Allgemeines

Die Katoden-Basis-Schaltung ist die wohl verbreiteste Röhrengrundschaltung. 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.

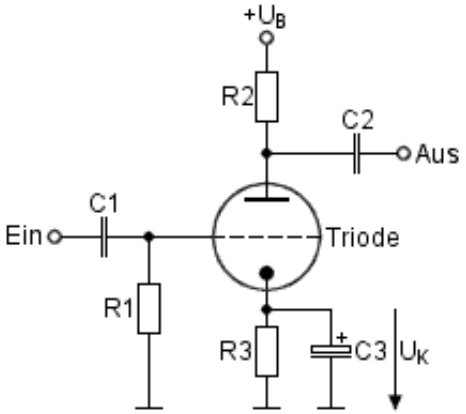


Bild 1: Katoden-Basis-Schaltung mit Triode

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.

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 2dargestellt ist:

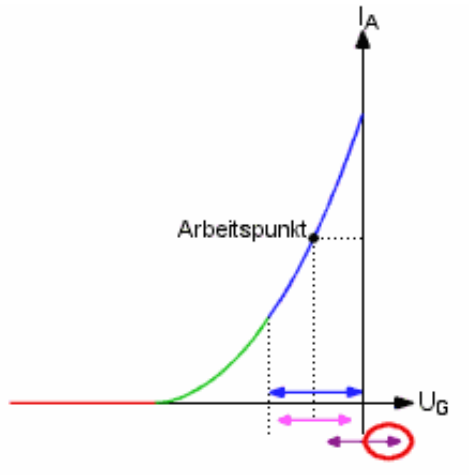


Bild 2: Eingangskennlinie

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 Wechselspannungen, die periodisch um 0 Vschwanken. 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).

Für die, die es genauer wissen wollen: Bei positiven Gitterspannungen zieht das Gitter die hindurchfliegenden Elektronen an; und zwar umso mehr, je positiver die Spannung ist. Dadurch fließt ein nenneswerter Gitterstrom. Dieser hat zur Folge, daß der Eingangswiderstand drastisch sinkt und die vorangehende Schaltung stark belastet wird. Normalerweise wird dadurch die Gitterspannung in positiver Richtung begrenzt, so daß man in der Regel keine Schutzmaßnahmen vorsehen muß. Wird der Gitterstrom dank niederohmiger Ansteuerung sehr groß, kann sich das aus sehr dünnem Draht bestehende Gitter infolge Erwärmung verformen oder gar schmelzen. Aus diesem Grund vermeidet man positive Gitterspannungen normalerweise. Es gibt zwar auch spezielle Röhrentypen, die positive Gitterspannungen erlauben. Diese sind aber im Niederfrequenzbereich sehr selten zu finden.

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 genausoweit nach oben wie nach unten schwanken, ohne daß es verzerrt wird (pinkfarbener Pfeil). Diese Voreinstellung nennt man Arbeitspunkt. Genau dafür sorgt Widerstand R3, 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 R3 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 Wiedergabeverhalten erwünscht ist, macht man für die Audiosignale die Gegenkopplung zugunsten einer höheren Verstärkung unwirksam, indem man sie durch den Kondensator an R3 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 R2, so daß bei konstanter Betriebsspannung als Anodenspannung weniger übrig bleibt. Ist das Eingangssignal negativ, sinkt der Strom durch die Röhre, wodurch der Spannungsabfall an R2 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 C2 sorgt als letztes Bauelement dafür, daß am Ausgang keine unerwünschten Gleichspannungsanteile auftreten sondern ein Audiosignal, dessen Spannung symmetrisch um den Nullpunkt schwankt.

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 mVheraus. 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 (sieheBild 3). Dieses sieht für Unbedarfte ziemlich wüst und unübersichtlich aus, ist es aber eigentlich nicht, wenn man weiß, was man daraus ablesen kann.

