INGENIEUR-
FERNSTUDIUM

Matthes

Bauelemente der Informationselektrik II

1

Herausgeber:
Ingenieurschule für
Elektrotechnik, Mittweida

200.41–01

L E H R W E R K
für das Ingenieur-Fernstudium

Ing. Günter Matthes

B A U E L E M E N T E D E R I N F O R M A T I O N S - E L E K T R I K II

1

Elektronenröhren
(Diode, Triode)

Veröffentlicht:
INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
KARL-MARX-STADT

1. Fachlektor: Fachschullehrer Manfred Kühne
Ingenieurschule für Maschinenbau und Elektrotechnik, Dresden

2. Fachlektor: Dipl.-Ing. Lothar Steinhäuser
VEB Fernmeldewerk Leipzig

Deutschlektor: Fachschuldozent Arthur Gärtner
Ingenieurschule für Elektrotechnik Mittweida

Redaktionsschluß: Oktober 1968

Ag 613/236/69/2000(116) Best.-Nr. 200.41-01

Vorzugsschutzgebühr M 2.00

Inhaltsverzeichnis Seite

1. Einleitung

Heute ist man geneigt, das Halbleiterbauelement, vornehmlich den Transistor, überzubewerten. Die Elektronenröhre wird häufig als überaltert angesehen. Die Praxis zeigt auch, daß das Halbleiterbauelement die Röhre stark verdrängt hat; aber die Röhre wird doch noch angewendet. Es ist auch nicht abzusehen, daß sie gänzlich verschwunden sein wird. Daher ist es notwendig, die Röhre und ihre vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten ebenso kennenzulernen wie den Transistor.

Wenn in den folgenden Lehrbriefen erst die Röhre und dann das Halbleiterbauelement behandelt wird, so ist diese Reihenfolge aus methodischen Gründen gewählt worden. Sie sollen kurz dargelegt werden.

Zunächst bietet sich die Reihenfolge Röhre - Transistor aus historischen Gründen an, wenn auch der Halbleitereffekt eher bekannt war als die Röhre. Dann ist zu bedenken, daß die Röhre einfacher dargestellt werden kann, die physikalischen Vorgänge sind leichter zu überschauen. So hat man es mit zwei Kennlinienfeldern zu tun und nicht, wie beim Transistor, mit vier. Die Steuerung der Röhre erfolgt leistungslos, während dies beim Transistor nicht der Fall ist. Ferner kann man bei der Betrachtung des Transistors auf Zusammenhänge, die auch bei der Röhre gegeben sind, verweisen. Man kann den ganzen Komplex Röhre - Transistor kontinuierlich und folgerichtig erfassen, was zu einer stärkeren Akzentuierung der Merkmale und damit zu einer sicheren Erkenntnis der Unterschiede beider Bauelemente führt. Röhre und Transistor werden nun so betrachtet, wie es für den, der die beiden Bauelemente anwendet, erforderlich ist. Der Entwickler von Röhren und Transistoren benötigt spezielle Kenntnisse, die aus der Spezialliteratur zu ersehen sind.

2. Die Diode

2.1. Unterscheidung Zweipol- und Mehrpolröhre

Bei den Elektronenröhren unterscheidet man zunächst grob zwischen Zweipol- und Mehrpolröhren. Diese Unterscheidung bezieht sich sowohl auf den Aufbau als auch auf die Wirkungsweise der Röhren. Zweipolröhren sind die Dioden. Diese haben die Eigenschaften eines nichtlinearen Widerstandes, die auch in der Anwendung der Dioden ausgenutzt werden. Charakteristisch sind die "Ventilwirkung" und die "Richtwirkung". Durch die Ventilwirkung ist die Anwendung der Diode als Gleichrichterbauelement gegeben, während die Richtwirkung eine Demodulation (im Prinzip auch eine Gleichrichtung), eine Frequenzvervielfachung und eine Modulation ermöglicht. Mehrpolröhren besitzen mindestens drei Elektroden. Sie sind ebenfalls als nichtlineare Widerstände anzusehen. Durch eine oder mehrere zusätzliche Elektroden werden aber besondere Effekte erzielt, wie z.B. der der Verstärkung oder auch der, eine Mehrpolröhre als Blindwiderstand verwenden zu können. Damit ist die Anwendung von Zwei- und Mehrpolröhren nicht erschöpft, aber alle Möglichkeiten der Verwendung der Diode lassen sich auf die Richt- und die Ventilwirkung und bei der Mehrpolröhre auf die Verstärkerwirkung zurückführen. Daher wollen wir uns in diesem Lehrbrief auf die genannten Wirkungen beschränken.

2.2. Aufbau einer Diode

Wie schon erwähnt, ist die Diode ein nichtlinearer Widerstand. Sie besitzt zwei Elektroden, die Katode und die Anode. Legt man eine Gleichspannung an diese Elektroden, so herrscht zwischen ihnen ein elektrisches Feld. An der Katode verlassen die Elektronen den festen Leiter und durchlaufen das elektrische Feld [1]. An der Anode treten sie wieder in den festen

[1] Man bezieht sich bei der Elektronenröhre, wie schon der Name sagt, zur Demonstration der Wirkungsweise auf die Bewegung der Elektronen.

Leiter ein. Anode und Katode befinden sich in einem evakuierten Glas- oder Metallkolben. Die die Elektronen emittierende Katode ist als Glühkatode ausgebildet, die direkt oder indirekt geheizt wird.
Die direkte Heizung wendet man bei den "homogenen" Katoden an, die aus einem Metall (Wolfram) bestehen. Ihre Elektronenemission ist allerdings gering, während ihre mechanische Festigkeit und die gegen Überheizung groß ist. Man versteht unter Überheizung die Erzeugung solch hoher Katodentemperaturen, daß die Katode deformiert oder gar zerstört wird.
Lagert man in eine Wolframkatode Thorium ein, so kann eine wesentlich höhere Emission als bei der reinen Wolframkatode (diese wird praktisch fast nicht verwendet) erzielt werden. Infolge Überheizung diffundiert Thorium an die Oberfläche des Wolframdrahtes und bildet dort einen Thoriumfilm. Damit liegt eigentlich keine homogene Katode vor, sondern eine "inhomogene" oder zusammengesetzte. Die Thoriumkatode, auch thorierte Katode genannt, ist ebenfalls mechanisch stabil, aber empfindlich gegen Überheizung, da dann der Thoriumfilm verdampft.
Die wichtigste inhomogene Katode ist die Oxidkatode. Sie wird ausnahmslos indirekt geheizt. In einem Nickel- oder Kupferzylinder (gut leitendes Material) befindet sich eine Heizwendel,

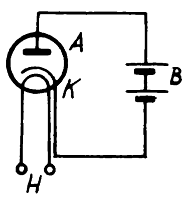


Bild 1.1

die durch einen besonderen Stromkreis (Heizstromkreis) den Heizstrom zugeführt bekommt.
Der Nickel- bzw. Kupferzylinder ist Träger einer Oxidschicht,

in der Regel einer Bariumoxidschicht. Reines Oxid emittiert auch nur wenige Elektronen, weshalb die Katode "aktiviert" werden muß. Durch Überheizung bei anliegender Anodenspannung wird ein geringer Teil des Oxids zersetzt (elektrolytische Zersetzung infolge des Emissionsstromes oder auch Reduktion infolge von Bindemitteln im Oxid). Es diffundiert reines Barium an die Oberfläche und verteilt sich unregelmäßig über dieselbe. Die Bariumoxidkatode weist eine sehr hohe Emission auf, sie ist aber mechanisch wenig stabil und auch gegen Überheizung empfindlich.
Es gibt auch Carbidkatoden, für die die gleichen Verhältnisse gelten, wie sie für die Oxidkatode erörtert wurden. Sie sind mechanisch etwas stabiler, aber in der Herstellung komplizierter.
Die Anode stellt für die Elektronen den Übergang vom Vakuum oder von der Gasstrecke zum festen Leiter dar. Sie besitzt gegenüber der Katode ein positives Potential. Als Material wird geschwärztes Blech verwendet, das die Katode zylindrisch umgibt.
In Bild 1.1 ist schematisch eine Diode mit indirekter Heizung und dem Stromkreis Batterie (Speisespannung), Anode und Katode gezeigt.

2.3. Kennlinie einer Diode

Legt man an die Anode einer Diode eine gegenüber der Katode positive Spannung an und befindet sich die Röhre, wie es Bild 1.1 zeigt, in einem geschlossenen Stromkreis, dann fließt durch sie ein Strom.
Es gilt

$$I = f(U) .$$

Die Darstellung dieser Funktion in einem Diagramm ergibt die Kennlinie der Diode. Der Stromverlauf ist schematisch in den Bildern 1.2 und 1.3 dargestellt. Dabei ist zu beachten, daß für die Ordinate eine logarithmische Teilung gewählt worden ist. Dadurch kann man deutlich drei Gebiete der Kennlinie un-

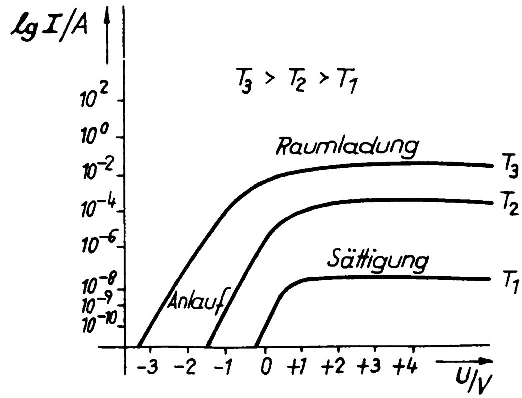


Bild 1.2

terscheiden. Das bedeutet nichts anderes, als daß die Funktion $I = f(U)$ nicht einem einheitlichen Gesetz folgt, sondern daß drei verschiedene physikalische Gesetzmäßigkeiten Gültigkeit haben.

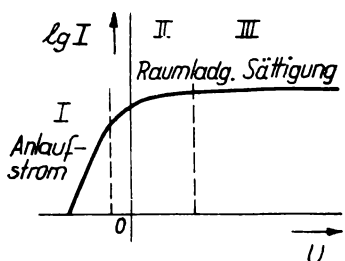


Bild 1.3

2.3.1. Das Anlaufstromgebiet

Das Gebiet I wird als Anlaufstromgebiet bezeichnet. Es ist dadurch gekennzeichnet, daß ein Strom durch die Röhre fließt, auch wenn die Anodenspannung kleiner als Null ist. Der Name Anlaufstromgebiet rührt daher, daß bei negativer Anodenspannung der Anodenstrom keineswegs verschwindet, sondern einige Elektronen, die die erhitzte Katode verlassen haben, eine so große kinetische Energie besitzen, daß sie gegen das negative Potential anlaufen und zur Anode gelangen. Die Kraftwirkung auf die Elektronen erfolgt in Richtung Katode. Im Anlaufstromgebiet folgt der Strom dem Anlaufstromgesetz:

$$I = I_0 \, e^{\frac{U}{U_T}} \qquad (1)$$

für $U = 0$.

I_0 ist dabei der Strom, der bei einer Spannung $U = 0$ gegeben ist; U_T ist die Temperaturspannung, d.h., es ist die Spannung, die der Wärmeenergie proportional ist, die je Ladungseinheit für den Austritt der Elektronen aus der Katode erforderlich ist.

2.3.2. Das Raumladestromgebiet

Das Gebiet II - Bild 1.3 - der Kennlinie der Diode ist das Raumladestromgebiet. Es ist, von wenigen Ausnahmen abgesehen, das wichtigste Arbeitsgebiet der Elektronenröhren. Wie aus den Bildern 1.2 und 1.3 ersichtlich ist, erstreckt sich das Raumladestromgebiet von schwach negativen Spannungen (bei höherer Katodentemperatur) bis in vorwiegend positive Spannungen. Es ist das Übergangsgebiet zwischen dem Anlaufstrom- und dem Sättigungsstromgebiet. Im Raumladestromgebiet gelangen nicht alle emittierten Elektronen bei einem positiven Potential zur Anode. Dies ist erst der Fall, wenn eine solch hohe Anodenspannung erreicht ist, daß der Sättigungsstrom fließt. Solange die Spannungen niedriger sind, wirkt sich das elektrische Feld, das durch die von der Katode zur Anode fliegenden Elektronen gebildet wird, auf den Stromverlauf aus. Barkhausen schreibt dazu:

"Im Raumladestromgebiet begrenzt der Strom sich selbst durch die von ihm hervorgerufene Raumladung Q_r auf einen solchen Wert, daß die negative Raumladung Q_r gleich der positiven auf der Anode befindlichen Ladung Q_a wird."

D.h., die Anode ist nicht gegenüber der Katode wirksam, sondern gegenüber der Raumladung. Das bedeutet jedoch, daß bei Vernachlässigung des geringen Potentials zwisohen Raumladung und Katode diese das Potential Null hat. Der Raumladestrom folgt nicht einem Exponentialgesetz wie der Anlaufstrom, sondern dem Raumladestromgesetz:

$$I = k \cdot U^{\frac{3}{2}} . \qquad (2)$$

k ist die Raumladekonstante, in der u.a. die geometrisohen Abmessungen der Röhre erfaßt sind.

Im Raumladestromgebiet entspricht der Strom nach obiger Formel der angelegten Spannung. Die Katodentemperatur hat auf den Strom keinen Einfluß. Erforderlich ist nur eine solch hohe Temperatur der Katode, daß soviel Elektronen aus der Katode austreten können, wie sie dem durch das Raumladestromgesetz bestimmten Strom entsprechen. Ist dies nicht der Fall, dann stellt sich ein konstanter Strom ein, der auch bei Erhöhung der Anodenspannung nicht größer wird. D.h. aber, daß der Strom nicht mehr der angelegten Spannung entspricht. Betrachtet man jedoch die Röhre als Widerstand, dann ist die Tatsache des der Spannung entsprechenden Stromes im Raumladegebiet das wesentliche Kriterium. Damit wird nochmals die besondere Bedeutung des Raumladegebietes deutlich.

2.3.3. Das Sättigungsstromgebiet

Wie aus den obigen Darlegungen und den Bildern 1.2 und 1.3 hervorgeht, ergibt sich bei konstanter Emission der Katode und bei bestimmten höheren Spannungen ein konstanter Strom. Es ist damit das Gebiet III der Kennlinie gegeben, das Sättigungsstromgebiet. Der Strom ist nicht mehr eine Funktion der Spannung. Vereinfacht gilt für das Sättigungsstromgebiet:

$$I = \text{konstant} . \qquad (3)$$

Bei modernen Röhren wird innerhalb der zulässigen Belastungen ($I_{a\,max}$, $P_{v\,max}$) die Sättigung nicht erreicht.

2.4. Kennwerte der Diode

2.4.1. Arbeitspunkt und Aussteuerbereich

In Bild 1.4 ist die statische, d.h. die mit Gleichspannung

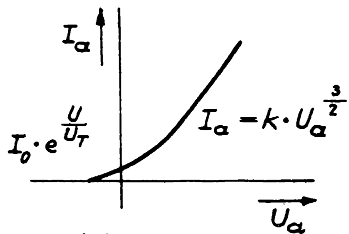


Bild 1.4

aufgenommene Kennlinie einer Diode dargestellt, wobei auf das Gebiet des Sättigungsstromes wegen seiner geringen Bedeutung verzichtet wurde. Das Anlaufstromgebiet tritt wenig in Erscheinung; es interessiert auch nur in besonderen Fällen, so daß es in der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden kann. Als bedeutendstes Gebiet bleibt das des Raumladestromes für die Betrachtung übrig.

