

Schweizerische Armee

---

65.90/I d

**Technische Grundlagen**  
für  
**Übermittlungsgerätemechaniker**

Band I

Gültig ab 1. Oktober 1974

# G. Elektronenröhren

## I. Diode

### 1. Einführung

Als Edison im Kolben einer Glühlampe ein Blech anbrachte und den Kolben leer pumpte, stellte er fest, dass zwischen dem Blech und dem Glühfaden ein Strom floss, sobald der Glühfaden erwärmt wurde. Bild 279 gibt den Versuch von Edison wieder.

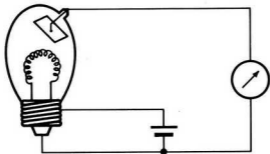


Bild 279

Mit diesem Experiment begann der Siegeszug der Elektronenröhre. Moderne Röhrendioden sind wohl etwas komplizierter aufgebaut, als die Edison-Diode, das Funktionsprinzip ist jedoch dasselbe geblieben.

Dioden werden in der Nachrichtentechnik vielseitig eingesetzt. Wir treffen sie in Demodulatoren zur Gleichrichtung von Signalen, in Netzgeräten als Gleichrichter für die Netzspannung und in vielen Spezialschaltungen und Messgeräten als Ventile an.

### 2. Was wissen Sie schon über Dioden? (Lösung Seite 479)

- Beschreiben Sie den Aufbau einer Diode und benennen Sie die Elektroden.
- Warum sind die Elektroden einer Diode im Kolben unter Vakuum?
- Warum verlassen die Elektronen die Katode?
- Durch welche Massnahmen kann der Anodenstrom in der Diode gesteigert werden?
- Was verstehen Sie unter einer «indirekt geheizten Katode»?
- Erklären Sie den Ausdruck «Raumladung».

### 3. Die Diode

#### a) Stromleitung im Vakuum

Der elektrische Strom wird durch bewegte Ladungsträger hervorgerufen. Die Stromleitung durch das Vakuum kommt durch die freien Elektronen, die sich von der Katode zur Anode bewegen, zustande. Im Vakuum befinden sich praktisch keine Gasmoleküle mehr; die Elektronen können sich ungehindert bewegen, sie riskieren keine Zusammenstösse mit Gasmolekülen. Unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes können diese freien Elektronen im Vakuum beschleunigt werden. Ihre Geschwindigkeit hängt von der Stärke des angelegten Feldes ab. In Bild 280 erkennen wir die *Katode* als Elektronenspender und die ihr gegenüberstehende *Anode*, die den emittierten Elektronenschwarm wieder auffängt. Zwischen diesen beiden Elektroden wird durch die angelegte *Anodenspannung* ein elektrisches Feld aufgebaut. Die positive Anode zieht die negativen Elektronen an. Je höher die Anodenspannung gewählt wird, desto grösser wird die Geschwindigkeit, mit welcher die Elektronen der Anode zufliegen. Die konventionelle Richtung des elektrischen Stromes wird vom Plus- zum Minuspol der Spannungsquelle angenommen. Diese Annahme stammt aus einer Zeit, die noch nicht viel vom Wesen der Elektrizität kannte. Wir wissen heute, dass sich die Elektronen vom Minuspol zum Pluspol der Spannungsquelle bewegen, trotzdem wird die ursprüngliche – die konventionelle – Stromrichtung beibehalten. *Die konventionelle Richtung des Anodenstromes ist der Bewegungsrichtung des Elektronenstromes entgegengesetzt.*

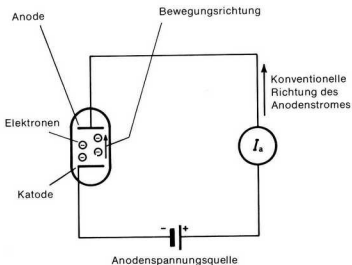


Bild 280

Die Elektronen benötigen eine gewisse Zeit, um von der Katode zur Anode zu gelangen. Die anodenspannungsabhängige Auftreffgeschwindigkeit beträgt im Durchschnitt etwa 10 000 km/s.

## b) Die Elektronenemission

Damit Elektronen einen Leiter verlassen können, müssen sie eine gewisse Geschwindigkeit aufweisen, um die im Leiter wirksamen Anziehungskräfte zu überwinden. Die notwendige Geschwindigkeit wird den Elektronen in der Katode durch Zufuhr von Wärmeenergie erteilt. Wird die Katode erwärmt, dann steigt die mittlere Geschwindigkeit der freien Elektronen an. Ein Teil der Elektronen erreicht dabei die kritische Geschwindigkeit, die notwendig ist, um die Katode zu verlassen. Diese Elektronen verlassen die Katode und fliegen unter dem Einfluss der Anodenspannung zur Anode. Grundsätzlich ist es gleichgültig, wie die Katode erwärmt wird. Die Heizung erfolgt bei den Elektronenröhren elektrisch. Da diese Elektronenemission durch *Erwärmung* der Katode verursacht wird, heisst sie *Thermoemission*.

## c) Die Raumladung

In einem Leiter ist der Strom und damit die bewegte Ladung proportional der angelegten Spannung. Elektronenbewegungen in einem Vakuum dagegen verhalten sich anders. Die Elektronen, die sich unter der Einwirkung der Anodenspannung bewegen, weisen eine nach der Anode hin zunehmende Geschwindigkeit auf. Im Leiter bewegen sich die Elektronen mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Nicht alle Elektronen, die die Katode verlassen, gelangen zur Anode, ein Teil verbleibt in der Nähe der Katode. Es bildet sich um die Katode eine «Elektronenwolke». Diese Elektronenwolke wirkt wie eine elektrische Ladung, sie wird deshalb als *Raumladung* bezeichnet. Infolge ihrer negativen Polarität wirkt sie bremsend auf die aus der Katode austretenden Elektronen. Mit zunehmendem Anodenstrom wird die Dichte der Raumladung immer geringer, damit schwindet auch ihr Einfluss. Ab einer bestimmten Anodenspannung gelangen alle emittierten Elektronen zur Anode, die Raumladung ist verschwunden. Wird die Anodenspannung weiter erhöht, so steigt der Anodenstrom nicht mehr weiter an, die Diode arbeitet im Sättigungsgebiet. Der maximale Anodenstrom heisst: *Sättigungsstrom*.

## d) Der Anlaufstrom

Edison stellte mit seinem Versuch fest, dass ein kleiner Anodenstrom auch dann fliesst, wenn keine Anodenspannung vorhanden ist, oder wenn diese leicht negativ wird. Dieser Strom wird *Anlaufstrom* genannt. Er entsteht dank der Eigengeschwindigkeit eines Teils der Elektronen, die aus der Katode ausgetreten sind. Die Austrittsgeschwindigkeit dieser Elektronen ist so gross, dass sie die Anode anzulaufen vermögen, ohne dass ein elektrisches Feld

sie beschleunigt. Elektronen mit einer grossen Austrittsgeschwindigkeit gelangen sogar trotz einer kleinen negativen Anodenspannung zur Anode. Der Anlaufstrom spielt für die Dioden und Verstärkerröhren eine wesentliche Rolle.

### e) Die Katode

Die Katode hat die Aufgabe, Elektronen zu emittieren. Bei einigen Stoffen ist die Fähigkeit Elektronen auszusenden besonders ausgeprägt. Belegt man den Glühfaden einer Diode mit einem dieser Materialien – Bariumoxyd wird häufig verwendet – so erhält man eine direkt geheizte Katode. Bild 281 zeigt Aufbau und Symbol der *direkt geheizten Katode*.

direkt geheizte Katode

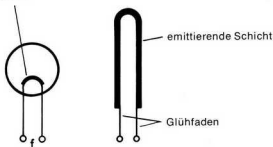


Bild 281

Röhren mit direkt geheizten Katen werden vor allem in batteriegespeisten Geräten verwendet. Für Geräte mit Wechselstromheizung sind sie nicht geeignet, da der Heizfaden thermisch zu wenig träge ist. Der emittierte Elektronenstrom schwankt im Rhythmus der Frequenz des Heizstromes. Für Wechselstromspeisung werden Röhren mit *indirekt geheizter Katode* benötigt. Die indirekt geheizte Katode besteht aus einem Heizwendel, welcher im Innern eines Röhrchens isoliert angebracht ist. Das Röhrchen dient als Träger für die emittierende Schicht. Durch diese Massnahme wird die Wärmeträgheit der Katode vergrössert, die Frequenz des Heizstromes kann den Katodenstrom nicht mehr beeinflussen. Die elektrische Trennung des Heizkreises von der Katode bringt zudem schaltungstechnisch grosse Vorteile. Den prinzipiellen Aufbau einer indirekt geheizten Katode erkennen wir in Bild 282.

indirekt geheizte Katode

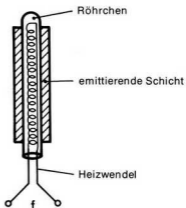
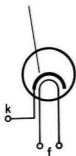


Bild 282

### f) Die Anode

Die Anode besteht aus Nickel- oder Stahlblech. Sie ist meistens zylindrisch oder oval um die Katode angeordnet. Bild 283 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Diode, während auf Bild 284 einige Ausführungsformen zu sehen sind.

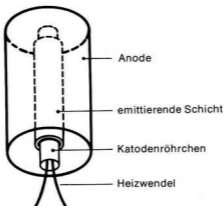


Bild 283

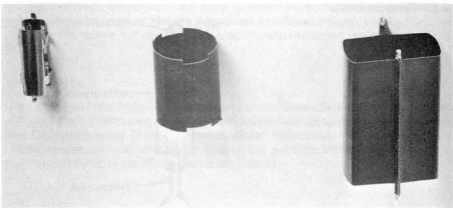


Bild 284

Die Elektronen, die auf die Anode aufprallen, besitzen eine beträchtliche Bewegungsenergie. Beim Eintritt in die Anode werden die Elektronen plötzlich gebremst, ihre Bewegungsenergie wandelt sich um in thermische Energie, welche an das Anodenblech abgegeben wird und dieses so erwärmt. Diese Erwärmung wird umso intensiver, je mehr Elektronen auf die Anode auftreffen, und je grösser die Geschwindigkeit dieser Elektronen ist. Sie nimmt mit steigendem Anodenstrom und grösser werdender Anodenspannung zu. Die maximal zulässige Anodenbelastung wird durch die *Anodenverlustleistung* ausgedrückt. *Die Anodenverlustleistung ist diejenige Leistung, die im Anodenblech in Wärme umgesetzt wird.* Wenn an der Anode *nur* eine Gleichspannung liegt, lässt sich die Anodenverlustleistung leicht messen. Sie entspricht dem Produkt aus Anodenstrom und Anodenspannung.

$$P_{\text{ad}} = I_{\text{a}} \cdot U_{\text{a}}$$

Die Wärmeabfuhr kann im Vakuum nur durch Strahlung erfolgen, weshalb die Anodenbleche zur Verbesserung der Wärmeabstrahlung meistens geschwärzt werden.