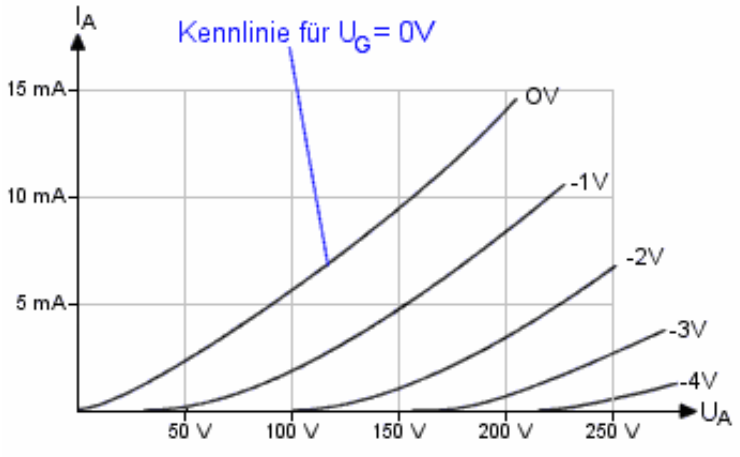


Bild 3: Triodenkennlinien

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 R2 ergibt sich daher ein Spannungsteiler, an dessen Eingang die Versorgungsspannung angeschlossen ist. Am Beispiel dreier Betriebsfälle ist dies in Bild 4 schematisch dargestellt.

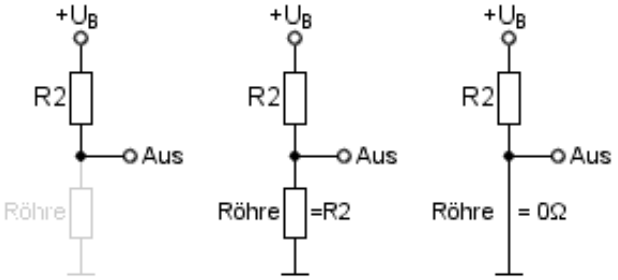


Bild 4: Extreme Betriebswerte und Arbeitspunkt

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 R2 entsteht. Dieser Betriebspunkt ist als P1 in das inBild 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 Ω 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: $I_{Anode} = U_B/R_2$

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.

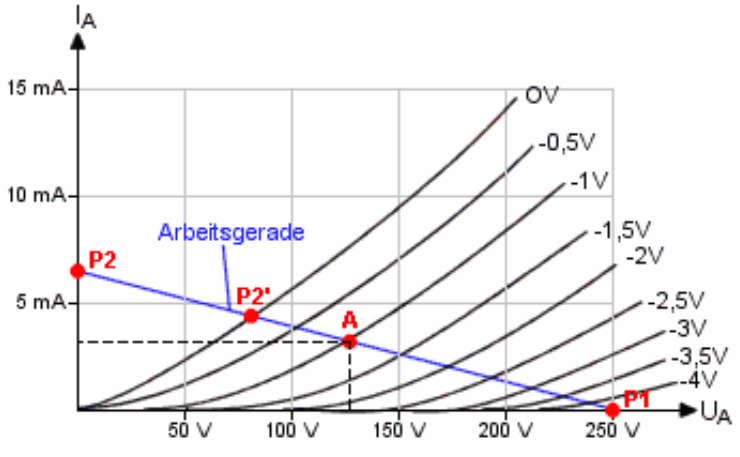


Bild 5: Triodenkennlinien mit Arbeitsgeraden

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:

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

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 VAnodenspannung 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.

