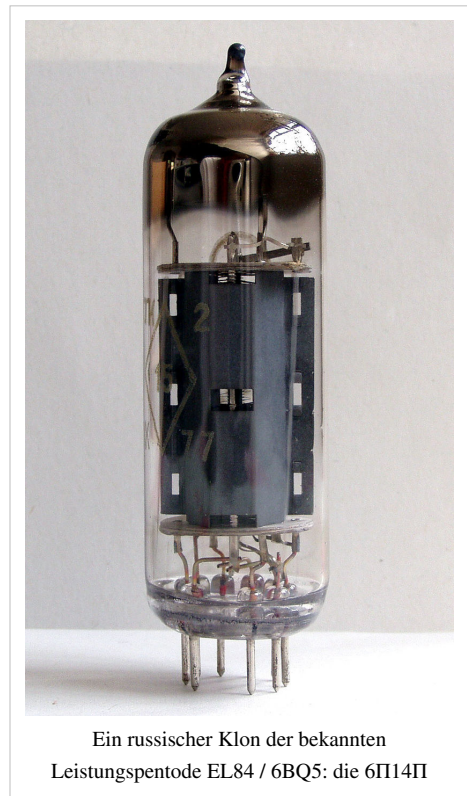
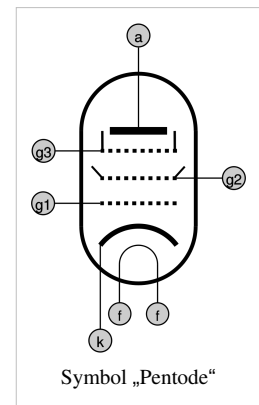
Aus diesem Grunde ging man in der Radio- und Fernsehtechnik Anfang der 1950er Jahre schon dazu über, in den Eingangsteilen der UKW-Verstärker von den Pentoden abzulassen und Trioden zu verwenden. Über einen Kunstgriff, die sogenannte Kaskode-Schaltung, erreichte man mit zwei Trioden pentodenähnliche Verstärkungswerte ohne deren Rauschen.

Beam-Power-Tetroden sind spezielle Pentoden, die anstelle des kompliziert herzustellenden Bremsgitters vergleichsweise einfach gebogene Elektronenstrahl-Leitbleche verwenden, was sich besonders vorteilhaft auf die Herstellungskosten auswirkt. Um patentrechtlichen Problemen mit der Firma Philips/Mullard aus dem Weg zu gehen, entwickelten britische Elektronik-Ingenieure das Beam-Tetroden-Design, dessen Patentlizenzen später an die amerikanische RCA verkauft wurden. Diese entwickelte in kurzer Zeit

die erfolgreichste, vielseitigste und bekannteste Strahlpentode der Röhrengeschichte, die mit der Bezeichnung 6L6 1936 auf dem Markt erschien und mit ihren zahlreichen Varianten bis heute im Bereich der eher kurzlebigen Elektronik-Bauteile eine beispiellose Dauerkarriere absolvierte. Sie wird immer noch gefertigt und spielt insbesondere im Marktsegment der Gitarren- und E-Bassverstärker eine dominierende Rolle.

Beispiele für Pentoden sind:

- EF80 (Breitband-Pentode)
- EF83 (regelbare rauscharme Kleinsignalpentode, in Hi-Fi-Anwendungen eingesetzt)
- EF85 (regelbare Breitbandpentode)



- EF86 (rauscharme Kleinsignalpentode, in Hi-Fi-Anwendungen eingesetzt)
- EF98 (Niederspannungs-Kleinsignalpentode, besonders für Hybrid-Autoradios)
- EL34 (häufig in Audioverstärkern eingesetzte NF-Endpentode)
- EL41 (NF-Endpentode für Radiogeräte älterer Bauart)
- EL84 (NF-Endpentode für Radiogeräte und Verstärker)
- PL83 (Videoendstufe in Fernsehgeräten)

Beispiele für Pentoden mit Strahlblechkonstruktion sind:

- 6L6 (US-amerikanische Beam-Power-Tetrode von RCA)
- 6550 (US-amerikanische Beam-Power-Tetrode von Tung-Sol, entspricht etwa der KT88)
- KT66 (Englische Kinkless-Tetrode von Marconi-Osram Valve Co., elektrisch fast identisch mit der 6L6)



- EL503 (berühmte hochsteile Spanngitter-Beam-Power-Tetrode von 1966)
- PL500 (Schaltpentode, Horizontal-Endstufe in Fernsehgeräten)
- PL519 (Schaltpentode mit höherer Leistung, Horizontal-Endstufe für Farbfernsehempfänger)
- PCF82 (Verbund-Kleinsignalröhre, Pentodenteil)

Hexode

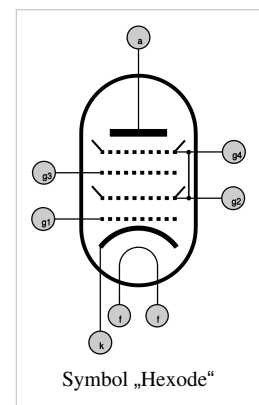
Die Hexode ist eine Elektronenröhre mit sechs Elektroden: Anode, Kathode, und insgesamt vier Gittern. Vereinfacht ausgedrückt ist die Hexode eine Reihenanordnung von zwei Tetroden mit nur einer Kathode und einer Anode – sie enthält somit zwischen Kathode und Anode zwei Steuergitter (g_1 , g_3) und zwei Schirmgitter (g_2 , g_4). Vom Funktionsprinzip her wird in der Literatur als erweiterte Funktionserklärung oft der Begriff „virtuelle Kathode“ (zwischen g_2 und g_3 gelegen) benutzt.

In der häufigsten Anwendung dieses Röhrentyps werden den Steuergittern g_1 und g_3 zwei verschiedene Signale mit unterschiedlicher Frequenz (f_1 , f_2) zugeführt. An der Anode treten dann die (verstärkten) Signale mit den Frequenzen f_1 , f_2 , f_1+f_2 und f_1-f_2 auf. Bei Überlagerungsempfängern ist hierbei nur die Differenz f_1-f_2 von Bedeutung – die sogenannte Zwischenfrequenz (ZF).

Schaltungen dieser Art werden *Multiplikative Mischer* genannt, da sich das Ausgangssignal aus der Multiplikation der beiden Steuersignale ergibt. Multiplikative Mischung ist besonders bei Amplitudenmodulation von Vorteil, da gegenüber additiver Mischung weniger Signalverzerrungen auftreten.

Diese Schaltungen fanden daher in AM-Radioempfängern weite Verbreitung (Details s. Überlagerungsempfänger).

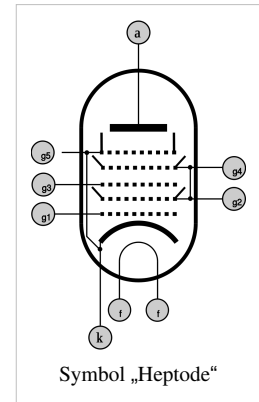
Bekannte und zur ihrer Zeit verbreitete Vertreter sind die Typen ACH 1, ECH 3, ECH 11, ECH 42, welche zusätzlich noch ein Triodensystem (Verwendung als Oszillator) enthalten. Die beiden Schirmgitter des Hexodenteils sind bei diesen Röhren miteinander verbunden.



Heptode

Die Heptode ist eine Weiterentwicklung der Hexode und eine Fünfgitterröhre. Dabei ist, analog zur Pentode, ein Bremsgitter (g_5) zwischen zweitem Schirmgitter (g_4) und Anode (a) vorgesehen und fix mit der Kathode im Kolben verbunden. Meistens ist nur ein einzelner elektrischer Anschluss aus dem Kolben für die beiden Schirmgitter (g_2 und g_4) herausgeführt.

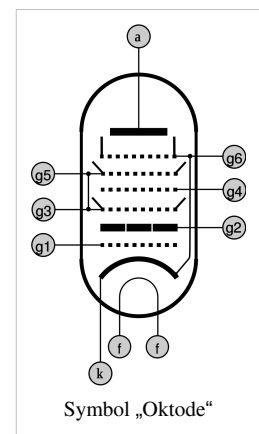
Bekannte Vertreter waren die Typen ECH 4, ECH 21, ECH 81; letztere fand sich in nahezu jedem Rundfunkempfänger der 1950er und frühen 1960er Jahre. Sie enthielten zusätzlich ein zur Verwendung als Oszillator vorgesehenes Triodensystem.



Oktode

Die Oktode oder Achtpolröhre ist eine Parallelentwicklung zur Mischhexode/Oszillatortriode. Dem ersten Steuergitter (g_1) folgt eine meistens aus zwei Stegen (Gitterhaltestäbe ohne Gitterbewicklung) bestehende Anode (g_2), welche mit Kathode und erstem Gitter das Oszillatorsystem bildet. Nach dem Schirmgitter (g_3) folgt ein weiteres Steuergitter (g_4), das mit dem Empfangssignal beaufschlagt wird, danach ein zweites Schirmgitter (g_5) und ein Bremsgitter (g_6) unmittelbar vor der Anode. Das gemeinsame Steuergitter g_1 beeinflusst damit auch den Elektronenstrom zur Hauptanode, was zu einer der Heptode ähnlichen Mischfunktion führt.