### g) Definition der Diode

Die *Diode* ist die einfachste Form einer Elektronenröhre. Sie besitzt zwei Elektroden: *Katode* und *Anode*. Die *Katode* emittiert den Elektronenstrom, der von der *Anode* aufgenommen wird. Die *Diode* wirkt als elektrisches «Ventil», da der Strom nur in einer Richtung fließen kann.

## h) Symbol

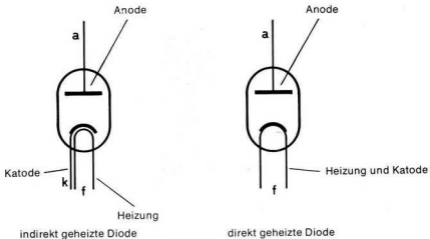


Bild 285

## i) Aufbau

Der prinzipielle Aufbau der Diode ist in Bild 286 festgehalten. In Bild 287 ist eine Doppeldiode zu sehen.

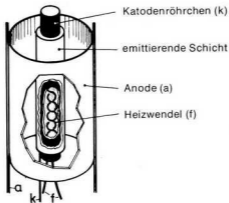


Bild 286



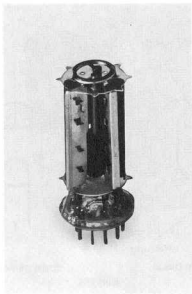


Bild 287

### k) Wirkungsweise

Der folgende Versuch untersucht die Wirkungsweise der Diode. Die Versuchsschaltung und der Aufbau sind aus den Bildern 288 und 289 ersichtlich. (Bild 289 entspricht nicht genau dem Schema von Bild 288, indem die Stromquelle für negative Anodenspannung umgesteckt werden muss.)

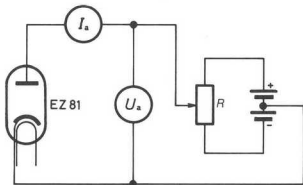


Bild 288

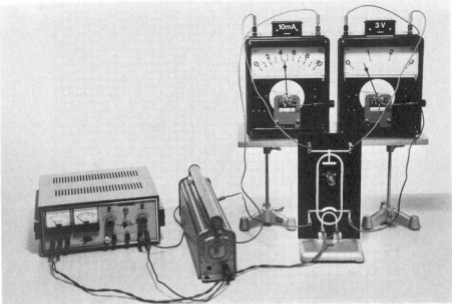


Bild 289

Die *Anodenspannung*  $U_a$  wird auf Null eingestellt. Das Ampèremeter misst einen schwachen *Anodenstrom*  $I_a$ . Dieser Anodenstrom sinkt auf Null ab, wenn die Anodenspannung etwa 2 Volt negativ gemacht wird. Für positive Anodenspannungen steigt der Strom durch die Röhre rapid an. Die Messwerte werden in das Anodenspannungs-Anodenstrom-Diagramm nach Bild 290 eingetragen.

Wird die Anodenspannung noch weiter erhöht, bleibt der Anodenstrom von einer bestimmten Spannung hinweg konstant. Der Anodenstrom steigt nicht mehr weiter an, da die Katode keine weiteren Elektronen emittieren kann.\*

\* Dieser Versuch darf aber, zwecks Schonung der Röhre EZ 81, nicht ausgeführt werden. Durch eine zu grosse Stromdichte auf der Katode könnten Teile der emittierenden Schicht weggerissen werden.

## EZ 81

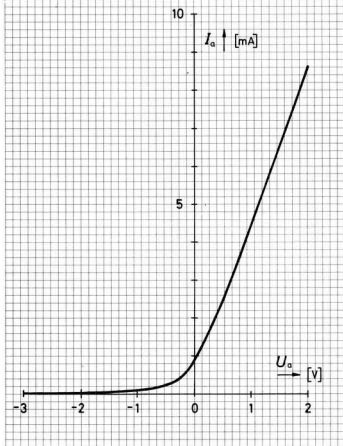


Bild 290

Die zugeführte Heizleistung kann keine weiteren Elektronen mehr mit der notwendigen Austrittsenergie versorgen. Bild 291 zeigt die Kennlinie einer Diode, bei welcher auch eine höhere Anodenspannung keinen höheren Anodenstrom bewirkt.

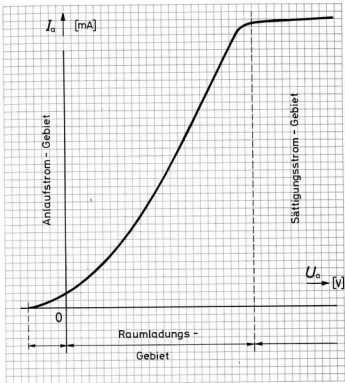


Bild 291

Die Kennlinie der Diode wird in drei Gebiete unterteilt:

- Im *Anlaufstromgebiet* entsteht der Anodenstrom durch die Eigengeschwindigkeit der Elektronen, die die Katode verlassen haben.
- Im *Raumladungsgebiet* wird der Anodenstrom von der Raumladung und der Anodenspannung beeinflusst.
- Im *Sättigungsstromgebiet* gelangen alle Elektronen, die die Katode emittierte, zur Anode. Die Raumladung ist verschwunden. Eine Erhöhung der Anodenspannung bringt keine Zunahme des Anodenstromes mehr, da die Emissionsfähigkeit der Katode voll beansprucht wird.

Moderne Dioden werden weit ausserhalb des Sättigungsgebietes betrieben. Die höchst zulässige Anodenspannung liegt unterhalb der Sättigungsspannung.

## I. Technische Daten

### – Der Gleichstrominnenwiderstand

Der Gleichstrominnenwiderstand der Diode ist gegeben durch den Quotienten aus Anodengleichspannung zu Anodengleichstrom. Dieser Gleichstrominnenwiderstand spielt bei Gleichrichterschaltungen eine Rolle, da er wie ein zur Gleichrichterstrecke in Serie geschalteter ohmscher Widerstand wirkt. Bei Belastungsschwankungen ändert sich der Spannungsabfall über der Röhre und damit die Klemmenspannung des Gleichrichters. Der Gleichstrominnenwiderstand kann nach Bild 292 graphisch aus den Kennlinien ermittelt werden, indem man für den Arbeitspunkt die Anodengleichspannung und den Anodengleichstrom abliest.

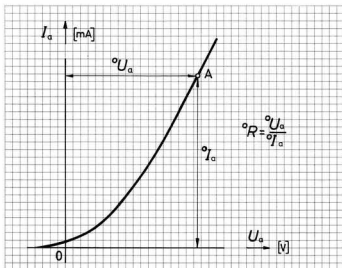


Bild 292

### – Der Wechselstrominnenwiderstand $R_i$

Der Wechselstrominnenwiderstand der Diode interessiert vor allem dann, wenn die Diode als veränderlicher Wechselstromwiderstand geschaltet wird. Diese Art der Verwendung ist bei älteren frequenzmodulierten Kleinsendern häufig anzutreffen. Der Wechselstrominnenwiderstand  $R_i$  ist derjenige Widerstand, den die Diode einer Spannungsänderung entgegensetzt. Er wird messtechnisch ermittelt, indem man die Anodenspannung um einen kleinen Betrag ändert und dabei die Anodenstromänderung beobachtet. Der Wechselstrominnenwiderstand errechnet sich dann zu

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

Das Zeichen  $\Delta$  (Delta) zeigt eine Veränderung der nachfolgenden Grösse an. Der Innenwiderstand kann auch graphisch ermittelt werden, indem man an den Arbeitspunkt die Tangente legt. Diese gibt die Steigung der Kurve im Arbeitspunkt an. Die Tangentensteigung drückt den Innenwiderstand der Diode für den Arbeitspunkt aus. Bild 293 zeigt das graphische Verfahren.

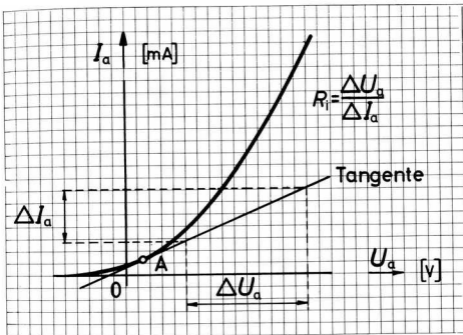


Bild 293

Als *Arbeitspunkt* bezeichnet man den Ort auf der Kennlinie, der durch die angelegte Anodenspannung und den dazugehörigen Anodenstrom bestimmt ist. Auf jeder gekrümmten Kennlinie hängt der Innenwiderstand von der Lage des Arbeitspunktes ab, da die Neigung der Kennlinie für jeden Arbeitspunkt eine andere ist.

## 4. Beispiele

### a) Bestimmen des Gleichstrominnenwiderstandes

Der Gleichstrominnenwiderstand der Röhre EZ 81 ist aus der Kennlinie nach Bild 294 für den Arbeitspunkt  $A_3$  zu ermitteln.

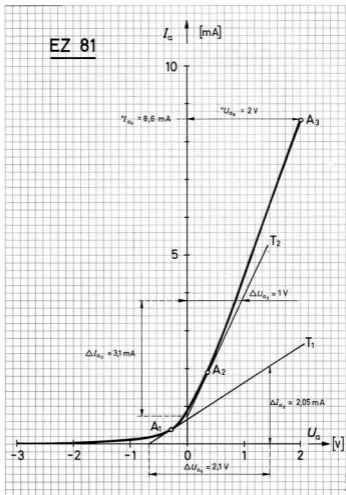


Bild 294

### Vorgehen:

- Die zum Arbeitspunkt  $A_3$  gehörende Anodenspannung und der daraus resultierende Anodenstrom sind aus dem Diagramm herauszulesen.
- Formel für den Gleichstrominnenwiderstand anschreiben

$$R = \frac{U_a}{I_a}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R = \frac{2}{8,6 \cdot 10^{-3}}$$

$$R = 232,558 \Omega$$

### b) Bestimmen des Wechselstrominnenwiderstandes

Der Wechselstrominnenwiderstand der Röhre EZ 81 nach Bild 294 soll für die beiden Arbeitspunkte  $A_1$  und  $A_2$  bestimmt werden.