Wie schon mehrfach erwähnt wurde, ist die Diode ein nichtlinearer Widerstand, durch den bei Anlegen einer Spannung ein Strom fließt. Dieser Tatbestand ist in Bild 1.5 dargestellt, und wir erörtern ihn nur, um einige Begriffe kennenzulernen, die wir immer wieder benutzen werden.

Legt man also an eine Diode, deren Charakteristik Bild 1.5 zeigt, eine Gleichspannung U_{a0} an, dann fließt ein Gleichstrom I_{a0}. Der Punkt A, dessen Koordinaten die Gleichspannung U_{a0} und der Gleichstrom I_{a0} sind, ist der Arbeitspunkt. Wird der Gleichspannung U_{a0} eine Wechselspannung

$$u_a = \hat{u}_a \sin \omega t$$

überlagert, so wird die Röhre vom Arbeitspunkt nach beiden Seiten "ausgesteuert". Das bedeutet, daß der Arbeitspunkt von A nach C und zurück über A nach B und wieder nach A wandert. Der Bereich BC in Bild 1.5 auf der Kennlinie wird als

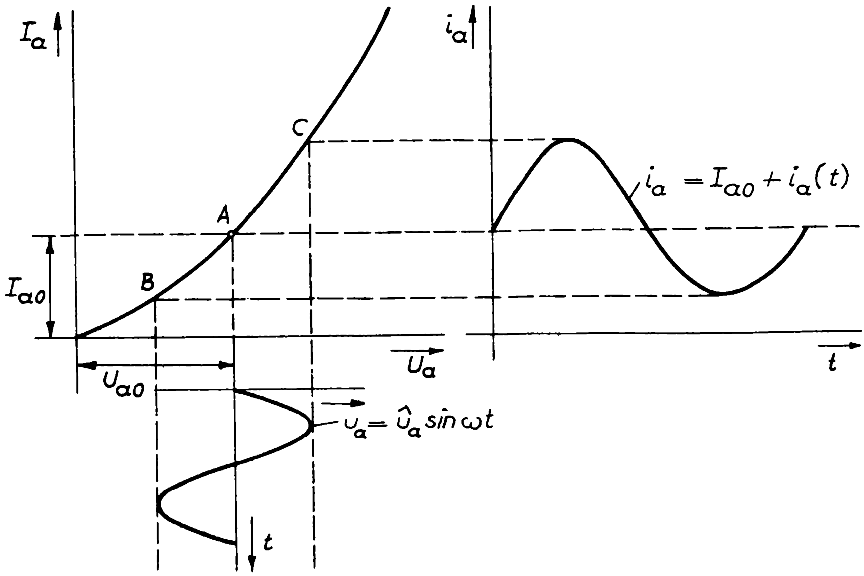


Bild 1.5

Aussteuerbereich bezeichnet. Der durch die Röhre fließende Strom setzt sich aus dem Anodengleichstrom I_{ao} , auch als Anodenruhestrom bezeichnet, und dem Anodenwechselstrom

$$i_a = \hat{i}_a \sin \omega t$$

zusammen.

2.4.2. Steilheit und Innenwiderstand

Ist nun der Aussteuerbereich, der auch durch $2\,\hat{u}_a$ gegeben ist, klein, dann kann mit guter Näherung die Kennlinie im Aussteuerbereich durch die Tangente an die Kennlinie im Arbeitspunkt A ersetzt werden. Da nun die Größe der Amplitude des Anodenstromes i_a nicht nur von der Amplitude der aussteuernden Spannung u_a abhängig ist, sondern auch vom Anstieg der Kennlinie im Aussteuerbereich, so ist dieser Anstieg der Kennlinie eine charakteristische Größe. Diese wird in der Röhrentechnik aber nicht als Anstieg der Kennlinie im betrachteten

Aussteuerbereich der Kennlinie bezeichnet, sondern als die Steilheit der Kennlinie im betrachteten Bereich. Nach Bild 1.6 wird die Steilheit definiert zu

$$\tan\beta = S = \frac{2\hat{i}_a}{2\hat{u}_a} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} ,$$

wobei die Heizspannung konstant sein muß. Diese Definition

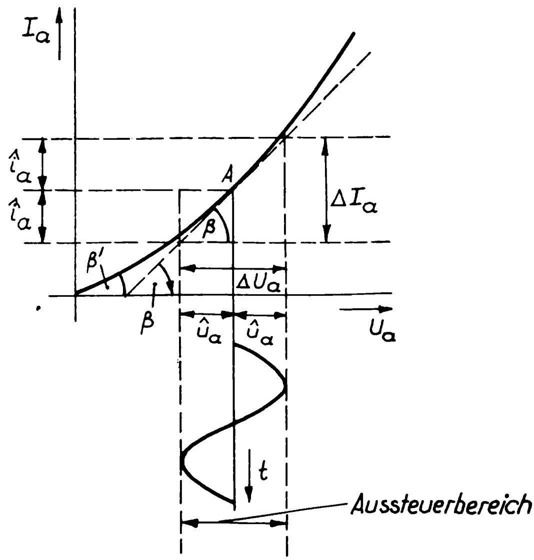


Bild 1.6

der Steilheit gilt natürlich nur für einen linearen Bereich der Kennlinie oder bei einer gekrümmten Kennlinie nur für einen kleinen Aussteuerbereich als Annäherung. Ist auch für einen kleinen Aussteuerbereich keine Linearität der Kennlinie gegeben und berücksichtigt man, daß der Kennlinienverlauf auch von anderen Größen, z.B. vom Heizstrom I_h abhängt, dann definiert man die Steilheit als den partiellen Differentialquotienten:

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \quad . \tag{4}$$

Die Dimension ist hierbei A/V , jedoch verwendet man praktisch die Dimension mA/V.
Der reziproke Wert der Steilheit der Diode ist der Wechselstromwiderstand, für den als Definition gilt:

$$R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \quad . \tag{5}$$

Kann mit guter Näherung wieder Linearität der Kennlinie im Aussteuerbereich angenommen werden, dann gilt als Näherung:

$$R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right)_{I_h = konst.} \tag{6}$$

Der Wechselstrominnenwiderstand ist eine Rechengröße, die nicht zu verwechseln ist mit dem Gleichstromwiderstand der Röhre. Für diesen gilt im Arbeitspunkt:

$$R_{i=} = \frac{U_{ao}}{I_{ao}} \quad . \tag{7}$$

Da die Steilheit und der Wechselstrominnenwiderstand der Diode zueinander reziproke Größen sind, gilt die Beziehung:

$$S \cdot R_i = 1 \quad . \tag{8}$$

Es ist zu beachten, daß diese Beziehung nur für die Diode gilt.

2.5. Anwendung der Diode

Die Diode findet eine vielfältige Anwendung. Obwohl der Begriff der Verstärkung nicht definiert ist, wollen wir uns aber an dieser Stelle darüber klar sein, daß eine Verstärkung mit einer Diode nicht möglich ist. Sie kann aber zur Modulation, Frequenzvervielfachung, vor allem aber zur Gleichrichtung und zur Demodulation verwendet werden.
Bei der Gleichrichtung unterscheidet man die Ventil- und die Richtwirkung der Diode. Aus beiden Wirkungen ergeben sich die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten, weshalb wir uns beide

Wirkungen verdeutlichen wollen.

2.5.1. Ventilwirkung

Ventilwirkung bedeutet, daß bei der negativen Halbwelle der angelegten Wechselspannung kein Strom fließt. Dies ist der Fall, wenn die Röhre ohne eine Gleichspannung als Anodenspannung (ohne Vorspannung) betrieben wird, d.h., wenn der Arbeitspunkt praktisch im Koordinatennullpunkt liegt (Bild 1.7).

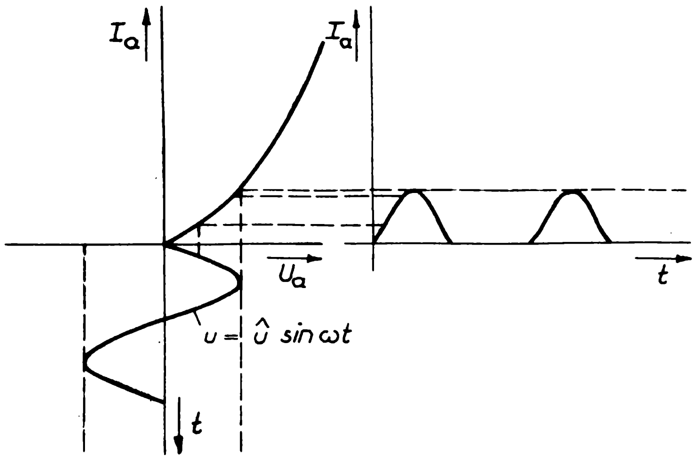


Bild 1.7

Durch die Röhre fließt nur ein Strom gleicher Richtung. Allerdings besitzt dieser Strom eine große Wechselspannungskomponente, so daß er bzw. ein durch ihn gegebener Spannungsabfall an einem Verbraucherwiderstand nicht geeignet ist, wenn eine Gleichgröße benötigt wird, wie es z.B. für die Anodenspannung einer Röhre der Fall ist.

Die Wechselspannungskomponente kann durch Siebung beseitigt werden.

Nachteilig ist neben der Wechselkomponente, daß der Gleichstromanteil relativ klein ist. Er beträgt etwa $I = 0{,}35\,\hat{i}$.

Allerdings kann er durch geeignete Schaltungsmaßnahmen (Parallelschalten eines "Ladekondensators") verbessert werden.
Die Diode wird in der geschilderten Wirkung als Leistungsgleichrichter verwendet, wobei allerdings Leistungen von etwa nur $50\,W$ bis $100\,W$ die Regel sind. Gegenüber anderen Dioden ist die Röhrendiode vorteilhaft, da sie keinen Rückstrom aufweist. Der Rückstrom ist der Strom, der bei Anliegen von negativen Spannungen durch den Gleichrichter fließt.
Bei der Röhre ist kein Rückstrom vorhanden, weil der Widerstand der Röhre in der Sperrichtung unendlich groß ist. Hierbei wird der Anlaufstrom vernachlässigt.

2.5.2. Richtwirkung

Bei der Richtwirkung arbeitet die Diode mit einer Gleichspannung als Vorspannung, der eine Wechselspannung überlagert ist. Um die Wirkung der Röhre darzustellen, geht man von der Taylorreihe aus, die besagt, daß man eine Funktion $f(x)$ von einem Punkt P ausgehend entwickeln kann, wenn der Wert der Funktion im Punkt P und der ihrer Ableitungen in P bekannt sind. Die Taylorreihe lautet in allgemeiner Form:

$$f(x_0 + x) = f(x_0) + \frac{x}{1!} f'(x_0) + \frac{x^2}{2!} f''(x_0) + \cdots\cdots .$$

Diese Reihenentwicklung kann man auf die Kennlinie einer Röhre anwenden. Legt man die Beziehungen des Bildes 1.8 zugrunde, dann bedeuten:

$f(x_0) = I_{a0}$	Ruhestrom im Arbeitspunkt
$f'(x_0) = S$	Ableitung der Funktion im Arbeitspunkt gleich Steilheit der Kennlinie im Arbeitspunkt
$f''(x_0) = S' = T$	Zweite Ableitung der Funktion im Arbeitspunkt. Sie wird nach Barkhausen mit Krümmung T bezeichnet, hat aber mit dem mathematischen Begriff der Krümmung einer Kurve nichts zu tun.

$x = u_a = \hat{u}_a \sin \omega t$ Aussteuerung der Diode im Arbeitspunkt

Damit erhält man

$$i_a = I_{a0} + S\,\hat{u}_a \sin\omega t + \frac{T}{2}\,\hat{u}_a^2 \sin^2\omega t + \cdots .$$

Mit

$$\sin^2\omega t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos 2\omega t$$

ergibt sich:

$$i_a = I_{a0} + S\,\hat{u}_a \sin\omega t + \frac{T}{2}\,\hat{u}_a^2\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos 2\omega t\right) + \cdots\cdots$$

$$i_a = I_{a0} + S\,\hat{u}_a \sin\omega t + \frac{T}{4}\,\hat{u}_a^2 - \frac{T}{4}\,\hat{u}_a^2 \cos 2\omega t + \cdots\cdots$$

Neben dem Anodenruhestrom I_{a0} ist noch ein Gleichstromanteil $\frac{T}{4}\,u_a^2$ vorhanden. Dieser wird als Richtstrom

$$\Delta I = \frac{T}{4}\,\hat{u}_a^2 \qquad (9)$$

bezeichnet. Er ist dem Quadrat der Amplitude der angelegten Wechselspannung und der Krümmung T proportional. Eine wichtige Anwendung des Richtstromes ist durch das Audion gegeben.

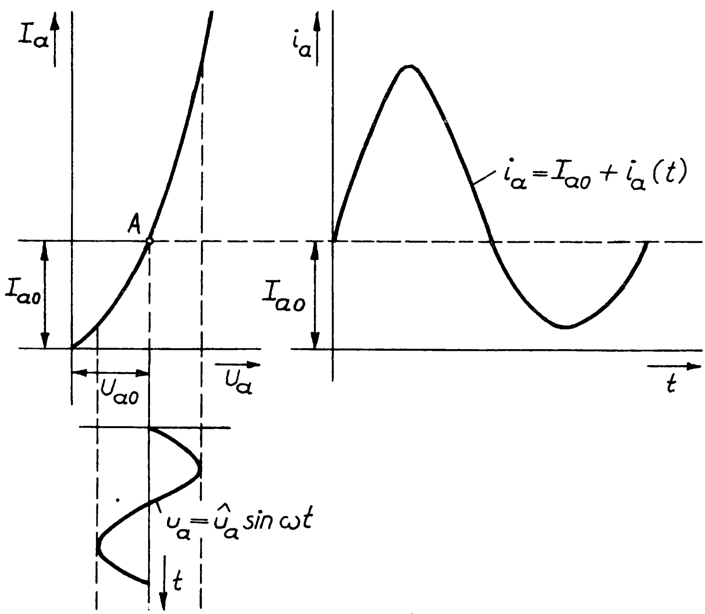


Bild 1.8

2.6. Zusammenfassung

Die Diode ist ein nichtlinearer Widerstand. Ihre Kennlinie folgt der Funktion $I_a = f(U_a)$, deren Verlauf durch drei Gesetze gegeben ist. Demzufolge unterscheidet man das Anlaufstromgebiet (Anlaufstromgesetz - eine Exponentialfunktion), das Raumladestromgebiet (Raumladestromgesetz - $I_a = k\,U_a^{\frac{3}{2}}$) und das Sättigungsstromgebiet (Sättigungsstromgesetz I_a ist praktisch konstant). Wird an eine Diode eine Gleichspannung angelegt, dann fließt ein durch die Kennlinie festgelegter Gleichstrom. Durch die Gleichspannung und den Gleichstrom wird ein Punkt, der Arbeitspunkt, auf der Kennlinie fixiert. Überlagert man der Gleichspannung eine Wechselspannung, dann spricht man von der Aussteuerung der Röhre. Die Amplitude der Wechselspannung bestimmt den Aussteuerbereich auf der Kennlinie. Für diesen interessiert die Stromänderung in Abhängigkeit von der Spannungsänderung. Diese Abhängigkeit wird durch die Steigung der Kennlinie, die man als Steilheit bezeichnet, bestimmt. Für diese gilt die Definition

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \quad .$$

Der reziproke Wert der Steilheit ist der Wechselstrominnenwiderstand der Diode

$$R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \quad .$$

Aus der Reziprozität beider Größen folgt für die Diode die Gleichung

$$S \cdot R_i = 1 \quad .$$

Die Diode kann nicht zur Verstärkung verwendet werden. Ihre Anwendung aber ist, von dieser Einschränkung abgesehen, vielfältig. Sie wird vor allem als Gleichrichter verwendet, indem einmal ihre Wirkung als Ventil, zum anderen ihre Richtwirkung genutzt wird.