Die Oktode ist wie die Hexode und die Heptode eine Spezialröhre für Überlagerungsempfänger, sie bildet gleichzeitig Misch- und Oszillatorröhre in einem System. Typische Vertreter waren die Typen AK2, EK2. Bei einer Triode/Hexode wie der ECH3 wird das Empfangssignal an das empfindliche Steuergitter g_1 angeschlossen, bei der Oktode an das weniger empfindliche zweite Steuergitter g_4 . Oktoden sind durch die unmittelbare Kopplung der Elektroden über den Elektronenstrom recht empfindlich für Frequenzverwerfungen.



Enneode

Die Enneode ist eine Röhre mit einer Kathode, einer Anode und sieben Gittern, also mit insgesamt neun Elektroden, weshalb sie bisweilen auch als *Nonode* bezeichnet wird. Es gab nur wenige Typen: Die EQ 40 und die EQ 80 (bzw. deren Allstromvariante UQ 80). Sie wurde etwa zeitgleich mit der Einführung des UKW-Rundfunks zum Zweck der Frequenzdemodulation entwickelt. Ihre Arbeitsweise entsprach der eines Koinzidenzdemodulators. An ihrer Anode konnte eine vergleichsweise hohe Signalspannung abgenommen werden, die zur vollen Aussteuerung der unmittelbar folgenden Endröhre ausreichte und zudem noch eine Gegenkopplung gestattete. Einige Verbreitung fand diese Röhre im Tonteil von Fernsehempfängern und in UKW-Nachrüstsets für alte Empfänger. Da das Bremsgitter g_7 intern mit der Kathode und die drei Schirmgitter g_2 , g_4 und g_6 untereinander verbunden und gemeinsam herausgeführt waren, genügte trotz der zahlreichen Elektroden im Falle der EQ 40 sogar ein achtstiftiger Rimlocksockel.

Magisches Auge

Das Magische Auge ist eine Spezialröhre, die ein elektrisches Steuersignal in ein Leuchtsignal umsetzt, dessen sichtbare Ausdehnung von der angelegten Steuersignalspannung abhängt. Erfunden 1930 von dem Amerikaner Dr. Allen Du Mont und weiterentwickelt von den beiden RCA-Ingenieuren Thompson und Wagner diente sie zunächst in Radioempfängern als visuelle Hilfe für eine optimale Abstimmung auf die gewünschte Sendefrequenz. Als Leuchtschirmformen wurden hauptsächlich der segmentierte Kreis (AM2, EM34), der Fächer (EM71, EM80, EM85) oder später das rechteckige Band (EM84, EM800, EMM801, EMM803) verwendet. Wie die Oszilloskopröhren leuchten magische Augen in der Regel grün, bei moderneren Exemplaren wie der EM84 tendiert die Farbe eher in den Bereich blau-grün. Die Leuchtfarbe ist abhängig von der Leuchtschirmsubstanz, die vom Elektronenstrahl angeregt wird: Zink-Silikat für die älteren grün leuchtenden Schirme, Zinkoxid für die hell leuchtenden und moderneren grün-bläulichen Varianten. Dabei hat sich Zinkoxid als wesentlich haltbarer gegenüber der Belastung durch das fortwährende Elektronenbombardement erwiesen: Röhren mit diesem Leuchtstoff haben eine höhere Lebensdauer.

Für Stereo-Geräte brachte die Röhrenindustrie spezielle Abstimmanzeigeröhren mit zwei getrennten Elektrodensystemen heraus, die unterschiedlich eingesetzt wurden: entweder als 2-Kanal-Aussteuerungsanzeige für Audio-Anwendungen (EMM801, EM83) oder als Abstimmanzeige für UKW-Stereotuner, wobei ein System die optimale Abstimmung des Tuners signalisiert, das zweite System auf das Vorhandensein eines Stereosignals hinweist (EMM803).

Die magischen Augen sind hinsichtlich der Typenbezeichnung als Ausnahme zu betrachten. Bis auf die DM70/71 und EFM11 ist in jedem magischen Auge mindestens eine Triode als Hilfsystem untergebracht. Trotzdem werden diese Typen nicht mit zum Beispiel ECM84 bezeichnet, sondern mit EM84.

Mehrfachröhren (Verbundröhren)

In Mehrfachröhren oder Mehrsystemröhren sind zwei oder mehr Röhrensysteme bei elektrischer Trennung mechanisch vereint. Beispiele: zwei Trioden in der ECC83, eine Triode und eine Leistungspentode in der ECL82, eine Kleinsignalpentode und eine Leistungspentode in der PFL200.

In Verbundröhren sind die beiden Röhrensysteme teilweise miteinander verbunden; entweder durch den mechanischen Aufbau (zum Beispiel vertikale Anordnung von Triode und Leistungspentode mit einem gemeinsamen Kathodenröhrchen bei der ECL80) oder durch entsprechende Verschaltung der Elektroden über Anschlussdrähte im Röhreninnern (mechanisch getrennte Kathodenröhrchen mit gemeinsamem Kathodenanschlussstift für Triode und Pentode der PCF86). Es sind auch Kombinationen von Abstimmanzeigeröhren und Pentoden hergestellt worden, zum Beispiel in der EFM11.

Die noch in den 1940er Jahren vorgenommene Unterscheidung von Verbund- und Mehrfachröhren ist wegen der geringen Unterschiede im Laufe der Zeit nicht mehr beibehalten worden. So hat sich für beide Arten der Begriff *Mehrfachröhre* etabliert.

In Mehrfach- und Verbundröhren wurden auch teilweise Widerstände und Kondensatoren mit eingebaut (erstmal bei Dreifachröhre 3NF)^[25]; diese Röhren waren gewissermaßen die ersten integrierten Schaltungen der Elektronik .



Eine EM83 ('Magisches Auge' mit doppeltem Elektrodensystem) von RSD

Weitere Arten von Elektronenröhren

- Bildverstärker (Restlichtverstärker) und Bildaufnahmeröhren sind Bildwandlerröhren, welche vor allem zur Aufnahme und Verstärkung von Licht dienen. Restlichtverstärker werden in Nachtsichtgeräten eingesetzt.
- Die Fotozelle gibt es in Vakuumausführung oder gasgefüllt, sie ändert in Abhängigkeit vom auf sie einfallenden Licht ihren Elektronenstrom (Fotoeffekt). Sie wird heute durch Halbleiter (Fototransistor, Fotodiode, Fotowiderstand) ersetzt.
- Die Braunsche Röhre und deren Weiterentwicklung in Form der Bildröhre (englisch CRT) zur Anzeige von Bildsignalen auf einem Bildschirm. Diese Röhre findet man in Oszilloskopen, Fernsehempfängern und Computermonitoren, sie wird zunehmend durch neuere Technologien wie Flüssigkristallbildschirme ersetzt.
- Crookes-Röhren sind Anzeigeröhren vom Anfang des 20. Jahrhunderts. Sie werden im Physikunterricht zu Anschauungszwecken benutzt.
- Die Röntgenröhre wird zur Erzeugung von Röntgenstrahlung verwendet. Sie findet in der Medizintechnik, Werkstoffprüfung und Warenabfertigung als Röntgenquelle Anwendung.
- Ein Plumbicon ist ein spezieller Bildsensor, der auch heute noch in Videokameras für spezielle Einsatzbereiche wie in Bereichen eines Kernkraftwerkes mit hoher ionisierter Strahlung (Reaktorhalle) eingesetzt wird.
- Das Klystron, ein Sende-Verstärker im Mikrowellenbereich, findet in Radaranlagen oder in Teilchenbeschleunigern Verwendung. Das Reflexklystron als Oszillator ist durch andere Techniken abgelöst worden.
- Inductive Output Tube ist eine Mischform aus Strahltriode und Klystron.
- Die Wanderfeldröhre wird als Signalverstärker in der Radartechnik und Radioastronomie benutzt.
- Das Magnetron wird als selbstständiger Mikrowellengenerator in der Radartechnik und als Hauptbauteil von Mikrowellenherden verwendet.
- das Gyrotron ist ein Mikrowellengenerator für höchste Leistungen
- Sekundärelektronenvervielfacher und Photomultiplier sind sehr empfindliche und schnelle Licht- und Ultraviolett-Sensoren, die den Elektronenstrom, der durch einfallendes Licht aus einer Fotokathode gelöst wird, hoch verstärken.
- Fluoreszenzanzeigen sind Anzeigeröhren, die festgelegte Symbole und Zeichen darstellen können. Fluoreszenzanzeigen werden als Anzeigeeinheiten bei Heimelektronik-Geräten wie Videorekordern oder DVD-Playern nach wie vor häufig verwendet. Es gibt auch Pixelanzeigen.
- Nuvistoren sind miniaturisierte Elektronenröhren, meist Trioden für UHF-Anwendungen. Sie wurden in ihrer Funktion praktisch vollständig durch Halbleiter abgelöst und werden nicht mehr verwendet.
- Elektronenröhren mit besonders kleinem Gitterstrom werden als Elektrometerröhren bezeichnet.