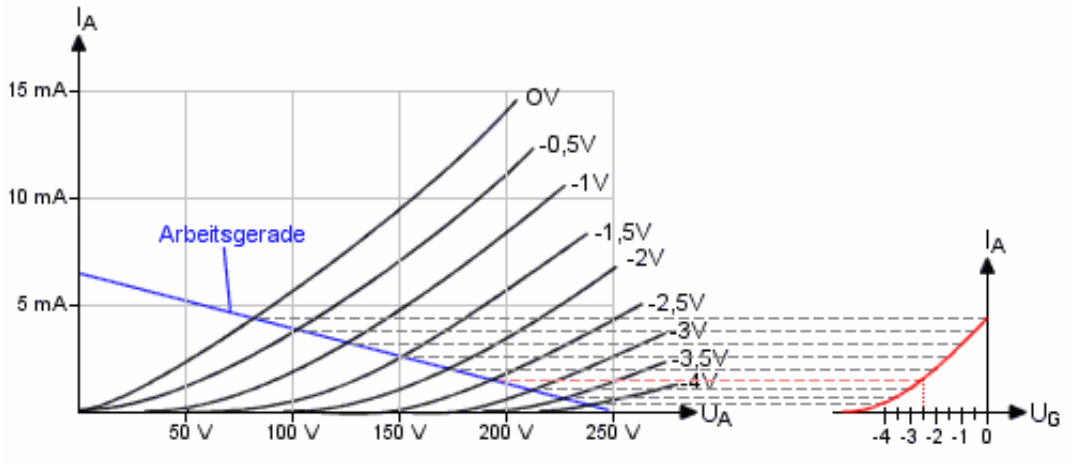


Bild 6: Reale Übertragungskennlinie

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 V / 2 = -1,25 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 Quentchen 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.

Dimensionierung der Katoden-Basis-Schaltung

Nun kommen wir zur Berechnung der wenigen Bauteile. Zuerst einmal wird der Widerstand R1 festgelegt. Da Röhren einen Eingangswiderstand von meistens einigen Megaohm besitzen, dimensioniert man R1 entsprechend dem gewünschten Eingangswiderstand, also meistens zwischen ca. 50 kΩund 1 MΩ. Hierbei muß man beachten, daß es einen oberen zulässigen Wert gibt, der von der verwendeten Röhre abhängt und dem jeweiligen Datenblatt entnommen werden muß. Grund hierfür ist, daß der Gitterstrom nicht wirklich Null ist, sondern geringe Restströme vorhanden sind, die von der Gitterspannung und dem Anodenstrom abhängen. Wenn der Gitterwiderstand zu groß ist, fällt an ihm eine nennenswerte Spannung ab, die in dieser Schaltungskonfiguration unerwünscht ist, weil sie die Arbeitspunkteinstellung stört.

Wenn R1 festgelegt wurde, kann man den Wert von C1 bestimmen. Dieser bildet mit dem Eingangswiderstand der Schaltung (also in erster Näherung R1) einen Hochpaß. Dies bedeutet, daß Frequenzen unterhalb seiner Grenzfrequenz zunehmend abschwächt sprich leiser wiedergegeben werden. Für die Berechnung des Kondensators gilt bei vorgegebener Grenzfrequenz folgende Formel:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

Beispiel: Bei einem Eingangswiderstand von 100 kΩ und einer gewünschten Grenzfrequenz von 20 Hz ergibt sich ein Wert von $7{,}9577 \cdot 10^{-8}$ F sprich79,577 nF. Der nächste Wert aus der Normenreihe ist 82 nF. Wenn der gewünschte Wert mitten zwischen zwei Normwerten liegt, sollte man übrigens zum größeren Wert greifen, was eine etwas geringere Grenzfrequenz ergibt.
Statt 82 nF könnten Sie auch 100 nF verwenden, denn der Wert von C1 ist ziemlich unkritisch. Großzügiges Aufrunden ist erlaubt. Im Beispiel würde sich die untere Grenzfrequenz bei 100 nF auf ca. 16 Hzverringern.

Die Berechnung des Anodenwiderstands R2 ist ebenfalls nicht schwierig, wenn die Arbeitsgerade bekannt ist. Wie schon oben beschrieben zeichnet man die Arbeitsgerade in das Ausgangskennfeld der Röhre ein und liest den Strom I_0 in Arbeitspunkt P2 ab. Der Widerstandswert berechnet sich dann ganz einfach zu $R = U_B / I_0$. Wenn die Betriebsspannung wie im obigen Beispiel (Bild 6) 250 V und der Maximalstrom I_0 7 mA beträgt, ergibt sich daraus als Anodenwiderstand ein Wert von 35715 Ω. Der nächste gebräuchliche Normwert ist 33 kΩ.