Bei der Ventilwirkung wird nur eine Wechselspannung an die Röhre angelegt. Der Arbeitspunkt befindet sich im Koordinatenursprung. Die Röhre wird nur durch die positive Halbwelle der Wechselspannung ausgesteuert. Es fließt ein Strom in

gleicher Richtung. Ein Rückstrom ist nicht vorhanden.
Die Richtwirkung bedeutet die Aussteuerung der Diode in einem Bereich ihrer Kennlinie, wobei dieser durch die Lage des Arbeitspunktes und durch die Amplitude der Wechselspannung gegeben ist. Durch die Krümmung der Kennlinie im Aussteuerbereich ergibt sich ein Gleichstromanteil

$$\Delta I = \frac{T}{4} \hat{U}_a^2 ,$$

der Richtstrom. Neben diesem sind Wechselströme gleicher und vielfacher Frequenz der angelegten Wechselspannung vorhanden. Daraus ergeben sich weitere Anwendungen der Diode.

3. Die Triode

3.1. Die Steuerwirkung einer Triode

Wie schon der Name "Triode" zum Ausdruck bringt, haben wir es nun mit einer Röhre zu tun, die neben Anode und Katode eine weitere Elektrode, das Gitter, besitzt. Damit weist die Triode nicht mehr allein die Eigenschaften des nichtlinearen Widerstandes "Diode" auf, sondern sie besitzt noch eine besondere Wirkung, nämlich die der Steuerwirkung. Diese wird, wie wir später noch sehen werden, definiert als das Verhältnis der Ausgangsgröße zur Eingangsgröße, wobei beide Größen die gleiche Dimension haben. D.h., das Verhältnis beider Größen (die Verstärkung) ist dimensionslos.
Das Gitter befindet sich zwischen Katode und Anode (Bild 1.9a und Bild 1.9b). Es ist als Wendel um die Katode gebildet und wird durch Streben in einem bestimmten Abstand von der Katode gehalten.
Allgemein bezeichnet man die Elektroden Gitter-Katode als den Eingang und die Elektroden Anode-Katode als den Ausgang der Röhre. Das bedeutet, daß sämtliche Potentiale der Röhre auf die Katode bezogen werden. Andere Beziehungen sind selbstverständlich möglich, sollen aber hier nicht erörtert werden.
Die Ausgangsgröße ist z.B. die Spannung zwischen Anode und Katode, und die Eingangsgröße ist die Spannung zwischen Gitter und Katode. Bei der Triode ist nun die Ausgangsgröße in ihrem

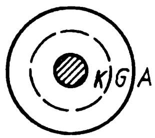


Bild 1.9a

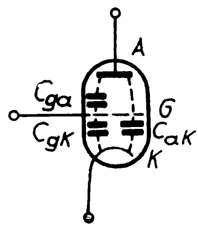


Bild 1.9b

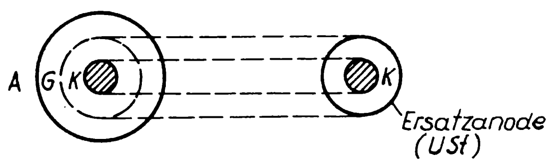


Bild 1.9c

zeitlichen Verlauf und in der Amplitude von der Eingangsgröße abhängig. Man kann die Gitterspannung demzufolge als die steuernde Größe, den Anodenstrom als die gesteuerte Größe bezeichnen. Faßt man die Anordnung Anode-Katode als Kondensator auf, so ergibt sich die Steuerung der Anodenspannung daraus, daß der Potentialverlauf zwischen Anode und Katode nicht kontinuierlich verläuft, sondern durch das Gitter mit seinem Potential "gestört" wird. Diese Verhältnisse werden deutlich, wenn man Gesetzmäßigkeiten des elektrischen Feldes auf die Triode, deren Anordnung die Bilder 1.9a und 1.9b zeigen, bezieht.

Das Gitter stellt eine Sonde im elektrischen Feld dar, durch welche die Teilkapazitäten C_{ga} und C_{gk} gegeben sind. Sie charakterisieren einmal die Wirkung der Anode auf das Gitter, das andere Mal die Wirkung des Gitters auf die Katode. Die Wirkung der Anode auf die Katode wird durch die Kapazität C_{ak} dargestellt. Sie bedeutet, daß das Gitter die Katode nicht

restlos gegen die Anode "abschirmt". D.h., der durch die Röhre fließende Strom ist von der am Gitter liegenden Spannung und ebenfalls von der Anodenspannung abhängig. Letztere Abhängigkeit bezeichnet man auch als Rückwirkung des Ausgangs auf den Eingang. Damit besitzt also die gesteuerte Größe (Ausgangsgröße) einen Einfluß auf die "zu steuernde Größe", nämlich auf den Strom. Das bedeutet, der Steuervorgang, der nur durch das Gitter bewirkt werden soll, ist nicht mehr eindeutig.
Im folgenden wird dieser Sachverhalt nochmals dargestellt.
Für die Katode kann man unter Vernachlässigung der Raumladung die auf ihr influenzierte Ladung angeben:

$$Q_k = C_{gk} \cdot U_g + C_{ak} \cdot U_a \; . \qquad (10)$$

Ist eine Raumladung vorhanden, dann gilt sinngemäß:

$$Q_K = Q_R = C_{gk} \cdot U_g + C_{ak} \cdot U_a \; . \qquad (10a)$$

Das heißt, an die Stelle der Katodenladung tritt die Raumladung, was für die Kapazitäten bedeutet, daß ihre Elektrodenabstände um den Abstand Katode-Raumladung verringert worden sind. Die Ladung der Katode ist dann praktisch gleich Null, damit aber auch das Potential der Katode.
Daher rührt es, daß sämtliche Potentiale der Elektroden einer Röhre auf die Katode bezogen angegeben werden müssen. Die Raumladung liegt vor der Katode. Zwischen Katode und Raumladung ergibt sich ein Potentialgefälle.
Man kann nun für die Raumladungsgleichung (10a) auch schreiben:

$$Q_R = C_{gk}\left(U_g + \frac{C_{ak}}{C_{gk}} \cdot U_a\right) . \qquad (11)$$

Diese Gleichung besagt, daß die Raumladung der Gitter- und der Anodenspannung proportional ist. Das Kapazitätsverhältnis $\frac{C_{ak}}{C_{gk}} < 1$ gibt hierbei die Größe der Anodenspannung an, die durch das abschirmende Gitter auf die Raumladung wirksam ist.

Man definiert daher auch das Verhältnis der beiden Kapazitäten als Durchgriff:

$$D = \frac{C_{ak}}{C_{gk}} \quad . \tag{12}$$

Dieser statische Durchgriff D ist eine Röhrenkonstante. Sie hat hier mehr die Bedeutung einer Konstruktionskonstante. Die auf die Raumladung nunmehr wirksame bzw. der Raumladung proportionale Spannung wird als Steuerspannung der Röhre bezeichnet:

$$U_{st} = U_g + DU_a \quad . \tag{13}$$

Die Einführung dieser Steuerspannung bedeutet nichts anderes, als daß bei einer Triode eine resultierende Spannung anstelle der Gitter- und der Anodenspannung gesetzt wird. Damit kann aber die Triode durch eine Diode ersetzt werden. Die Anodenspannung dieser Diode ist die Steuerspannung U_{st} ; die Anode ist an der Stelle des Gitters der Triode zu denken. Für eine Triode wird also eine "Ersatzdiode" angegeben, wie es Bild 1.9c zeigt.

3.2. Das Raumladestromgesetz einer Triode

Mit dieser Darstellung, d.h. der Rückführung einer Triode auf eine Diode, können die Gesetzmäßigkeiten der Diode auch auf die Triode Anwendung finden. Insbesondere gilt das Raumladegesetz in der Form

$$I_k = k \cdot U_{st}^{\frac{3}{2}} \tag{14}$$

$$I_k = k(U_g + D \cdot U_a)^{\frac{3}{2}} \quad . \tag{14a}$$

Dieser Strom I_k ist nun wegen der konstruktiven Gestaltung des Gitters als Drahtwendel (also nicht als Vollzylinder) kleiner, als er gemäß der Steuerspannung U_{st} sein müßte. Demzufolge müßte die Steuerspannung U_{st} korrigiert werden. Diese Korrektur nimmt man jedoch nicht an U_{st} , sondern an der Raumladekonstante k vor.

$$I_k = k^* U_{st}^{\frac{3}{2}} \qquad (14b)$$

wobei $k^* < k$.

3.3. Kennlinienfelder der Triode

Da für die Triode die gleichen Gesetzmäßigkeiten gelten wie für die Diode, ergibt die Funktion

$$I_a = f(U_a)$$

den gleichen Verlauf, wie er für die Diode gegeben war. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß I_a nicht allein von der Anodenspannung abhängig ist, sondern auch von der Gitterspannung. Soll also I_a als Funktion von U_a dargestellt werden, dann muß U_g konstant gehalten werden. U_g ist also Parameter:

$$I_a = f(U_a)_{U_g = konst.}$$

Dabei wird vorausgesetzt, daß $U_g < 0\ V$ ist, so daß kein Gitterstrom fließt.
Soll nun für verschiedene Werte von U_g ein gleich großer Anodenstrom fließen, dann ist dies möglich, wenn der Änderung der Gitterspannung die Änderung der Anodenspannung entspricht:

$$\Delta U_g = D \cdot \Delta U_a \quad . \qquad (15)$$

Es ergeben sich für $I_a = f(U_a)$ bei verschiedenen Gitterspannungen Kennlinien, die zueinander parallel werschoben sind. Die Kennlinien werden im Koordinatensystem um so weiter nach rechts verschoben, je kleiner die Gitterspannung wird. Bild 1.10 zeigt die Verhältnisse prinzipiell. Es liegt ein $I_a - U_a$-Kennlinienfeld vor.
Die Kennlinien verlaufen nicht exakt parallel. Die Ursache hierfür ist durch den Aufbau der Röhre und durch gewisse Inhomogenitäten des elektrischen Feldes in der Röhre gegeben.

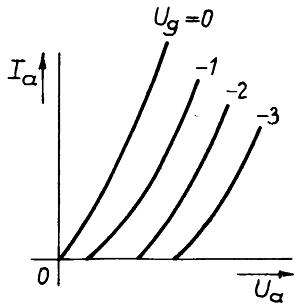


Bild 1.10

In Bild 1.11 sind die beschriebenen Verhältnisse nochmals dargestellt. Vor allem ist dabei darauf Bezug genommen, daß einer verschieden großen Gitterspannung eine verschieden große Anodenspannung entsprechen muß, wenn der Anodenstrom konstant sein soll (Siehe die zur Abszisse waagerecht verlaufende Gerade!).

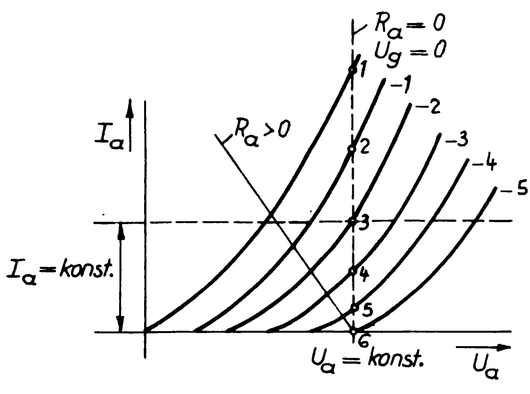


Bild 1.11

3.3.1. Widerstandsgerade

Die über U_a = konstant eingezeichnete Senkrechte im Bild 1.11 hat eine besondere Bedeutung. Wir wollen dazu eine kleine Überlegung anstellen. Bild 1.12 zeigt die Reihenschaltung der Röhre, eines Widerstandes R_a (eines Anodenwiderstandes, besser gesagt, eines im Anodenkreis liegenden Widerstandes) und

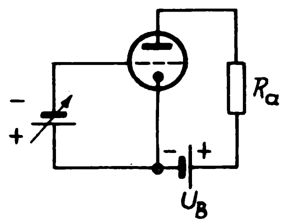


Bild 1.12

der Batterie mit der Spannung U_B . Wird nun der Widerstand der Batterie mit Null angenommen (das kann in der Praxis ohne weiteres geschehen), dann sind die mit 1, 2, 3, 4 usf. bezeichneten Ströme diejenigen, die im Stromkreis Röhre - Batterie bei $R_a = 0$ und der jeweils gegebenen Gitterspannung fließen. Man nennt diesen Fall den Kurzschlußfall, obwohl er mit Kurzschluß im eigentlichen Sinne nichts zu tun hat; denn der Strom ist eindeutig durch die Gitterspannung fixiert. Ist $R_a = 0$, so ist die an der Röhre anliegende Spannung U_a gleich der Speisespannung U_B . D.h., die Senkrechte über U_a = konstant hat die Bedeutung $R_a = 0$. Ist nun $R_a > 0$, dann ist der Gesamtwiderstand im Stromkreis um den Wert von R_a größer geworden, und es fließt für U_a = konstant ein entsprechend kleinerer Strom. Dieser ergibt sich zu:

$$I_a = \left(\frac{U_B}{R_i + R_a} \right)_{U_g = konst.} \quad (16)$$

Daraus folgt zweierlei:

1. Wenn $R_a > 0$, so ist $U_a < U_B$, da an R_a ein Spannungsabfall $I_a \cdot R_a$ gegeben ist. Dieser wird häufig ebenfalls mit U_a bezeichnet, woraus Ungenauigkeiten in der Darstellung resultieren. Daher bezeichnet man den Gleichspannungsabfall an der Röhre mit U_{a0}.
2. Ist $R_a > 0$, so ergeben sich für U_a = konstant und verschiedene Werte von U_g jeweils kleinere Ströme. D.h., die Punkte 1, 2, 3 usf. in Bild 1.11 verschieben sich auf der jeweiligen Kennlinie nach unten. Für einen konstanten Wert von $R_a > 0$ ergibt sich eine Gerade mit dem Fußpunkt U_B und einer Neigung nach links im Koordinatensystem. Die für $R_a = 0$ und $R_a > 0$ angegebene Gerade ist die <u>Widerstandsgerade.</u> Sie ist für alle weiteren Betrachtungen einer belasteten Röhre von großer Bedeutung.

