

Inhalt:

1. Allgemeines
2. Funktionsweise einer Röhrendiode
3. Funktionsweise einer Röhrentriode
4. Funktionsweise einer Röhrentetrode
5. Funktionsweise einer Röhrenpentode
6. Heptoden, Oktoden usw.
7. Niedervoltröhren / Batterieröhren
8. Spezialröhren
9. Heizungsarten
10. Realer Aufbau und Herstellung
11. Verwendung in der Elektronik
12. Zusammenfassung
13. Schaltungsarten
14. Katoden-Basis-Schaltung Allgemeines
15. Katoden-Basis-Schaltung Wirkungsweise grob
16. Katoden-Basis-Schaltung genau
17. Katoden-Basis-Schaltung mit Tetroden und Pentoden
18. Katodenfolger Allgemeines
19. Katodenfolger Wirkungsweise grob
20. Katodenfolger Wirkungsweise genau
21. Katodenfolger mit Tetroden und Pentoden

1. Allgemeines



Elektronenröhren, kurz Röhren genannt, waren die ersten aktiven elektronischen Bauelemente, d.h. Bauelemente, mit denen man kleine elektrische Signale verstärken konnte. Sie begründeten das Elektronikzeitalter, das sich in der Anfangsphase vor allem in Form von Radiogeräten manifestierte. Ein halbes Jahrhundert lang gab es keine Alternativen zu Elektronenröhren. Mit dem Aufkommen der Transistoren in den 50er/60er Jahren waren sie jedoch außer bei Spezialanwendungen (z.B. RADAR), bei denen Röhren schlicht billiger als Transistoren waren, vom Aussterben betroffen. Grund ist ihre große Bauform, die hohe Verlustleistung, die als Wärme abgeführt werden muss, ihre begrenzte Lebensdauer sowie ihr vergleichsweise extrem hoher Preis (Röhre mehr als 5 Euro, guter Kleinleistungstristor weniger als 0,05 Euro!). Zudem verändern Röhren ihre Eigenschaften im Laufe der Lebensdauer und brauchen beim Einschalten des Geräts einige Minuten, bis sie warmgelaufen sind. Aufgrund dieser Nachteile kamen im Niederfrequenzbereich ab ca. 1965 kaum noch

neuentwickelte Geräte mit Röhren auf den Markt. Die logische Folge war, dass es seit dieser Zeit in der westlichen Welt im kommerziellen Sektor auch keine Neuentwicklungen von Röhren mehr gab. Hiervon abweichend wurden vor allem in der ehemaligen Sowjetunion noch sehr lange Röhren verwendet und auch entwickelt, schlicht weil man in der Halbleitertechnik arge Defizite hatte.

Eine kurze Renaissance erlebten die Röhren in der Militärtechnik dadurch, dass Röhren von Natur aus unempfindlich gegenüber EMP (= elektromagnetischer Puls, der bei Atombombendetonationen entsteht) sind.

Seit man weiß, wie man Transistorschaltungen EMP-fest macht, ist aber auch das Geschichte. Lediglich in der Audiotechnik finden Röhren trotz oder gerade wegen ihrer aus heutiger Sicht vorsintflutlichen Technik noch Anhänger. Einerseits handelt es sich um HiFi-Liebhaber und andererseits um Musiker, vorzugsweise E-Gitarristen. Beide Gruppen haben ganz unterschiedliche Zielsetzungen: Die eine sucht den möglichst unverfälschten Klang, während die andere genau das Gegenteil tut, nämlich durch Übersteuern der Verstärker verzerrte Klänge zu erzeugen. In beiden Lagern werden zahlreiche Mythen erzählt, die leider oft nicht den Tatsachen entsprechen. Speziell aus diesem Grund finden Sie nachfolgend Informationen zu Aufbau und Funktionsweise von Röhren.

2. Funktionsweise einer Röhrendiode

Schon vor weit mehr als 100 Jahren erkannte man bei Versuchen mit den ersten Glühlampen, dass Elektronen die heiße Glühwendel verlassen. Dies führte zur Entwicklung der Röhrendiode im Jahre 1906. Diese besteht aus einem luftleeren Glaskolben, in dem sich eine Glühwendel und ininigem Abstand ein Blech befindet. Dies ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

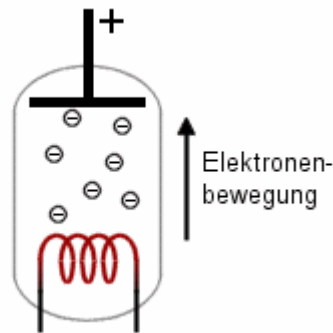


Bild 1: Prinzipieller Aufbau einer Röhrendiode

Bei ungeheizter Glühwendel kann man eine äußere Spannungsquelle in beliebiger Polung anschließen, ohne dass ein Stromfluss zustande kommt. Dies liegt darin begründet, dass Vakuum (also sprichwörtlich "Nichts") naturgemäß ein extrem guter Isolator ist. Erst bei extrem hoher Spannung kommt es zum Funkenüberschlag. Der Effekt der Röhrendiode liegt darin begründet, dass bei hoher Temperatur Elektronen die Glühwendel verlassen können, d.h. sozusagen aus dem Material geschleudert werden. Legt man von außen eine Spannung zwischen Auffangblech und Glühwendel an, hängt es von der Polung ab, was passiert. Hängt das Auffangblech am Pluspol, so werden die aus der Glühwendel emittierten Elektronen angezogen und es fließt ein Strom durch die Röhre. Bei umgekehrter Polung müssten die Elektronen aus dem Auffangblech austreten. Das können sie aber nicht, weil das Blech nicht beheizt ist. Deshalb leitet die Röhrendiode Strom nur in eine Richtung. Röhrendioden wurden vor allem zum Gleichrichten von Wechselstrom benutzt, bevor sie wegen der viel besseren elektrischen Eigenschaften (vor allem viel kleinerer Spannungsverlust und viel kleinerer Innenwiderstand) durch Halbleiterdioden verdrängt wurden.

Die Glühwendel wird übrigens in der Röhreterminologie als Katode (oder Kathode) bezeichnet und das Auffangblech als Anode.

3. Funktionsweise einer Röhrentriode

Wenn man bei einer Röhrendiode zwischen Glühwendel und Auffangblech ein Drahtgeflecht, in der Röhreterminologie Gitter genannt, einfügt, erhält man eine Röhrentriode, wie sie in Bild 2 dargestellt ist.

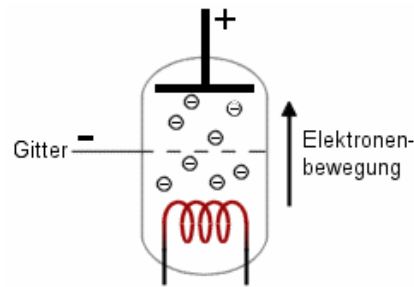


Bild 2: Prinzipieller Aufbau einer Röhrentriode

Sie funktioniert bei mit der Glühwendel leitend verbundenem und damit elektrisch gesehen neutralem Gitter genauso wie eine Röhrendiode. Bei offenem Anschluss lädt sich das Gitter übrigens aufgrund der von der Katode ausgesandten Elektronen negativ auf und behindert dann den Stromfluss zur Anode. Man nutzt die Triode aber nicht zum Gleichrichten von Wechselspannungen, sondern betreibt sie ausschließlich in Durchlassrichtung, d.h. Pluspol an Anode, mit einer äußeren Betriebsspannung von üblicherweise einigen hundert Volt zwischen Katode (Glühwendel) und Anode (Auffangblech). Legt man nun an das Gitter eine im Vergleich zur Glühwendel negative Spannung an, wird mit zunehmend negativer werdender Spannung der Strom durch die Röhre immer kleiner, bis der Stromfluss aufhört. Denn genauso, wie Elektronen von einem positiven Potential (ungleiche Ladungen ziehen sich an) angezogen werden, werden sie von einem negativen Potential abgestoßen (gleiche Ladungen stoßen sich ab).

Hierfür genügen schon wenige Volt. Bei einer Röhrentriode kann man mit einer geringen Spannungsänderung am Gitter eine relativ große Stromänderung durch die Röhre bewirken. Die Röhrentriode wirkt daher als Verstärker. Sie war zusammen mit den nachfolgenden Röhrentypen vor der Erfindung der Transistoren die einzige Möglichkeit der Signalverstärkung. Das Bauelement Elektronenröhre hat jedoch aus elektronischer Sicht gegenüber Transistoren noch nicht einmal einen einzigen Vorteil sondern ausschließlich die nachfolgend aufgelisteten Nachteile, weshalb es sehr schnell von Transistoren verdrängt wurde.