Gasgefüllte Röhren

Siehe: Gasentladungslampe

Neben den Elektronenröhren, die in ihrem Inneren ein Hochvakuum benötigen, gibt es Röhren mit Gasfüllung, die erst dadurch ihre eigentliche Funktion erlangen. Es sind keine Elektronenröhren im eigentlichen Sinne, da die freie Weglänge der Elektronen im Inneren meist geringer als der Elektrodenabstand ist. Sie werden jedoch häufig als Röhren bezeichnet und daher hier aufgezeigt.

Gasgefüllte Röhren sind zum Beispiel Quecksilberdampfgleichrichter, gasgefüllte Fotozellen, Nixieröhren, Glimmstabilisatoren und Thyratrons.

Gasgefüllte Gleichrichterröhren wurden bis auf wenige Ausnahmen durch Halbleiterbauelemente ersetzt. Die Gasfüllung besteht meistens aus Edelgasen wie Argon, Xenon, Neon, normalen Gasen wie Wasserstoff und Deuterium oder auch Quecksilberdampf. Die Gasfüllung wird im Betrieb ionisiert, was eine Stromleitung im Gas ermöglicht. Zu der Gruppe der Gleichrichter zählen Quecksilberdampfgleichrichter und gesteuerte Schatröhren wie das Thyratron, das Ignitron und das Excitron.

Tungar-Röhren sind mit dem Edelgas Argon gefüllte Gleichrichter für den Einsatz bei kleinen Spannungen.

Das Krytron ist als elektronischer Schalter einsetzbar.

Gasgefüllte Röhren sind auch die verschiedenen Gasentladungslampen (Hochdruck-Gasentladungslampen wie die Natriumdampflampen, Quecksilberdampflampen oder Halogen-Metaldampflampen), sie werden jedoch meist nicht als Röhren bezeichnet. Ausnahme sind die Leuchtstofflampen und die für Hinterleuchtung eingesetzten Kaltkathodenröhren (CCFL) und Leuchtröhren.

Glimmstabilisatoren (zum Beispiel 0A2) sind unbeheizte, gasgefüllte Röhren, bei der die rechteckige Strom-Spannungs-Kennlinie zur Spannungsstabilisierung benutzt wird. Sie funktionieren wie die Glimmlampen und Nixieröhren, die häufig zu Anzeigezwecken verwendet werden.

Geißlersche Röhren sind mit verschiedenen Gasen gefüllte Kaltkathodenröhren für Unterrichts- und Demonstrationszwecke.

Anschlüsse

Bis auf wenige Ausnahmen (Nullode) benötigen Röhren elektrische Verbindungen in das Innere des Kolbens, um ihre Funktion zu erfüllen. Dazu haben sich im Laufe der Jahre zahlreiche Anschlussstypen entwickelt. Der Großteil der Röhren ist mit einem *Sockel* versehen, der Aufnahme in einer *Fassung* findet. Es existieren aber auch Typen wie die DY51, die direkt in die Schaltung eingelötet werden.

In der Anfangszeit der Röhrentechnik waren Sockel und Kolben getrennt. Die Durchführungsdrähte aus dem Kolben wurden in einen nachträglich angebrachten Sockel aus Bakelit oder Kunststoff geführt und dort verlötet.


Aus Kostengründen wurden letztendlich die separaten Sockelkonstruktionen fallen gelassen und die Allglasröhre entwickelt, deren Vorläufer der Loktalsockel bildet. Dieser sogenannte *Pressglassockel* besteht aus einer speziellen Glasmischung mit geringen dielektrischen Verlusten, in den die Sockelkontakte aus Chromeisen oder Nickel vakuumdicht sowie maßhaltig eingeschmolzen und verpresst werden. Auch diese Sockelart wird in einem separaten Herstellungsschritt gefertigt und im Laufe der Fertigung mit dem System punktverschweißt und mit dem Kolben



Nixie-Anzeigeröhre Typ Telefunken ZM1210

verschmolzen.

Tabelle der wichtigsten Sockelarten:

Sockelart	Bemerkungen	Beispielbild
Europa-Sockel	Anordnung ungleichmäßig, Stift- ϕ 4 mm, Stiftabstand gegenüberliegender Stifte zirka 16 mm.	
Außenkontakt-Sockel (5-Pin)	Pin1 auf 3 Uhr, Nummerierung gegen Uhrzeiger, Winkel 3 x 60° und 2 x 90°, ϕ zirka 20 mm.	
Außenkontakt-Sockel (8-Pin)	Pin1 auf 2 Uhr 30, Nummerierung gegen Uhrzeiger, Winkel 3 x 30° und 5 x 54°, ϕ zirka 26 mm.	
Stahlröhren-Sockel (Y8A)	Pin1 auf 5 Uhr, Nummerierung im Uhrzeiger, Zwei Stiftgruppen, Winkel je 26°50', Lochkreis- ϕ 28 mm	
Oktal-Sockel (K8A)	Pin1 auf 1 Uhr, Nummerierung im Uhrzeiger, Winkel je 45°, Lochkreis- ϕ 17,45 mm	
Loktal-Sockel (W8A)	Pin1 auf 1 Uhr, Nummerierung im Uhrzeiger, Winkel je 45°, Lochkreis- ϕ 17,5 mm	
Rimlock-Sockel (B8A)	Pin1 auf 1 Uhr, Nummerierung im Uhrzeiger, Winkel je 45°, Lochkreis- ϕ 11,5 mm	
Pico 7-Sockel (B7G)	Pin1 auf 7 Uhr 30, Nummerierung im Uhrzeiger, Winkel je 45°, Pin 8 ausgespart, Lochkreis- ϕ 9,53 mm	
Noval-Sockel (B9A)	Pin1 auf 7 Uhr, Nummerierung im Uhrzeiger, Winkel je 36°, Pin 10 ausgespart, Lochkreis- ϕ 11,9 mm	
Magnoval-Sockel	Pin1 auf 7 Uhr, Nummerierung im Uhrzeiger, Winkel je 36°, Pin 10 ausgespart, Lochkreis- ϕ 19 mm	

Separate Anschlusskappe

Für spezielle Anforderungen besitzen manche Röhrentypen eine vom Sockel separate Anschlusskappe. Bei den Röhren mit Außenkontaktsockel ist das zumeist der Anschluss für das Steuergitter, er liegt damit räumlich weit entfernt von den übrigen Anschlüssen und ermöglicht damit eine weitgehende Entkopplung, was den Hochfrequenzeigenschaften dieser Röhren zugute kommt. Nachteile dieser Anschlüsse sind der höhere Aufwand bei der Röhrenherstellung und auch im Gerätebau. Die Vorteile der Entkopplung werden durch notwendige längere Leitungswege der Verdrahtung bis zu diesem Anschluss teilweise wieder aufgehoben.

Moderne Röhren besitzen einen Kappenanschluss, wenn es die Spannungsfestigkeit erfordert. Die Anoden von Zeilenendröhren (PL81, PL36, PL500, PL509, ...) werden durch die Selbstinduktion des Zeilentransformators mit Spannungsspitzen bis 5 kV belastet. Bei diesen hohen Spannungen wären Überschläge zwischen den einzelnen Sockelstiften unvermeidlich. Aus dem gleichen Grund liegt die Kathode von Boosterdioden (PY81, PY83, PY88, PY500, ...) an der Kolbenkappe.

Auch Sendeendröhren größerer Leistung besitzen eine oder mehrere Anschlusskappen. Meist ist auch hier die Anode angeschlossen, ebenfalls aus Gründen der Spannungsfestigkeit, aber auch zur besseren Entkopplung der Gitter- und Anodenkreise. Ein weiterer Punkt ist der einfachere Aufbau des mechanisch meist größeren Ausgangsschwingkreises der Sendeendstufe.



Kappenanschluss einer PL36

Bezeichnungsschemata

Amerikanisches Schema

Die US-amerikanische Röhrenindustrie entwickelte ab 1933 einen eigenen Typisierungsschlüssel mit sehr begrenzter Aussagekraft (*Radio Electronics Television Manufacturers' Association – RETMA Tube Designation*).

Europäisches Schema

Mit der allmählichen Standardisierung der Röhrensockel um 1925 (zum Beispiel Europa-Stiftsockel oder Topfsockel mit Außenkontakten) wurden erste Versuche mit einem kombinierten Zahlen- und Buchstabensystem zur einheitlichen Kurz Kennzeichnung von Bauart und Betriebsdaten der Röhren unternommen.

Aber erst ab 1933/34 etablierte sich in Europa ein zukunftsweisender Röhren-Bezeichnungsschlüssel, das von Philips und Telefunken gemeinsam beschlossene „Gemeinschafts-Bezeichnungssystem“^[26]. Es entwickelte sich zu einem heute noch gültigen, höchst informativen und transparenten Code-System, das die Röhren nach Heizungsart, Sockelung und Systemtyp klassifiziert, konnte sich aber nur in Europa durchsetzen.