#### Vorgehen

- Die Tangenten  $T_1$  und  $T_2$  sind durch die Arbeitspunkte  $A_1$  und  $A_2$  an die Kennlinie zu legen.
- Die Anodenspannungs- und Anodenstromänderungen für die beiden Arbeitspunkte sind mit Hilfe der Tangenten zu ermitteln.

- Grundformel für Wechselstrominnenwiderstand anschreiben

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

- Zahlenwerte für beide Fälle einsetzen und ausrechnen

$$R_{i2} = \frac{1}{3,1 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_{i2} = 323 \Omega$$

$$R_{i1} = \frac{2,1}{2,05 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_{i1} = 1024,39 \Omega$$

Das Beispiel hat an Hand der Kennlinie einer Gleichrichterröhre sehr schön bewiesen, dass der *Wechselstrominnenwiderstand* einer Diode vom Arbeitspunkt abhängt. Je flacher die Tangente verläuft, desto grösser wird der Innenwiderstand. Gleichzeitig konnten wir feststellen, dass der *Gleichstrominnenwiderstand* der Röhre mit dem Wechselstrominnenwiderstand *nichts* gemeinsam hat. Wir halten nochmals fest:

Der Wechselstrominnenwiderstand einer Diode ist derjenige Widerstand, den die Röhre einer Spannungsänderung entgegensetzt. Er ergibt sich aus dem Quotienten aus Anodenspannungsänderung zu Anodenstromänderung.



## 5. Das Wesentliche

Im Vakuum ist eine Stromleitung darum möglich, weil den Elektronen keine Hindernisse in Form von Molekülen oder Atomen entgegentreten.

Als Elektronenquelle in Röhren dient die Katode. Sie wird geheizt und emittiert Elektronen. Die Elektronenemission kommt durch die Erwärmung der Katode zustande. Unter dem Einfluss einer positiven Anodenspannung werden die Elektronen beschleunigt und von der Anode aufgefangen.

Bei negativer Anodenspannung fliesst kein praktisch verwendbarer Anodenstrom; die Diode ist gesperrt.

Dioden wirken als elektrische «Ventile», sie lassen den Strom nur in einer Richtung fließen.

Im Anlaufstromgebiet fliesst infolge der Eigengeschwindigkeit der Elektronen ein kleiner Anlaufstrom. Dieser Anlaufstrom kommt auch bei einer schwachen negativen Anodenspannung zum Fließen.

Im Raumladungsgebiet wird die Katode von einer Raumladewolke umgeben. Sie bremst die austretenden Elektronen und ist für die Nichtlinearität der Kennlinie verantwortlich.

Im Sättigungsstromgebiet fließen alle emittierten Elektronen zur Anode.

Es wird unterschieden zwischen direkt und indirekt geheizten Katen.

Die Anodenverlustleistung ist die Leistung, die im Anodenblech in Wärme umgesetzt wird; sie entspricht dem Produkt aus Anodenspannung und Anodenstrom unter der Bedingung, dass keine Wechselspannung zusätzlich an der Röhre liegt. Der Maximalwert der Anodenverlustleistung darf nicht überschritten werden, da sonst die Röhre zerstört wird.

Der Gleichstrominnenwiderstand der Röhre errechnet sich aus dem Quotienten von Anodenspannung zu Anodenstrom.

Der Wechselstrominnenwiderstand ist der Widerstand, der einer Anodenspannungsänderung entgegengesetzt wird. Er lässt sich graphisch aus der Kennlinie ermitteln, indem die Tangente am Arbeitspunkt an die Kurve gelegt wird. Die Neigung der Tangente ist ein Mass für die Grösse des Wechselstrominnenwiderstandes.

## 6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 480)

- Warum ist im Vakuum ein Stromfluss möglich?
- Unter welcher Bedingung ist die Katode in der Lage, Elektronen zu emittieren?
- Wie wirkt sich die Raumladung auf den Anodenstrom aus?
- Zeichnen Sie eine Diodenkennlinie und unterteilen Sie diese in ihre drei Teilgebiete.
- Welche Faktoren bestimmen die Anodenverlustleistung der Diode?
- Welches ist die Ursache des Anlaufstromes?
- Definieren Sie die Anodenverlustleistung.
- Ermitteln Sie den Wechselstrominnenwiderstand der Diode nach Bild 295 für den eingezeichneten Arbeitspunkt.

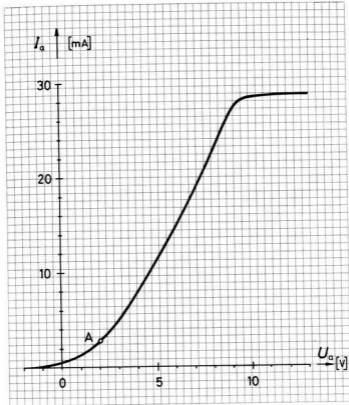


Bild 295

- i) Wie wird der Gleichstrominnenwiderstand der Diode für einen bestimmten Arbeitspunkt ermittelt?
- k) Nennen Sie ein Anwendungsgebiet, wo der Wechselstrominnenwiderstand der Diode eine Rolle spielt.

## II. Die Triode

### 1. Einführung

Mit der Erfindung der Triode wurde erstmals ein aktives Bauelement geschaffen, welches die Verstärkung von Signalen und die Erzeugung elektrischer Schwingungen ermöglichte. Die Triode blieb über längere Zeit das einzige verstärkende Element. Später wurden Röhrentypen gebaut mit Eigenschaften, welche sie für viele Anwendungen den Trioden überlegen machten. Das Anwendungsgebiet der Triode beschränkt sich heute hauptsächlich auf die Verstärkung von Niederfrequenzsignalen, die Erzeugung von elektrischen Schwingungen und den Einsatz in Messgeräten. Als Hochfrequenzverstärker wird sie nur noch in Spezialschaltungen verwendet.

### 2. Was wissen Sie schon über Trioden?

(Lösung Seite 482)

- Wieviele Elektroden weist eine Triode auf?
- Wie heissen diese Elektroden?
- Mit welcher Elektrode wird der Anodenstrom gesteuert?
- Sagt Ihnen der Ausdruck «Steilheit» etwas?
- Lässt sich eine Triode leistungslos steuern?
- Kann eine Triode auch als Leistungsverstärker verwendet werden?

### 3. Die Triode

#### a) Definition

Die *Triode* ist die einfachste Form einer Verstärkerröhre. Sie weist drei Elektroden auf. Die Katode emittiert den Elektronenstrom, über die Anode verlässt dieser die Röhre, während mit einer Spannung am *Gitter* der Anodenstrom gesteuert werden kann.

#### b) Symbol

Bild 296 zeigt die Symbole für eine direkt geheizte und eine indirekt geheizte Triode.

#### c) Aufbau

Die Triode besteht aus drei Elektroden, welche in einem Glaskolben unter Vakuum stehen. Zwischen Katode und Anode ist das *Steuergitter* angeordnet. Das Steuergitter besteht aus einer zylinderförmigen Drahtspirale oder einem

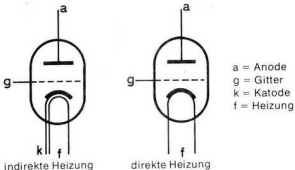


Bild 296

indirekte Heizung

direkte Heizung

rechteckigen Drahtrahmen. Die Form des Gitters ist durch die Form der Anode bestimmt. Bild 297 zeigt schematisch den Aufbau einer Triode.

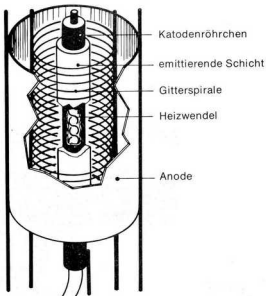


Bild 297

#### d) Wirkungsweise

Eine negative Spannung am Steuergitter bremst den Emissionsstrom der Katode. Er lässt sich mit einer Spannung am Steuergitter steuern. Im Bereich der negativen Gitterspannungswerte ist die Diodenstrecke Katode-Gitter gesperrt. Mit Ausnahme des Anlaufstromes fließt über das Gitter kein Strom. Um die Röhre leistungslos auszusteuern, wählt man Steuerspannungen, die

so negativ sind, dass über das Gitter kein Strom fließt. Das Verhalten der Triode wird mit der Schaltung nach Bild 298 untersucht. Bild 299 zeigt den Versuchsaufbau. Für die erste Messung beträgt die Gittervorspannung 0 Volt. Die Anodenspannung wird langsam von 0 Volt gegen 200 Volt erhöht. Der Anodenstrom steigt mit zunehmender Anodenspannung an, die Röhre verhält sich wie eine Diode.

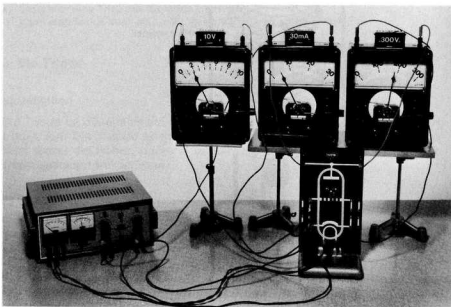
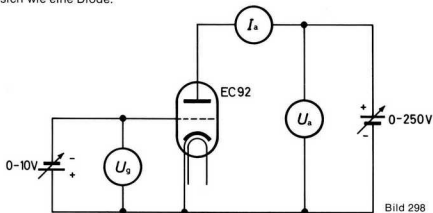


Bild 299

Für die zweite Messung wird die Anodenspannung auf 200 V fixiert und die Gittervorspannung kontinuierlich von 0 Volt auf -10 Volt erhöht. Der Anodenstrom sinkt ab und erreicht für eine Gittervorspannung von -6 Volt bereits den Wert Null. Der Versuch bleibt auf negative Gitterspannungen beschränkt. Da für positive Spannungen am Gitter ein Gitterstrom fließen würde – die Strecke Katode Gitter verhält sich wie eine Diode – interessiert der positive Bereich nicht, weil in diesem Bereich eine leistungslose Steuerung nicht mehr möglich ist.

Das Verhalten der Röhre soll nun messtechnisch erfasst und graphisch festgehalten werden. Zu diesem Zweck wird für feste Anodenspannungen (100, 150, 200, 250 V) die Abhängigkeit des Anodenstromes von der Gitterspannung aufgezeichnet. Wir erhalten das  $I_a - U_g$ -Kennlinienfeld. Die zweite Messreihe wird mit verschiedenen festen Gitterspannungen (0, -1, -2, -3, -4 V) durchgeführt. Für diese Gitterspannungen wird die Abhängigkeit des Anodenstromes von der Anodenspannung untersucht. Die Messresultate werden im  $I_a - U_a$ -Kennlinienfeld festgehalten. Bild 300 hält die Messresultate in Form von Röhrenkennlinien fest. Die Röhrendaten lassen sich aus diesen Kennlinien graphisch ermitteln.