- Heizung erforderlich
- Betrieb erst nach Warmlauf möglich (Aufheizphase der Katode)
- Röhren verschleßen und müssen ausgetauscht werden
- Erschütterungsempfindlichkeit
- Hohe Verlustleistung
- Kennlinienverlauf deutlich schlechter als bei Transistoren
- Die Kennlinien ändern sich über die Lebensdauer
- Hochspannung zum Betrieb erforderlich
- Leistungsverstärker benötigen Anpasstransformator im Signalpfad mit all' seinen Nachteilen
- Großer Platzbedarf
- Im Vergleich zu Transistoren extrem hoher Preis
- Durch hohen Preis einfache Schaltungstechnik (wenige aktive Bauelemente)

Lediglich als Gitarrenverstärker haben Röhrenverstärker eine gewisse Berechtigung, weil man hier die röhrentypischen Verzerrungen bis zum Exzess ausnutzt, um den gewünschten verzerrten Klang zu erzeugen. Diese Verzerrungen kann man jedoch mindestens genauso gut auch mit wesentlich weniger Aufwand durch Verwendung von Halbleitern (Germaniumdioden, Feldeffekttransistoren etc. oder digital über beliebige definierbare Kennlinien) erzeugen.

4. Funktionsweise einer Röhrentetrode

Schon sehr früh erkannte man, dass eine Triode aus elektrischer Sicht alles andere als ideal war. Bei der seinerzeit häufigsten Anwendung der Röhren im Radio störte auf Hochfrequenzseite am meisten die Kapazität zwischen Gitter und Anode. Resultat ist, dass die Ausgangsspannung, die an der Anode zur Verfügung steht, bei hohen Frequenzen sehr stark auf das Gitter zurückgekoppelt wird. Denn hohe Frequenzen können Kondensatoren leicht passieren. Für Sendeanlagen entwickelte man daher spezielle Trioden, bei denen der Abstand zwischen Gitter und Anode sehr groß und damit die Kapazität sehr klein war. Durch den großen Abstand steigt aber leider auch der Betriebsspannungsbedarf sehr stark. Sendetrioden müssen daher meistens mit mehreren tausend Volt betrieben werden.

Eine andere Möglichkeit ist, die unerwünschte Kapazität durch ein zusätzliches Gitter G2, auch Schirmgitter genannt, zwischen dem Steuergitter und der Anode anzubringen. Röhren mit einem solchen Schirmgitter nennt man Tetroden, weil eine solche Röhre -von der Heizung abgesehen- 4 Anschlüsse besitzt: Katode, Gitter, Schirmgitter und Anode. Wenn man das Schirmgitter an eine relativ niederohmige Hilfsspannung legt, sinkt die Gitter-Anodenkapazität wie gewünscht stark ab, weil das Schirmgitter -der Name sagt es schon- das Steuergitter von der Anode elektrostatisch abschirmt. Tetroden wurden seit ihrer Entwicklung im Jahr 1916 oft als Senderöhren verwendet, der Einsatz in Radios etc. war jedoch selten. Aufgrund der besseren Eigenschaften verwendete man dort sehr oft die nachfolgend beschriebenen Pentoden.

5. Funktionsweise einer Röhrenpentode

Wenn Elektronen mit hoher Geschwindigkeit auf das Anodenblech auftreffen, ist die Wucht so groß, dass sie einige Elektronen aus dem Anodenmaterial heraus schlagen können. Diese herausgeschlagenen Elektronen nennt man Sekundärelektronen. In Sekundärvervielfacherröhren nutzt man diesen Effekt nutzbringend aus; bei allen anderen Röhren ist das Herausschlagen unerwünscht. Andere Elektronen schlagen derart hart auf die Anode auf, dass sie nicht in das Anodenmaterial eintreten können, sondern wie ein Fußball beim Lattenschuss daran abprallen. Sie schlagen hierbei ebenfalls Elektronen aus der Anode heraus, wobei sie den größten Teil ihrer Bewegungsenergie verlieren. Sie bilden zusammen mit den Sekundärelektronen eine Elektronenwolke um die Anode. Bei Trioden werden diese Elektronen dank ihrer negativen Ladung recht schnell wieder von der positiv geladenen Anode angezogen und stören daher nicht sonderlich stark. Sie behindern lediglich die von der Katode herkommenden Elektronen ein wenig, weil sich ja gleiche Ladungen abstoßen.

Bei Tetroden besitzt jedoch auch das Schirmgitter eine positive Spannung, so dass auch dieses die freien Elektronen anzieht. Bei hoher Aussteuerung der Röhre sinkt die Anodenspannung zeitweise unter die Spannung des Schirmgitters ab, weshalb in diesem Fall das Schirmgitter die Elektronen am stärksten anzieht und damit der Anodenstrom stark nachlässt. Dies bedeutet, dass ab einem bestimmten Punkt das Ausgangssignal verzerrt, weil nun ein Teil des Stroms über das Schirmgitter abfließt und damit nicht mehr als Anodenstrom zur Verfügung steht. Dies beschränkt die nutzbare Ausgangsspannung und damit die nutzbare Ausgangsleistung. Ziel ist es daher, die Sekundärelektronen vom Schirmgitter fernzuhalten. Genau dies ist der Zweck eines weiteren Gitters G3, dem Bremsgitter. Eine Tetrode mit einem zusätzlichen Bremsgitter nennt man Pentode, weil sie abgesehen von der Heizung 5 Anschlüsse besitzt. Sie ist wie folgt aufgebaut:

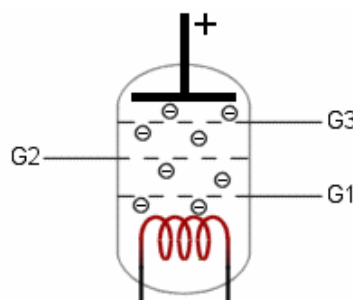


Bild 3: Prinzipieller Aufbau einer Röhrenpentode

Das Bremsgitter G3 wird mit der Katode verbunden. Es ist ziemlich grobmaschig, so dass die mit relativ hoher Geschwindigkeit von der Katode kommenden Elektronen kaum behindert werden. Für die Elektronenwolke um die Anode bildet es allerdings eine fast unüberwindliche Hürde, weil es im Vergleich zur Anode stark negatives Potential besitzt und damit die langsamen Elektronen ausreichend stark in Richtung Anode abstößt. Dadurch wird der Stromfluss über das Schirmgitter deutlich reduziert, so dass man Pentoden weiter aussteuern kann als Tetroden. Die 1926 entwickelte Pentode war daher insbesondere für Röhren in Endstufen weit verbreitet.

6. Heptoden, Oktoden usw.

Es gab noch eine ganze Reihe von Röhren mit noch mehr Gittern. Diese waren jedoch weitgehend speziellen Zwecken vorbehalten. Meistens handelte es sich um Mischröhren, bei denen z.B. 2 mehr oder weniger gleichberechtigte Steuergitter vorhanden waren. Hiermit kann man 2 Signale miteinander multiplizieren sprich modulieren. Jedes weitere Gitter fängt jedoch in gewissem Umfang nützliche Elektronen ein, weshalb man solche Röhren nur dann verwendete, wenn man die speziellen Eigenschaften nutzte. Für normale Verstärker war hingegen die Pentode aus elektrotechnischer Sicht das Optimum des Röhrenbaus.



7. Niedervoltröhren / Batterieröhren

Gegen Ende der Röhrenära in den 60er Jahren kamen tragbare Rundfunkempfänger und zunehmend auch Autoradios in Mode. Bei ersteren war der hohe Energiebedarf von Röhren sehr nachteilig und bei beiden Anwendungen der hohe Spannungsbedarf von üblicherweise mehreren hundert Volt. Beides waren ganz klare Vorteile für die damals aufkommenden Transistoren, weil die üblichen Zink-Kohle-Batterien pro Zelle nur etwa 1,5 V liefern und ein geringerer Stromverbrauch ein längerer Betrieb möglich macht. Zu dieser Zeit gab es zum Einsatz in Autoradios noch keine brauchbaren UKW-Transistoren, so dass man hier noch für einige Jahre auf Röhren angewiesen war. Flugs wurden speziell für diesen Zweck Niedervoltröhren entwickelt, die nicht nur mit einer kleineren Anodenspannung betrieben werden konnten, sondern deren Heizspannung an die Batteriespannung angepasst war. Im

Jargon werden sie häufig Batterieröhren genannt. Viele Niedervoltröhren waren je nach Typ für 90, 60 oder 45 Volt Anodenspannung ausgelegt. Eigens hergestellte Batterien, die viele Zellen in einem Gehäuse vereinten, machten den für den Anwender problemlosen Betrieb von portablen Rundfunkempfängern möglich. Diese Röhren sind ideal, wenn hohe Spannungen unerwünscht sind. Durch kleinere Abmessungen sank auch der Heizleistungsbedarf. Einige Röhren waren für 22,5 bzw. 12 Volt ausgelegt, ganz wenige wie die ECC86 (eine "Autoröhre") sogar für sagenhafte 6,3 Volt Anodenspannung, der Bordnetzspannung z.B. eines damaligen VW Käfers. Bei Niedervoltbastlern, die die lebensgefährliche Hochspannung konventioneller Röhren scheuen, aber trotzdem aus bestimmten Gründen Röhren einsetzen möchten, sind Niederspannungsrohren heute hochbegehrte. Der Anodenstrom ist hierbei selbstverständlich gering, so dass man mit ihnen keine Leistungsverstärker mit hoher Ausgangsleistung bauen kann.