	1. Buchstabe: Heizungsart (Spannung oder Strom)		2. Buchstabe: Systemart
A	4 V direkt oder indirekt	A	Diode
B	180 mA direkt aus Batterien	B	Zweiwegdiode, zwei Anoden zu einer Kathode
C	200 mA indirekt (Serienspeisung)	C	Triode
D	1,4 V direkt aus Batterien oder halbindirekt	D	Leistungstriode
E	6,3 V indirekt	E	Tetrode
F	12,6 V indirekt	F	Pentode
G	5 V indirekt	H	Hexode oder Heptode
H	150 mA indirekt	K	Oktode
I	(wurde schon für 20 V indirekt verwendet)	L	Leistungstetrode oder Leistungspentode
K	2 V direkt aus Blei-Säure-Zellen	M	Anzeige- bzw. Indikatorröhre
L	450 mA indirekt (Serienspeisung)	Q	Enneode (9-Pol-Röhre)
O	ohne Heizung (für gasgefüllte Röhren, auch Halbleiter)	T	Zählröhre (digitale Anwendungen)
P	300 mA indirekt (Serienspeisung)	W	Einweg-Leistungsdioden mit spezieller Gasfüllung
U	100 mA indirekt (Serienspeisung)	X	Zweiweg-Leistungsdioden mit spezieller Gasfüllung
V	50 mA indirekt (Serienspeisung)	Y	Einweg-Leistungsdioden
X	600 mA indirekt (Serienspeisung)	Z	Zweiweg-Leistungsdioden
Y	450 mA indirekt (Serienspeisung)		
Z	ohne Heizung (für gasgefüllte Röhren)		

Sind in einem Glaskolben mehrere Elektrodensysteme untergebracht, so werden diese mit weiteren Buchstaben gekennzeichnet, welche die gleiche Bedeutung wie der zweite Buchstabe haben. Dabei werden die Buchstaben in alphabetischer Reihenfolge aufgelistet.

Röhren sind grundsätzlich Verschleißteile und müssen nach bestimmten Zeitintervallen ausgetauscht werden. Um diesen Vorgang zu erleichtern, sind fast alle Röhren mit einem Stecksystem, dem Röhrensockel, ausgestattet, der im Verlauf der Röhrengeschichte die unterschiedlichsten Varianten angenommen hat, die sich ebenfalls im Zahlencode der Röhrenbezeichnung niederschlagen. Dieser Code hat sich über verschiedene Quellen hinweg mehr als Anhaltspunkt denn als fest vorgegebenes Schema erwiesen. Eine verlässliche Standardisierung konnte erst 1963 erreicht werden, allerdings waren zu diesem Zeitpunkt schon viele Röhrentypen auf dem Markt, die nicht mehr in das Schema passten.

Wertebereich	Sockelart
1 bis 9	Außenkontakt-Sockel (5- und 8-polig), auch Oktal- und Europa-Stiftsockel mit Quetschfußaufbau
10 bis 19	Stahlröhren-Sockel (8-polig), ggfs. Quetschfußaufbau
20 bis 29	Oktal oder auch Preßstellertypen und Loktalröhren
30 bis 39	Oktal-Sockel
40 bis 49	Rimlock-Sockel
50 bis 60	Verschiedene Sockelformen, bevorzugt Pressglassockel wie Loktal
61 bis 79	Verschiedene Sockel, zum Beispiel für Kleinströhren (B5A, B5B, B8D, ...) oder direkte Lötverbindung oder Loktalröhren von Lorenz
80 bis 89	Noval-Sockel

90 bis 99	Pico 7-Sockel
150 bis 159	Stahlröhren-Sockel (10-polig)
171 bis 175	RFT Gnomröhrenreihe
180 bis 189	Noval-Sockel
190 bis 199	Pico 7-Sockel
200 bis 209	Dekal-Sockel
280 bis 289	Noval-Sockel
500 bis 599	Magnoval-Sockel
800 bis 899	Noval-Sockel
900 bis 999	Pico 7-Sockel

Je nach Stellenanzahl kann die zweite oder die letzte Stelle ein Hinweis auf die Art der Gitter-Steuerkennlinie sein – diese Regelung wurde erst 1963 offiziell vorgegeben und auch dann nicht immer von den Herstellern eingehalten und ist nur als Hinweis zu verstehen. Oft ist die angegebene Zahl nur eine laufende Nummer ohne weitere Bedeutung. So ergibt beispielsweise die Angabe einer Regelkennlinie bei Leistungsröhren keinen Sinn. Verbreitet ist nachfolgend dargestellte Zifferneinteilung zur Unterscheidung der Kennlinie bei manchen Kleinsignalpentoden (Kennbuchstabe F) oder auch bei HF-Trioden (Kennbuchstabe C, zum Beispiel PCC189).

	Anodenstrom in Abhängigkeit von der Steuergitterspannung
gerade Ziffer	normale Kennlinie
ungerade Ziffer	gekrümmte Kennlinie für Regelröhren

Gelegentlich sind Röhren anzutreffen, bei denen die Ziffernkombination zwischen dem Buchstaben der Heizungsart und denen der Systemart angegeben wird, zum Beispiel E83CC. Diese Röhren sind für eine besonders lange Lebensdauer spezifiziert, weisen gegenüber der Standardversion (hier: ECC83) engere Toleranzen auf, haben eine höhere Stoß- und Vibrationsfestigkeit und sind oft Spanngitterröhren. Daher kamen sie besonders bei erhöhten Anforderungen an Funktion und Zuverlässigkeit wie zum Beispiel in Geräten für Industrie und Militär zum Einsatz. Es ist nicht in jedem Fall bei einer gegebenen Spezialröhren-Typbezeichnung durch einfaches Umstellen der Ziffern-Buchstaben-Kombination auf die elektrisch vergleichbare konventionelle Röhre zu schließen. Die nach dem Philips-Datenblatt zur Verwendung in Telefonanlagen gedachte Kleinleistungs-Spezialpentode E81L ist beispielsweise nicht mit der Zeilenendpentode EL 81 vergleichbar!

Typische reguläre Beispiele:

- UL 84 = Leistungsendpentode für 100 mA Heizstrom, Noval-Sockel
- EF 97 = Regel-Pentode für 6,3 V Heizspannung, Pico-Sockel
- VY 1 = Leistungsdiode für 50 mA Heizstrom, Außenkontaktsockel
- UCH 21 = Mehrsystemröhre aus einer Triode und Heptode in einem Glaskolben, 100 mA Heizstrom, Loktal-Sockel

Ausnahmen

Die magischen Augen (M) sind hinsichtlich der Typenbezeichnung als Ausnahme zu betrachten. Bis auf wenige Ausnahmen ist in jedem magischen Auge mindestens eine Triode als Hilfssystem untergebracht. Diese Triode wird nicht extra aufgeführt: Es gibt keine Röhre *ECM*, wohl aber Röhren *EFM*, bei denen die übliche Triode durch eine Pentode ersetzt wurde.

Manche Leistungspentoden (L) sind in konstruktiver Hinsicht Tetroden, ihnen fehlt aber sowohl ein Bremsgitter als auch eine Strahlbündelungselektrode. Durch einen vergleichsweise sehr großen Abstand der Anode vom Schirmgitter wird trotzdem die Betriebscharakteristik einer Pentode erreicht (zum Beispiel ECL11, AL4).

Russisches Schema

Russische Röhren werden meist nach dem Schema Zahl-Buchstabe-Zahl-Buchstabe bezeichnet, zum Beispiel 2Ж27Л.

Die erste Zahl bezeichnet die Heizspannung:

Zahl	Heizspannung
06	625 mV
1	800 mV; 1 V; 1,2 V; 1,4 V; 1,5 V
2	2 V; 2,2 V; 2,4 V
3	3,15 V
4	4 V; 4,2 V; 4,4 V
5	5 V
6	6 V; 6,3 V
7	7 V
9	9 V
10	10 V
12	12 V; 12,6 V
13	13 V
17	17 V
18	18 V
20	20 V
25	25,2 V
30	30 V

Der erste Buchstabe bezeichnet die Art und die Anwendung der Röhre, die zweite Zahl ist ein Unterscheidungsmerkmal. Der zweite Buchstabe enthält konstruktive Merkmale, zum Beispiel den zugehörigen Sockel.

Rauschen

Wie jedes andere elektronische Bauelement bewirkt eine Elektronenröhre ein in Spektrum und Leistung spezifisches Rauschen. Dieses ist von der generellen Funktion einer Elektronenröhre bedingt.

Funkeleffekt

Die Emission von Elektronen an der Kathodenoberfläche hängt von chemischen Vorgängen innerhalb der erhitzten Emissionsschicht ab. So ist die Emission nicht über die gesamte wirksame Fläche der Kathode identisch und ändert sich zudem zeitlich. Der Funkeleffekt trägt am stärksten zum Gesamtrauschen bei. Er ist besonders für Audioverstärker bedeutsam, da die Rauschleistung, die durch den Funkeleffekt verursacht wird, unterhalb von etwa 10 kHz stark ansteigt.

Schroteffekt

Der Elektronenstrom, der – zum Beispiel bei Aussteuerung mit einer Gleichspannung – die Anode erreicht, ist niemals völlig konstant, sondern hängt von der statistischen Anzahl der Elektronen ab, die im entsprechenden Zeitpunkt die Anode erreichen.

Verteilungsrauschen

Bei einer Mehrgitterröhre fließen die von der Kathode emittierten Elektronen zum Schirmgitter und weiter zur Anode. In Abhängigkeit von der Zeit erreichen eine abweichende Anzahl von Elektronen Schirmgitter und Anode. Dieses führt zu einem für Mehrgitterröhren typischen höheren Rauschen.