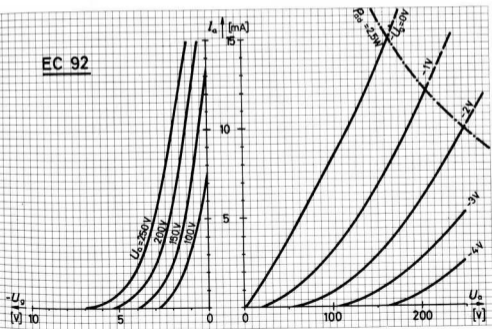


Bild 300

## e) Röhrendaten

### Die Steilheit S

Die *Steilheit S* ist ein Maß für die Steuerwirkung des Gitters und seiner Spannung auf den Anodenstrom. Sie ist bestimmt durch das Verhältnis von Anodenstromänderung zu Gitterspannungsänderung. Messtechnisch kann sie ermittelt werden, indem die Gitterspannung um den Wert  $\Delta U_g$  verändert wird, und die dadurch verursachte Anodenstromänderung  $\Delta I_a$  gemessen wird. Die Steilheit ergibt sich aus dem Quotienten der beiden Werte.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}; [S] = \text{mA/V} \quad U_a = \text{konstant}$$

Die gebräuchliche Masseinheit für die Steilheit ist das Milliampère pro Volt. Für jeden Arbeitspunkt auf der  $I_a - U_g$ -Kennlinie ergibt sich die Röhrensteilheit aus der Steilheit der Tangente für diesen Punkt. Die Steilheit wird mei-

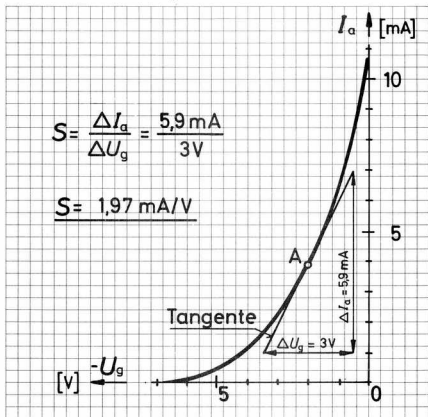


Bild 301

stens graphisch ermittelt, indem man durch den interessierenden Arbeitspunkt die Tangente an die Kennlinie legt. Bild 301 zeigt die graphische Bestimmung der Steilheit für den Arbeitspunkt A. Die Steilheit ist ein wichtiger Röhrenwert, sie beeinflusst die mit der Röhre erreichbare Verstärkung.

### Der Durchgriff D

Der Anodenstrom ist von der Anodenspannung und der Gitterspannung abhängig. Der *Durchgriff D* gibt an, wieviel mal kleiner die Steuerwirkung der Anodenspannung auf den Anodenstrom ist als jene der Gitterspannung. Messtechnisch wird der Durchgriff ermittelt, indem für eine konstante Gitterspannung die Anodenspannung um einen gewissen Betrag verändert wird.

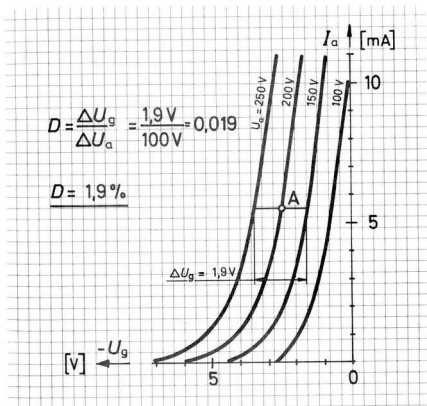


Bild 302



Die dabei auftretende Änderung des Anodenstromes wird durch Verändern der Gitterspannung rückgängig gemacht. Das Verhältnis von Gitterspannungsänderung zu Anodenspannungsänderung ergibt den Durchgriff.

$$D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \cdot 100 \quad [D] = \% \quad I_a = \text{konstant}$$

Der Durchgriff lässt sich aus der  $I_a - U_g$ -Kennlinienschar graphisch ermitteln. Soll der Durchgriff für eine bestimmte Gitter- und Anodenspannung bestimmt werden, so zieht man durch den gewählten Arbeitspunkt auf der  $I_a - U_g$ -Kennlinie eine Waagrechte, die die benachbarten Kennlinien schneidet. Die Waagrechte bedeutet, dass der Anodenstrom konstant gehalten wird. Anoden- und Gitterspannungsänderungen können direkt aus den Kennlinien abgelesen werden. Bild 302 zeigt an einem Beispiel die graphische Bestimmung des Durchgriffes.

Der Durchgriff wird in Prozenten angegeben.

**Der Verstärkungsfaktor  $\mu$ ,** auch Leerlaufverstärkungsfaktor genannt.

Der *Verstärkungsfaktor*  $\mu$  entspricht dem Reziprokwert des Durchgriffes. Er gibt die Leerlaufverstärkung der Röhre an.

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} \quad I_a = \text{konstant}$$

Das Produkt von Gitterwechselspannung und Verstärkungsfaktor ergibt die E.M.K. der Röhre. Diese E.M.K. verhält sich genau gleich wie die E.M.K. einer Batterie, sobald sie mit einem Widerstand belastet wird, sinkt sie auf den Wert der Klemmenspannung ab.

Der Verstärkungsfaktor ist ein reiner Zahlenwert, er hat keine Dimension.

**Der Innenwiderstand  $R_i$**

Wird bei konstanter Gitterspannung die Anodenspannung verändert, so resultiert daraus eine Anodenstromänderung. Der Quotient von Anodenspannungsänderung zu Anodenstromänderung ergibt wie für die Diode den *Innenwiderstand*  $R_i$  der Röhre. Dieser Widerstand charakterisiert den *Wechselstrominnenwiderstand*. Er ist nicht zu verwechseln mit dem Gleichstromwiderstand der Triode, der wie für die Diode durch den Quotienten von Anodenspannung zu Anodenstrom für einen bestimmten Arbeitspunkt gegeben ist. Zur messtechnischen Erfassung des Innenwiderstandes wird bei fester Gittervorspannung die Anodenspannung um den Betrag  $\Delta U_a$  verändert. Die resultierende Anodenstromänderung  $\Delta I_a$  ergibt zusammen mit der Anodenspannungsänderung den Wert des Innenwiderstandes.

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}; [R_i] = \frac{V}{A} = \Omega \quad U_g = \text{konstant}$$

Die Masseinheit für den Innenwiderstand ist das Ohm.  
 Der Innenwiderstand wird graphisch im  $I_a - U_a$ -Kennlinienfeld bestimmt.  
 Durch den Arbeitspunkt wird die Tangente an die Kennlinie gelegt. Die Neigung der Tangente ergibt den Wert des Innenwiderstandes. Aus Bild 303 geht die graphische Bestimmung des Innenwiderstandes hervor.

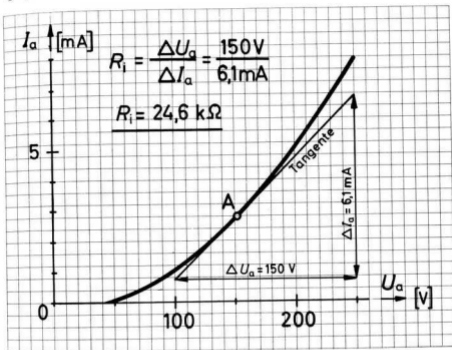


Bild 303

### Die Röhrgleichung von Barkhausen

Die Röhrgleichung von Barkhausen zeigt den Zusammenhang der Röhrendaten.

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

Diese Gleichung ist nur dann erfüllt, wenn sich alle Röhrendaten auf den *gleichen Arbeitspunkt* der Röhre beziehen. Unter Arbeitspunkt versteht man jenen Betriebspunkt der Triode, der durch Anoden- und Gitterspannung bestimmt ist.

Die Richtigkeit der Barkhausengleichung lässt sich leicht beweisen, indem für  $S$ ,  $D$  und  $R_i$  die Bestimmungswerte eingesetzt werden

#### 4. Beispiel

Aus den Kennlinien der Röhre EC 92 sollen für einen bestimmten Arbeitspunkt die statischen Daten ermittelt werden.

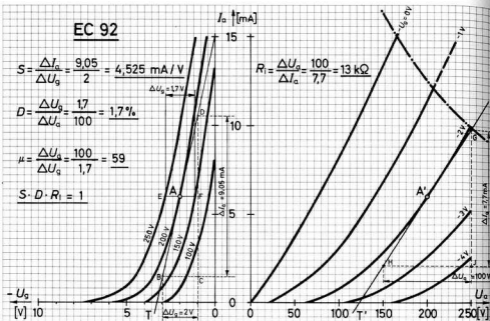


Bild 304

Vorgehen:

- Schritt: Festlegen des Arbeitspunktes
  - Der Arbeitspunkt soll möglichst auf dem linearen Teil der  $I_a - U_g$ -Kennlinie liegen.
  - Der Arbeitspunkt  $U_a = 200$  V,  $U_g = -2$  V erfüllt diese Bedingung. Durch Projektion auf die  $I_a - U_a$ -Kennlinie ( $U_g = -2$  V) wird A' festgelegt.
- Schritt: Ermitteln der Steilheit S
  - Durch den Arbeitspunkt A wird an die  $I_a - U_g$ -Kennlinie von 200 Volt die Tangente gelegt.
  - Von der  $U_g$ -Achse werden durch die Werte  $-3$  Volt und  $-1$  Volt senkrechte Projektionsgeraden bis zu den Schnittpunkten B und D auf der Tangente T nach oben gezogen. Die Strecke BC entspricht der Gitterspannungsänderung, die Strecke CD stellt die Anodenstromänderung dar.

- Werte ablesen:

$$\Delta U_g = 2 \text{ V}$$

$$\Delta I_a = 9,05 \text{ mA}$$

- Grundformel für S anschreiben

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$S = \frac{9,05}{2} \quad \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$S = 4,525 \text{ mA/V}$$

### 3. Schritt: Bestimmen des Durchgriffes D

- Waagrechte durch den Arbeitspunkt A ziehen. Die Strecke EF entspricht der Gitterspannungsänderung. Die Anodenspannungsänderung ergibt sich aus der Differenz zwischen den beiden Anodenspannungskennlinien für 150 V und 250 V.