Es gibt übrigens ganz unterschiedliche Wege, wie man zur Arbeitsgeraden kommt: Man kann aus dem Datenblatt beispielsweise die Werte für Betriebsspannung sowie Ruhestrom im Arbeitspunkt A entnehmen. Mit der Betriebsspannung kennt man Punkt P1 und mit dem dem Ruhestrom im Arbeitspunkt (bei halber Betriebsspannung) den Punkt A. Mit diesen beiden Punkten kann man leicht die Arbeitsgerade zeichnen. Man kann aber auch die Angaben über Nenn-Betriebsspannung (ergibt P1) und maximal zulässigen Anodenstrom (ergibt P2) verwenden, wobei man bei Vorverstärkern den Anodenstrom in Punkt P2 meistens weit unter dem Maximalwert wählt. Nicht selten gibt es im Datenblatt sogar konkrete Angaben zur Dimensionierung von R2 und R3.

Der Katodenwiderstand R3 ist genauso schnell und einfach berechnet wie R2: Auch hier kommt das ohmsche Gesetz zur Anwendung. Weil dieser Widerstand den Arbeitspunkt einstellt, verwendet man zur Berechnung Anodenstrom und den Betrag der Gitterspannung im Arbeitspunkt. Im Beispiel sind das ca. 3 mA und 1,25 V, so daß sich 416 Ω ergeben. Der nächste gebräuchliche Normwert ist 390 Ω.

Der Kondensator C3 soll für die Audiosignale eine möglichst niederohmige Überbrückung des Katodenwiderstands sein. Zusammen mit dem Katodenwiderstand R3 ergibt sich eine Zeitkonstante, die man so dimensionieren sollte, daß sie mindestens der gewünschten unteren Grenzfrequenz entspricht. Es hat sich jedoch bewährt, den Kondensator deutlich größer zu dimensionieren, nämlich so, daß sich zwischen 1 und 5 sergeben, was 1 bis 0,2 Hz entspricht. Wenn der Verstärker üblicherweise übersteuert wird, sollte man die untere Grenzfrequenz jedoch so hoch wie möglich legen, weil sich durch die unsymmetrische Wellenform während der Übersteuerung die Spannung am Kondensator und damit der Arbeitspunkt ändert. Die Steilheit der Röhre ist leider stark arbeitspunktabhängig, wodurch sich eine geringere Verstärkung ergibt. Es dauert bei langer Zeitkonstante dann relativ lang, bis der alte Arbeitspunkt und damit die alte Verstärkung wieder erreicht ist. Gitarristen kennen diesen Effekt als "totes Loch" oder "Pump-Effekt".

Die Berechnungsformel für C3 ist die gleiche wie für C1, nur daß man hier den Widerstandswert von R3 einsetzen muß. Bei 390 Ω ergeben sich daher für 0,2 Hz 2040 µF. Der nächste gebräuchliche Normwert ist 2200 µF. Die Ansprüche an seine Spannungsfestigkeit sind sehr gering: Er muß lediglich für den Spannungsabfall an R3 im Arbeitspunkt ausgelegt sein, d.h. im Beispiel für 1,25 V. Eine höhere Nennspannung des Elkos ist natürlich zulässig.

Den Ausgangskondensator C2 kann man nur berechnen, wenn man den Eingangswiderstand der nachfolgenden Stufe kennt. Die Berechnungsformel ist die gleiche wie für C1, wobei man als Widerstandswert den Eingangswiderstand der nachfolgenden Stufe einsetzen muß. Ganz wichtig ist eine ausreichend hohe Spannungsfestigkeit. Er muß mindestens für die Betriebsspannung dimensioniert sein, da die Anodenspannung bis auf Betriebsspannungsniveau ansteigen kann.

Diese Dimensionierung gilt wie schon gesagt für einen maximalen Aussteuerbereich. Gerade bei Vorstufen liegen jedoch am Ausgang nur einige wenige Volt an, weshalb man üblicherweise kleinere Ströme für den Arbeitspunkt einstellt. Nicht selten wird daher als Anodenwiderstand ein Wert von 100 kΩ oder noch mehr verwendet.