Das Stromverteilungsrauschen kann durch Reduzierung des Schirmgitterstromes reduziert werden. Konstruktive Maßnahmen wie gleichartig gewickelte Schirm- und Steuergitter erlauben es, die Schirmgitterwindungen aus Kathodensicht hinter dem Steuergitter zu verstecken. Die Windungen liegen im Elektronenschatten des Steuergitters und können somit nur weitaus weniger Elektronen aufnehmen: Der Schirmgitterstrom ist weitaus geringer als bei herkömmlichen Schirmgitterkonstruktionen.

Wegen ihres niedrigeren Rauschens wurden im Laufe der Geräteentwicklung in HF-Eingangsstufen ausschließlich Trioden eingesetzt.

Influenzrauschen

Vor allem bei Frequenzen oberhalb von 100 MHz kommt es zu Influenzvorgängen, die der Elektronenstrom zwischen Kathode und Anode infolge Laufzeiteffekten auf dem Steuergitter hervorruft.

Kühlung

Kühlverfahren



Siedegekühlte Anode einer großen Senderöhre



Luftgekühlte Anode einer kleinen Senderöhre. Der linke Ring ist der Anschluss des Schirmgitters



Die strahlungsgekühlte Senderöhre 3-500 C mit 500 W Verlustleistung besitzt eine Anode aus Graphit



Röntgenröhre mit Drehanode. Der Antrieb erfolgt unten durch die Glaswand wie bei einem Asynchronmotor

Die Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode bewirkt eine Beschleunigung der von der Kathode emittierten Elektronen: Elektrische Energie wird in kinetische Energie der Elektronen umgewandelt. Trifft dieser Elektronenstrom auf die Anode, wird die Bewegungsenergie überwiegend in Wärmeenergie, zu einem geringen Teil aber auch in Lichtstrahlung (siehe oben bei Anode) und bei höheren Betriebsspannungen in Röntgenstrahlung umgesetzt. Die entstehende Wärme muss abgeführt werden, damit die Röhre nicht thermisch zerstört wird. Abhängig von der Bauart kann nicht beliebig viel Energie pro Zeit abgeführt werden, das bezeichnet man als maximale Anodenverlustleistung.

Leistungsvergleich

Die folgende Tabelle zeigt am Beispiel von Senderöhren für verschiedene Kühlungsarten den Aufbau der Anode und die maximale spezifische Belastbarkeit.

Kühlungsart	Anodenart	max. spezifische Belastbarkeit
Strahlung	Graphit, Molybdän	10 W/cm ²
Druckluft	Außenanode aus Cu mit Kühlrippen	50 W/cm ²
Wasser- oder Ölkühlung	Außenanode aus Cu, von Kühlflüssigkeit umströmt	100 W/cm ²
Siedekühlung	Außenanode aus Cu, Wasser wird verdampft	500 W/cm ²

Strahlungskühlung

Bei kleinen Leistungen werden Röhren immer strahlungsgekühlt. Das System ist ohne Kontakt nach außen gut isoliert im Vakuum untergebracht, Wärmeabgabe ist nur durch Strahlung möglich. Um die Verlustleistung möglichst effektiv abzustrahlen, sind vor allem bei Leistungsröhren Anoden und Gitter mit Kühlfahnen oder Kühlrippen versehen. Geeignetes, dunkles Material mit großer Oberfläche (zum Beispiel Graphit oder P2-Eisen) trägt zur Erhöhung des Emissionsgrades bei. Trotzdem ist die abstrahlbare Leistung sehr begrenzt.

Das Steuergitter in unmittelbarer Nähe der heißen Kathode muss besonders kühl bleiben, damit es seinerseits keine Elektronen emittiert. Die Haltestege werden deshalb aus thermisch gut leitendem Material (oft Kupfer mit Nickelplattierung) gefertigt und tragen am Ende ebenfalls Kühlfahnen. Zusätzlich können die Molybdän-Gitterdrähte vergoldet sein, da Gold in Verbindung mit von der Kathode abgedampftem Barium die Austrittsarbeit erhöht.

Strahlungskühlung findet man auch bei Röntgenröhren mit *Drehanode*, hier sorgt die Drehung für eine Wärmeverteilung, indem der auftreffende Elektronenstrahl immer nur einen kleinen Teilbereich der elektromotorisch bewegten Anode erhitzt. Dieser Teilbereich kann sich dann bis zur Vollendung einer Umdrehung außerhalb des Strahlflecks wieder abkühlen.

Andere Kühlverfahren

Senderöhren mit hoher Leistung werden mit Wasser oder einem anderen Kühlmedium gekühlt, während Senderöhren mittlerer Leistung luftgekühlt sind (gesteigerte Luftkühlung mit Gebläsen). Damit kann man einige hundert Mal mehr Leistung abtransportieren als mit Strahlungskühlung.

Bei diesen Röhren ist die Anode aus massivem Kupfer gefertigt und ragt aus dem Gehäuse heraus oder ist im Inneren von einem Kühlmedium durchflossen. Das erlaubt gegenüber Strahlungskühlung wesentlich höhere Leistungsdichten auf der Anode. Die übrigen Elektroden wie das Schirmgitter sind bei scheibenförmigem Aufbau ebenfalls durch Wärmeleitung kühlbar.

Für höchste Leistungen wird immer die Siedekühlung eingesetzt.

Lebensdauer

Trotz ihrer hohen Toleranz gegenüber kurzzeitigen Überschreitungen der elektrischen Grenzwerte besitzen Elektronenröhren eine geringere Lebensdauer als Halbleiterbauelemente. Gerade in der Leistungstechnik sind Röhren Verbrauchselemente, während oft in Empfängern der 1950er Jahre noch die original eingesetzten Vorröhren anzutreffen sind. Röhren weisen herstellungsbedingt Toleranzen im zweistelligen Prozentbereich auf, in einigen Schaltungen funktioniert eine Röhre mit weit abweichenden Parametern besser, in anderen weniger. Im Bereich der High-End-Audioverstärker werden Röhren oft weitaus früher als messtechnisch notwendig ausgetauscht.

Die anfangs aufwändige und vor allem bei sehr hohen Frequenzen problematische Konstruktion Röhrensockel–Röhrenfassung ist nicht zuletzt Ausweis der Notwendigkeit einfachen Austausches.

Neben einigen anderen Faktoren wird die Lebensdauer einer Elektronenröhre bei einem Betrieb innerhalb der Grenzwerte durch folgende Faktoren bestimmt:

Zwischenschichtbildung

Die elektrochemischen Vorgänge in den Kathoden sind der entscheidende, die Lebensdauer limitierende Faktor. Vor allem, wenn die Röhre geheizt wird, jedoch kein Anodenstrom fließt, bilden sich bei einer Oxidkathode schnell sogenannte Zwischenschichten zwischen Kathodenträger und der aktiven Schicht aus, die die Emissionsfähigkeit der Kathode drastisch reduzieren.

Diese Zwischenschicht kann begrenzt durch gezielte, vorsichtige Überheizung bei gleichzeitigem hohem Kathodenstrom wieder rückgebildet werden. Siehe Abschnitt „Regenerierung“.

Abtragung von Kathodenmaterial

Das emissive Material der Kathode kann sich mit der Zeit langsam ablösen. Zum einen kann das durch sehr starke Überlastungsmomente geschehen, die zum Beispiel auftreten können, wenn die Röhre mit bereits angelegter Anodenspannung aufgeheizt wird. Zum anderen findet in der Röhre eine stetige Abdampfung statt. Dieser Vorgang verläuft unter normalen Betriebsbedingungen jedoch sehr langsam und macht sich erst nach einigen zehntausend Betriebsstunden bemerkbar. Bereits vor Taubwerden der Kathode kann als Folge Gitteremission auftreten.



Röhre mit teilweise abgelöster Kathodenschicht

Gitteremission

Eine Folge von der Kathode verdampfenden und sich auf dem Steuergitter niederschlagenden Materials kann Gitteremission sein. Dabei emittiert das Steuergitter Elektronen, was dazu führt, dass es positiver wird, sich dadurch der Anodenstrom erhöht und sich der Arbeitspunkt soweit verschiebt, dass Verzerrungen und/oder thermische Überlastung auftreten. Dadurch heizt sich das Steuergitter noch weiter auf und emittiert umso mehr Elektronen. Besonders anfällig sind Schaltungen, bei denen die Gittervorspannung über einen besonders großen Widerstand (1 Megaohm oder größer) zugeführt wird. Dann reichen bereits wenige Mikroampere Gitteremissionsstrom, um einen Ausfall zu verursachen.

Vakuum

Das Vakuum einer Röhre kann sich aus zwei Gründen verschlechtern: Ausgasung von Materialien innerhalb der Röhre, was von der Qualität (Reinheit) der Materialien abhängt, sowie Eindringen von Gasen durch den Kolben.

Bedingt durch die Betriebstemperatur einer Elektronenröhre wechselt die Temperatur des Glaskolbens oder der Keramik-Metall-Verschweißungen zwischen ein- und ausgeschaltetem Zustand um die 100 K, bei Leistungsröhren kann die Temperaturdifferenz sogar 150 K erreichen. Manchmal geht mit einer Vielzahl von Ein- und Ausschaltvorgängen die Bildung von Haarrissen im Kolben einher. Die meisten Gase (Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid usw.) können zunächst vom Getter der Röhre adsorbiert werden. Bei Glasröhren ermöglicht der Getter eine optische Kontrolle des Vakuums: Solange der silberne Belag an der Innenseite des Kolbens noch deutlich erkennbar ist, kann man das Vakuum als ausreichend ansehen. Ist er dagegen verschwunden bzw. milchig-transparent verfärbt, befindet sich Luft im Glaskolben. Bei genügendem Gasdruck kommt es zu einer Oxidation des Heizfadens: Er verbrennt. Die Röhre ist jetzt nachhaltig zerstört.