8. Spezialröhren

Wenn man von Röhren absieht, die zwar auch als Röhren bezeichnet werden, aber ganz anders funktionieren als Verstärkerröhren wie z.B. Röntgenröhren, Wanderfeldröhren, Klystrons oder Magnetrons (letztere dienen der Mikrowellenerzeugung), gibt es auch unter den Verstärkerröhren spezielle Ausführungen. Hierzu gehören die Miniaturröhren, die sich vor allem in der ehemaligen Sowietunion und dort besonders in der Rüstungstechnik bis zuletzt großer Beliebtheit erfreuten. Außer dem reduzierten Platzbedarf benötigen sie im Vergleich zu

normalgroßen Röhren weniger Heizleistung und geben sich mit einer geringeren Versorgungsspannung zufrieden. Es handelt sich aus einleuchtenden Gründen nicht um Leistungsröhren.

Elektrometerröhren unterscheiden sich von normalen Verstärkerröhren durch zwei Dinge: erstens ist das Gitter meistens aus dem Röhrenkopf herausgeführt und zweitens sind die Röhren oft mit einer speziellen Beschichtung versehen. Sie sind auf möglichst geringe Gitterströme hin entwickelt, damit sich auch bei extrem hochohmigen Signalquellen keine Verfälschung des Messsignals einstellt. Um diese geringen Gitterströme nicht durch parasitäre Widerstände (Kriechströme) hochzutreiben, führt man den Gitteranschluss möglichst weit von allen anderen Anschlüssen aus der Röhre heraus, d.h. an der gegenüberliegenden Seite sprich dem Kopf der Röhre. Bei hoher Luftfeuchte würde schon eine extrem gering benetzte Glasoberfläche zu einem stark verringerten Isolationswiderstand führen. Aus diesem Grund sind solche Röhren oft zusätzlich mit einer hydrophoben (=wasserabweisenden) Oberfläche versehen, die zusätzlich verhindert, dass Licht in die Röhre eindringen kann. Photonen können durch das Herausschlagen von Elektronen für einen zusätzlichen und in diesem Fall absolut unerwünschten Stromfluss sorgen (Wirkung wie Fotozelle). Trotz aller Maßnahmen wird der Eingangswiderstand von Elektrometerröhren von CMOS-Operationsverstärkern leicht um den Faktor 100 oder mehr übertroffen.



Sogenannte Senderöhren unterscheiden sich oft sowohl in Form als auch Bauweise deutlich von den wohlbekannten Verstärkerröhren. Sendetrioden besitzen größere Abstände zwischen Katode und Anode, weshalb Betriebsspannungen im Kilovoltbereich notwendig sind. Um die hohe Verlustleistung abzuführen, besitzen sie oft ein Keramik- anstatt eines Glasgehäuses, das zudem mit einem fest installierten Kühlkörper versehen ist. Sendetrioden wiederum wurden nicht selten als Doppelsysteme, d.h. mit zwei Systemen in einem Gehäuse, hergestellt. Bei diesen sind oft die beiden Anodenanschlüsse aus dem Röhrenkopf herausgeführt. Diese recht großen und breiten Röhren sind optisch recht ansprechend, weshalb man Sendedoppeltrioden auch gern in teuren HiFi-Röhrenverstärkern der fünfstelligen Euro-Klasse einsetzt. Allerdings sind Tetroden hierfür aus elektrischer Sicht aufgrund des eingeschränkten Aussteuerbereichs deutlich weniger gut geeignet als Pentoden.

9. Heizungsarten

Die einfachste und gleichzeitig effektivste Form der Heizung ist ein nackter Glühdraht, wobei einer der beiden Heizanschlüsse gleichzeitig die Katode ist. Zur Erhöhung der Emission ist der Glühdraht mit einem Material beschichtet, das besonders leicht Elektronen emittiert. Üblicherweise verwendet man hierfür Oxide von Erdalkalimetallen. Dem Vorteil des hohen Wirkungsgrades steht der große Nachteil entgegen, dass bei der üblichen Wechselstromheizung die Temperatur der Heizwendel im Takte des Wechselstroms leicht schwankt und mit ihr die Emission. Gleichzeitig schwankt die Spannung zwischen Katode und Glühwendel um den Betrag der Heizspannung. Denn zwischen dem Heizungsanschluss 1 (gleichzeitig Katodenanschluss) und dem Heizungsanschluss 2 gibt es eine Spannungsdifferenz, die der Höhe der Heizspannung entspricht. Als Folge schwankt auch die Anodenspannung und damit der Anodenstrom, was sich als profanes Brummen bemerkbar macht. Bei Pentoden ist dieser Effekt aufgrund der fast "waagerechten" Kennlinien gering, bei Trioden aufgrund der starken Abhängigkeit des Anodenstroms von der Anodenspannung jedoch stark ausgeprägt.

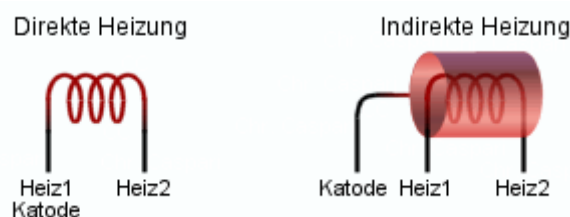


Bild 4: Direkte und indirekte Heizung

Dieses Brummen kann man verringern, wenn die Katode als metallisches Röhrchen ausgeführt wird, der von innen ohne direkte Berührung von einer Glühwendel beheizt wird, weshalb man diese Art der Heizung indirekte Heizung nennt. Dadurch, dass die Katode sprich das Röhrchen vom Heizstrom entkoppelt ist, entfällt die geringe Spannungsschwankung zwischen Katode und Anode, die insbesondere bei Trioden aufgrund deren besonderen Kennlinien stark stört. Gleichzeitig ist die Wärmekapazität des gesamten Gebildes so hoch, dass sich die Temperaturschwankungen nicht nennenswert bemerkbar machen. Nur leider sinkt der Wirkungsgrad ein wenig, weil durch die größere Oberfläche auch mehr Wärme abgestrahlt wird. Bei direkter Heizung braucht man hingegen für jede Röhre eine eigene Wicklung auf dem Heiztrafo, wenn die Katoden nicht direkt sondern über je einen Katodenwiderstand mit Masse verbunden sind. Aufgrund der großen Vorteile hatte sich daher die indirekte Heizung bei "normalen" Röhren weitgehend durchgesetzt. Die direkte Heizung war vorzugsweise bei Spezialröhren, bei denen es vor allem auf geringen Bauraum (Miniaturröhren) oder eine geringe Heizleistung (Batterieröhren) ankommt, zu finden.

10. Realer Aufbau und Herstellung

Das Schaltzeichen könnte den Eindruck erwecken, dass bei einer Röhre sich unten in der Nähe der Kontaktstifte die beheizte Katode befindet, oben am Röhrenkopf die Anode und irgendwo dazwischen ggf. die Gitter. Das ist bei den allermeisten Röhren nicht der Fall. Vielmehr besteht die Katode aus einer langen, geraden Glühwendel, die fast immer vertikal angeordnet ist. Axial darum sind die Gitter und ganz außen die Anode angeordnet, wie in Bild 5 dargestellt. Haltedrähte usw. wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen.