Wir wollen festhalten, daß für $R_a = 0, U_{a0} = U_B$ und die Widerstandsgerade die Senkrechte über U_B ist; für $R_a > 0$ neigt sich die Widerstandsgerade nach links, und für $R_a = \infty$ fällt die Widerstandsgerade mit der Abszisse zusammen. $R_a = 0$ und $R_a = \infty$ sind Grenzfälle, nämlich die des Kurzschlusses bzw. des Leerlaufs.

3.3.2. Das $I_a - U_g$-Kennlinienfeld

Ebenso wie man $I_a = f(U_a)_{U_g = konst.}$ darstellen kann, ist dies für $I_a = f(U_g)_{U_a = konst.}$ möglich. Dabei setzt man den für die Praxis wichtigen Fall voraus, daß $U_g < 0$ sein soll, daß also kein Gitterstrom fließt. Ferner wird wieder davon ausgegangen, daß $R_a = 0$ ist. Der physikalische Sachverhalt bedarf keiner Erläuterung, da er der gleiche wie für $I_a = f(U_a)_{U_g = konst.}$ ist. Da $I_a = f(U_g, U_a)$ (Siehe Gleichung 14a), besteht natürlich zwischen $I_a = f(U_g)_{U_a = konst.}$ und $I_a = f(U_a)_{U_g = konst.}$ eine Abhängigkeit, die eindeutig anhand der Kennlinienfelder übersehen werden kann. Daher ist in Bild 1.13 die Kennlinie $I_a = f(U_g)_{U_a = konst.}$ aus dem Kennlinienfeld $I_a = f(U_a)$ konstruiert worden, und zwar für verschiedene Parameter U_a und U_a'. Wird die Anodenspannung U_a auf U_a' erhöht,

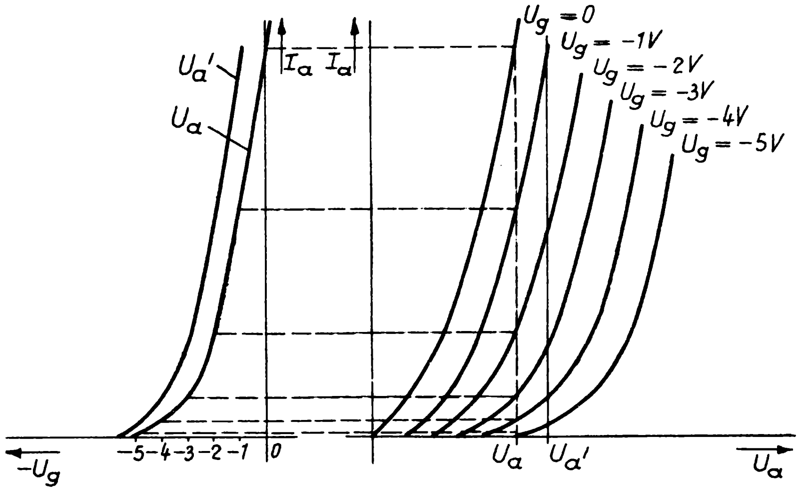


Bild 1.13

dann ergibt sich eine Parallelverschiebung der Kennlinie $I_a = f(U_g)$ nach links im Koordinatensystem. Nach Gleichung (15) ist für die Verschiebung die Größe $D \cdot U_a$ maßgebend, weshalb diese Größe als Verschiebespannung bezeichnet wird. $D \cdot U_a$ bestimmt also die Lage der $I_a - U_g$-Kennlinie im Koordinatensystem. Ist U_a, damit $D \cdot U_a$ klein, dann liegt die Kennlinie weit nach rechts verschoben, und ist U_a groß, also auch $D \cdot U_a$, dann liegt die Kennlinie weit nach links verschoben im Koordinatensystem. Je weiter nun eine Kennlinie nach links verschoben im Kennlinienfeld liegt, um so größer kann der Aussteuerbereich auf der Kennlinie gewählt werden, ohne daß eine Übersteuerung der Röhre erfolgt. Man versteht unter Übersteuerung, daß die Röhre bis in das Gebiet positiver Gitterspannungen ausgesteuert wird, so daß ein Gitterstrom fließt.

3.4. Zusammenfassung

Prinzipiell sei festgehalten, daß man bei einer Triode den Anodenstrom einmal in Abhängigkeit von der Anodenspannung, bei konstant zu haltender Gitterspannung, und ein anderes Mal in Abhängigkeit von der Gitterspannung, wobei die Anodenspannung konstant gehalten werden muß, darstellen kann. Die jeweils konstant zu haltende Spannung ist Parameter der Funktion für I_a. Man erhält die Kennlinien $I_a = f(U_a)_{U_g = konst.}$ und $I_a = f(U_g)_{U_a = konst.}$. Beide Kennlinien sind entsprechend der Beziehung $I_a = k(U_g + D U_a)^{\frac{3}{2}}$ voneinander abhängig. Wird der Parameter(die konstante Spannung) geändert, so verschiebt sich die Kennlinie im Koordinatensystem. Die Darstellung von Kennlinien für verschiedene konstante Hilfsgrössen U_g bzw. U_a ergibt die Kennlinienfelder der Triode.

3.5. Kennwerte der Triode und Barkhausensche Röhrengleichung

Ebenso wie für die Diode die Kennlinie charakteristisch für ihr Verhalten ist, gilt dies auch für die Triode. Demzufolge leitet man wieder Kenngrößen ab, und zwar anhand beider Kennlinien.

Die Steilheit der I_a-U_a-Kennlinie (Bild 1.14) ergibt sich zu:

$$S_A = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}\right)_{U_g = konst.} , \qquad (17)$$

wobei aus Bild 1.14 zu erkennen ist, daß die Nichtlinearität der Kennlinie sich bei der gewählten großen Aussteuerung bemerkbar macht.

Daher gilt auch hier wieder:

$$S_A = \frac{\partial I_a}{\partial U_a} . \qquad (18)$$

Der Index A für die Steilheit der I_a-U_a-Kennlinie ist hier nur zur Unterscheidung eingeführt worden.

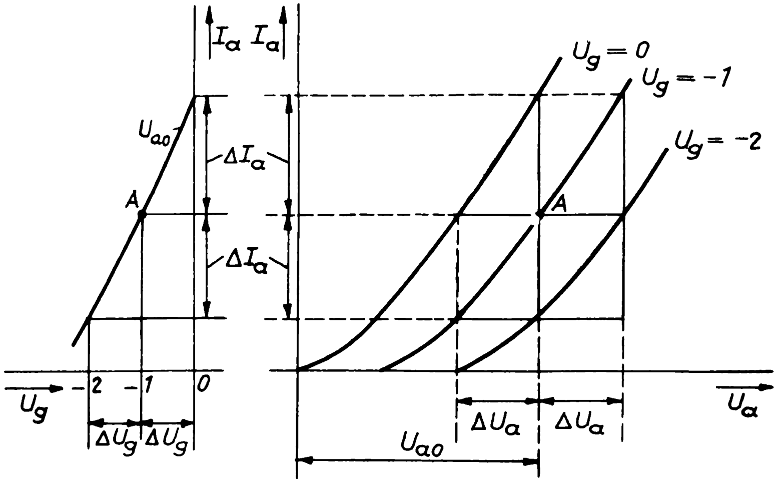


Bild 1.14

Der reziproke Wert der Anodensteilheit

$$\frac{1}{S_A} = R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \tag{19}$$

ist der Wechselstrominnenwiderstand der Triode.
Nach Bild 1.15 kann man die Triode als einen Vierpol auffassen, dessen Eingang durch die Anschlüsse Gitter-Katode und

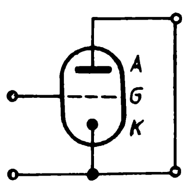


Bild 1.15

dessen Ausgang durch die Anschlüsse Anode-Katode gebildet wird. Ohne damit die Triode als Vierpol betrachten zu wollen, wie es später in einem anderen Zusammenhang geschehen wird, ergibt sich daraus nicht das Problem, wie groß der im Ausgang fliessende Strom in Abhängigkeit von der im Ausgang vorhandenen Spannung ist; vielmehr interessiert die Frage, wie groß der Ausgangsstrom in Abhängigkeit von der im Eingang vorhandenen Spannung ist. Anders ausgedrückt: es ist sinnvoll, nach der Größe des Anodenstromes in Abhängigkeit von der Gitterspannung zu fragen. D.h., es interessiert der Anstieg der I_a-U_g-Kennlinie bzw. deren Steilheit. Nach Bild 1.14 ergibt sich sinngemäß:

$$S_G = \frac{2\,\Delta I_a}{2\,\Delta U_g} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \qquad (20)$$

für $U_a = U_{a0}$ = konstant.

Entsprechend der allgemeinen Definition für die Steilheit gilt auch hier:

$$S_G = S = \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \qquad (21)$$

Die Steilheit $S_G = S$ (Der Index G wurde wieder nur zur Unterscheidung beider Steilheiten benutzt) wird als die Steilheit der Triode angegeben, was bezüglich der Darlegung über die Ausgangs- und Eingangsgröße einer Triode, also der Auffassung der Triode als Vierpol auch sinnvoll ist. Kenngrößen der Triode sind somit zunächst der Innenwiderstand R_i und die Steilheit S . Damit soll aber keineswegs die Bedeutung der Anodenstromsteilheit S_A geschmälert sein. Als reziproker Wert von R_i ist sie durch R_i stets mitgegeben.

Da nunmehr die Abhängigkeit des Ausgangsstromes I_a von der Eingangsspannung dargestellt wurde, ist es wiederum sinnvoll, auch die Frage nach dem Verhältnis der Ausgangsspannung zur Eingangsspannung aufzuwerfen. Die weitere Frage der Beziehung zwischen Ausgangsspannung und Eingangsstrom erübrigt sich, da die Gitterspannung so stark negativ gewählt wird, so daß kein Gitterstrom fließt; andererseits ergibt dieses Verhältnis in dieser Betrachtungsweise physikalisch keinen Sinn.

Setzt man die Steilheit $S_G = S$ ins Verhältnis zur Steilheit S_A, so ergibt sich:

$$\frac{S_G}{S_A} = \frac{S}{S_A} = \frac{\frac{\partial I_a}{\partial U_g}}{\frac{\partial I_a}{\partial U_a}} = - \frac{\partial U_a}{\partial U_g} = \mu ; \quad (22)$$

d.h., es ist damit das Verhältnis der Ausgangsspannung zur Eingangsspannung gegeben. Man bezeichnet dieses Verhältnis und damit μ als den Verstärkungsfaktor der Triode. Verallgemeinert man diese Definition, so ergibt sich der Begriff der Verstärkung:

Die Verstärkung ist definiert als das Verhältnis der Ausgangswechselgröße zur Eingangswechselgröße eines als Vierpol aufzufassenden Übertragungssystems.

Der reziproke Wert des Verstärkungsfaktors μ ist der Durchgriff D:

$$D = \frac{1}{\mu} = \frac{\partial U_g}{\partial U_a} . \quad (23)$$

Dieser aus den Kennlinien hergeleitete Durchgriff wird als technischer Durchgriff bezeichnet und zur Unterscheidung vom statischen Durchgriff (Gleichung (12)), der durch das Verhältnis der Ausgangskapazität zur Eingangskapazität gegeben ist, mit D^* bezeichnet. Da im normalen Arbeitsbereich (Aussteuerungsbereich) der Triode D^* konstant ist und auch mit guter Näherung $D^* \approx D$ gilt, ist in Gleichung (23) der unterscheidende Stern weggelassen worden. Deshalb wird auch im folgenden (wie auch in der Literatur) unter D der technische Durchgriff verstanden.

Der statische Durchgriff als Verhältnis der Kapazitäten ist eine auf die konstruktive Gestaltung der Röhre bezogene Konstante und von den Betriebsbedingungen unabhängig. Der technische Durchgriff gibt das durch die Betriebsbedingungen gegebene Verhältnis der Änderung der Eingangsspannung zur Änderung der Ausgangsspannung wieder. Er ist für die erzielbare Verstärkung der Röhre entscheidend, was besonders bei Mehrgitterröhren deutlich wird.

Die für die Triode wichtigen Kennwerte sind also die Steilheit S, der Wechselstrominnenwiderstand R_i und der Verstärkungsfaktor μ bzw. dessen reziproker Wert, der Durchgriff D. Es gilt nun:

$$\frac{\partial I_a}{\partial U_g} \cdot \frac{\partial U_g}{\partial U_a} \cdot \frac{\partial U_a}{\partial I_a} = 1 \qquad (24)$$

bzw.

$$S \cdot D \cdot R_i = 1. \qquad (25)$$

Diese Gleichung wurde von Barkhausen aufgestellt, und sie wird daher als "Barkhausensche Röhrengleichung" bezeichnet. Sie gibt die Beziehung der Kennwerte zueinander wieder. Diese Gleichung ist für sämtliche Röhren gültig, also auch für Mehrgitterröhren. Für diese schreibt man die Gleichung aber besser in der Form

$$S \cdot R_i = \frac{1}{D} = \mu, \qquad (26)$$

weil bei Mehrgitterröhren auch andere Spannungsverhältnisse (und auch andere Kapazitätsverhältnisse) als das der Eingangsspannung zur Ausgangsspannung angegeben werden können. Für die Diode ist die Gleichung ebenfalls gültig. Da die Diode kein Gitter hat, ist der Durchgriff gleich 1, und man erhält die Gleichung (8): $S \cdot R_i = 1$.

Bemerkt sei noch, daß der Durchgriff meist in Prozent angegeben wird.