- Werte ablesen

$$\Delta U_g = 1,7 \text{ V}$$

$$\Delta U_a = 100 \text{ V}$$

- Grundformel für D anschreiben

$$D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \cdot 100$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$D = \frac{1,7}{100} \cdot 100 \quad \frac{\text{V}}{\text{V}} \cdot \%$$

$$D = 1,7\%$$

### 4. Schritt: Berechnung des Verstärkungsfaktors μ

- Grundformel für μ anschreiben

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\mu = \frac{100}{1,7} \quad \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

$$\mu = 59$$

### 5. Schritt: Bestimmen des Innenwiderstandes Ri

- Tangente T' durch den Arbeitspunkt A' an die Ia - Ua - Kennlinie legen.  
- Von der Ua - Achse aus werden durch die Werte 150 V und 250 V zwei senkrechte Projektionsgeraden bis zu den Schnittpunkten G und H auf der Tangente T' gezogen. Durch den Schnittpunkt H wird eine Waagrechte gelegt. Die Strecke HJ entspricht der Anodenspannungsänderung, die Strecke JG ergibt die dazugehörige Anodenstromänderung.

- Werte herauslesen

$$\Delta U_a = 100 \text{ V}$$

$$\Delta I_a = 7,7 \text{ mA}$$

- Grundformel für Ri anschreiben

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

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_i = \frac{100}{7,7 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_i = 13 \text{ k}\Omega$$

## 6. Schritt: Kontrolle der Resultate mit der Röhrenformel von Barkhausen.

- Barkhausenformel anschreiben  $S \cdot D \cdot R_i = 1$
  - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen  $4,525 \cdot 10^{-3} \cdot 1,7 \cdot 10^{-2} \cdot 13 \cdot 10^3 = 1$
- $$[SDR_i] = \frac{A}{V} \cdot \frac{V}{V} \cdot \frac{V}{A} = 1$$

## 5. Das Wesentliche

Das Elektrodensystem der Triode besteht aus Katode, Gitter und Anode. Der Anodenstrom lässt sich durch die Spannung am Gitter leistungslos steuern.

Die Steuerwirkung des Gitters wird graphisch mit der  $I_a - U_g$ -Kennlinienschar dargestellt. Jede  $I_a - U_g$ -Kennlinie gilt für einen bestimmten konstanten Wert der Anodenspannung.

Der Einfluss der Anodenspannung ist aus der  $I_a - U_a$ -Kennlinie ersichtlich. Jeder  $I_a - U_a$ -Kennlinie ist eine bestimmte Gitterspannung zugeordnet.

Aus den Kennlinien lassen sich die Röhrendaten graphisch ermitteln.

Die Steilheit der Röhre ist ein Mass für die Steuerwirkung des Gitters auf den Anodenstrom. Sie entspricht der Steilheit der Tangente durch den Arbeitspunkt auf der  $I_a - U_g$ -Kennlinie. Die Steilheit errechnet sich aus dem Quotienten von Anodenstromänderung zu Gitterspannungsänderung.

Der Durchgriff gibt an, wieviel mal kleiner die Steuerwirkung der Anodenspannung auf den Anodenstrom ist als jene der Gitterspannung. Je näher die  $I_a - U_g$ -Kennlinien beieinander liegen, desto geringer ist der Durchgriff. Er errechnet sich aus dem Quotienten von Gitterspannungsänderung zu Anodenspannungsänderung für gleichbleibenden Anodenstrom.

Der Verstärkungsfaktor gibt die Leerlaufverstärkung der Röhre an. Er entspricht dem Reziprokwert des Durchgriffes.

Der Innenwiderstand ist der Wechselstromwiderstand der Röhre. Sein Wert ist durch die Steilheit der Tangente im Arbeitspunkt auf der  $I_a - U_a$ -Kennlinie bestimmt. Er errechnet sich aus dem Quotienten von Anodenspannungsänderung zu Anodenstromänderung.

Die Röhrgleichung von Barkhausen zeigt uns, dass das Produkt aus Steilheit, Innenwiderstand und Durchgriff einer Röhre für einen Arbeitspunkt immer Eins ergibt.

## 6. Repetitionsaufgaben (Lösungen Seite 483)

- Warum wird bei Trioden nur der negative Teil der  $I_a - U_g$ -Kennlinie zur Steuerung des Anodenstromes verwendet?
- Ermitteln Sie die Steilheit der Triode nach Bild 305 für eine Gittervorspannung von  $-1$  V.

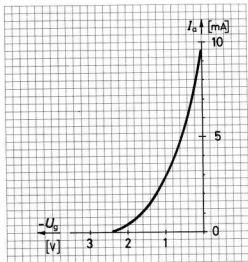


Bild 305

- c) Definieren Sie den Begriff der «Steilheit».  
 d) Bestimmen Sie den Durchgriff der Röhre nach Bild 306 für eine Gittervorspannung von  $-2$  V auf der 150 V-Kennlinie.

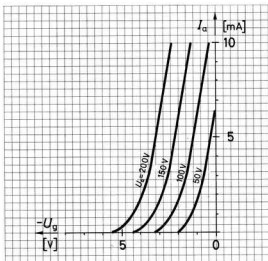


Bild 306

- e) Wie gross ist der Verstärkungsfaktor der Röhre aus Aufgabe d)?  
 f) Ermitteln Sie aus der Kennlinie nach Bild 307 den Innenwiderstand der Röhre für eine Anodenspannung von 150 V.

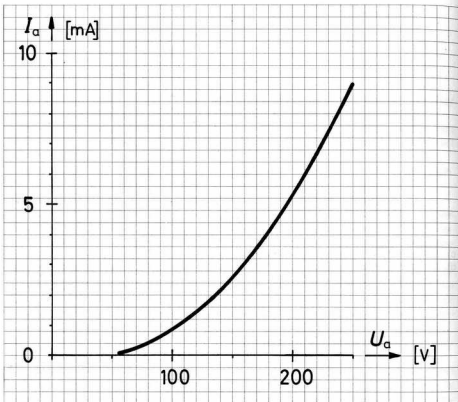


Bild 307

- g) Der Verstärkungsfaktor einer Triode beträgt 40, der Innenwiderstand misst  $15 \text{ k}\Omega$ . Wie gross ist die Steilheit der Röhre?  
 h) Beweisen Sie die Richtigkeit der Röhrgleichung von Barkhausen.  
 i) Nennen Sie die Hauptanwendungsgebiete von Trioden.

### III. Die Pentode

#### 1. Einführung

Die Triode weist einige Nachteile auf. So wirkt sich vor allem der grosse Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom in Verstärkerschaltungen ungünstig aus. Die grosse Kapazität zwischen Anode und Gitter führt in Hochfrequenzverstärkern oft zur Entstehung unerwünschter Schwingungen. Mit der *Tetrode* wurde ein Röhrentyp entwickelt, der einen bedeutend kleineren Durchgriff, einen grösseren Innenwiderstand und eine viel kleinere Gitter-Anodenkapazität aufweist. Die Tetrode ist eine Röhre, bei welcher zwischen dem Steuergitter und der Anode ein weiteres Gitter angebracht wurde. Dieses *Schirmgitter* wird an eine positive Spannung gelegt, wodurch der Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom stark verringert wird. Die Tetrode weist jedoch im  $I_a - U_a$ -Kennlinienbild eine Einsattelung auf; innerhalb eines bestimmten Bereiches nimmt trotz steigender Anodenspannung der Anodenstrom ab. Es ergibt sich die Kennlinie nach Bild 308.

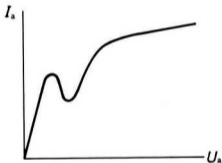


Bild 308

Dieser unerwünschte Kennlinienknick wurde bei der *Pentode* durch Einbau eines dritten Gitters zwischen Schirmgitter und Anode behoben. Dieses *Bremsgitter* – früher auch als *Fanggitter* bezeichnet – liegt meistens am gleichen Potential wie die Katode.

Die Pentode ist die am häufigsten verwendete Verstärkerröhre. Dank ihren guten Verstärkereigenschaften wird sie zur Verstärkung von Nieder- und Hochfrequenzsignalen verwendet.

In Spezialgeräten ist die Pentode als Impulserzeuger, Impulsverstärker und Gleichspannungsverstärker anzutreffen. Ihre Eigenschaften erlauben auch den Einsatz in Mischstufen.



## 2. Was wissen Sie schon über die Pentode?

(Lösung Seite 486)

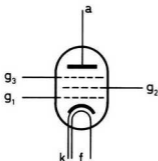
- Wieviele Elektroden hat die Pentode?
- Welche Röhrendaten weichen bei der Pentode wesentlich von denjenigen der Triode ab?
- Welche Folgen zeigt der wesentlich kleinere Durchgriff der Pentode in bezug auf die Verstärkung?
- Wie muss das  $I_a - U_a$ -Kennlinienbild aussehen, da der Innenwiderstand der Pentode wesentlich grösser ist als derjenige der Triode?
- Wie beeinflusst der erheblich kleinere Durchgriff der Pentode die  $I_a - U_g$ -Kennlinienschar?

## 3. Die Pentode

### a) Definition

Die *Pentode* ist eine Mehrgitterröhre. Sie hat fünf Elektroden: Katode, Steuergitter ( $g_1$ ), Schirmgitter ( $g_2$ ) Bremsgitter ( $g_3$ ) und Anode. Dank dem kleinen Anodendurchgriff und dem grossen Innenwiderstand weist die Pentode sehr gute Verstärkereigenschaften auf.

### b) Symbol



- a = Anode
- k = Katode
- f = Heizung
- $g_1$  = Steuergitter
- $g_2$  = Schirmgitter
- $g_3$  = Bremsgitter

Bild 309

### c) Aufbau

Der Unterschied zwischen dem Aufbau der Triode und demjenigen der Pentode besteht darin, dass bei der Pentode zwischen dem Steuergitter und der Anode noch das Schirmgitter und das Bremsgitter angebracht sind. Bild 310 zeigt die Anordnung der Elektroden einer Pentode.

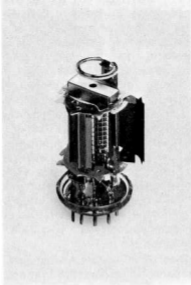


Bild 310

#### d) Wirkungsweise

Wird zwischen das Steuergitter und die Anode einer Triode ein weiteres Gitter – das Schirmgitter – eingefügt, so entsteht ein neuer Röhrentyp, die *Tetrode*. Das Schirmgitter wird an ein konstantes positives Potential gelegt. Diese Massnahme vermindert die Rückwirkung der Anodenspannung auf den Anodenstrom beträchtlich. Das Schirmgitter übernimmt für den Katodenstrom eine ähnliche Funktion wie die Anode, es beschleunigt die Elektronen. Ein Teil der Elektronen des Katodenstromes prallen auf die Maschen des Schirmgitters und verursachen den Schirmgitterstrom. Der weitaus grösste Teil fliegt jedoch zwischen den Schirmgittermaschen hindurch und landet auf der Anode, er wird als Anodenstrom wirksam. Die Anodenspannung kann in weiten Grenzen verändert werden, ohne dass sich dabei der Anodenstrom merklich ändert. Das heisst in der Formelsprache, dass gegenüber der Triode der Anodendurchgriff wesentlich herabgesetzt und der Innenwiderstand beträchtlich erhöht ist. Gleichzeitig verringert sich die Gitter-Anodenkapazität, da das Schirmgitter das Steuergitter von den elektrischen Feldlinien der Anode abschirmt.