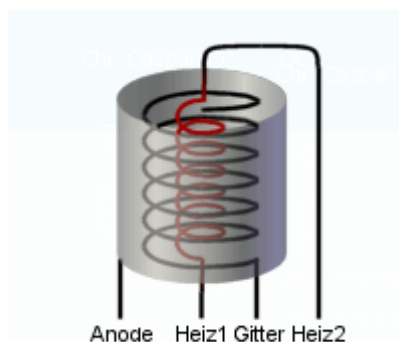


Bild 5: Realer Aufbau einer Röhrentriode

Um die Glühwendel ist in einem kleinen Abstand spiralförmig ein dünner Draht herumgewickelt, der das Gitter bildet. Der Abstand der einzelnen Windungen zueinander, also sozusagen die Maschenweite, bestimmt mit vielen weiteren Einflussfaktoren die Kennlinie. Es ist nur eine Seite der Gitterspirale nach außen geführt, weil das Gitter lediglich durch Vorhandensein einer Steuerspannung den Elektronenfluss elektrostatisch beeinflusst. Ein Stromfluss durch die Gitterspirale hindurch ist dazu nicht erforderlich und erst recht nicht erwünscht. Das Gitter wiederum ist in kleinem Abstand vom Anodenblech umgeben. Da die Anode laufend von Elektronen bombardiert wird, die ihre Bewegungsenergie an diese abgeben, wird diese heiß - so heiß, dass es bei Endstufenröhren zur leichten Rotglut kommen kann. Um die Wärme besser abstrahlen zu können, ist das Anodenblech bei Leistungsröhren meistens aus gefaltetem Blech hergestellt, um eine große Oberfläche zu erreichen. Das Gitter ist um zwei Haltedrähte gewickelt, denen als Halterung (wie auch der Katode und der Anode) oben und unten je ein Plättchen aus einem nichtleitenden und hitzebeständigen Material, meist Glimmer, dient. Das gesamte Gebilde wird von einem Glaskolben umgeben. Es gibt auch Röhren, bei denen der empfindliche Glaskolben von einer Metallhülle umgeben ist, wodurch man einerseits eine höhere mechanische Robustheit und andererseits eine gute Abschirmung gegenüber äußeren Feldern erreicht.



Bild 6: Reale Röhre am Beispiel der PL802
(Pentode, aber nur 1 Gitter gut sichtbar)

Das Innere des Glaskolbens wird bei der Herstellung in einem der letzten Arbeitsschritte luftleer gepumpt und der Glaskolben dabei nach außen hin hermetisch dicht zugeschmolzen. Das Evakuieren hat den Zweck, dass die Elektronen später auf dem Weg zur Anode nicht mit Stickstoff- oder Sauerstoffmolekülen kollidieren sollen, was die Funktion sehr stark beeinträchtigen würde. Denn dadurch würde das noch vorhandene Restgas ionisiert und in einer Glimmentladung Licht aussenden. Die Röhre würde als Gasentladungslampe mit beheizter Elektrode wirken und hätte eine sehr nichtlineare Kennlinie. Außerdem würde das Innere der Röhre wegen der hohen Temperaturen sehr schnell durch den Luftsauerstoff oxidieren und damit unbrauchbar werden. Nach dem Evakuieren der Röhre befindet sich aber trotz Verwendung von Hochleistungsvakuumpumpen immer noch eine geringe Restmenge an Sauerstoff in der Röhre, der unschädlich gemacht werden muss. Zu diesem Zweck befindet sich im Kopf der Röhre eine mit einem leicht oxidierbaren Metall (meist Barium) gefüllte sogenannte Getterpfanne. Nach dem Evakuieren und Zuschmelzen des Glaskolbens wird die Röhre induktiv erhitzt, wodurch das Gettermaterial verdampft und sich vorzugsweise im oberen Teil der Röhre als silbrig glänzender oder dunkler Belag niederschlägt. Gleichzeitig wird ein Teil des Gettermaterials durch den Restsauerstoff oxidiert, wodurch dieser gebunden und damit unschädlich gemacht wird. Die Farbe des Niederschlags sagt übrigens entgegen landläufiger Meinung ("silbrig ist gut, schwarz ist schlecht") überhaupt nichts über den Zustand der Röhre aus.

11. Verwendung in der Elektronik

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts waren Röhren, da es nichts Anderes gab, weit verbreitet. Heute findet man sie nur noch in bestimmten Hochfrequenzbereichen, in denen sie Kostenvorteile gegenüber Halbleitern bieten (RADAR, Sendeanlagen mit extrem hoher Ausgangsleistung etc.), oder bei Gitarrenverstärkern und in extrem geringem Maße als HiFi-Verstärker. Im Niederfrequenzbereich ist das Ende der Röhren bereits abzusehen, weil die allermeisten Röhrentypen schon lange nicht mehr hergestellt werden und die Preise ins Astronomische wachsen.

12. Zusammenfassung

Röhrendioden bestehen aus einem luftleer gepumpten Glaskolben, in dem sich außer einer Glühwendel (Katode) ein Auffangblech (Anode) befindet. Aus der heißen Glühwendel können Elektronen austreten, die sich bei äußerer Spannung (Anode positiver als Katode) zur Anode bewegen, so dass ein Stromfluss zustande kommt. Bei umgekehrter Polung fließt kein Strom, weil aus der ungeheizten Anode auch bei hoher Spannung keine Elektronen emittiert werden können.

Bei einer Röhrentriode befindet sich zwischen Katode und Anode ein Drahtgeflecht, das sogenannte Gitter. Durch Anlegen einer kleinen negativen Spannung an das Gitter kann man den Stromfluss durch die Röhre steuern. Dadurch kann man eine Triode als Verstärkerelement benutzen. Durch zusätzliche Gitter kann man die elektrischen Eigenschaften verbessern, was bei Tetroden und Pentoden praktiziert wird. Aufgrund der zahlreichen Nachteile wurden Röhren fast vollständig von Transistoren abgelöst.

13. Schaltungsarten

Es gibt 3 Röhregrundschaltungen: Die Katoden-Basis-Schaltung, die Anoden-Basis-Schaltung und die Gitter-Basis-Schaltung. Sie unterscheiden sich bezüglich der genannten Eigenschaften wie folgt:

Schaltungsart	Verstärkungs- faktor	Eingangs- widerstand	Ausgangs- widerstand	Grenz- frequenz
Katoden-Basis	hoch	hoch	hoch	niedrig
Anoden-Basis	1	hoch	niedrig	mittel
Gitter-Basis	hoch	niedrig	hoch	hoch

14. Katoden-Basis-Schaltung Allgemeines

Die Katoden-Basis-Schaltung ist die wohl verbreitetste Röhregrundschaltung. Hierbei wird das zu verstärkende Signal an das Gitter angelegt, und das Ausgangssignal an der Anode abgegriffen. Die Schaltung ist in Bild 1 schematisch anhand einer Triode dargestellt, wird aber auch bei Tetroden und Pentoden in großem Stil verwendet.

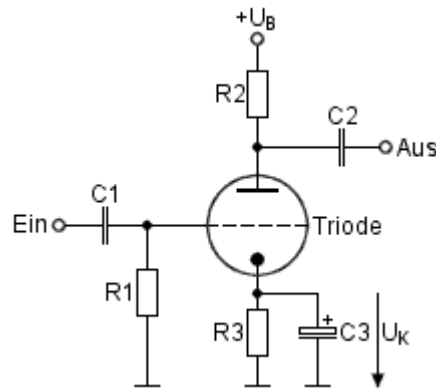


Bild 1: Katoden-Basis-Schaltung mit Triode

Diese Schaltung sieht ziemlich einfach aus. Trotzdem kann man die Werte der Widerstände und Kondensatoren nicht beliebig wählen, um eine funktionierende Schaltung zu erhalten. Nachfolgend können Sie zuerst einmal erfahren, wie die Schaltung grob funktioniert. Danach folgt eine weitergehende Erklärung der Wirkungsweise anhand der Röhrenkennlinien und zuletzt wird die Dimensionierung der Schaltung erklärt - also salopp gesagt, wie man die Werte der Widerstände und Kondensatoren ermittelt.

Die Katoden-Basis-Schaltung zeichnet sich durch einen hohen Eingangswiderstand und eine für Röhrenverhältnisse hohe Spannungsverstärkung aus. Der Ausgangswiderstand ist recht hoch, so dass der nachfolgende Schaltungsteil ebenfalls hochohmig ausgeführt werden muss. Ist ein niederohmiger Ausgang erforderlich, kann man dies durch eine nachfolgende Anoden-Basis-Schaltung, besser bekannt als Katoden-Folger, erreichen.

15. Wirkungsweise (Grobübersicht)

Der Eingangskondensator C1 dient dazu, das Gitter vom Eingangssignal gleichstrommäßig abzukoppeln. Kondensatoren lassen ja bekanntlich keinen Gleichstrom sondern nur Wechselstrom sprich in diesem Fall das Audiosignal passieren. Der Widerstand R1 sorgt dafür, dass das Gitter bei fehlendem Eingangssignal auf einem definierten Wert, d.h. auf Masse ("0 V") liegt. Die Anode der Röhre ist über den Widerstand R2 mit der Betriebsspannung verbunden. Der Strom fließt durch diesen Widerstand in die Röhre hinein und kommt an der Kathode wieder vollständig heraus, solange der Gitterstrom nahezu Null ist (was der Normalfall ist). Nun fließt er über Widerstand R3 nach Masse und damit zurück zur Spannungsquelle.