3.6. Zusammenfassung

Bei der Triode unterscheidet man die Kennlinien $I_a = f(U_g)_{U_a = konst.}$ und $I_a = f(U_a)_{U_g = konst.}$. Für beide Kennlinien gibt man die Steilheit an. Da aber die Steilheit $S_A = \frac{\partial I_a}{\partial U_a}$ der reziproke Wert des Wechselstrominnenwiderstandes R_i ist, wird die Steilheit S_A nicht gesondert angegeben. Das Verhältnis beider Steilheiten S und S_A ergibt den Verstärkungsfaktor μ, dessen reziproker Wert den Durchgriff D darstellt. Damit gelten als Kennwerte:

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_g} ,$$

$$R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a}$$

und

$$\mu = \frac{1}{D} = \frac{\partial U_a}{\partial U_g} .$$

Die Kennwerte sind durch die Barkhausensche Röhrengleichung miteinander verknüpft:

$$S \cdot R_i \cdot D = 1$$

bzw.

$$S \cdot R_i = \mu .$$

3.7. Begriff und Bedeutung der Aussteuerung einer Röhre

Die Aussteuerung einer Röhre ist ein an sich logischer Vorgang, aber trotzdem wird er häufig nicht richtig verstanden. Die Verhältnisse sollen daher grundsätzlich betrachtet werden, indem versucht wird, von den bis jetzt dargestellten Zusammenhängen ausgehend, das Problem zu erläutern.
Zunächst muß man sich darüber klar sein, daß bis jetzt nur das Gleichstromverhalten der Röhre betrachtet wurde, auch wenn die Kennwerte der Triode als Quotienten von Spannungs- bzw. Stromänderungen definiert worden sind. Auch die Steuerspannung (Gleichung (13)),

$$U_{st} = U_g + D \cdot U_a ,$$

stellt das Gleichstromverhalten dar, indem die Beziehung darüber Auskunft gibt, welche resultierende Spannung das Fließen eines Gleichstromes durch die Röhre ermöglicht. Die Beziehung wurde zudem insofern in ihrer Allgemeingültigkeit eingeschränkt, als die Gittergleichspannung so stark negativ gemacht werden soll, daß kein Gitterstrom fließt:

$$U_{st} = -U_g + D \cdot U_a .$$

$D \cdot U_a$ muß nun so groß sein, daß U_{st} einen positiven Wert er-

gibt, so daß nicht etwa nur im Anlaufstromgebiet gearbeitet wird bzw. durch die Röhre überhaupt kein Strom fließt.
Wird nun der negativen Gittergleichspannung, der Vorspannung des Gitters, eine Wechselspannung so überlagert, daß auch während der ganzen Periode der Wechselspannung das Gitter so stark negativ bleibt, so daß kein Gitterstrom fließt, dann bedeutet dies nur eine Potentialänderung des Gitters im Rhythmus der Wechselspannung. Damit wird aber die Stromstärke des durch die Röhre fließenden Stromes zeitlich dem Gitterpotential entsprechend geändert. Barkhausen hat diesen Vorgang als Steuerung bezeichnet. Daher spricht man auch von dem Steuergitter der Röhre und bezeichnet den Vorgang selbst als die Steuerung bzw. die <u>Aussteuerung</u> der Röhre.
Bild 1.16 verdeutlicht die Verhältnisse für den Fall, daß der Widerstand im Anodenkreis gleich Null ist.

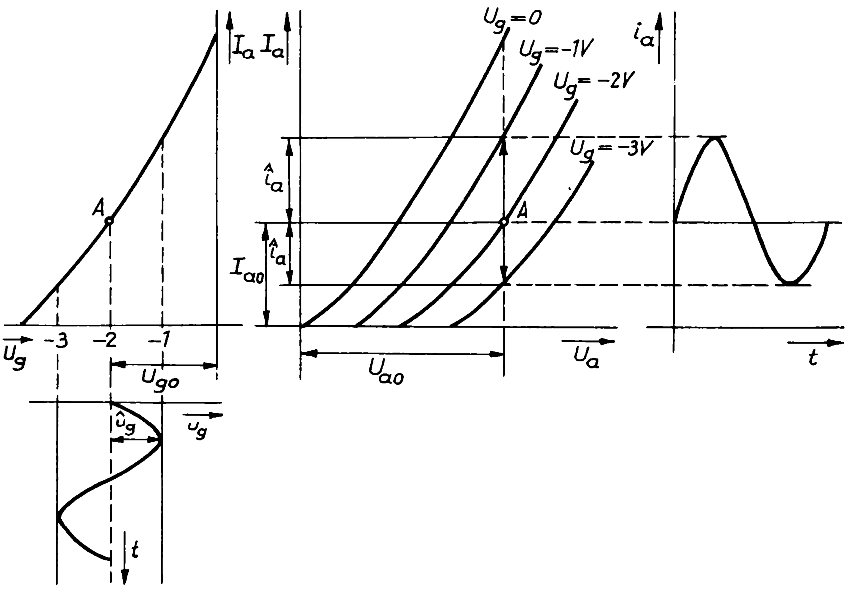


Bild 1.16

Die Gleichspannungsverhältnisse der Röhre sind gegeben durch die Anodengleichspannung U_{ao} (Anodenruhespannung), den Anodengleichstrom (Anodenruhestrom) I_{ao} und durch die Gittergleichspannung U_{go} (Gittervorspannung; in Bild 1.16 sind $-2\,V$ angenommen). Durch U_{ao} und U_{go} ist der Arbeitspunkt A festgelegt und damit natürlich der Anodenruhestrom I_{ao} gegeben. Der Gittervorspannung U_{go} wird eine sinusförmige Wechselspannung überlagert (im Bild beträgt die Amplitude $1V$):

$$u_{ges} = -U_{go} + \hat{u}_g \sin \omega t \, . \qquad (27)$$

Damit ändert sich also das Potential des Gitters zwischen den Extremwerten

$$-U_{go} + \hat{u}_g \quad und \; -U_{go} - \hat{u}_g \, .$$

Durch die Röhre fließt dann ein Strom

$$i_{a\,ges} = I_{ao} + \hat{i}_a \sin \omega t \, , \qquad (28)$$

wie er im Diagramm $i_a = f(t)$ in Bild 1.16 dargestellt ist. Je größer die Aussteuerung auf der Kennlinie ist - diese ist durch die Amplitude der Gitterwechselspannung gegeben - um so weniger entspricht infolge der Krümmung der Kennlinie der zeitliche Verlauf des Wechselstromes der Sinusfunktion.

Wie schon erwähnt, ist der im Anodenkreis liegende Widerstand R_a gleich Null. Der durch die Röhre und damit im Stromkreis fließende Strom wird nur durch die Parameter der Röhre - Gitterspannung und Anodenspannung - bestimmt. In der Praxis ist der Anodenwiderstand $R_a > 0$ (Bild 1.17). Die Speisespannung U_B ist dann nicht gleich dem Spannungsabfall U_{ao} an der Röhre, sondern sie teilt sich auf in die Spannungsabfälle U_{ao} und $I_{ao} \cdot R_a$. Der Strom ist dann nicht mehr durch die Röhre allein bestimmt, sondern auch durch den Widerstand R_a.

Soll nun der durch U_{ao} und I_{ao} gegebene Arbeitspunkt beibehalten werden, so neigt sich die Widerstandsgerade nach links. Widerstandsgerade und Abszisse schneiden sich im Scheitelpunkt des Winkels β, der den Neigungswinkel der Wider-

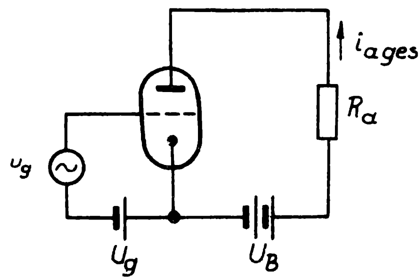


Bild 1.17

standsgeraden gegen die Abszisse darstellt. Die Strecke Koordinatenursprung-Scheitelpunkt des Neigungswinkels β stellt die Spannung

$$U_B = U_{ao} + I_{ao} \cdot R_a \tag{29}$$

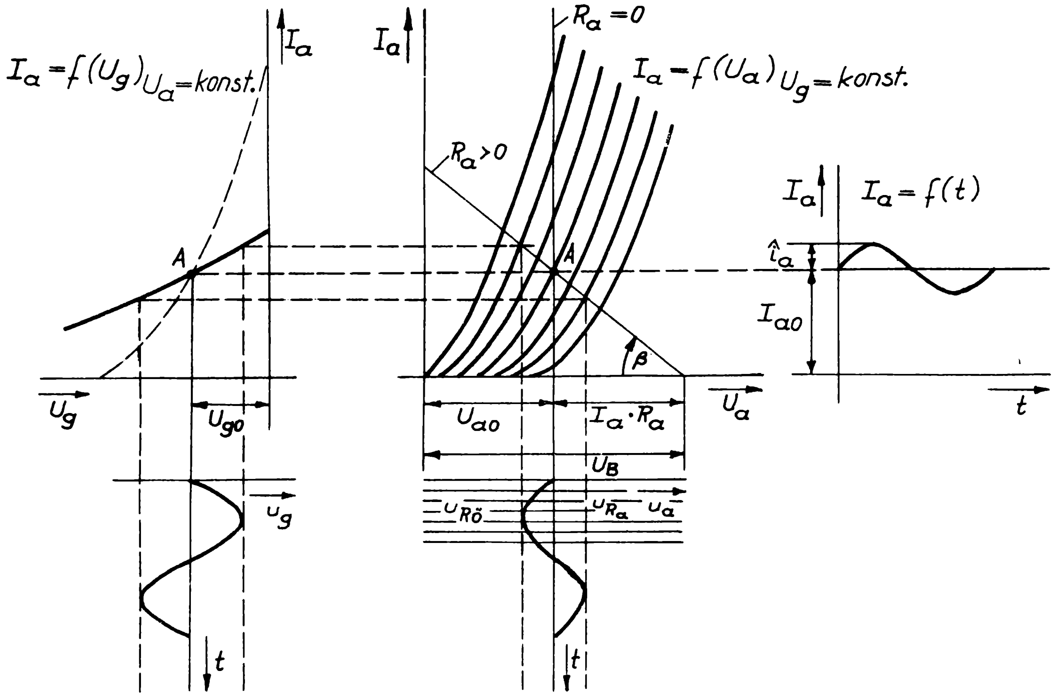
dar (Bild 1.18).
Für den Tangens des Winkels β folgt:

$$\tan\beta = \frac{I_{ao}}{U_B - U_{ao}} = \frac{I_{ao}}{I_{ao} \cdot R_a} = \frac{1}{R_a} \tag{30}$$

bzw.

$$\frac{1}{\tan\beta} = R_a \ . \tag{31}$$

Damit läßt sich, dieser Überlegung entsprechend, die Widerstandsgerade leicht einzeichnen: In einem beliebigen Punkt der Abszisse wird der Winkel β angetragen. Der freie Schenkel des Winkels wird dann so parallel verschoben, daß er durch den festgelegten Arbeitspunkt geht. Für $R_a = 0$ ist $\beta = 90°$, und für $R_a = \infty$ ist $\beta = 0°$.
Man muß sich nun noch eine bemerkenswerte Tatsache klarmachen. Mit größer werdender Gitterspannung fließt durch die Röhre, und da Röhre und Außenwiderstand R_a in Reihe geschaltet sind,



$I_a = f(U_g)_{U_a = konst.}$
I_a
$I_a = f(U_a)_{U_g = konst.}$
$R_a = 0$
$R_a > 0$
A
A
β
U_g
U_{g0}
u_g
t
U_{a0}
$I_a \cdot R_a$
U_a
U_B
$u_{Rö}$
u_{R_a}
u_a
t
$I_a = f(t)$
$\hat{i}_a$
I_{a0}
t

Bild 1.18

im Stromkreis ein größerer Strom. Gitterwechselspannung und Anodenwechselstrom sind miteinander in Phase. Mit größerem Anodenwechselstrom wird der Spannungsabfall am Widerstand R_a größer; damit aber wird der Spannungsabfall an der Röhre kleiner. Somit ergeben sich die folgenden Phasenverhältnisse zwischen Gitterwechselspannung, Anodenwechselstrom und Anodenwechselspannung:

Gitterwechselspannung, Anodenwechselstrom und Wechselspannungsabfall an R_a sind sämtlich miteinander in Phase; die Anodenwechselspannung ist gegenüber der Gitterwechselspannung, dem Anodenwechselstrom und dem Spannungsabfall an R_a um 180° in der Phase verschoben.

Diesen Sachverhalt muß man sich sehr genau einprägen. Sehr häufig wird der Spannungsabfall an R_a mit dem an der Röhre identifiziert. Das ist falsch! Für den ohmschen Widerstand R_a gilt natürlich das Ohmsche Gesetz, also Strom und Spannung sind in Phase.

Bei der Röhre ist dies nicht der Fall, sondern, dies sei nochmals betont, die Anodenwechselspannung ist gegenüber dem Anodenwechselstrom um 180° phasenverschoben. Die Verhältnisse sind in Bild 1.18 dargestellt, und zwar ist vom I_a–U_a-Kennlinienfeld ausgegangen worden. In diesem ist die Widerstandsgerade für $R_a = 0$ und eine Widerstandsgerade für $R_a > 0$ eingezeichnet. Für $R_a = 0$ wurde die I_a–U_g-Kennlinie (gestrichelt gezeichnet) konstruiert. Desgleichen wurde für $R_a > 0$ die I_a–U_g-Kennlinie entwickelt (im Diagramm ausgezogen). Diese hat eine geringere Steilheit als die für $R_a = 0$. Diese geringere Steilheit wird als Arbeitssteilheit der Röhre bezeichnet und die Kennlinie als die Arbeitskennlinie. An der Arbeitssteilheit und der Arbeitskennlinie wird deutlich, daß der Strom durch die Röhre auch von dem belastenden Widerstand R_a abhängig ist. Den Begriff der Arbeitssteilheit werden wir noch erörtern müssen.

Auf der Arbeitskennlinie ist der Arbeitspunkt A durch die Gittervorspannung U_{go} festgelegt. Die Röhre wird durch eine sinusförmige Spannung ausgesteuert. Diese Gitterwechselspannung ist mit dem Anodenwechselstrom in Phase. Mit größer werdendem Anodenwechselstrom wird auch der Spannungsabfall an R_a größer und entsprechend der an der Röhre kleiner. Dies ist durch Schraffur für $u_{Rö}$ und u_{R_a} angedeutet.

3.8. Zusammenfassung

Bei einer Röhre muß man das Gleichstrom- und das Wechselstromverhalten unterscheiden. Die Gitterwechselspannung wird einer so stark negativen Gittergleichspannung überlagert, daß kein Gitterstrom fließt. Es ändert sich also nur das Gitterpotential im Rhythmus der angelegten Wechselspannung. Damit ergibt sich ein Anodenwechselstrom, der den gleichen zeitlichen Verlauf wie die Gitterwechselspannung aufweist. D.h., diese und der Anodenwechselstrom sind in Phase. Ein größer werdender Anodenwechselstrom hat einen größeren Spannungsabfall an R_a zur Folge. Das bedeutet, daß auch dieser Spannungsabfall mit der Gitterwechselspannung und auch mit dem Anodenwechselstrom in Phase ist. Der größere Spannungsabfall an R_a aber bewirkt, daß an der Röhre die Spannung entsprechend kleiner wird. Es ist also die Anodenwechselspannung gegenüber der Gitterwechselspannung, dem Anodenwechselstrom und gegenüber dem Spannungsabfall an R_a um 180° in der Phase verschoben.

3.9. Ersatzschaltbilder der Triode

Vergegenwärtigt man sich die Verhältnisse, die durch die Aussteuerung einer mit einem Widerstand R_a belasteten Röhre gegeben sind, so kann man die Röhre als einen Generator auffassen, dem eine Gleichstromenergie zugeführt wird und der eine entsprechende Wechselstromenergie abgibt, wobei in der Röhre als Generator eine Gleichstromenergie selbst verbraucht wird. Sie wird in Wärme umgesetzt und ergibt damit eine Erwärmung des Anodenbleches. Daher spricht man auch von der Anodenverlustleistung.