Die  $I_a - U_a$ -Kennlinie der Tetrode weist den unerwünschten Knick auf. Dieser wird durch den *Sekundärelektroneneffekt* verursacht. Bei genügender Anodenspannung ist die Energie der Elektronen, die auf die Anode auftreffen, so gross, dass sie aus dem Anodenblech weitere Elektronen – die sogenann-

ten *Sekundärelektronen* – ausschlagen. Ist nun die Schirmgitterspannung höher als die Anodenspannung, so werden diese Sekundärelektronen vom Schirmgitter angezogen, und fließen über dieses ab. Der Anodenstrom wird um diesen *Sekundärelektronenstrom* kleiner, er sinkt trotz steigender Anodenspannung ab. Im Bereich des Kennlinienknicks wirkt die Röhre zwischen Katode und Anode als *negativer Widerstand*.

Dieser unerwünschte Effekt kann durch Einbau eines Gitters zwischen Schirmgitter und Anode behoben werden. Dieses *Bremsgitter* wird in vielen Röhren direkt mit der Katode verbunden. Wo dies nicht der Fall ist, muss es auf Nullpotential gelegt werden. Die Sekundärelektronen werden dank dem negativen Potential, das das Bremsgitter gegenüber der Anode aufweist, gebremst und zur Anode zurückgedrängt, was ein Verschwinden des Kennlinienknicks bewirkt. Durch die abschirmende Wirkung des Bremsgitters wird die Gitter-Anodenkapazität der Pentode noch kleiner als diejenige der Tetrode, gleichzeitig sinkt der Anodendurchgriff noch weiter ab. Die Pentode besitzt beinahe ideale Verstärkereigenschaften. Die technischen Daten einer Pentode werden mit einer Schaltung nach Bild 311 aufgenommen. Bild 312 zeigt die Versuchsanordnung.

Die erste Messung zeigt den Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom. Die Schirmgitterspannung wird auf 200 V konstant gehalten, die Gittervorspannung wird so gewählt, dass sich für eine Anodenspannung von 200 V ein Anodenstrom von 5 mA ergibt. Die Anodenspannung wird nun kontinuierlich verändert, wobei der Anodenstrom beobachtet wird. Im Bereich von 100 V bis 350 V Anodenspannung ändert sich der Anodenstrom praktisch nicht. Für Anodenspannungen unter 100 V sinkt er langsam ab, für Spannungen unter

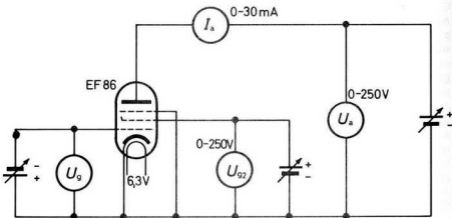


Bild 311

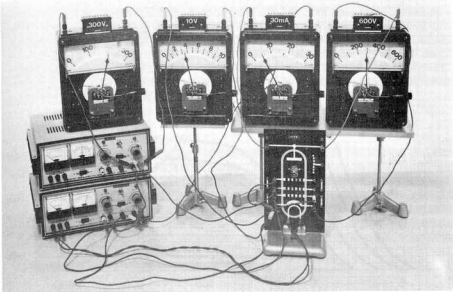


Bild 312

50 V ist die Stromabnahme ausgeprägter. Wir stellen fest, dass der Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom innerhalb eines grossen Bereiches unbedeutend ist.

Mit einer zweiten Messung soll der Einfluss der Schirmgitterspannung auf den Anodenstrom untersucht werden. Die Anodenspannung wird auf 250 V einreguliert. Die Schirmgitterspannung beträgt zu Beginn der Messung 140 V, die Gitterspannung wird so gewählt, dass sich wiederum ein Anodenstrom von 5 mA einstellt. Wird nun die Schirmgitterspannung vergrössert und verkleinert, so folgt der Anodenstrom dieser Spannungsänderung. *Der Einfluss der Schirmgitterspannung auf den Anodenstrom ist gross.*

Die dritte Messung dient der Aufnahme der  $I_a - U_g$ -Kennlinien. Die Anodenspannung wird für die ganze Messreihe konstant gehalten. Es werden die Kurven für verschiedene Schirmgitterspannungen aufgenommen. Die Messresultate sind in Bild 313 graphisch festgehalten.

Die vierte Messreihe ergibt die  $I_a - U_a$ -Kennlinien bei fester Schirmgitterspannung für verschiedene Gittervorspannungen. Die Messwerte sind ebenfalls in Bild 313 dargestellt.

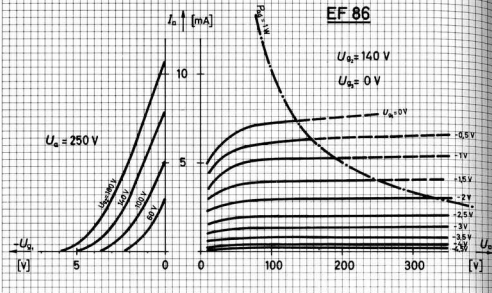


Bild 313

### e) Beurteilung der Kennlinienbilder

Das  $I_a - U_g$ -Kennlinienbild ähnelt demjenigen der Triode, mit dem Unterschied, dass als Parameter die Schirmgitterspannung gewählt wurde. Als *Parameter* bezeichnet man eine veränderliche Grösse, die vorübergehend konstant gehalten wird. Wollte man diese Kennlinien für verschiedene Anodenspannungen aufnehmen, so würden sich die Kurven beinahe decken, da der Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom sehr gering ist. Die Kennlinien zeigen die grosse Beeinflussung des Anodenstromes durch die Schirmgitterspannung. Die Schirmgitterspannung von Pentoden wird deshalb im praktischen Einsatz der Röhre möglichst konstant gehalten. Der Arbeitspunkt ist durch die Werte der Gittervorspannung, der Schirmgitterspannung und – in beschränktem Mass – der Anodenspannung bestimmt.

Im  $I_a - U_a$ -Kennlinienbild fällt der flache Verlauf der Kurven auf. Je flacher diese Kennlinien liegen, desto grösser ist der Innenwiderstand der Röhre.

### f) Kennwerte der Pentode

Von einer Pentode interessieren für einen bestimmten Arbeitspunkt nur die Steilheit und der Innenwiderstand. Der Durchgriff wird meistens nicht ange-

geben, da er sehr klein ist und das Verhalten der Röhre durch Steilheit und Innenwiderstand ausreichend gekennzeichnet ist. Der Durchgriff lässt sich aber ohne weiteres aus der Röhrengleichung, die auch für die Pentode gilt, berechnen. Die Bestimmung der Röhrendaten mit Hilfe der Kennlinien erfolgt nach den gleichen Methoden wie für die Triode. Die Barkhausenformel zeigt, dass ein grosser Innenwiderstand bei kleinem Durchgriff eine grosse Verstärkung ergeben muss. Die mit Pentoden erreichbaren Verstärkungen liegen weit über denjenigen der Triode.

### g) Die Regelpentode

Die Lautstärke eines Empfängers soll unabhängig von der Feldstärke des einfallenden Signals sein. Die Verstärkung des Gerätes muss sich automatisch dem Eingangssignal anpassen. Bei starkem Empfangssignal muss die Verstärkung kleiner sein, als beim Empfang schwacher Stationen. Die Verstärkung der einzelnen Stufen des Empfängers muss elektronisch regelbar sein. Zu diesem Zweck wurde die Regelpentode entwickelt. Bei unregelmässiger Ganghöhe der Windungen des Steuergitters nach Bild 314 erhält man eine  $I_a - U_g$ -Kennlinie wie sie ebenfalls auf Bild 314 gezeigt ist.

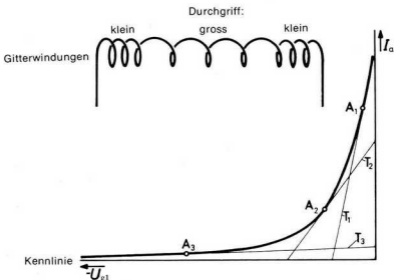


Bild 314

Die erzielbare Verstärkung wird abhängig von der Lage des Arbeitspunktes und somit von der Gittervorspannung. Für eine kleine Gittervorspannung wird dank der grösseren Steilheit die erreichbare Stufenverstärkung grösser als für eine grosse Vorspannung, da für höhere Werte der Gitterspannung die

Steilheit kleiner wird. In der Praxis werden Steilheitsänderungen von 1:100 erreicht, mit Spezialröhren lässt sich dieses Verhältnis noch wesentlich erhöhen. Die Regelung eines Verstärkers mit Regelröhren erfolgt durch Zuführen einer vom Eingangssignal abhängigen veränderlichen negativen Regelspannung auf das Steuergitter.

#### 4. Beispiel

Aus den Kennlinien der Röhre EF 86 (NF-Pentode) sollen für einen bestimmten Arbeitspunkt die Steilheit und der Innenwiderstand ermittelt werden.

*Vorgehen:*

1. Schritt: Festlegen des Arbeitspunktes (Bild 315).

Der Arbeitspunkt wird auf der  $I_a-U_{g1}$ -Kennlinie für eine Schirmgitterspannung von 140 V und eine Anodenspannung von 250 V bei einer Gittervorspannung von -2 V eingezeichnet. Durch Projektion auf die  $I_a-U_a$ -Kennlinie für eine Vorspannung von -2 V ergibt sich der Arbeitspunkt A' im  $I_a-U_a$ -Kennlinienfeld.

2. Schritt: Ermitteln der Steilheit.

- Durch den Arbeitspunkt A wird an die  $I_a-U_{g1}$ -Kennlinie die Tangente T gelegt. Diese wird bis zu den Schnittpunkten B und D auf der  $I_a$ - und  $U_{g1}$ -Achse in das Diagramm eingezeichnet. Die Strecke  $\overline{BC}$  entspricht der Gitterspannungsänderung, die Strecke  $\overline{CD}$  gibt die Anodenstromänderung wieder.