Dadurch, dass Strom durch R3 fließt, fällt an ihm gemäß dem ohmschen Gesetz eine Spannung ab, die man nach der bekannten Formel $U = R \cdot I$ berechnen kann. Dadurch wird bewirkt, dass die Kathode um genau diese Spannung positiver ist als das Gitter. Diese Katodenspannung wollen wir U_K nennen. Alle Spannungen an der Röhre beziehen sich immer auf die Katode, d.h. die Gitterspannung ist durch den Trick mit R3 negativ zur Katode. Dies ist erforderlich, weil die Gitterspannung in allen Betriebszuständen immer negativ sein sollte. Warum das so sein muss, sieht man, wenn man sich die sogenannte Eingangskennlinie der Röhre ansieht, die exemplarisch in Bild 2 dargestellt ist:

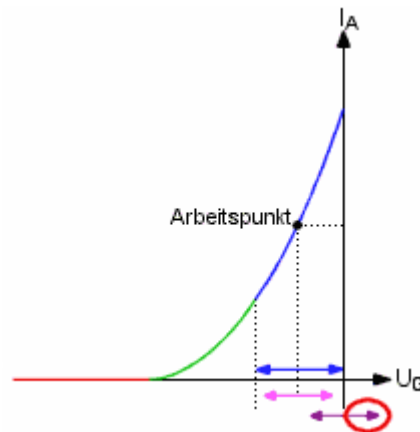


Bild 2: Eingangskennlinie

Diesem Diagramm kann man entnehmen, dass der Anodenstrom I_A von der Gitterspannung U_G abhängt. Unterhalb eines bestimmten Spannungswertes fließt kein Strom (roter Teil der Kennlinie). Erhöht man die Gitterspannung in Richtung positiver Werte, so steigt der Anodenstrom zuerst nur ganz wenig und nimmt dann immer mehr zu (grüner Teil), bis er in eine annähernd konstante Steigung übergeht (blauer Teil). Die Gitterspannung sollte aus mehreren Gründen, die nichts zum Verständnis der Schaltung beitragen und daher nicht behandelt werden, normalerweise nicht positiv werden. Wenn man Audiosignale möglichst unverfälscht verstärken will, muss man sich im blauen Bereich der Kennlinie befinden. Die Gitterspannung muss sich daher in dem durch den blauen Pfeil gekennzeichneten Spannungsbereich bewegen. Audiosignale sind aber Wechsellspannungen, die periodisch um 0 V schwanken. Der Spannungsbereich ist im Bild als lila Balken für ein exemplarisches Audiosignal mit maximaler Amplitude dargestellt. Wie man sieht, liegt nur die negative Hälfte im blauen Bereich, die positive überschreitet den zulässigen Bereich (roter Kringel).

Man muss deshalb dafür sorgen, dass sich die Gitterspannung in der Mitte des blauen Bereichs befindet, wenn kein Audiosignal anliegt. Denn dann kann das Audiosignal genauso weit nach oben wie nach unten schwanken, ohne dass es verzerrt wird (pinkfarbener Pfeil). Diese Voreinstellung nennt man Arbeitspunkt. Genau dafür sorgt Widerstand R_3 , indem er die Spannung an der Katode (=Gitterspannung ohne Eingangssignal) um genau den gewünschten Betrag gegenüber Masse anhebt. Er sorgt zusätzlich dafür, dass sich eine Gegenkopplung ergibt: Wenn nämlich der Ruhestrom aus irgendeinem Grund auch nur ganz geringfügig ansteigt (z.B. durch Aufheizen der Röhre), nimmt auch die Spannung an R_3 zu, wodurch automatisch eine kleinere Gitterspannung anliegt, die dem Stromanstieg entgegenwirkt. Dies nennt man Gegenkopplung. Die Gegenkopplung verringert gleichzeitig aber auch die Verstärkung des Audiosignals, die schon ohne Gegenkopplung bei einer Triode nicht besonders groß ist. Wenn nicht ein möglichst lineares Wiederverhalten erwünscht ist, macht man für die Audiosignale die Gegenkopplung zugunsten einer höheren Verstärkung unwirksam, indem man sie durch den Kondensator an R_3 vorbeileitet.

Jetzt aber zur Funktion bei anliegendem Eingangssignal: Wenn das Eingangssignal positiv ist d.h. wenn die Gitterspannung positiver wird, steigt der Strom durch die Röhre. Als Folge sinkt die Anodenspannung. Warum? Nun, ein höherer Strom bewirkt einen höheren Spannungsabfall an Widerstand R_2 , so dass bei konstanter Betriebsspannung als Anodenspannung weniger übrig bleibt. Ist das Eingangssignal negativ, sinkt der Strom durch die Röhre, wodurch der Spannungsabfall an R_2 sinkt und damit die Anodenspannung steigt. Die Katoden-Basis-Schaltung verstärkt also nicht nur das Eingangssignal sondern invertiert es zusätzlich, d.h. dreht die Phase um konstant 180° , wie man im Fachjargon sagt. Man nennt solche Verstärkerstufen deshalb invertierende Verstärker. Klanglich hat die Signalinvertierung übrigens keinerlei Auswirkungen. Die Höhe der Spannungsverstärkung hängt von den Röhrendaten und der Dimensionierung ab. Der Ausgangskondensator C_2 sorgt als letztes Bauelement dafür, dass am Ausgang keine unerwünschten Gleichspannungsanteile auftreten sondern ein Audiosignal, dessen Spannung symmetrisch um den Nullpunkt schwankt.

16. Detaillierte Wirkungsweise

Für die nachfolgende detaillierte Betrachtung wollen wir davon ausgehen, dass der Aussteuerbereich maximal sein soll. Die Ausgangsspannung soll also so groß wie möglich werden können, ohne allzu sehr zu verzerren. Es sei allerdings angemerkt, dass man hiervon bei der Verstärkung kleiner Eingangssignale oft abweicht. Denn wenn man ein Mikrofonsignal mit z.B. 10 mV um den Faktor 30 verstärkt, kommen am Ausgang nur 300 mV heraus. Ein maximaler Ausgangsspannungshub, der bei Röhren je nach Versorgungsspannung bis zu einigen hundert Volt betragen kann, wird in diesem Fall überhaupt nicht benötigt.

Die Eingangskennlinie, wie sie in der obigen Grobbetrachtung zur Erläuterung der grundsätzlichen Gegebenheiten herangezogen wurde, hat einen großen Nachteil: Sie gilt nur für eine konstant gehaltene Anodenspannung. Bei großem Ausgangssignal ändert sich aber die Anodenspannung recht stark, so dass die Eingangskennlinie nur für kleine Ausgangsspannungen Gültigkeit besitzt. Für große Ausgangsspannungen muss man daher das Ausgangskennfeld berücksichtigen, das der Röhrenhersteller üblicherweise im zugehörigen Datenblatt angibt (siehe Bild 3). Dieses sieht für Unbedarfte ziemlich wüst und unübersichtlich aus, ist es aber eigentlich nicht, wenn man weiß, was man daraus ablesen kann.

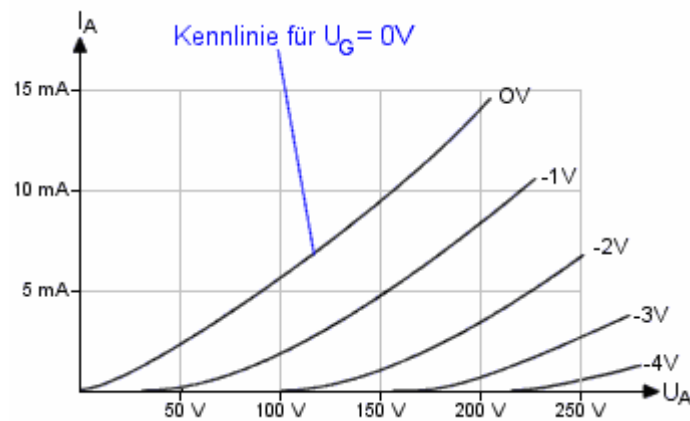


Bild 3: Triodenkennlinien

Was man sieht, ist die Abhängigkeit des Anodenstroms von der Anodenspannung bei verschiedenen Gitterspannungen. Eine einzelne Kennlinie ist also immer nur für eine bestimmte Gitterspannung gültig, deren Wert man an der jeweiligen Kennlinie vermerkt. Weil die Abhängigkeit von der Gitterspannung wichtig ist, werden die Kennlinien für einige exemplarisch ausgesuchte Gitterspannungen in das gleiche Diagramm eingetragen, so dass sich eine Kennlinienschar ergibt. Selbstverständlich gibt es nicht nur Kennlinien, die den festen Gitterspannungen im Diagramm entsprechen sondern unendlich viele dazwischen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden im Diagramm aber nur einige wenige eingezeichnet.

Die Röhre kann man sich ganz grob als Widerstand vorstellen, dessen Wert über die Gitterspannung einstellbar ist. Zusammen mit dem Anodenwiderstand R_2 ergibt sich daher ein Spannungsteiler, an dessen Eingang die Versorgungsspannung angeschlossen ist. Am Beispiel dreier Betriebsfälle ist dies in Bild 4 schematisch dargestellt.