3.9.1. Anodenverlustleistung

Die Elektronen werden beim Übergang von der Vakuumstrecke auf

das Anodenblech abgebremst, d.h., die kinetische Energie wird in Wärmeenergie umgesetzt: Die Anode erwärmt sich. Diese Erwärmung der Anode ist ein Kriterium für die Röhre, indem durch zu starke Erwärmung Wärmeenergie von der Anode der Katode zugeführt wird; dadurch wird deren Elektronenemission erhöht, und somit eine stärkere Erwärmung der Anode bewirkt usf.
Man nennt den Vorgang "Rückheizung". Diese kann natürlich zu einer Zerstörung der Röhre führen, und zwar wird die Katode schließlich verdampfen. Ferner leidet durch zu starke Erwärmung auch die mechanische Festigkeit der Elektrodenanordnung.
Die Wärmeenergie muß daher abgeführt werden. Bei Röhren geringerer Leistung (in der Größenordnung von etwa 10 W) erfolgt die Wärmeabfuhr durch Strahlung (strahlungsgekühlte Röhren). Die Anode wird zu diesem Zweck möglichst großflächig ausgeführt und geschwärzt. Bei Röhren sehr hoher Leistung (Senderöhren) verwendet man eine Wasserkühlung.
Die Anodenverlustleistung ist die in Wärmeenergie umgesetzte elektrische Leistung. Sie wird mit P_a oder P_V bezeichnet:

$$P_a = I_{a0} \cdot U_{a0} \quad . \qquad (32)$$

Die für eine Röhrentype zulässige Anodenverlustleistung wird vom Hersteller besonders angegeben. Sie darf im Dauerbetrieb der Röhre nicht überschritten werden. Im Kennlinienfeld stellt die Verlustleistung nach Gleichung (32) eine Hyperbel dar (Bild 1.19). Der Arbeitspunkt ist also stets so zu wählen, daß er unterhalb der Hyperbel, höchstens auf ihr zu liegen kommt.

3.9.2. Die Röhre als Generator (Ersatzschaltbilder)

In der Röhre wird Gleichstromenergie in Wechselstromenergie umgewandelt. Nach dem Überlagerungsprinzip kann man jede einer anderen überlagerten Größe für sich betrachten. Daher sollen die Wechselstromverhältnisse getrennt von den Gleichstromverhältnissen dargestellt werden.
Die Steilheit der Triode ist definiert zu:

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_g} \quad .$$

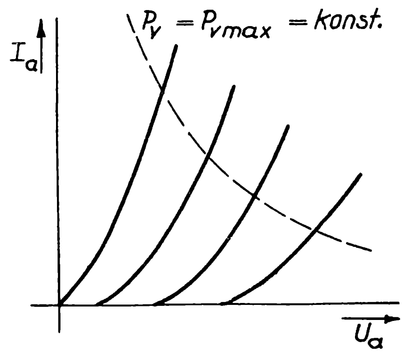


Bild 1.19

Es ist aber bei der mit einem Widerstand R_a belasteten Röhre U_a nicht konstant (Bild 1.18):

$$I_a = f(U_g, U_a) \quad .$$

Das totale Differential ist erklärt zu:

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial z}{\partial y} \cdot dy \; .$$

Bezogen auf die Röhre, ergibt sich sinngemäß:

$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_g} \, dU_g + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \cdot dU_a \; .$$

Setzt man für die partiellen Differentialquotienten die definierten Kenngrößen S und R_i und für die Differentiale die Momentanwerte von Strom und Spannung ein, so erhält man:

$$i_a = S u_g - \frac{1}{R_i} \, u_a \; .$$

Diese Gleichung besagt, daß der Anodenstrom i_a gegeben ist durch einen Strom $S \cdot u_g$ - dieser wird noch als der Kurzschlußstrom der Röhre definiert - und einen Strom $\frac{u_a}{R_i}$. Entsprechend dieser Darstellung und weil die Anodenwechselspannung gegenüber der Gitterwechselspannung um 180° phasenverschoben ist, muß der Strom $\frac{u_a}{R_i}$ in der Gleichung ein negatives Vorzeichen erhalten, so daß nunmehr gilt:

$$i_a = S \cdot u_g - \frac{u_a}{R_i} \; . \tag{33}$$

Daraus folgt:

$$i_a R_i = S \cdot R_i \cdot u_g - u_a$$

$$\frac{u_g}{D} = i_a R_i + u_a \; . \tag{34}$$

Diese Gleichung ist die Generatorgleichung der Röhre. Die Spannung $\frac{u_g}{D}$, die Urspannung oder Leerlaufspannung der Röhre, hat einen Spannungsabfall an der Röhre und am Widerstand R_a zur Folge. Damit gilt auch:

$$\frac{u_g}{D} = i_a (R_i + R_a) \; . \tag{35}$$

Das bedeutet aber eine Spannungsaufteilung; und es ergibt sich folgendes Ersatzschaltbild der Röhre, das als Spannungsquellenersatzschaltbild bezeichnet wird (Bild 1.20).

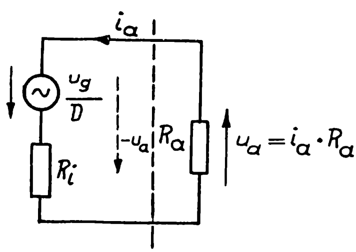


Bild 1.20

Aus Gleichung (35) folgt:

$$i_a = \frac{u_g}{D} \frac{1}{R_i + R_a} \tag{36}$$

$$u_a = i_a R_a = -\frac{u_g}{D} \frac{R_a}{R_i + R_a} \tag{37}$$

$$V = \frac{u_a}{u_g} = -\frac{1}{D} \frac{R_a}{R_i + R_a} \tag{38}$$

$$V = -\mu \frac{R_a}{R_i + R_a} . \tag{38a}$$

In Gleichung (37) ergibt sich das negative Vorzeichen wieder aus der Tatsache, daß die Gitterwechselspannung gegenüber der Anodenwechselspannung um 180° phasenverschoben ist. Damit ist auch die Verstärkung negativ.
Aus Gleichung (33) ergibt sich auch:

$$S \cdot u_g = i_a + \frac{u_a}{R_i} .$$

$S \cdot u_g$ ist der Strom, den die Röhre maximal abgeben kann. Er wurde schon als der <u>Kurzschlußstrom</u> der Röhre bezeichnet. Dieser teilt sich also auf in den Strom i_a und den durch den Widerstand R_i fließenden Strom. Da Stromaufteilung stets identisch mit der Parallelschaltung von Widerständen ist, kann das in Bild 1.21 dargestellte <u>Stromquellenersatzschaltbild</u> der Röhre angegeben werden. Aus diesem folgt:

$$i_a = S u_g \frac{R_i}{R_i + R_a} \tag{39}$$

$$i_a \cdot R_a = u_a = -S u_g \frac{R_i \cdot R_a}{R_i + R_a} \tag{40}$$

$$V = \frac{u_a}{u_g} = -S \frac{R_i \cdot R_a}{R_i + R_a} . \tag{41}$$

Die Gleichungen (39), (40) und (41) entsprechen ganz den Gleichungen (36), (37), (38) und (38a). Beide Ersatzschaltbilder sind also gleichwertig und können jeweils zweckentsprechend verwendet werden.

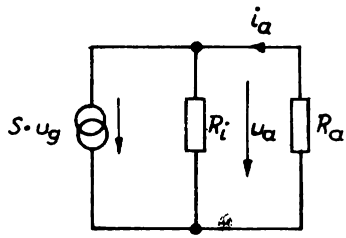


Bild 1.21

3.9.3. Der Anodenwiderstand R_a

Es ist bisher immer vom Belastungswiderstand der Röhre gesprochen worden. Dabei drängt sich die Frage auf, wozu denn ein besonderer Belastungswiderstand für die Röhre erforderlich ist. Man kann doch, da die Röhre als Wechselspannungsgenerator dargestellt wurde, den Verbraucher einfach an die Röhre anschließen. Dies tut man auch; aber gleichzeitig muß der Röhre die in die Wechselspannungsenergie umzuwandelnde Gleich-

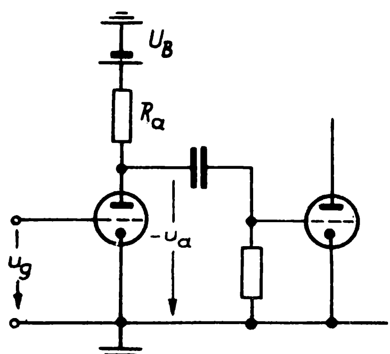


Bild 1.22

spannungsenergie zugeführt werden. Dies geschieht durch den Widerstand R_a , wie es in Bild 1.22 deutlich zu erkennen ist.

Wechselspannungsmäßig sind Gitter-Katode der Eingang und Anode-Katode der Ausgang. Man setzt auch die damit gegebene Ausgangsspannung ins Verhältnis zur Eingangsspannung und erhält damit die Spannungsverstärkung. Wir beziehen uns jetzt aber ausdrücklich auf die Spannung und nicht etwa auch auf die Leistung. D.h., unsere Ersatzschaltbilder sind nicht allgemeingültig. Daher wird die Röhre als Leistungs- und als Stromverstärker noch gesondert betrachtet werden müssen.

Der Anodenwiderstand R_a bestimmt weiterhin die Größe der Anodenwechselspannung $-u_a$. Es ist selbstverständlich, daß der Anodenwiderstand nicht immer ein ohmscher Widerstand sein kann. Ist er ein komplexer Widerstand, dann bestimmt er nicht allein die absolute Größe von $-u_a$, sondern auch die Phasenlage von u_a gegenüber der Gitterwechselspannung u_g bzw. gegenüber dem Anodenwechselstrom i_a, die sich um den Winkel φ ändert. Dieser Winkel ist durch den komplexen Widerstand Z_a gegeben.

$$-u_a = |u_a| e^{j\varphi} = \frac{u_g}{D} \frac{Z_a^{\angle}}{R_i + Z_a^{\angle}} \qquad (42)$$

Bemerkt sei, daß sich bei einem komplexen Widerstand keine Widerstandsgerade ergibt, sondern daß die Gerade zu einer Ellipse entartet.

Die Gleichungen (36) .... (41) behalten durch den komplexen Widerstand ihre Gültigkeit. R_a wird nur durch $Z_a^{\angle}$ ersetzt. Zu beachten ist, daß die Steuerspannung ebenfalls komplex wird:

$$u_{st}^{\angle} = u_g^{\angle} + D \cdot u_a^{\angle} .$$

Das bedeutet, daß der Anodenstrom i_a nicht mehr in Phase mit u_g ist, sondern mit $u_{st}^{\angle}$.

3.9.3.1. Arbeitssteilheit

Im Abschnitt 3.7 "Begriff und Bedeutung der Aussteuerung" wurde erwähnt, daß durch den Anodenwiderstand der Anodenstrom nicht mehr allein durch die Parameter der Röhre bestimmt wird, sondern auch durch den Anodenwiderstand R_a bzw. $Z_a^{\angle}$. Es wurde bereits der Begriff der Arbeitssteilheit genannt. Aus Gleichung (36)

$$\dot{i}_a = \frac{u_g}{D} \; \frac{1}{R_i + R_a}$$

folgt für $R_a = 0$:

$$\dot{i}_a = \dot{i}_k = \frac{u_g}{D \cdot R_i} = S \cdot u_g . \qquad (43)$$

Dies ist, wie in einem anderen Zusammenhang bereits gesagt wurde, der Kurzschlußstrom. Das Verhältnis des Anodenwechselstromes zur Anodenwechselspannung wird mit Kurzschlußsteilheit bezeichnet. Ist $R_a > 0$, dann ist

$$\dot{i}_a = \frac{u_g}{D} \; \frac{1}{R_i + R_a} = u_g \cdot S \; \frac{R_i}{R_i + R_a} .$$

Bei $R_a > 0$ tritt zur Steilheit S ein Faktor < 1, nämlich

$$\frac{R_i}{R_i + R_a} .$$

Die Beziehung

$$S \; \frac{R_i}{R_i + R_a} = S_D \qquad (44)$$

(der Index D bedeutet <u>dynamische Steilheit</u> gleich Arbeitssteilheit) ist stets kleiner als die statische und als die Kurzschlußsteilheit:

$$S_D < S .$$

Ist nun der Anodenwiderstand wieder komplex, dann wird auch die Arbeitssteilheit komplex:

$$S_D^{\angle} = \frac{S \cdot R_i}{R_i + Z_a^{\angle}} = S \; \frac{1}{1 + \frac{Z_a^{\angle}}{R_i}} . \qquad (44a)$$

3.10. Zusammenfassung

3.10.1. Anodenverlustleistung

Durch den Übertritt der Elektronen aus der Vakuumstrecke in den festen Leiter an der Anode werden sie abgebremst und geben ihre kinetische Energie ab. Diese wird in Wärme umgewandelt. Die Wärmeenergie ist der elektrischen Leistung, der Verlustleistung $P_a = I_{a0} \cdot U_{a0}$, proportional. Um eine Schädigung der Röhre durch eine zu starke Erwärmung zu vermeiden, wird eine höchstzulässige Verlustleistung angegeben: P_a = konstant. Diese ergibt, im Kennlinienfeld eingetragen, eine Hyperbel, die Anodenverlusthyperbel. Um eine Überlastung der Röhre zu vermeiden, darf der Arbeitspunkt nicht oberhalb der Verlusthyperbel gewählt werden.

3.10.2. Röhre als Generator (Ersatzschaltbilder)

Da bei der belasteten Röhre U_a nicht konstant ist, ergibt sich $I_a = f(U_g, U_a)$. Unter Verwendung des totalen Differentials erhält man für den Anodenstrom:

$$i_a = S u_g - \frac{u_a}{R_i} \ .$$

Daraus folgt:

$$\frac{u_g}{D} = i_a (R_i + R_a) \ .$$

Das bedeutet, daß eine Spannungsquelle mit der Urspannung $\frac{u_g}{D}$ in Reihe mit den Widerständen R_i und R_a liegt. Die Spannungsaufteilung der Urspannung als Spannungsabfälle an R_i und R_a bedeutet eine Reihenschaltung: das Spannungsquellenersatzschaltbild.

Für $R_a = 0$ folgt:

$$i_a = i_k = \frac{u_g}{D R_i} = S u_g \ .$$

Dies ist der Kurzschlußstrom der Röhre. Da durch einen Außenwiderstand R_a niemals der Kurzschlußstrom fließen kann, ergibt sich bei Vorhandensein eines Außenwiderstandes eine Stromaufteilung über R_i und R_a. Diese liegen also zueinander parallel: Stromquellenersatzschaltbild.

Aus beiden Ersatzschaltbildern ergeben sich die jeweils entsprechenden Gleichungen (36) ....(41).

3.10.3. Anodenwiderstand

Der Anodenwiderstand ist erforderlich, um der Röhre die Gleichspannungsenergie zuführen zu können. Er bestimmt aber auch die Größe der Wechselspannung $-u_a$. R_a kann auch komplex sein. Es ergibt sich dann zwischen Anodenstrom und Anodenwechselspannung nicht eine Phasenverschiebung von 180°, sondern von $180^\circ \pm \varphi$. Mit R_a komplex wird auch die Steuerspannung eine komplexe Größe; ferner ist der Anodenstrom nicht mehr mit $\underline{u_g}$ in Phase, sondern mit $\underline{u_{st}}$.