- Werte herauslesen:

$$\Delta U_{g1} = 3,5 \text{ V}; \Delta I_a = 7 \text{ mA}$$

- Werte in die Formel für die Steilheit einsetzen und ausrechnen

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{g1}} \frac{U_a}{U_{g2,3}} = \text{konstant}$$

$$S = \frac{7}{3,5} \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$S = 2 \text{ mA/V}$$

3. Schritt: Bestimmen des Innenwiderstandes

- Durch den Arbeitspunkt A' wird die Tangente T' an die  $I_a-U_a$ -Kennlinie für  $U_{g1} = 2 \text{ V}$  gelegt. Diese wird bis zum Schnittpunkte G auf der  $I_a$ -Achse und zum Schnittpunkt auf der Projektionsgeraden durch den Anodenspannungswert 300 V verlängert.

- Horizontale durch den Punkt F bis zum Schnittpunkt E auf der  $I_a$ -Achse ziehen.

- Die Strecke  $\overline{EF}$  entspricht der Anodenspannungsänderung, während die Strecke  $\overline{EG}$  die Anodenstromänderung darstellt.

- Werte herauslesen:

$$\Delta I'_a = 0,12 \text{ mA}, \Delta U_a = 300 \text{ V}$$

- Werte in die Formel für den Innenwiderstand einsetzen und ausrechnen.

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I'_a} \quad U_{g1,2,3} = \text{konstant}$$

$$R_i = \frac{300}{0,12} \quad \frac{\text{V}}{\text{mA}}$$

$$R_i = 2500 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = 2,5 \text{ M}\Omega$$

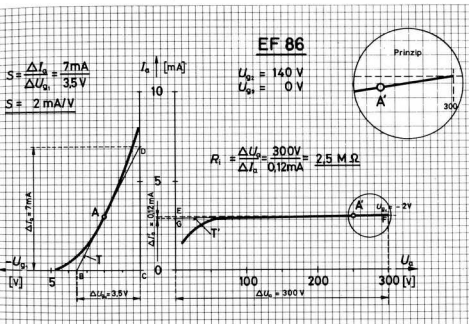


Bild 315

## 5. Das Wesentliche

Die Pentode weist 5 Elektroden auf: Katode, Steuergitter, Schirmgitter, Bremsgitter und Anode.

Das Schirmgitter setzt den Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom stark herab, wodurch der Durchgriff gegenüber der Triode wesentlich



kleiner wird und der Innenwiderstand gleichzeitig stark ansteigt. Der Einfluss der Schirmgitterspannung auf den Anodenstrom ist gross. Die Schirmgitterspannung wird deshalb im Betrieb konstant gehalten.

Das Bremsgitter bremst die Sekundärelektronen der Anode ab und zwingt sie zur Rückkehr zur Anode.

Regelpentoden weisen eine stark gekrümmte  $I_a-U_g$ -Kennlinie auf. Die Steilheit ist ausgeprägt von der Lage des Arbeitspunktes abhängig. Durch Änderung der Gittervorspannung wird die Steilheit und mit ihr die Verstärkung der Röhre geregelt.

Der kleine Durchgriff und der hohe Innenwiderstand machen die Pentode zum idealen Verstärkerelement.

Schirmgitter und Bremsgitter bewirken eine starke Reduktion der schädlichen Kapazität zwischen Gitter und Anode. Diese wird für die Pentode so klein, dass sie in den meisten Fällen vernachlässigt werden kann.

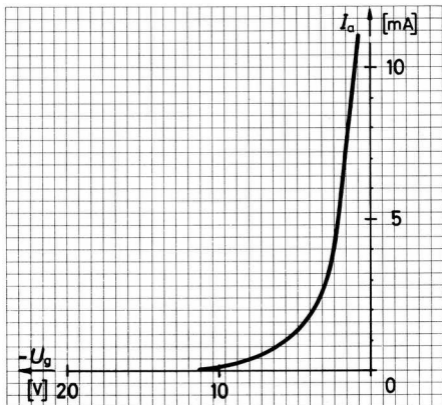


Bild 316

## 6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 487)

- a) Welche Vorteile weist die Pentode gegenüber der Triode auf?
- b) Warum muss im Betrieb die Schirmgitterspannung der Pentode konstant gehalten werden?
- c) Warum ist der Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom bei der Pentode gering?
- d) Auf welchem Potential liegt normalerweise das Bremsgitter?
- e) Welches ist die Aufgabe des Bremsgitters?
- f) Skizzieren Sie die  $I_a-U_g$ -Kennlinie einer Regelpentode und erklären Sie stichwortartig die Funktionsweise dieser Röhre.
- g) Wo werden Regelpentoden hauptsächlich eingesetzt?
- h) Warum ist die Pentode als Verstärkerröhre besonders gut geeignet?
- i) Bestimmen Sie für die Regelpentode, deren  $I_a-U_g$ -Kennlinie Bild 316 zeigt, für die Gittervorspannungen  $-2\text{ V}$  und  $-8\text{ V}$  die Steilheit  $S_1$  und  $S_2$ .
- k) Skizzieren Sie den Verlauf der  $I_a-U_a$ -Kennlinienschar einer Pentode und erläutern Sie deren Einfluss auf die Röhrendaten.

# IV. Die Leistungspentode

## 1. Einführung

Die Leistungspentode wird oft in Niederfrequenzverstärkern eingesetzt. Der Niederfrequenzverstärker hat eine bestimmte Niederfrequenzleistung abzugeben. Als Endröhre in einem Hochfrequenzverstärker eines Senders erzeugt die Leistungspentode die geforderte Senderleistung. Um eine Wechselstromleistung erzeugen zu können, benötigt eine Endröhre ausser einer genügend hohen Anodenspannung auch einen entsprechenden Anodenstrom. Die abzugebende Leistung bestimmt deshalb die Grösse der Röhre. Je höher Anodenspannung und Anodenstrom gewählt werden, desto grösser müssen Katode und Anode gebaut sein. Die prinzipielle Funktionsweise einer Leistungspentode entspricht derjenigen einer gewöhnlichen Pentode, einzig die Röhrendaten weisen andere Werte auf.

## 2. Was wissen Sie schon über Leistungspentoden?

(Lösung Seite 489)

- Worin unterscheiden sich die Röhrendaten der Leistungspentoden von den Daten einer gewöhnlichen Pentode?
- Besteht zwischen dem Verlauf der  $I_a-U_a$ -Kennlinien der Leistungspentode und denjenigen der normalen Pentode ein Unterschied?
- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Anodenverlustleistung»?
- Warum benötigen Endröhren eine grössere Heizleistung als gewöhnliche Verstärkeröhren?
- Warum werden praktisch keine Trioden mehr als Endröhren verwendet?
- Warum spielt der Begriff der Anodenverlustleistung für die Endröhre eine besonders wichtige Rolle?

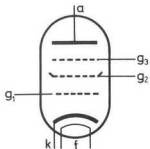
## 3. Die Leistungspentode

### a) Definition

Die *Leistungspentode* ist eine Verstärkeröhre, welche als letzte Röhre in einem Verstärker zur Leistungsverstärkung benützt wird. Infolge der höheren Anodenspannung und der grösseren Anodenströme unterscheidet sie sich konstruktiv von Spannungsverstärkeröhren.

### b) Symbol

Das Symbol der Leistungsverstärkeröhre unterscheidet sich nicht von demjenigen der Spannungsverstärkeröhre. In Schaltbildern wird die Unterscheidung zwischen Leistungs- und Spannungsverstärkeröhre mit der Typenbezeichnung vorgenommen.



- a = Anode
- $g_3$  = Bremsgitter
- $g_2$  = Schirmgitter
- $g_1$  = Steuergitter
- k = Katode
- f = Heizung

Bild 317

### c) Aufbau

Die Leistungspentode ist im Prinzip gleich aufgebaut wie die gewöhnliche Pentode. Die Grösse der Elektroden wird durch die Anodenverlustleistung der Röhre bestimmt. Je höher diese gewählt wird, desto grösser müssen die Elektroden gebaut werden. Bild 318 zeigt den Aufbau einer Leistungspentode für Niederfrequenzendstufen, Bild 319 denjenigen einer Endröhre für einen Sender mittlerer Leistung.

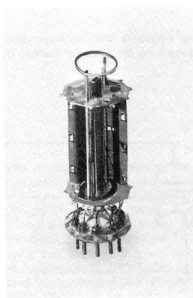


Bild 318

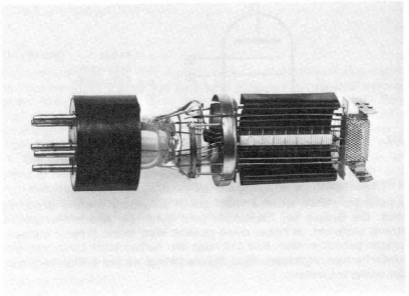


Bild 319

#### d) Wirkungsweise

Das Arbeitsverhalten der Endröhre wird im folgenden Versuch gezeigt. Bild 320 zeigt die Versuchsschaltung, Bild 321 den Aufbau des Versuches.

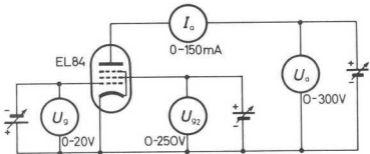


Bild 320

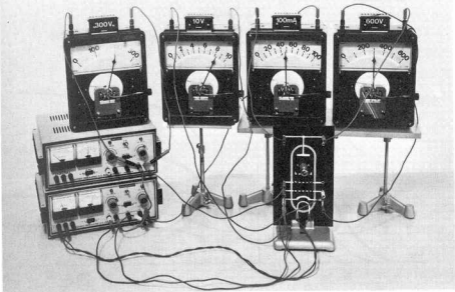


Bild 321

Mit der ersten Messreihe werden die Kennlinien des  $I_a-U_a$ -Kennlinienfeldes für verschiedene Gittervorspannungen bei einer festen Schirmgitterspannung von 250 V ermittelt. Der Verlauf der Kennlinien nach Bild 322 ist demjenigen einer gewöhnlichen Verstärkerpentode ähnlich. Der flache Kurvenverlauf lässt auf einen grossen Innenwiderstand schliessen; die Anodenspannung hat nur einen geringen Einfluss auf den Anodenstrom. Mit der zweiten Messreihe werden die Steuerwirkung des Steuergitters und der Einfluss der Schirmgitterspannung auf den Anodenstrom untersucht. Auch diese Messresultate ergeben einen ähnlichen Kurvenverlauf wie für die Spannungsverstärkeröhre. Die Kennlinien lassen auch hier den grossen Einfluss der Schirmgitterspannung auf den Anodenstrom erkennen.