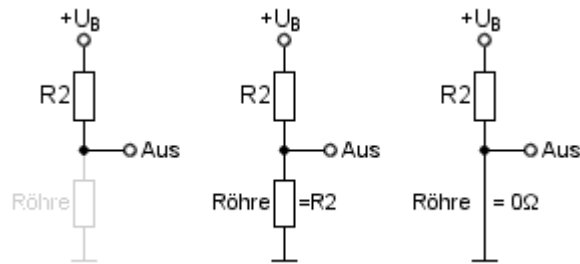


Bild 4: Extreme Betriebswerte und Arbeitspunkt

Wenn wie links in Bild 4 die Röhre vollständig sperrt, ist der Anodenstrom Null, und die Ausgangsspannung ist ohne äußere Belastung identisch mit der Betriebsspannung, weil bei fehlendem Strom kein Spannungsabfall am Anodenwiderstand R_2 entsteht. Dieser Betriebspunkt ist als P1 in das in Bild 5 erneut dargestellte Ausgangskennfeld eingezeichnet, das gegenüber dem vereinfachten Bild 3 zusätzliche Kennlinien enthält.

In Bild 4 ist rechts ein weiterer extremer Betriebspunkt dargestellt: Wenn die Röhre bei voller Aussteuerung einen satten Kurzschluss mit $0\ \Omega$ bildet (in der Praxis besitzt sie allerdings einen bestimmten Restwiderstand), begrenzt der Anodenwiderstand den Anodenstrom auf einen bestimmten Maximalwert, der sich mit dem ohmschen Gesetz leicht berechnen lässt: $I_{\text{Anode}} = U_B / R_2$

In diesem Fall beträgt die Anodenspannung 0 V (theoretisch - mehr dazu weiter unten). Es ergibt sich mit diesen beiden Werten für Anodenstrom und -spannung der Betriebspunkt P2, der in dem in Bild 5 erneut dargestellten Ausgangskennlinienfeld eingezeichnet ist.

Zuletzt seien als dritter Punkt die Verhältnisse im Arbeitspunkt (d.h. ohne Eingangssignal, also sozusagen die Ruhestellung) dargestellt. Wenn eine maximale Aussteuerbarkeit das Ziel ist, wird man ihn so wählen, dass man die Anodenspannung sowohl nach oben als auch nach unten hin gleichweit ändern kann, ohne dass starke Verzerrungen entstehen. Dies ist in erster Näherung dann der Fall, wenn der Arbeitspunkt bei halber Betriebsspannung liegt. Dies trifft gemäß Spannungsteilerregel dann zu, wenn der Widerstand der Röhre in diesem Betriebspunkt genauso groß ist wie der Anodenwiderstand (Bild 4 Mitte). Der Anodenstrom ist dann genau halb so groß wie im Betriebspunkt P1, weil der Widerstand zwischen Betriebsspannung und Masse genau doppelt so hoch ist (Anodenwiderstand plus gleich großer Röhrenwiderstand). Mit diesen Werten ergibt sich der Betriebspunkt A, den man als Arbeitspunkt bezeichnet.

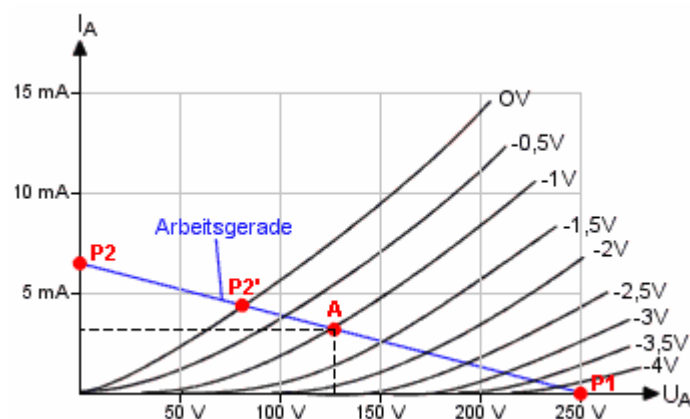


Bild 5: Triodenkennlinien mit Arbeitsgeraden

Verbindet man die Punkte P1 und P2 durch eine Gerade miteinander, erhält man die sogenannte Arbeitsgerade. Sie zeigt, welche Strom-/Spannungskombinationen bei dem vorgegebenen Anodenwiderstand und der vorgegebenen Versorgungsspannung möglich sind. Erwartungsgemäß liegt auch der Arbeitspunkt A genau auf dieser Geraden. Im Arbeitspunkt befindet sich die Röhre, wenn keine Eingangsspannung anliegt; es ist also die

"Ruhestellung". Wie man weiterhin sieht, schneidet zusätzlich die Kennlinie für Gitterspannung -1 V den Arbeitspunkt, d.h. um den Arbeitspunkt unter den vorgegebenen Umständen (Betriebsspannung/Anodenwiderstand) einzustellen, muss die Gitterspannung exakt -1 V betragen. Dies erreicht man, wie schon weiter oben beschrieben, durch entsprechende Dimensionierung des Widerstands R3.

Legt man nun eine Eingangsspannung an, so ändert sich auch die Gitterspannung entsprechend, da sich Gittervorspannung (so nennt man die Gitterspannung im Arbeitspunkt) und Eingangsspannung überlagern. Bei einer Eingangsspannung von z.B. +0,5 V nimmt die Gitterspannung auf -0,5 V zu und bei -0,5 V auf -1,5 V ab. Der Arbeitspunkt wird daher zum aktuellen Betriebspunkt hin verlassen. Man findet ihn jeweils auf der Arbeitsgeraden, wenn man den Punkt sucht, an dem die Kennlinie für die Gitterspannung -0,5 V bzw. -1,5 V die Arbeitsgerade schneidet. Im jeweiligen Betriebspunkt kann man den Anodenstrom bestimmen, indem man ihn an der linken Skala abliest. Dieser Strom fließt natürlich nicht nur durch die Röhre sondern auch durch den Anodenwiderstand und ruft an ihm einen Spannungsabfall gemäß dem ohmschen Gesetz hervor. Die Anoden- und damit Ausgangsspannung lässt sich berechnen, indem man von der Versorgungsspannung den Spannungsabfall am Anodenwiderstand abzieht. Man erhält folgende Formel:

$$U_{\text{Anode}} = U_B - R_2 \cdot I_{\text{Anode}}$$

Wenn Sie sich die Diagramme genau angeschaut haben, wird Ihnen wahrscheinlich nicht entgangen sein, dass bei der Gitterspannung 0 V die Anodenspannung keineswegs wie oben grob angenommen 0 V beträgt, sondern noch eine erhebliche "Restspannung" vorhanden ist. Man erreicht daher den Betriebspunkt P2 in der Praxis überhaupt nicht, sondern wird durch die Röhrenkennlinien auf P2' begrenzt. Auf den ersten Blick sieht es so aus, als ob man bei positiven Eingangsspannungen nur einen geringen Spannungshub erreichen kann, bei negativen Spannungen aber noch "viel Luft" hat: Im Betriebspunkt P2' beträgt die Anodenspannung etwa 80 V, was ausgehend vom Arbeitspunkt (125 V) nur 45 V ausmacht, während bei negativen Eingangsspannungen im Betriebspunkt P1 mit 250 V Anodenspannung immerhin 125 V möglich sind. Dieses Bild trügt jedoch: P1 kann man nämlich nicht erreichen, ohne massive Verzerrungen in Kauf zu nehmen, denn bei negativer werdender Gitterspannung liegen die Kennlinien immer dichter zusammen, so dass sich ein zunehmend nichtlineares Verhalten ergibt. Das reale Übertragungsverhalten kann man graphisch darstellen, indem man im Ausgangskennfeld die Schnittpunkte der vorhandenen Ausgangskennlinien mit der Arbeitsgeraden abliest und sich daraus eine Übertragungskennlinie erstellt, wie dies in Bild 6 exemplarisch durchgeführt wurde.