3.10.3.1. Arbeitssteilheit

Durch den Anodenwiderstand R_a wird der Strom durch die Röhre kleiner, als er für $R_a = 0$ ist. Man gibt daher die Arbeitssteilheit an, die vom Verhältnis $\frac{R_i}{R_a}$ abhängig ist. Je größer R_a, um so kleiner ist die dynamische Steilheit S_D. Diese wird komplex, wenn R_a komplex wird.

3.11. Abhängigkeit der Verstärkung vom Anodenwiderstand R_a

Mit der Röhre soll eine möglichst hohe Verstärkung erzielt werden. Nach Gleichung (38) muß dazu der Durchgriff möglichst klein bzw. der Verstärkungsfaktor möglichst groß sein. Ferner muß aber auch der Anodenwiderstand R_a groß gemacht bzw., genauer ausgedrückt, das Verhältnis R_a / R_i groß gewählt werden. Man stellt nun die Verstärkung als Funktion von R_a / R_i dar, wobei die Verstärkung auf den Verstärkungsfaktor μ bezogen wird:

$$V = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a} = \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_a}}$$

$$\frac{V}{\mu} = \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_a}} \leqq 1 .$$

Man erhält das in Bild 1.23 dargestellte Diagramm. Die relative (das ist die auf μ bezogene) Verstärkung steigt mit wachsendem R_a an und nähert sich asymptotisch dem Wert 1. Bei $\frac{R_a}{R_i} = 5$ ergibt sich: $V = 0{,}83\,\mu$. Das bedeutet, daß es praktisch keinen Sinn hat, über einen Wert von $R_a = 5 \cdot R_i$

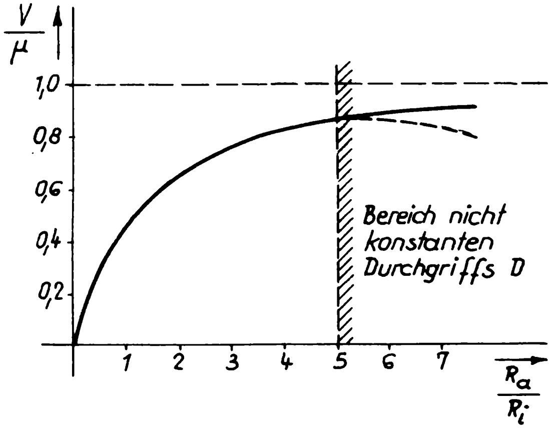


Bild 1.23

hinauszugehen. Dies um so weniger, als das in Bild 1.23 dargestellte Diagramm der Praxis nicht ganz entspricht, da die Kurve für $\frac{V}{\mu}$ ab $V = 0{,}83 \cdot \mu$ bzw. $\frac{R_a}{R_i} = 5$ absinkt, wie es in Bild 1.23 durch die gestrichelte Kurve angedeutet wird. Dieses Absinken rührt daher, daß der Durchgriff bei negativem Gitter nicht mehr konstant ist, sondern größer wird. Dadurch ergeben sich die sogenannten Durchgriffsverzerrungen. Diese könnte man vermeiden, wenn man die Betriebsspannung größer wählte. Das ist aber nur mit einem erheblichen Aufwand im Netzteil (Spannungsquelle) möglich. Daher wählt man zweckmäßig den Anodenwiderstand zu:

$$R_a = (5 \cdots 7)\, R_i \, . \qquad (45)$$

3.12. Zusammenfassung

Bei einer Triode soll der Durchgriff möglichst klein bzw. der Verstärkungsfaktor μ groß sein, damit eine hohe Verstärkung erzielt werden kann. Ferner müßte R_a sehr groß gewählt werden. Praktisch steigt aber die Verstärkung mit wachsendem R_a nur bis etwa $V = 0{,}83\,\mu$ an $(R_a = 5\,R_i)$. Das bedeutet, daß es sinnlos ist, R_a wesentlich größer als $5 R_i$ zu machen. Man soll $R_a = (5 \cdots 7) R_i$ wählen.

3.13. Anmerkung zur Triode

Im vorliegenden Abschnitt 3 des Lehrbriefes wurde die Triode beschrieben. Vor allem haben wir uns über die Erfordernisse und die Eigenschaften der Triode bei Verwendung als Verstärker Gedanken gemacht. Betont wurde allerdings, daß die Aussteuerung klein sein soll, daß also die Triode als Kleinsignalverstärker Verwendung finden soll. Da die Verstärkung als Verhältnis von Ausgangsgröße zu Eingangsgröße definiert wurde, interessiert nicht nur die Spannungsverstärkung, sondern auch die Strom- und Leistungsverstärkung. Die Stromverstärkung entfällt in unserer Betrachtung, da wir stets darauf Bezug nahmen, ohne Gitterstrom zu arbeiten. Praktisch ergeben sich für die Stromverstärkung auch ganz andere Gesichtspunkte, so daß sie einer besonderen Betrachtung bedarf. Entsprechendes gilt auch für die Leistungsverstärkung. Formal läßt sich eine Ausgangsleistung als Produkt der Ausgangswechselspannung und des Ausgangswechselstromes angeben. Eine Eingangsleistung als Produkt der Gitterwechselspannung und des Gitterwechselstromes ist aber nicht vorhanden.

In der Betrachtung der Leistungsverstärkung bezieht man sich auf die der Röhre zuzuführende Gleichstromleistung, d.h., die Fragestellung lautet: Welche Gleichstromleistung muß einer Röhre zugeführt werden, damit sie die gewünschte Wechselleistung abgibt?

Damit ergeben sich auch für die Leistungsverstärkung besondere Gesichtspunkte, die hier nicht zu erörtern sind.

3.14. Darstellung der Röhre als Vierpol

Obwohl die Zweipolbetrachtung der Röhre einfach und zweckmäßig ist, bringt die Vierpolbetrachtung häufig Vorteile. Zum Beispiel werden in der Verstärker- und HF-Technik Rückkopplungen angewendet. Die oft unübersichtlichen Verhältnisse lassen sich sehr einfach begreifen, wenn man zwischen der Röhre als

dem einen Vierpol und der Rückkopplung (diese kann durch einen Widerstand gegeben sein) als dem anderen Vierpol unterschei-det.
Weiterhin ergeben sich Vorteile bei der Berechnung von Eingangsstufen, wenn sie bezüglich der Verstärkung und des Rauschens zu dimensionieren sind. Man kann die durch die Röhrenkapazität gegebenen Rückwirkungen einfach berücksichtigen.
In den Bildern 1.24 und 1.25 ist die Röhre als Vierpol darge-

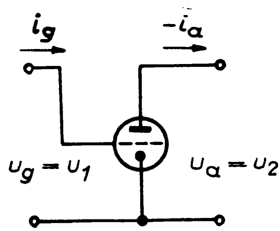


Bild 1.24

stellt. Die Vorzeichen sind im Sinne einer durchgehenden Energieübertragung gewählt worden (Vorzeichenvereinbarung I der Ingenieurschule für Elektrotechnik Mittweida). Vorausgesetzt wird, daß die Potentiale an den Klemmen lineare Funktionen

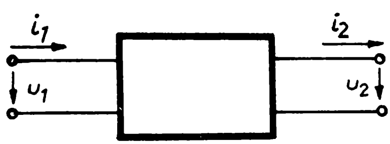


Bild 1.25

der fließenden Ströme sind. Das ist bei Röhren näherungsweise der Fall, wenn die Aussteuerung klein ist und im annähernd linear verlaufenden Teil der Kennlinie erfolgt.
Nach den Bildern 1.24 und 1.25 ergeben sich nun die folgenden

Gleichungen, wobei die Röhrenkapazitäten zunächst vernachlässigt werden. Die Wahl der Leitwertform erfolgt aus Gründen der Zweckmäßigkeit.

$$
\begin{aligned}
i_g &= Y_{11}\, u_g + Y_{12}\, u_a \\
-i_a &= Y_{21}\, u_g + Y_{22}\, u_a
\end{aligned}
$$

Die Matrizengleichung lautet dann:

$$\begin{pmatrix} i_g \\ -i_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_g \\ u_a \end{pmatrix} . \qquad (46)$$

Die Bedeutung der Parameter läßt sich erklären, wenn man die Röhre ausgangs- bzw. eingangsseitig im Kurzschluß betreibt. Es folgt für

$u_a = 0$:

$$Y_{11} = \frac{\partial i_g}{\partial u_g} \qquad (47)$$

$$Y_{21} = \frac{-\partial i_a}{\partial u_g} \longrightarrow - \frac{\partial i_a}{\partial u_g} = -S \, , \qquad (48)$$

$u_g = 0$:

$$Y_{12} = \frac{\partial i_g}{\partial u_a} \qquad (49)$$

$$Y_{22} = - \frac{\partial i_a}{\partial u_a} \longrightarrow - \frac{\partial i_a}{\partial u_a} = - \frac{1}{R_i} \cdot \qquad (50)$$

Da die Röhre in der Regel leistungslos ausgesteuert wird, ist $i_g = 0$. D. h., es sind $Y_{11} = 0$ und $Y_{12} = 0$. Damit lautet die Matrizengleichung:

$$\begin{pmatrix} i_g \\ -i_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -S & -\frac{1}{R_i} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_g \\ u_a \end{pmatrix} . \qquad (51)$$

Die Leitwertmatrix für die Röhre ist damit:

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -S & -\frac{1}{R_i} \end{pmatrix} . \qquad (52)$$

Die Größen S und R_i sind wieder die Kennwerte der Röhre. Im folgenden soll nun die Leitwertmatrix unter Einbeziehung der Röhrenkapazitäten erläutert werden. In Bild 1.26 sind sie

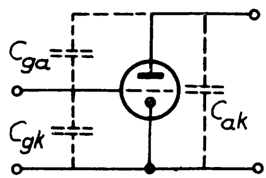


Bild 1.26

eingezeichnet. Die Röhrenkapazitäten stellen ein π-Glied dar, das zur Röhre parallel liegt (Bild 1.27).

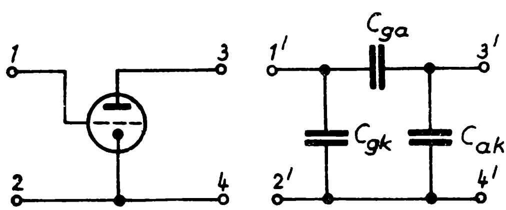


Bild 1.27

Entsprechend der vollständigen Darstellung in Bild 1.28 sind die Leitwertmatrizen der beiden Vierpole zu addieren.

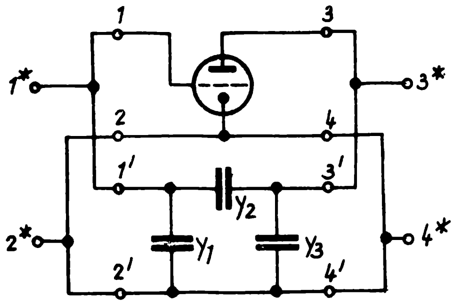


Bild 1.28

Für das π-Glied lautet die Leitwertmatrix:

$$Y_{\pi} = \begin{pmatrix} Y_1+Y_2 & -Y_2 \\ Y_2 & -(Y_2+Y_3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{gk}+Y_{ga} & -Y_{ga} \\ Y_{ga} & -(Y_{ga}+Y_{ak}) \end{pmatrix}. \tag{53}$$

Damit erhält man die Gesamtmatrix:

$$Y_{ges} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -S & -\frac{1}{R_i} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y_{gk}+Y_{ga} & -Y_{ga} \\ Y_{ga} & -(Y_{ga}+Y_{ak}) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} Y_{gk}+Y_{ga} & -Y_{ga} \\ -S+Y_{ga} & -\left(\frac{1}{R_i}+Y_{ga}+Y_{ak}\right) \end{pmatrix}. \tag{54}$$

In dieser Matrix bedeuten

Y_{gk} den Eingangsleitwert der Röhre,

Y_{ak} den Ausgangsleitwert der Röhre,

Y_{ga} den Rückwirkungsleitwert der Röhre.

Die reziproken Werte der Leitwerte sind die entsprechenden

Widerstände, von denen bei den üblichen Verstärkerschaltungen nur der kapazitive Ausgangswiderstand von Bedeutung ist, da kein Gitterwechselstrom fließt und die Röhre als rückwirkungsfrei angenommen wird.

$$\frac{1}{Y_{gk}} = \frac{1}{j\omega C_{gk}}$$ der Eingangswiderstand der Röhre,

$$\frac{1}{Y_{ak}} = \frac{1}{j\omega C_{ak}}$$ der Ausgangswiderstand der Röhre,

$$\frac{1}{Y_{ga}} = \frac{1}{j\omega C_{ga}}$$ der Rückwirkungswiderstand der Röhre.

Wird nun die Röhre als beiderseitig abgeschlossener Vierpol angesehen, dann lautet die allgemeine Verstärkergleichung:

$$V = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-Y_{21} R_a}{1 + Y_{22} R_a} = \frac{(-S + Y_{ak}) \cdot R_a}{1 + \frac{1}{R_i}(Y_{ga} + Y_{ak}) \cdot R_a} . \tag{57}$$

Da man bei einer üblichen Verstärkerschaltung die Leitwerte Y_{ak} und Y_{ga} vernachlässigen kann, so ergibt sich die bekannte Gleichung:

$$V = - \frac{S \cdot R_a}{1 + \frac{R_a}{R_i}}$$

3.13. Zusammenfassung

Die Betrachtung der Röhre als Vierpol bringt den Vorteil mit sich, daß die Größen, die bei der üblichen Anwendung der Röhre nicht von Bedeutung sind, berücksichtigt werden. So sind z.B. Rückkopplungsschaltungen, HF- Eingangsschaltungen usw. mit der Vierpoldarstellung einfacher zu erklären und zu dimen-

sionieren.
Verwendet wurde die Leitwertdarstellung. Die Röhrenkapazitäten C_{gk}, C_{ga} und C_{ak} sind als zum Vierpol Röhre parallel liegender Vierpol angesehen worden, so daß sich die Leitwertmatrix aus der Addition der Leitwertmatrizen beider Vierpole ergeben hat.

4.1. Fragen und Beispiele

1. Welches sind die wichtigsten Katodenarten, und welches sind ihre Merkmale?
2. Welche Gebiete unterscheidet man bei einer Kennlinie, und wodurch wird der Kennlinienverlauf gekennzeichnet?
3. Was versteht man unter dem Arbeitspunkt und was unter dem Aussteuerbereich einer Röhre?
4. Welches sind die Kennwerte der Diode, und in welcher Beziehung stehen sie zueinander?
5. Wie groß ist die statische Steilheit einer Diode, wenn die Raumladekonstante $k = 0{,}12 \cdot 10^{-3} \frac{A}{V^{\frac{3}{2}}}$ und die Anodenspannung $U_a = 250\ V$ betragen?
6. Worin unterscheiden sich die Richtwirkung und die Ventilwirkung einer Diode?
7. Welche zweifache Bedeutung hat das Gitter einer Triode?
8. Worin zeigt sich, daß die Steuerwirkung bei einer Triode nicht allein durch das Gitter gegeben ist?
9. Wie lautet das Raumladegesetz einer Triode?
10. Welche Wirkung hat der Anodenwiderstand R_a ?
11. Was versteht man unter dem Durchgriff D ?
12. Wie groß muß U_B sein, wenn bei $R_a = 18\ k\Omega$, $I_{a0} = 5\ mA$ und $U_{a0} = 170\ V$ sein sollen?
13. Gegeben ist eine Röhre mit den Daten
$$S = 2{,}5 \frac{mA}{V}, \quad R_i = 45\ k\Omega,$$
$$R_a = 100\ k\Omega \text{ und } \hat{u}_g = 0{,}3\ V.$$
Es sind die Urspannung, der Kurzschlußstrom, die dynamische Steilheit, der Anodenwechselstrom, die Anodenwechselspan-

nung und die Verstärkung der Röhre zu berechnen!