Der Eingangswiderstand der nachfolgenden Stufe spielt nicht nur bei der Berechnung von C2 eine Rolle, sondern er bildet zusätzlich mit dem Ausgangswiderstand der gerade betrachteten Stufe einen Spannungsteiler. Da die effektive Verstärkung durch diesen Spannungsteiler reduziert wird, ist man

bestrebt, die Schaltungen so zu dimensionieren, daß der Eingangswiderstand viel höher ist als den Ausgangswiderstand, so daß sich eine möglichst geringe Abschwächung ergibt. Ist der Ausgangswiderstand genauso groß wie der Eingangswiderstand, reduziert sich die effektive Verstärkung auf die Hälfte. Dies muß man beim Entwurf berücksichtigen, indem man die Verstärkung der Stufe so hoch wählt, daß sich trotz dieses Spannungsteilers die gewünschte Verstärkung ergibt.

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 R4 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.

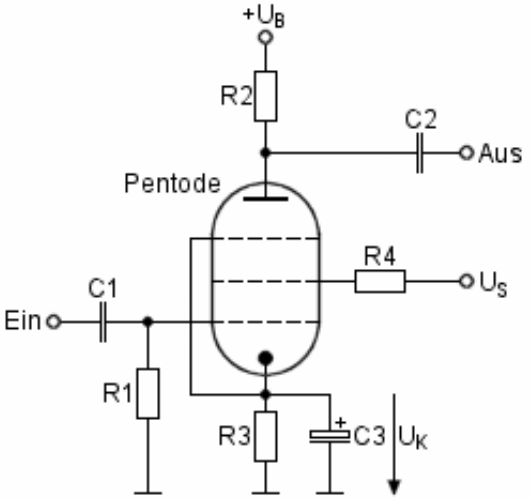


Bild 7: Beschaltung einer Tetrode/Pentode

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.

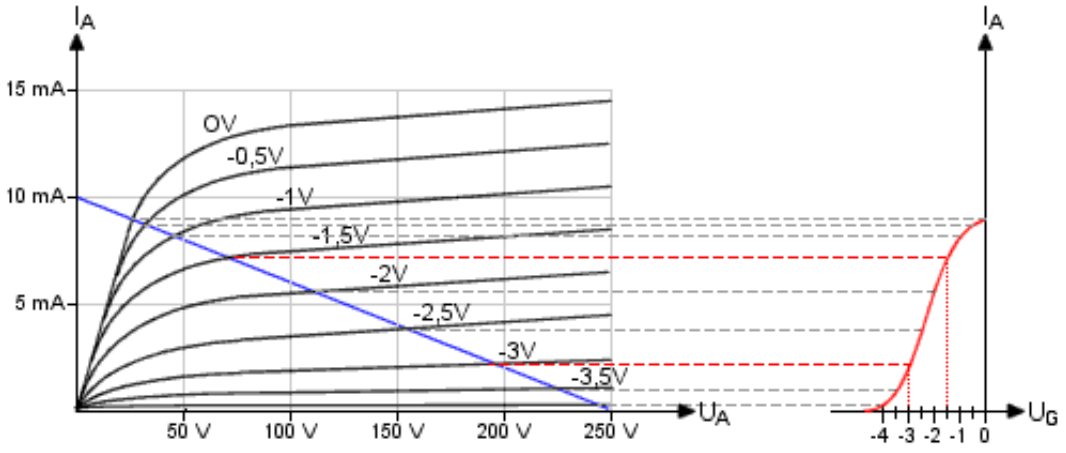


Bild 8: Kennlinienschar einer Tetrode/Pentode

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 ausgesteuert 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 dem einer Triode liegt. Trotz aller Unterschiede erfolgt die Berechnung der Bauteilewerte jedoch genauso wie bei der Triode. Tetroden sind als Vorverstärkerröhren höchst ungebräuchlich, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird.

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 voneinander unabhängige Systeme als Doppel-Triode in eine einzige Röhre packen kann (2x3 Pins für die beiden Trioden plus 2 für die Heizung plus 1 für Abschirmung oder Mittelabgriff der Heizung ergibt 9 Pins). Ein in Europa sehr bekanntes Exemplar war die ECC83 bzw. 12AX7. Bei Pentoden wären 12 Pins erforderlich, so daß eine Doppel-Pentode mit unabhängigen Systemen 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.