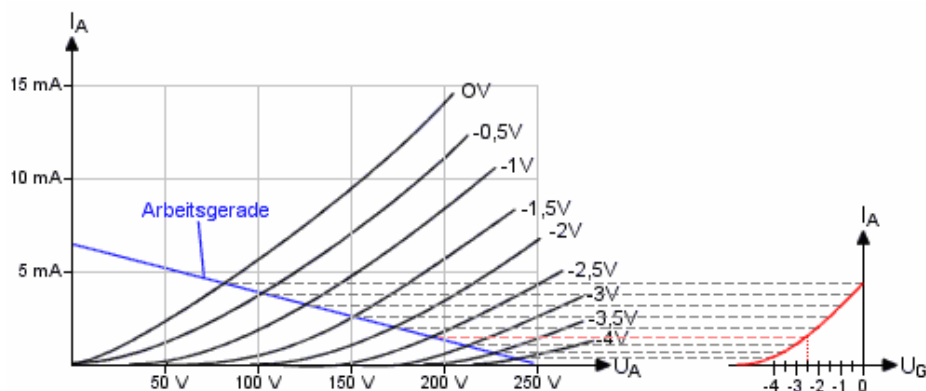


Bild 6: Reale Übertragungskennlinie

Wie man sieht, ist das Verhalten nur bei einer Gitterspannung von mehr als -2,5 V einigermaßen linear. Um die maximal mögliche, weitgehend unverzerrte Ausgangsspannung zu erhalten, muss man den Arbeitspunkt auf einen Wert legen, der in der Mitte des linearen Teils liegt, also auf eine Gitterspannung von $-2,5 \text{ V} / 2 = -1,25 \text{ V}$. Dieser neue Arbeitspunkt ist meistens nicht weit von demjenigen entfernt, den man durch die Faustregel "halbe Betriebsspannung" erhält - so auch hier. Eine genaue Einstellung ist daher nur dann notwendig, wenn man das allerletzte Quäntchen an Aussteuerbereich tatsächlich benötigt. Das ist nur sehr selten der Fall. In der Praxis ist man bei Vorverstärkern eher darauf bedacht, den Anodenstrom im Arbeitspunkt relativ niedrig zu halten und nimmt einen mitunter deutlich verringerten Aussteuerbereich in Kauf.

17. Katoden-Basis-Schaltung mit Tetroden und Pentoden

Die weiter oben anhand einer Triode beschriebene Katoden-Basis-Schaltung kann unverändert auch mit Tetroden und Pentoden verwendet werden. Der einzige Unterschied in der Schaltungstechnik ist, dass die zusätzlichen Gitter beschaltet werden müssen. Und zwar wird bei Tetroden und Pentoden das Schirmgitter über den Widerstand R_4 an eine Spannung U_s gelegt, die meistens etwas kleiner als die Versorgungsspannung ist. Bei Pentoden wird das zusätzlich vorhandene Bremsgitter mit der Katode verbunden.

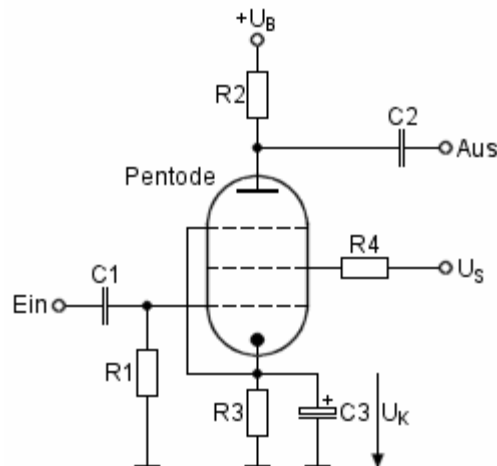


Bild 7: Beschaltung einer Tetrode/Pentode

Die Ausgangskennlinien sehen zwar ganz anders aus als bei Trioden, aber die Funktionsweise ist absolut die gleiche. Kennlinienschar, Arbeitsgerade usw. sind in Bild 8 dargestellt. Wichtig sind die Punkte, an denen die Arbeitsgerade die Kennlinien schneidet. In welchem Winkel dies passiert (bei Trioden verlaufen die Kennlinien tendenziell vertikal, bei Tetroden/Pentoden horizontal), ist absolut unerheblich.

Wie man sieht, steigt der Anodenstrom zuerst einmal steil an, wenn man ausgehend von 0 V die Anodenspannung bei konstanter Gitterspannung erhöht. Ab einem gewissen Wert bleibt er dann wie bei Transistoren weitgehend konstant. Der große Unterschied zu den Trioden liegt darin, dass die Röhre nicht verzerrungsfrei bis 0 V Gitterspannung angesteuert werden kann, sondern kurz vorher in die Begrenzung gerät. Dies macht sich dadurch bemerkbar, dass die Übertragungskennlinie kurz vor 0 V Gitterspannung abknickt. Als Ausgleich ist die "Restspannung" aber deutlich geringer als bei einer Triode, so dass der nutzbare Aussteuerbereich unterm Strich trotzdem ein gutes Stück größer als bei einer Triode ist. Hinzu kommt, dass die erzielbare Verstärkung erheblich über der einer Triode liegt. Trotz aller Unterschiede erfolgt die Berechnung der Bauteilwerte jedoch genauso wie bei der Triode. Tetroden sind als Vorverstärkerröhren höchst ungebräuchlich, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird. Sie besitzen kein

Trotz der Vorteile konnten Pentoden in Vorverstärkern die Trioden nicht verdrängen. Triodensysteme beanspruchen nämlich nur wenig Platz und benötigen nur wenige Anschlussstifte, so dass man 2 Systeme als Doppel-Triode in eine einzige Röhre packen kann (2x3 Pins für die beiden Trioden plus 2 für die Heizung plus 1 für die Katode ergibt 9 Pins). Ein in Europa sehr bekanntes Exemplar war die ECC83. Bei Pentoden wären 13 Pins erforderlich, so dass eine Doppel-Pentode nicht möglich oder besser gesagt nicht wirtschaftlich sinnvoll war. Da der Preis einer Doppel-Triode und einer Pentode ungefähr gleich ist, wurden Pentoden in Vorverstärkern oder Treiberschaltungen für Endstufen meistens nur dann eingesetzt, wenn ihre besonderen Vorteile tatsächlich benötigt wurden. Bei Endstufen war das ganz anders: Aufgrund des höheren Aussteuerbereichs und der damit höheren Ausgangsleistung wurden Endstufen fast ausschließlich mit Pentoden bestückt - in Europa oft mit der bekannten EL84 oder EL34.

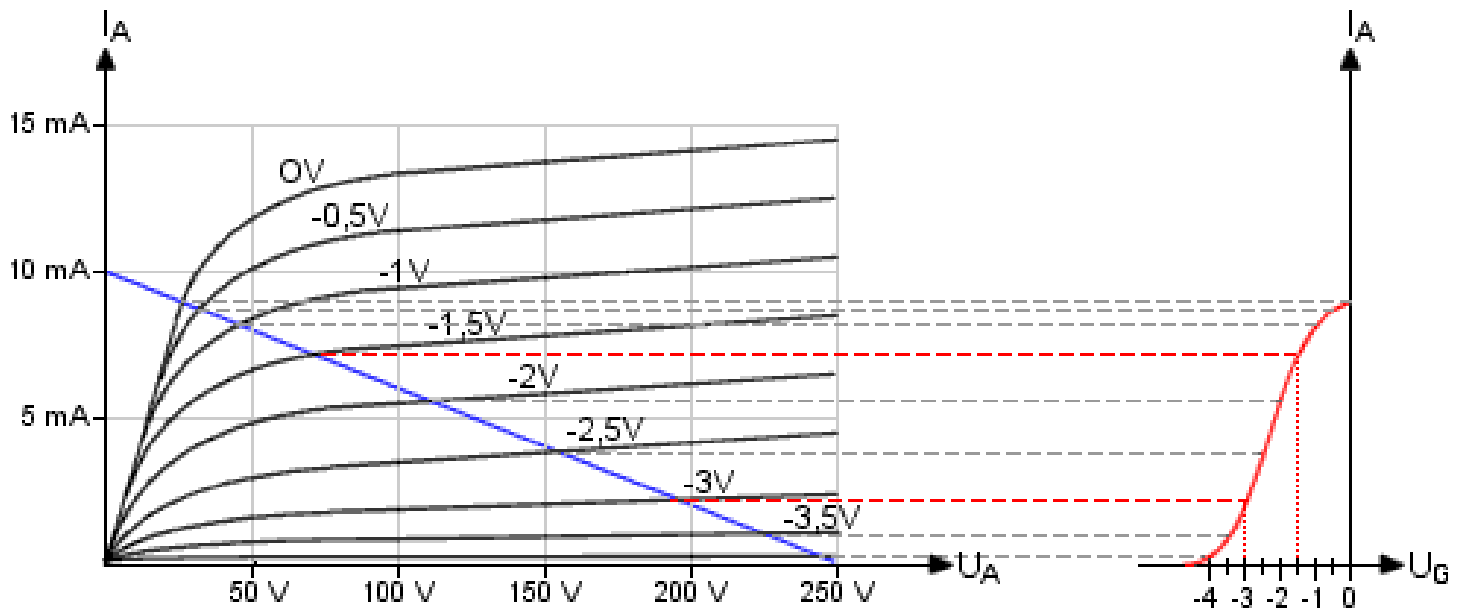


Bild 8: Kennlinienschar einer Tetrode/Pentode

18. Katodenfolger Allgemeines

Der Katodenfolger (Anoden-Basis-Schaltung) besitzt einen für Röhrenverhältnisse niedrigen Ausgangswiderstand aber keine Spannungsverstärkung. Man verwendet ihn vorzugsweise als Impedanzwandler, wenn der hohe Ausgangswiderstand der Katoden-Basis-Schaltung stört. Die Schaltung ist in Bild 1 schematisch anhand einer Triode dargestellt, wird aber auch bei Tetroden und Pentoden in großem Stil verwendet.