14. Der Anodenwiderstand einer Triode ist gegeben zu $R_a = 200\,k\Omega$; die Steilheit beträgt $S = 1{,}2\,\frac{mA}{V}$. Die Amplitude der Gitterwechselspannung beträgt $\hat{u}_g = 0{,}7\,V$, die der Anodenwechselspannung $\hat{u}_a = 42{,}5\,V$.
Zu berechnen sind: die dynamische Steilheit, der Wechselstrominnenwiderstand, der Verstärkungsfaktor und der Anodenwechselstrom!

15. In einer Verstärkerschaltung wird die Triode ECC 91 verwendet. Ihre Daten sind: $D = 2{,}6\,\%$, $S = 5{,}3\,\frac{mA}{V}$.
Am Gitter der Röhre liegt eine Spannung von $25\,e^{j0^\circ}\,V$ an.
Die Frequenz dieser Gitterwechselspannung beträgt $f = 900\,Hz$.
Der Anodenwiderstand ist eine Drossel mit $L = 4{,}5\,H$ und einem Verlustwiderstand von $R_V = 5000\,\Omega$.
Zu berechnen sind: die dynamische Steilheit, die Verstärkung, der Anodenwechselstrom, die Anodenwechselspannung, der Wechselspannungsabfall an der Röhre, der Spannungsabfall an der Induktivität der Drossel, der Spannungsabfall am Verlustwiderstand, die Urspannung der Röhre!

16. Die Daten einer Triode sind: $D = 2{,}4\,\%$, $S = 5{,}4\,\frac{mA}{V}$
Am Gitter liegt eine Wechselspannung von $15\,e^{j10^\circ}\,V$ an.
Die Frequenz beträgt $f = 1000\,Hz$. Der Anodenwiderstand ist gegeben zu $R_a = 33\,e^{j72^\circ}\,k\Omega$.
Zu berechnen sind: der Wechselstrominnenwiderstand der Röhre, die dynamische Steilheit, die Verstärkung V, Anodenwechselstrom und Anodenwechselspannung!

4.2. Antworten und Lösungen zu den Aufgaben in 4.1.

Zu 1. Man unterscheidet homogene und zusammengesetzte Katoden. Eine homogene Katode ist z.B. die Wolframkatode. Sie besteht aus Wolfram und zeichnet sich durch mechanische Festigkeit und geringe Wärmeempfindlichkeit aus. - Zu den zusammengesetzten oder auch inhomogenen Katoden gehört die thorierte Katode. Sie ist ebenfalls mechanisch stabil, aber nicht unempfindlich gegen Überheizung, da dann der an der Oberfläche gebildete Thoriumfilm verdampft.

Die wichtigste Katode ist die Barium-Oxidkatode. Die Oxidschicht befindet sich auf einem Trägerröhrchen aus Nickel oder Kupfer. Durch Aktivierung bildet sich an der Oberfläche der Oxidschicht eine gleichmäßig verteilte Bariumschicht. - Die Katode ist mechanisch wenig stabil und gegen Überheizung empfindlich. Sie weist aber einen hohen Emissionsstrom auf.

Zu 2. Man unterscheidet das Anlaufstrom-, das Raumladestrom- und das Sättigungsstromgebiet.

Im Anlaufstromgebiet verläuft die Kennlinie nach einer e-Funktion. Der Strom ist gering und wird in der Regel praktisch nicht genutzt. Das Raumladestromgebiet ist das Arbeitsgebiet der Röhre. Die Kennlinie folgt dem Raumladestromgesetz

$$I_a = k \cdot U_a^{\frac{3}{2}} .$$

Hierbei ist k die Raumladekonstante, in der u.a. die geometrischen Abmessungen der Röhre erfaßt sind. Im Raumladestromgebiet folgt der Strom der angelegten Spannung.

Das Sättigungsstromgebiet ist dadurch gekennzeichnet, daß der Strom auch bei Änderung der Spannung konstant bleibt.

Zu 3. Der Arbeitspunkt ist ein durch eine Gleichspannung auf der Kennlinie fixierter Punkt. Ist die Gleichspannung gleich Null, dann ist der Koordinatenursprung unter Vernachlässigung des Anlaufstromes der Arbeitspunkt.- Wird der Gleichspannung eine Wechselspannung überlagert, so ändert sich das Spannungspotential zwischen der Anodengleichspannung und der positiven bzw. negativen Amplitude der Wechselspannung. D.h., der Aussteuerbereich ist gegeben zu

$$U_{a0} \pm \hat{U}_a .$$

Zu 4. Die Kennwerte der Diode sind die Steilheit S und der Wechselstrominnenwiderstand R_i. Sie sind zueinander reziprok, und es gilt demzufolge:

$$S \cdot R_i = 1 .$$

Zu 5.

$$S = \frac{dI_a}{dU_a} = \frac{d(k U_a^{\frac{3}{2}})}{dU_a} = \frac{3}{2} k U_a^{\frac{1}{2}}$$

$$S = \frac{3}{2}\, 0{,}12 \cdot 10^{-3}\, 250^{\frac{1}{2}} = \underline{\underline{2{,}84 \frac{mA}{V}}}$$

Zu 6. Bei der Ventilwirkung wird die Röhre ohne Vorspannung betrieben. Der Arbeitspunkt liegt im Koordinatenursprung. Es ergibt sich ein Strom gleicher Richtung, der aber eine starke Welligkeit aufweist.

Bei der Richtwirkung der Diode ist die Anodengleichspannung größer als die Amplitude der angelegten Wechselspannung:

$$U_{a0} > \hat{U}_a .$$

Der Arbeitspunkt liegt damit nicht im Koordinatenursprung. Es ergibt sich ein Mischstrom, der folgende Stromanteile enthält:

$$I_{a0} = \text{Anodenruhestrom},$$

$$\Delta I = \frac{T}{4} \hat{U}_a^2 = \text{Richtstrom},$$

ferner Wechselströme mit der Frequenz der anliegenden Anodenwechselspannung und mit dem Vielfachen dieser Frequenz.

Zu 7. Das Gitter schirmt die Katode gegen die Anode teilweise ab, es hat also eine Schirmwirkung. Ferner wird durch Potentialänderung des Gitters die Stromstärke des durch die Röhre fließenden Stromes verändert. Dies ist die Steuerwirkung des Gitters.

Zu 8. Der Durchgriff gibt die Wirkung der Anodenspannung auf den Katodenstrom an, d.h., der Strom ist nicht allein von der Gitterspannung abhängig, sondern auch von der Anodenspannung, so daß die steuernde Wirkung durch eine resultierende Spannung, die Steuerspannung $U_{st} = U_g + DU_a$ gegeben ist.

Zu 9. $I_k = I_a = k\,(U_g + DU_a)^{\frac{3}{2}} = k\,U_{st}^{\frac{3}{2}}$

Zu 10. Durch den Widerstand R_a wird der Strom durch die Röhre nicht mehr nur durch die Parameter der Röhre bestimmt, sondern auch durch R_a. Durch den Widerstand R_a ist die Gleichspannung an der Röhre U_{a0} nicht mehr gleich der Batteriespannung U_B, sondern U_B teilt sich auf in den Spannungsabfall an der Röhre und den an R_a

$$U_B = U_{a0} + I_{a0} R_a$$

Zu 11. Der Durchgriff ist der reziproke Wert des Verstärkungsfaktors μ, der als das Verhältnis der Steilheiten der I_a–U_g–Kennlinie und der I_a–U_a–Kennlinie definiert ist.

Zu 12

$$U_B = U_{a0} + I_{a0} R_a = 160 + 5 \cdot 10^{-3}\ 18 \cdot 10^3 = \underline{\underline{250\ V}}$$

Zu 13

$$\frac{u_g}{D} = S R_i u_g = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^3 \cdot 0{,}3 = \underline{\underline{33{,}75\ V}}$$

$$i_k = S u_g = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}3 = \underline{\underline{0{,}75\ mA}}$$

$$S_D = S \frac{R_i}{R_i + R_a} = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \frac{45 \cdot 10^3}{(45 + 110) \cdot 10^3} = \underline{\underline{0{,}725 \frac{mA}{V}}}$$

$$i_a = \frac{u_g}{D} \frac{1}{R_i + R_a} = 33{,}75 \frac{1}{(45+110) \cdot 10^3} = \underline{\underline{0{,}218\ mA}}$$

$$V = S \frac{R_i \cdot R_a}{R_i + R_a} = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \frac{45 \cdot 10^3 \cdot 110 \cdot 10^3}{(45 + 110) \cdot 10^3}$$

$$= \underline{\underline{80\text{–fach}}}$$

$$u_a = -i_a \cdot R_a = 0{,}218 \cdot 10^{-3} \cdot 110 \cdot 10^3 = \underline{\underline{-24\ V}}$$

Zu 14

$$V = \frac{\hat{u}_a}{\hat{u}_g} = \frac{42{,}5}{0{,}7} = \underline{\underline{60{,}7-\text{fach}}}$$

$$V = S\,\frac{R_i \cdot R_a}{R_i + R_a} \longrightarrow R_i = \frac{V \cdot R_a}{S \cdot R_a - V} = \frac{60{,}7 \cdot 200 \cdot 10^3}{1{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^3 - 60{,}7}$$

$$= \underline{\underline{67{,}7\ k\Omega}}$$

$$S_D = S\,\frac{R_i}{R_i + R_a} = 1{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{67{,}7 \cdot 10^3}{(67{,}7 + 200) \cdot 10^3} = \underline{\underline{0{,}304\ \frac{mA}{V}}}$$

$$\mu = S \cdot R_i = 1{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 67{,}7 \cdot 10^3 = \underline{\underline{81}}$$

$$i_a = \frac{\hat{u}_a}{R_a} = \frac{42{,}5}{200 \cdot 10^3} = \underline{\underline{0{,}212\ mA}}$$

Zu 15

$$S R_i D = 1$$

$$R_i = \frac{1}{S D} = \frac{1}{5{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}026} = \underline{\underline{7{,}26\ k\Omega}}$$

$$S_D^{\angle} = S\,\frac{R_i}{R_i + Z_a^{\angle}} = 5{,}3 \cdot 10^{-3}\,\frac{7{,}26 \cdot 10^3}{(7{,}26 + 5) \cdot 10^3 + j\,2\pi\,900 \cdot 4{,}5}$$

$$= \underline{\underline{1{,}4\ e^{-j\,61^\circ}\ \frac{mA}{V}}}$$

$$V^{\angle} = S_D^{\angle} Z_a^{\angle} = 1{,}4 \cdot 10^{-3}\,e^{-j61^\circ} \cdot (5 \cdot 10^3 + j\,2\pi\,900 \cdot 4{,}5)$$

$$= \underline{\underline{36\ e^{j\,14{,}75^\circ}}}$$

$$i_a^{\angle} = u_g^{\angle} S_D^{\angle} = 25\ e^{j0^\circ}\ 1{,}4\,e^{-j\,61^\circ} = \underline{\underline{35\ e^{-j\,61^\circ}\,mA}}$$

$$u_a^{\angle} = -i_a^{\angle} Z_a^{\angle} = -35\cdot 10^{-3} e^{-j61^\circ}\cdot 26\cdot 10^{3}\cdot e^{j76^\circ}$$

$$= \underline{\underline{-910\, e^{j15^\circ} V}}$$

$$u_{R_i}^{\angle} = -i_a R_i = -35\cdot 10^{-3} e^{-j61^\circ}\cdot 7{,}26\cdot 10^{3}$$

$$= \underline{\underline{-254\, e^{-j61^\circ} V}}$$

$$u_L^{\angle} = i_a j\omega L = 35\cdot 10^{-3}\, e^{-j61^\circ}\, j\, 2\pi\, 900\cdot 4{,}5$$

$$= \underline{\underline{-892\, e^{j29^\circ} V}}$$

$$u_{R_V}^{\angle} = +i_a R_V = 35\cdot 10^{-3}\, e^{-j61^\circ}\, 5\cdot 10^{3} = \underline{\underline{175\, e^{-j61^\circ} V}}$$

$$\frac{u_g}{D} = \frac{25\, e^{j0^\circ}}{0{,}026} = \underline{\underline{961\, e^{j0^\circ} V}}$$

Zu 16

$$R_i = \frac{1}{S D} = \frac{1}{5{,}4\cdot 10^{-3}\, 0{,}024} = \underline{\underline{7{,}7\ k\Omega}}$$

$$S^{\angle} = S\frac{R_i}{R_i + R_a^{\angle}} = 5{,}4\cdot 10^{-3}\frac{7{,}7\cdot 10^{3}}{7{,}7\cdot 10^{3} + 33\cdot 10^{3}(\cos 72^\circ + j\sin 72^\circ)}$$

$$= \underline{\underline{1{,}15\, e^{-j61^\circ}\frac{mA}{V}}}$$

$$V^{\angle} = S^{\angle} R_a^{\angle} = 1{,}15\cdot 10^{-3}\, e^{j61^\circ}\, 33\cdot 10^{3} e^{j72^\circ} = \underline{\underline{38\, e^{j12^\circ}}}$$

$$i_a^{\angle} = S_D^{\angle}\, u_g^{\angle} = 1{,}15\cdot 10^{-3}\cdot e^{-j61^\circ}\cdot 15\, e^{j10^\circ} = \underline{\underline{17{,}25\, e^{-j51^\circ} mA}}$$

$$u_a^{\angle} = -i_a^{\angle}\cdot Z_a^{\angle} = -17{,}25\, e^{-j51^\circ}\cdot 10^{-3}\cdot 33\cdot 10^{3}\, e^{j72^\circ}$$

$$= \underline{\underline{-569\, e^{j22^\circ} V}}$$

Literaturverzeichnis:

/1/ Barkhausen, H. : Elektronenröhren, Bd. 1, Allgemeine Grundlagen. Leipzig: Verlag von S. Hirzel.

/2/ Vilbig, F. : Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Bd. 2. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.

/3/ Rothe, H., Kleen, W. : Hochvakuum Elektronenröhren, Bd. 1, Physikalische Grundlagen. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.

/4/ Rint, C. : Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechniker, Bd. 1und 2. Berlin-Borsigwalde: Verlag für Radio- Foto- Kinotechnik GMBH.

/5/ Frühauf, H., Sahner, G., Pasemann, H. : Elektronenröhren, Lehrbriefe 1-3. Berlin: VEB Verlag Technik 1953.

/6/ Funktechnik, Radio-Fernsehen-Elektronik 1955, 10. Jahrg. Berlin-Borsigwalde: Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GMBH.