Die Verschlechterung des Vakuums hat zunächst Änderungen der elektrischen Eigenschaften zur Folge. So können im nicht mehr komplett gasfreien Raum Glimmentladungen entstehen, die sich gerade bei Endröhren wegen schaltungstechnisch nicht notwendiger hochohmiger Außenwiderstände außerordentlich schnell zu Bogenentladungen steigern. Diese ziehen unter Umständen weitere Bauteile (Netztransformator, Gleichrichterröhre, Ausgangsübertrager) in Mitleidenschaft. Ist jedoch schaltungstechnisch gesichert, dass der innere Überschlag nur kurz brennt und keine Folgeschäden verursacht, kann sich das Vakuum einer Röhre durch den dabei auftretenden Metaldampf und dessen Gasadsorptionsvermögen wieder verbessern. Dieses Phänomen wird besonders bei Senderöhren beobachtet beziehungsweise genutzt.

Langlebensdauerrohren

Dort, wo eine sehr hohe Anzahl von Röhren in einem elektronischen System zusammenarbeiten (elektronische Rechengerate, Fernsprechübertragungsanlagen usw.), nur sehr eng tolerierte Röhren verwendet werden können oder wo besondere Anforderungen an die Zuverlässigkeit gestellt werden, werden Spezialröhren eingesetzt. Je nach Einsatzzweck wurden unterschiedliche Arten von Spezialröhren entwickelt. Röhren für elektronische Rechensysteme besitzen eine Spezialelektrode, die nur gering zur Ausbildung von Zwischenschichten neigt. Röhren für den militärischen Einsatz sind neben anderen Anforderungen häufig für hohe Beschleunigungen konstruiert. Die Lebensdauer dieser Spezialröhren wird im Allgemeinen mit 10.000 Stunden angegeben.^[27]

Spezialröhren sind von den Herstellern unterschiedlich gekennzeichnet. Oft wird die Systembezeichnung mit den Ziffern vertauscht, so wird aus einer ECC88 in der Spezialvariante eine E88CC. Valvo hat hier auch verschiedene nach Farben unterschiedene Serien etabliert (Rote Serie, Blaue Serie, usw.) die ihrerseits spezielle Eigenschaften (soliderer Systemaufbau, zwischenschichtfreie Kathode, usw.) kennzeichnen.

Spezialröhren gehören heute zu den gesuchten und damit vergleichsweise teuren Elektronenröhren.

Regenerierung

Ein häufiger Ausfallgrund von Elektronenröhren sind taube Kathoden, das heißt, deren Elektronenemission lässt nach. Solche Kathoden können in gewissem Umfang regeneriert werden. Dazu wird während gewisser Zeiträume die Kathode gezielt überheizt, während gleichzeitig ein begrenzter Anodenstrom fließt. Ziel ist dabei, die Kathode wieder zu aktivieren, sodass die Röhre wieder eine Weile funktioniert.

Bei altersbedingt leuchtschwachen Anzeigeröhren wie zum Beispiel magischen Augen ist eine Regenerierung im Allgemeinen nicht möglich, da die Gründe nicht in einer schwachen Emission der Kathode zu suchen sind, sondern sich fast ausschließlich in einem Taubwerden des Leuchtstoffes zeigen. Es gibt Möglichkeiten^[28], durch massive Erhöhung der Anodenspannung wieder eine höhere Leuchtkraft zu erzielen.

Für Bildröhren waren früher Bildröhrenregeneriergeräte erhältlich, die den Vorgang der Regeneration vereinfacht haben.^[29]

Weiterhin wurden taube Bildröhren-Kathoden dauerhaft überheizt, um noch eine gewisse Zeit funktionsfähig zu bleiben.

Heutige Glühkathoden von Bild- und anderen Kathodenstrahlröhren haben eine so hohe Lebensdauer, dass sie meist diejenige des Gerätes übersteigt.

Siehe auch

- Barkhausensche Röhrenformel
- Laufzeitröhre
- Röhrenabklopffammer
- Edison-Richardson-Effekt

Literatur

- Friedrich Benz: *Einführung in die Funktechnik*. 4 Auflage. Springer-Verlag, Wien 1937, 1950, 1959.
- Fritz Kunze, Erich Schwendt: *Röhren-Taschen-Tabelle*. 15 Auflage. Franzis, Poing 2006, ISBN 3-7723-5454-8.
- Eduard Willi: *Schweizer Elektronenröhren 1917–2003*. Eigenverlag Willi, Russikon 2006, ISBN 978-3-0330055-2-5.
- F. Bergtold: *Röhrenbuch für Rundfunk- und Verstärkertechnik*. Weidmannsche Buchhandlung, Berlin 1936.
- Ludwig Ratheiser: *Das große Röhren-Handbuch*. Franzis-Verlag, München 1995, ISBN 3-7723-5064-X.
- Ludwig Ratheiser: *Rundfunkröhren – Eigenschaften und Anwendung*. Union Deutsche Verlagsgesellschaft, Berlin 1936.

- Herbert G. Mende: *Radio-Röhren, wie sie wurden, was sie leisten, und anderes, was nicht im Barkhausen steht*. Franzis-Verlag, München 1966.
- Gerhard B. Salzmann: *Zur Geschichte der RV12P2000*. Rüdiger Walz, Kelkheim 1994, ISBN 3-9802576-2-2.
- Aus der Philips Technical Library:
 - Technical & Scientific Literature Department: *Data and Circuits of Receiver and Amplifier Valves*. In: *Series of Books of Electronic Valves*. II, N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken (Philips Industries), Eindhoven, NL 1949 (übersetzt von G. Ducloux, Sutton, England) (PDF, 26 MB ^[30]).
 - Technical & Scientific Literature Department: *Data and Circuits of Receiver and Amplifier Valves, 1st Supplement*. In: *Series of Books of Electronic Valves*. III, N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken (Philips Industries), Eindhoven, NL 1949 (übersetzt von G. Ducloux, Sutton, England) (PDF, 14 MB ^[31]).
 - Technical & Scientific Literature Department, N. S. Markus, J. Otte: *Data and Circuits of Radio Receiver and Amplifier Valves, 2st Supplement*. In: *Series of Books of Electronic Valves*. IIIa, N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken (Philips Industries), Eindhoven, NL 1952 (übersetzt von J. F. Havinga, London) (PDF, 30 MB ^[32]).
 - Technical & Scientific Literature Department, J. Jager: *Data and Circuits of Television Receiver Valves*. In: *Series of Books of Electronic Valves*. IIIc, N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken (Philips Industries), Eindhoven, NL 1953 (übersetzt von J. Jager, Eindhoven, Harley Carter, London) (PDF, 15 MB ^[33]).
- Heinrich Barkhausen: *Elektronen-Röhren*. 4 Auflage. Verlag von S. Hirzel, Leipzig 1937.
- Werner Espe: *Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik*. 1: Metalle und metallisch leitende Werkstoffe, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1957.
- Werner Espe: *Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik*. 3: Hilfswerkstoffe, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1957.

Patente

- Patent GB190304168 ^[34]: *Improvements in the Method of and Means for Obtaining Uni-directional Current from a Single-phase or Poly-phase Alternating Current Source*. Angemeldet am 21. Februar 1903, Erfinder: Peter Cooper-Hewitt.
- Patent DE179807 ^[35]: *Kathodenstrahlrelais*. Veröffentlicht am 4. März 1906, Erfinder: Robert von Lieben.
- Patent US841387 ^[36]: *Device For Amplifying Feeble Electrical Currents" – Die De Forest-Triode*. Angemeldet am 25. Oktober 1905, Erfinder: Lee de Forest.
- Patent GB190424850 ^[37]: *Improvements in Instruments for Detecting and Measuring Alternating Electric Currents*. Angemeldet am 16. November 1904, Erfinder: John Ambrose Fleming.