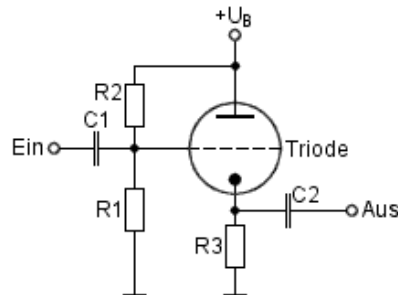


Bild 1: Schaltung eines Katodenfolgers mit Triode

Diese Schaltung sieht ziemlich einfach aus. Trotzdem kann man die Werte der Widerstände und Kondensatoren nicht beliebig wählen, um eine funktionierende Schaltung zu erhalten. Nachfolgend können Sie erfahren, wie die Schaltung funktioniert. Danach wird die Dimensionierung der Schaltung erklärt - also salopp gesagt, wie man die Werte der Widerstände und Kondensatoren ermittelt.

Der Eingangswiderstand ist sehr hoch, der Ausgangswiderstand hingegen relativ niedrig. Er ist aber bei weitem nicht so niedrig, dass man damit z.B. einen handelsüblichen Lautsprecher mit 4 oder 8 Ω Impedanz betreiben könnte. Verwendet wird der Katodenfolger daher beispielsweise als Ausgangsstufe für Vorverstärker aber auch als Treiberstufe in Endverstärkern mit leistungsfähigen Endröhren, die eine besonders niederohmige Ansteuerung benötigen.

19. Wirkungsweise

Der Eingangskondensator C1 dient dazu, das Gitter vom Eingangssignal gleichstrommäßig abzukoppeln. Kondensatoren lassen ja bekanntlich keinen Gleichstrom sondern nur Wechselstrom sprich in diesem Fall das Audiosignal passieren. Die Widerstände R1 und R2 sorgen dafür, dass das Gitter bei fehlendem Eingangssignal auf einem definierten Wert, d.h. auf der Hälfte der Betriebsspannung liegt. Die Anode der Röhre ist im Gegensatz zur Katoden-Basis-Schaltung nicht über einen Widerstand sondern direkt mit der Betriebsspannung verbunden. Der Strom fließt in die Röhre hinein und kommt an der Kathode wieder vollständig heraus, solange der Gitterstrom näherungsweise Null ist (was der Normalfall ist). Nun fließt er über Widerstand R3 nach Masse und damit zurück zur Spannungsquelle.

Dadurch, dass Strom durch R3 fließt, fällt an ihm gemäß dem ohmschen Gesetz eine Spannung ab, die man nach der bekannten Formel $U = R \cdot I$ berechnen kann. Die Differenz zwischen Spannung am Gitter und an der Kathode bestimmt nun, was passiert: Ist sie positiv, wird die Röhre stark aufgesteuert und der Strom durch R3 nimmt zu. Damit wird aber auch die Spannung an R3 größer und in Folge die Spannungsdifferenz zwischen Gitter und Kathode kleiner. Ist die Differenz negativ, wird die Röhre abgesteuert, wodurch letztendlich die Spannungsdifferenz zwischen Gitter und Kathode ebenfalls kleiner wird. Ohne Eingangssignal ergibt sich deshalb ein stabiler Zustand, in dem sich die Ausgangsspannung von der Gitterspannung nur durch die Gitter-Katoden-Spannung (=Spannungsoffset) unterscheidet.

Ein positives Eingangssignal erhöht die Spannung am Gitter, ein negatives Eingangssignal vermindert diese.

Diese Spannungsänderungen haben sofortige Anodenstrom- und damit Katodenstromänderungen zur Folge, so dass sich auch sofort die Spannung an R3 der neuen Situation anpasst. Die Röhre ist, wie man im Fachjargon sagt, voll gegengekoppelt und stellt die Eingangsspannung mit relativ niedriger Ausgangsimpedanz und hoher Linearität zur Verfügung. Die Schaltung besitzt zwar keine Spannungsverstärkung aber eine Stromverstärkung, denn der Eingangsstrom ist gering und wird weitgehend nur durch R1 und R2 bestimmt, wohingegen der Ausgangsstrom je nach Dimensionierung der Schaltung sehr viel höher sein kann. Die am Gitter anliegende Spannung darf dabei zwischen 0 V und nahezu Betriebsspannung betragen. Der Kondensator C2 verhindert, dass der durch R1 und R2 eingestellte Gleichspannungsanteil, der ungefähr der Hälfte der bis zu mehrere hundert Volt betragenden Betriebsspannung entspricht, an den Ausgang gelangt und nachfolgende Geräte zerstört.

Die Linearität der Schaltung ist dank der Gegenkopplung ausgezeichnet, hat allerdings röhrenbedingte Grenzen, denn leider ist der Spannungsoffset zwischen Ein- und Ausgang nicht konstant: Bei voll durchgesteuerter Röhre (d.h. maximaler Ausgangsspannung infolge maximalen Stroms) ist die Differenz zwischen Gitterspannung und Katodenspannung Null. Bei nahezu gesperrter Röhre (d.h. sehr kleine Ausgangsspannung infolge sehr kleinen Stroms) ist die Gitter-Katoden-Spannung negativ und beträgt einige Volt. Den jeweiligen Wert kann man der Eingangskennlinie der Röhre entnehmen (siehe Katoden-Basis-Schaltung). Insgesamt gesehen ergibt sich dadurch eine nicht korrigierbare Nichtlinearität, die umso größer ist, je größer der Betrag der Abschnürspannung der Röhre im Verhältnis zur Betriebsspannung ist. Als Abschnürspannung bezeichnet man übrigens diejenige Gitter-Katoden-Spannung, bei der der Anodenstrom gerade Null wird (abgesehen von geringen aber unvermeidlichen Restströmen).

In den meisten Fällen benutzt man einen Katodenfolger als Stromverstärker, um den Ausgangswiderstand einer Katodenbasisschaltung herabzusetzen. In diesem Fall verbindet man das Gitter des Katodenfolgers direkt mit der Anode der vorausgehenden Verstärkerstufe. Die Vorspannung, die mit R1 und R2 künstlich erzeugt wird, ist bei ihr nämlich schon gleich vorhanden. Die gesamte Schaltung sieht dann folgendermaßen aus:

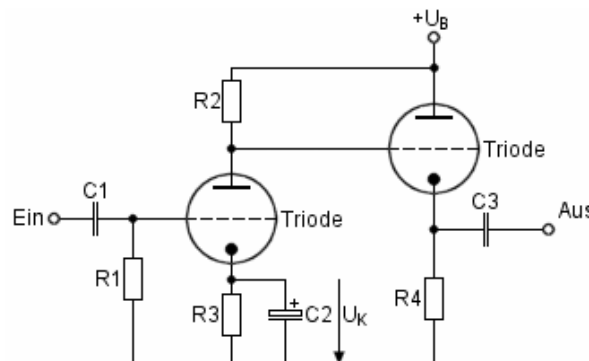


Bild 2: Katodenbasisschaltung mit nachfolgendem Katodenfolgers

20. Katodenfolger mit Tetroden und Pentoden

Die weiter oben anhand einer Triode beschriebene Katodenfolger-Schaltung kann unverändert auch mit Tetroden und Pentoden verwendet werden. Der einzige Unterschied in der Schaltungstechnik ist, dass die zusätzlichen Gitter beschaltet werden müssen. Und zwar wird bei Tetroden und Pentoden das Schirmgitter an eine Spannung gelegt, die meistens etwas kleiner als die Versorgungsspannung ist. Bei Pentoden wird zusätzlich das Bremsgitter mit Masse verbunden.

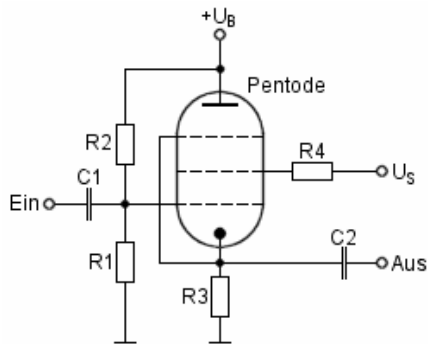


Bild 3: Beschaltung einer Tetrode/Pentode als Katodenfolger

Die Wirkungsweise ist genau die gleiche wie bei Verwendung einer Triode. Durch die verglichen mit einer Triode höhere Leerlaufverstärkung ist der Gegenkopplungsgrad deutlich höher, wodurch sich ein lineareres Verhalten ergibt. Das Problem, dass die Ausgangsspannung mit einem aussteuerungsabhängigen Versatz der Eingangsspannung folgt, besteht jedoch auch bei Pentoden.

Quellen: Böhmer