Weblinks

- Röhregrundlagen ^[38]
- Exzellente Seite über Elektronenröhren von H.-T. Schmidt ^[39]
- Service für vergriffene Röhren-Datenblätter ^[40]
- Große Datenblattsammlung ^[41]
- Jogis Röhrenbude ^[42]
- Mißverständnisse um Röhren ^[43]
- Röhrenvergleichslisten, Datenblätter, Schaltpläne ^[44]
- Röhrenherstellung in Handarbeit ^[45] (Flash Video – 17 Minuten)

Referenzen

- [1] Patent US307031 (<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=US307031>): *Electrical Indicator*. Angemeldet am 15. November 1883, veröffentlicht am 21. Oktober 1884, Erfinder: Thomas A. Edison (PDF (<http://www.pat2pdf.org/patents/pat307031.pdf>)).
- [2] Patent GB190304168 (<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=GB190304168>): *Improvements in the Method of and Means for Obtaining Uni-directional Current from a Single-phase or Poly-phase Alternating Current Source*. Angemeldet am 30. Oktober 1902, Erfinder: Peter Cooper-Hewitt.
- [3] Patent GB190424850 (<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=GB190424850>): *Improvements in Instruments for Detecting and Measuring Alternating Electric Currents*. Angemeldet am 16. November 1904, Erfinder: John Ambrose Fleming.
- [4] Homepage von Robert von Lieben (<http://www.hts-homepage.de/Lieben/Lieben.html>)
- [5] Patent DE179807 (<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=DE179807>): *Kathodenstrahlrelais*. Veröffentlicht am 4. März 1906, Erfinder: Robert von Lieben.
- [6] Andreas Stiller: *Röhrenradau. 100 Jahre Streit um den elektronischen Verstärker..* In: *c't*. 6, 2006, S. 67 (*c't*-Archiv (<http://www.heise.de/ct/06/06/067/default.shtml>)).
- [7] Patent US841387 (<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=US841387>): Erfinder: Lee de Forest: „Device For Amplifying Feeble Electrical Currents“ – Die *De Forest*-Audion-Röhre, angemeldet am 25. Oktober 1906.
- [8] Triode Type A (http://www.radiomuseum.org/tubes/tube_a_western.html)
- [9] Pliotron, Sammlung Udo Radtke (<http://www.tubecollection.de/ura/pliotron.htm>)
- [10] Patent DE293460 (<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=DE293460>): *Anordnung für Kathodenstrahlrelais, die als Verstärkungsrelais wirken*. Veröffentlicht am 23. August 1914, Anmelder: Gesellschaft für drahtlose Telegraphie.
- [11] Patent DE300617 (<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=DE300617>): *Vakuumverstärkerröhre mit Glühkathode und Hilfsselektrode*. Angemeldet am 1. Juni 1916, Anmelder: Siemens & Halske.
- [12] H. J. Round: *Direction and Position Finding*. In: *Journal Inst. Elec. Eng.*. lviii, 1920, S. 224–257.
- [13] Schaltbild Ducretet RM5 von 1926, Link (<http://www.tsf-radio.com/archives/sch/sch-ducretet-RM5.pdf>)
- [14] Die Loewe Röhre 3NFB – Analyse einer Mehrfachröhre Link (http://www.radiomuseum.org/forumdata/upload/3NFB_Bericht_Teil1.pdf)
- [15] Erläuterungen zur Loktälöhre ab PDF-Seite 13 (http://frank.pocnet.net/sheets/046/suppinfo/Philips_ElectronicValves_BookIII.pdf.)
- [16] Funk-Technik, Heft 24/1947
- [17] War Department Technical Manual TM11-235, Fig. 15, Seite 13.
- [18] AF7 im Radiomuseum (http://www.radiomuseum.org/tubes/tube_af7.html)
- [19] EF12 im Radiomuseum (http://www.radiomuseum.org/tubes/tube_ef12.html)
- [20] Siehe Definition der elektrischen Leistung
- [21] Schlierenbildung bei Elektronenröhren (<http://www.hts-homepage.de/Herstellung/Schlieren.html>)
- [22] Diskussion über Spiegelbildung im Forum des Radiomuseums (http://www.radiomuseum.org/forum/innenspiegel_nicht_getter_bei_manchen_roehrentypen.html)
- [24] Röhrenprojekt TU-Berlin (<http://www.emsp.tu-berlin.de/lehre/mixed-signal-baugruppen/Roehrenverstaerker>)
- [25] <http://www.hts-homepage.de/Loewe/3NF.html>
- [26] RATHEISER, Ludwig, „Das große Röhren- Handbuch“, Franzis Verlag GmbH, Poing, ISBN 978-3-7723-5064-1
- [27] Exemplarische Daten unter <http://frank.pocnet.net/sheets/009/e/E88CC.pdf>, Seite 11
- [28] Regenerierung von magischen Augen in Jogis Röhrenbude (http://www.jogis-roehrenbude.de/Roehren-Geschichtliches/Mag_Augen/Regener/Regener.htm)
- [29] Einfaches Regenerieren von S/W-Bildröhren (<http://www.pocnet.net/hobby/bastel/tubes/tips.html>)
- [30] http://frank.pocnet.net/sheets/046/suppinfo/Philips_ElectronicValves_BookII.pdf
- [31] http://frank.pocnet.net/sheets/046/suppinfo/Philips_ElectronicValves_BookIII.pdf
- [32] http://frank.pocnet.net/sheets/046/suppinfo/Philips_ElectronicValves_BookIIIa.pdf
- [33] http://frank.pocnet.net/sheets/046/suppinfo/Philips_ElectronicValves_BookIIIc.pdf
- [34] <http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=GB190304168>
- [35] <http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=DE179807>
- [36] <http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=US841387>
- [37] <http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&F=0&IDX=GB190424850>
- [38] <http://www.elektronikinfo.de/strom/roehren.htm>
- [39] <http://www.hts-homepage.de/HTS-Roehreninhalt.html>
- [40] <http://www.tubedata.de/>
- [41] <http://frank.pocnet.net/index.html>
- [42] <http://www.jogis-roehrenbude.de/>
- [43] <http://www.elektronikinfo.de/strom/roehrenirtum.htm>
- [44] <http://www.funkamt.de/>
- [45] http://dailymotion.alice.it/video/x3wrzo_fabrication-dune-lampe-triode

Quellen und Bearbeiter der Artikel

Elektronenröhre *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=75039941> *Bearbeiter:* 1-1111, 32X, 32bitmaschine, AHZ, Abrakadabra, Aka, AlexdG, Allesmüller, AmigoCgn, Amtiss, Anastasius zweg, Anathema, AndreAdrian, Andrsvoos, Anhi, Arved, Averse, Avron, BEG, BJ Axel, BlueFiSH.as, Baikonor, Bertonymus, Biedimpfl, Blauer elephant, Blaufisch, Boehm, BuSchu, Cactus26, Cepheiden, Chrisbenz, ChristophDemmer, Chtaube, Ckeen, Cl, ClemiMD, Conan174, Conny, CvetanPetrov1940, D, DarkMoon, Dk9sj, Don Magnifico, Dr.kleine, DvsseI, Ebedic, Eckiradio, El., Eneas, Ephraim33, Euku, F.Schäfer, Fgli, Frihu, GNoSis, Gauss, Georg-Johann, GeorgGerber, GeorgHH, Gerhardvalentin, Gertheinz, Glenn, Goliath, Gonzosft, Grasmo, Grenzdebiler, Groogokk, Gurt, HROestTypo, HaSee, Hardy42, Haseluenne, Heihei, HenrikHolke, Herbertweidner, Hermannthomas, Hihiman, Hutschi, Hydro, Hystrix, Hänschenlein, Ich hab hunga, Inschenör, J-PG, JHöcker, JWBE, Jergen, Jivee Blau, Jkbw, Jkü, Jodoform, JohannWalter, Jossi, Juesch, Julius1990, Jutta234, Karsten1, Katharina, Kein Einstein, Kku, Klaeren, Klawuttk, Kölscher Pitter, LKD, Laenzlinger, Leider, Leumar01, Lmsz, Lochball, Lukas9950, Löschfix, MalteAhrens, Martin Homuth-Rosemann, McCoy-Tyner, MdE, Memset, Menrathu, Mh26, MichaelDiederich, MichaelFrey, Mik81, Mjk, Mkill, MoLa, MsChaos, Na204, Nachtagent, Neun-x, Nockel12, NorbertR., Norbirt, Norro, Otto Normalverbraucher, Pavlos, Peacemaker, Pecar, Pelz, Pendulin, Perhelion, PeterFrankfurt, Petzi, Phrood, Pixelfire, Pjacobi, Plenz, Poc, Pstaudt-fischbach, Quark48, RWA, Rabensteiner, Raphman, Redecke, Reinraum, Reseka, RokerHRO, Rolf H., Rolf Maria Rexhausen, Romanm, Rufus46, Rupert Pupkin, S1, STBR, SVL, Sansculotte, Sardur, Schnargel, Schnatzel, Schrammler, Sebaki, Settembrini2, Shmia, Sinn, Southpark, Stefan Heinzmann, Stepa, Stfn, Stw, Succu, Summ, Svenska, Tafkas, Themanta, Thomas1, Thorbjørn, Thormard, Topory, Ulfbastel, UvM, Varulv, Viperch, Wasabi, Wdwd, Wernegh, Wiegels, Wikinaut, Wikipit, Wolfgang1018, YMS, YPS, YourEyesOnly, Zaphiro, Zbasisimone, 326 anonyme Bearbeitungen

Quellen, Lizenzen und Autoren der Bilder

Datei:Radio vacuum tubes.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Radio_vacuum_tubes.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* 32bitmaschine

Datei:elektronenroehren-auswahl.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Elektronenroehren-auswahl.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Benutzer:Quark48

Datei:Roehre ef42 innenspiegel.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre_ef42_innenspiegel.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:6L6tubespair.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:6L6tubespair.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Original uploader was Pjacobi at de.wikipedia

Datei:Telefunken RE144 1937.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Telefunken_RE144_1937.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* User:Hihiman

Datei:Roehre-AL1-Domkolben.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-AL1-Domkolben.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Quetschfuss-Roehre-AL1.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Quetschfuss-Roehre-AL1.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre el84 zerlegt.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre_el84_zerlegt.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Bearbeiter:* Poc

Datei:DF91 gitter komplett.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:DF91_gitter_komplett.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Quark48

Datei:getterringmtext.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Getterringmtext.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Ulf Seifert Dresden.Original uploader was Ulfbastel at de.wikipedia

Datei:Elektronenroehre real.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Elektronenroehre_real.png *Lizenz:* Creative Commons Attribution 2.0 *Bearbeiter:* Stefan Riepl (Quark48)

Datei:la-Ug-Kennlinie-ECC40.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:la-Ug-Kennlinie-ECC40.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Poc 17:38, 8. Apr. 2008 (CEST). Original uploader was Poc at de.wikipedia

Datei:Heizungsarten e-roehren.gif *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Heizungsarten_e-roehren.gif *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Quark48

Datei:röhre da96 direkte heizung.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Röhre_da96_direkte_heizung.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Patrik Schindler

Datei:Roehre-PL509-Glas.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-PL509-Glas.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-ef89-Anodenlicht.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-ef89-Anodenlicht.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Poc

Datei:Roehre-pl95-Anodenlicht.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-pl95-Anodenlicht.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Poc

Datei:tube-ef91-detail.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Tube-ef91-detail.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Bearbeiter:* Patrik Schindler

Datei:P-120-row-220.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:P-120-row-220.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* FDominec, Glenn, Julio, WikipediaMaster, Ysangkok, Yves-Laurent, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:ECC83 in Vorstufe.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:ECC83_in_Vorstufe.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:ClemiMD

Datei:Diode-Symbol de.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Diode-Symbol_de.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* erstellt von , geändert von

Datei:Triode-Symbol de.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Triode-Symbol_de.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* erstellt von , geändert von

Datei:Strahltriode.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Strahltriode.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ulfbastel

Datei:Tetrode-Symbol de.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Tetrode-Symbol_de.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* erstellt von , geändert von

Datei:Penode-Symbol de.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Penode-Symbol_de.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* erstellt von , geändert von

Datei:EL84-6N14P.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:EL84-6N14P.JPG> *Lizenz:* Creative Commons Attribution 3.0 *Bearbeiter:* User:Settembrini

Datei:EF86neu.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:EF86neu.JPG> *Lizenz:* Creative Commons Attribution 3.0 *Bearbeiter:* User:Settembrini

Datei:Hexode-Symbol de.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Hexode-Symbol_de.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* erstellt von

Datei:Heptode-Symbol de.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Heptode-Symbol_de.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* erstellt von

Datei:Oktode-Symbol de.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Oktode-Symbol_de.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* erstellt von

Datei:EM83 von RSD.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:EM83_von_RSD.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* R.Brunsch

Datei:ZM1210-operating edit2.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:ZM1210-operating_edit2.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Georg-Johann Lay with a slight edit by Richard Bartz

Datei:Roehre-Europasockel.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Europasockel.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Aussenkontaktsockel5.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Aussenkontaktsockel5.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Aussenkontaktsockel8.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Aussenkontaktsockel8.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Stahlsockel.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Stahlsockel.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Oktalsockel.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Oktalsockel.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Loktalsockel.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Loktalsockel.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Rimlocksckel-g.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Rimlocksckel-g.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Rimlocksckel-m.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Rimlocksckel-m.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Miniatursockel.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Miniatursockel.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Novalsockel.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Novalsockel.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Magnovalsockel.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Magnovalsockel.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Roehre-Anodenkappe.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roehre-Anodenkappe.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Datei:Rs2041_siedegekuehlt.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Rs2041_siedegekuehlt.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Herbertweidner

Datei:4x150a-top.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:4x150a-top.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Herbertweidner

Datei:HiPowerTube3-500_C.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:HiPowerTube3-500_C.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Angoleleithold, Duesentrieb, El., Paddy, PySaal, SvIxxv, Ustas, 2 anonyme Bearbeitungen

Datei:Roentgenroehre mit Drehanode.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roentgenroehre mit Drehanode.png> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Herbertweidner

Datei:Röhre-ebc91-defekte-Kathode.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Röhre-ebc91-defekte-Kathode.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Benutzer:Poc

Lizenz

Wichtiger Hinweis zu den Lizenzen

Die nachfolgenden Lizenzen beziehen sich auf den Artikeltext. Im Artikel gezeigte Bilder und Grafiken können unter einer anderen Lizenz stehen sowie von Autoren erstellt worden sein, die nicht in der Autorensliste erscheinen. Durch eine noch vorhandene technische Einschränkung werden die Lizenzinformationen für Bilder und Grafiken daher nicht angezeigt. An der Behebung dieser Einschränkung wird gearbeitet. Das PDF ist daher nur für den privaten Gebrauch bestimmt. Eine Weiterverbreitung kann eine Urheberrechtsverletzung bedeuten.

Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported - Deed

Diese "Commons Deed" ist lediglich eine vereinfachte Zusammenfassung des rechtsverbindlichen Lizenzvertrages (http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Lizenzbestimmungen_Commons_Attribution-ShareAlike_3.0_Unported) in allgemeinverständlicher Sprache.

Sie dürfen:

- das Werk bzw. den Inhalt **vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen**
- Abwandlungen und Bearbeitungen** des Werkes bzw. Inhaltes anfertigen

Zu den folgenden Bedingungen:

- Namensnennung** — Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen.
- Weitergabe unter gleichen Bedingungen** — Wenn Sie das lizenzierte Werk bzw. den lizenzierten Inhalt bearbeiten, abwandeln oder in anderer Weise erkennbar als Grundlage für eigenes Schaffen verwenden, dürfen Sie die daraufhin neu entstandenen Werke bzw. Inhalte nur unter Verwendung von Lizenzbedingungen weitergeben, die mit denen dieses Lizenzvertrages identisch, vergleichbar oder kompatibel sind.

Wobei gilt:

- Verzichtserklärung** — Jede der vorgenannten Bedingungen kann aufgehoben werden, sofern Sie die ausdrückliche Einwilligung des Rechteinhabers dazu erhalten.
- Sonstige Rechte** — Die Lizenz hat keinerlei Einfluss auf die folgenden Rechte:
 - Die gesetzlichen Schranken des Urheberrechts und sonstigen Befugnisse zur privaten Nutzung;
 - Das Urheberpersönlichkeitsrecht des Rechteinhabers;
 - Rechte anderer Personen, entweder am Lizenzgegenstand selber oder bezüglich seiner Verwendung, zum Beispiel Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen.
- Hinweis** — Im Falle einer Verbreitung müssen Sie anderen alle Lizenzbedingungen mitteilen, die für dieses Werk gelten. Am einfachsten ist es, an entsprechender Stelle einen Link auf <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.de> einzubinden.

Haftungsbeschränkung

Die „Commons Deed“ ist kein Lizenzvertrag. Sie ist lediglich ein Referenztext, der den zugrundeliegenden Lizenzvertrag übersichtlich und in allgemeinverständlicher Sprache aber auch stark vereinfacht wiedergibt. Die Deed selbst entfaltet keine juristische Wirkung und erscheint im eigentlichen Lizenzvertrag nicht.

GNU Free Documentation License

Version 1.2, November 2002

Copyright (C) 2000,2001,2002 Free Software Foundation, Inc.

51 Franklin St, Fifth Floor, Boston, MA 02110-1301 USA

Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies

of this license document, but changing it is not allowed.

0. PREAMBLE

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document "free" in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others. This License is a kind of "copyleft", which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

1. APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The "Document", below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as "you". You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A "Modified Version" of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A "Secondary Section" is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document's overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The "Invariant Sections" are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The "Cover Texts" are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A "Transparent" copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not "Transparent" is called "Opaque".

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The "Title Page" means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, "Title Page" means the text near the most prominent appearance of the work's title, preceding the beginning of the body of the text.

A section "Entitled XYZ" means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as "Acknowledgements", "Dedications", "Endorsements", or "History".) To "Preserve the Title" of such a section when you modify the Document means that it remains a section "Entitled XYZ" according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties; any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

2. VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3. You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

3. COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

4. MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

- A.** Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.
- B.** List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.
- C.** State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.
- D.** Preserve all the copyright notices of the Document.
- E.** Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.
- F.** Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.
- G.** Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.
- H.** Include an unaltered copy of this License.
- I.** Preserve the section Entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled "History" in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.
- J.** Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.
- K.** For any section Entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.
- L.** Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.

- **M.** Delete any section Entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version.
- **N.** Do not retitle any existing section to be Entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section.
- **O.** Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section Entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties—for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

5. COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.

The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

6. COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

7. AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an "aggregate" if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation's users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document's Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

8. TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section 4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled "Acknowledgements", "Dedications", or "History", the requirement (section 4) to Preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

9. TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided for under this License. Any other attempt to copy, modify, sublicense or distribute the Document is void, and will automatically terminate your rights under this License. However, parties who have received copies, or rights, from you under this License will not have their licenses terminated so long as such parties remain in full compliance.

10. FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <http://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License "or any later version" applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation.

ADDENDUM: How to use this license for your documents

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

Copyright (c) YEAR YOUR NAME.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document

under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2

or any later version published by the Free Software Foundation;

with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled

"GNU Free Documentation License".

If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts, replace the "with...Texts." line with this:

with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the

Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.