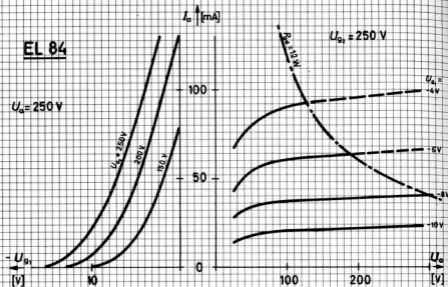


Bild 322

#### e) Kenndaten der Leistungspentode

Steilheit und Innenwiderstand sind auch für die Leistungspentode zwei wichtige Größen, zusätzlich interessiert die höchstzulässige Anodenverlustleistung, da die abgegebene Wechselstromleistung durch diese Anodenverlustleistung bestimmt wird.

#### 4. Beispiel

Aus den Kennlinien der Endpentode EL 84 sollen für einen bestimmten Arbeitspunkt Steilheit und Innenwiderstand ermittelt werden.

*Vorgehen:*

1. Schritt: Festlegen des Arbeitspunktes

Der Arbeitspunkt muss sich unterhalb der *Leistungshyperbel* befinden, damit die Anodenverlustleistung nicht überschritten wird. Um eine möglichst hohe

# EL 84

$$U_{a0} = 250 \text{ V}$$

$$U_{g0} = 250 \text{ V}$$

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{94 \text{ mA}}{8 \text{ V}}$$

$$S = 11,75 \text{ mA/V}$$

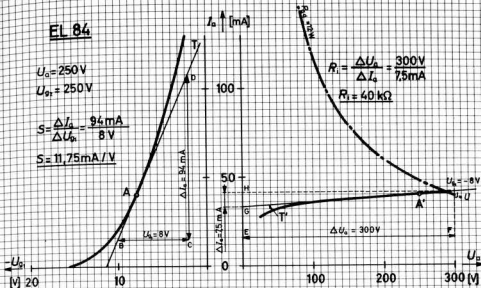


Bild 323

Wechselstromleistung zu erhalten, muss die Anodenverlustleistung bis an die Grenze beansprucht werden. Für unser Beispiel sind Anoden- und Schirmgitterspannung mit je 250 V vorgegeben. Wir wählen den Arbeitspunkt bei einer Gittervorspannung von -8 V und bleiben somit leicht unter der Leistungs-herbel.

## 2. Schritt: Ermitteln der Steilheit S

Die Steilheit S im Arbeitspunkt A wird graphisch mit Hilfe der Tangentenkonstruktion bestimmt. Die Strecke  $\overline{BC}$  entspricht der Gitterspannungsänderung, die Anodenstromänderung wird durch die Strecke  $\overline{CD}$  dargestellt.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$$

$$S = \frac{94}{8} \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$S = 11,75 \text{ mA/V}$$



3. Schritt: Bestimmen des Innenwiderstandes  $R_i$   
 Der Innenwiderstand im Arbeitspunkt  $A'$  ist durch die Neigung der Tangente  $T'$  gegeben. Er entspricht dem Reziprokwert der Tangentensteilheit. Die Anodenspannungsänderung lässt sich aus der Strecke  $\overline{EF}$  und die Anodenstromänderung aus der Strecke  $\overline{GH}$  ablesen.

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad U_{g1,2,3} = \text{konstant}$$

$$R_i = \frac{300}{7,5 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{V}{A}$$

$$R_i = 40 \text{ k}\Omega$$

## 5. Das Wesentliche

Leistungsendröhren unterscheiden sich äusserlich von den Spannungsverstärkerendröhren durch ihre Grösse. Katode und Anode müssen grössere Oberflächen aufweisen, um die geforderten höheren Anodenströme und Anodenspannungen zu verarbeiten.

Der Kennlinienverlauf der Leistungsendpentode weist die gleiche Form auf wie derjenige der Spannungsverstärkerpentode.

Die grösseren Anodenströme bedingen einen kleineren Innenwiderstand.

Die Leistungsendpentode kann eine Wechselstromleistung abgeben, deren Grösse von der zulässigen Anodenverlustleistung und somit von den Dimensionen der Röhre abhängt.

Bei Leistungspentoden ist das Einhalten der maximal zulässigen Anodenverlustleistung besonders wichtig, da Überlastungen zu einer raschen Zerstörung der Röhre führen können.

## 6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 490)

- Warum ist der Innenwiderstand von Leistungspentoden bedeutend kleiner als derjenige von Spannungsverstärkerpentoden?
- Warum muss für die Leistungsendröhre der Arbeitspunkt unterhalb oder höchstens auf der Leistungshyperbel gewählt werden?
- Wie wird die Leistungshyperbel zeichnerisch ermittelt?
- Definieren Sie den Ausdruck «Anodenverlustleistung».
- Welches ist die Hauptaufgabe der Leistungspentode?
- Nennen Sie zwei Anwendungsgebiete für Leistungspentoden.

# V. Die Mischröhre

## 1. Einführung

In Sende- und Empfangsschaltungen müssen oft zwei verschiedene Frequenzen miteinander gemischt werden. Eine Mischung kann nur an einem nicht-linearen Element erfolgen. Da Röhrenkennlinien gekrümmt verlaufen, eignen sich Röhren als Mischstufen. In den gebräuchlichsten Schaltungen sind deshalb Röhren oder Transistoren als Mischer anzutreffen. Als Mischröhren werden meistens Mehrgitterröhren verwendet.

## 2. Was wissen Sie schon über Mischröhren?

(Lösung Seite 491)

- Kann eine Triode auch als Mischröhre verwendet werden?
- Kennen Sie ausser der Tetrode und der Pentode andere Mehrgitterröhren?
- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Verbundröhre»?
- Welche Möglichkeiten bietet eine Röhre mit mehreren Steuergittern?
- Kennen Sie das Funktionsprinzip einer Mischstufe?

## 3. Grundsätzliches über Mischstufen

### a) Allgemeines

Das Verständnis der Funktionsweise von Mischröhren setzt die Kenntnis der Grundlagen über die Mischung voraus. Die vielseitigen Probleme der Mischung werden in einem späteren Kapitel eingehend behandelt. Es sollen hier nur die unbedingt notwendigen Grundlagen vermittelt werden. Zu diesem Zweck wird der Mischvorgang isoliert und losgelöst von der Schaltungstechnik behandelt.

### b) Der Mischvorgang

Werden zwei Signale mit verschiedenen Frequenzen an ein Element mit *nicht-linearer Kennlinie* gelegt, so erfolgt eine *Mischung* dieser Signale. Es entstehen in grosser Anzahl Wechselspannungen mit neuen Frequenzen. Von diesen Mischprodukten treten die beiden zugeführten Frequenzen sowie die Summe und die Differenz dieser beiden Signale besonders stark in Erscheinung. Bild 324 zeigt rein schematisch den Mischvorgang.

(Gelangt zwei Signale auf ein Element mit *linearer Kennlinie*, so entstehen keine neuen Frequenzen, sondern die Signale überlagern sich in Form einer *Schwebung*.)

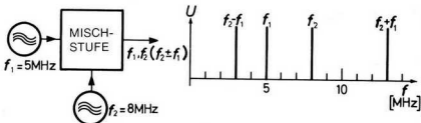


Bild 324

Unter Zuhilfenahme geeigneter Filter lässt sich die Summe oder die Differenz der beiden zugeführten Frequenzen am Ausgang der Mischstufe herausziehen. Die Amplitudenverhältnisse am Ausgang der Mischstufe sind stark von der Art der verwendeten Mischstufe abhängig. Mehrgitterröhren eignen sich besonders gut als Mischstufen, da jedes Eingangssignal auf ein separates Gitter geführt werden kann. Die Mischung kommt an der nichtlinearen Röhrenkennlinie zustande.

### c) Die Mischstufe im Empfänger

Das Funktionsprinzip des *Überlagerungsempfängers* wird in einem späteren Kapitel behandelt. Wir werden uns kurz mit der Mischstufe befassen, da die Kenntnis des Grundprinzips für das Verständnis der Mischröhre erforderlich ist. Die Mischstufe ist ein Teil des Überlagerungsempfängers, sie ist auch im einfachsten Empfängertyp anzutreffen. Fast alle Empfänger arbeiten heute nach dem Überlagerungsprinzip, so dass sich in jedem Empfangsgerät eine oder mehrere Mischstufen befinden.

Im Überlagerungsempfänger wird das ankommende Empfangssignal mit einem *Oszillatorsignal* gemischt. Das Oszillatorsignal wird im *Oszillator* erzeugt. Die Frequenz des Oszillatorsignals wird so gewählt, dass das Mischprodukt – die sogenannte *Zwischenfrequenz* – immer den gleichen Frequenzwert aufweist. Der Oszillator ist ein kleiner Sender. Er besteht aus einer Röhre oder einem Transistor, der als Generator geschaltet ist. Bild 325 zeigt blockschaltbildmässig die Baugruppen eines Überlagerungsempfängers, die am Mischvorgang beteiligt sind.

Das Eingangssignal  $f_e$  kommt direkt von der Antenne oder von einem vorgeschalteten Hochfrequenzverstärker auf den Eingang der Mischstufe. Der Oszillator erzeugt das Oszillatorsignal  $f_o$  und speist damit den zweiten Eingang der Mischstufe, an deren Ausgang die bekannten Mischprodukte entstehen. Aus diesen wird die Differenz zwischen Oszillatorfrequenz und Empfangsfrequenz mittels eines Bandfilters herausgefiltert und als Zwischenfrequenz  $f_z$  im nachfolgenden *Zwischenfrequenzverstärker* weiterverstärkt.

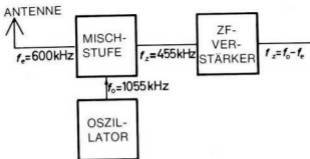


Bild 325

#### d) Daten der Mischröhren

##### Die Mischsteilheit $S_c$

In Mehrgitterröhren wird der Anodenstrom durch zwei Gitter gesteuert. Für jedes Gitter kann die Steilheit angegeben werden. Diese Steilheitsangaben sind jedoch nicht interessant, es interessiert die Steilheit der Stufe als Ganzes. Diese Steilheit heisst *Mischsteilheit*  $S_c$ . Sie entspricht dem Quotienten aus der Amplitude des Zwischenfrequenzstromes zur Amplitude der Hochfrequenzeingangsspannung.

$$S_c = \frac{I_z}{U_{g1}} \quad \begin{array}{l} S_c = \text{Mischsteilheit} \\ I_z = \text{Zwischenfrequenzstrom} \\ U_{g1} = \text{Wechselspannung am ersten Steuergitter} \end{array}$$

##### Die Mischverstärkung $v_c$

Die Verstärkung der Mischstufe wird als *Mischverstärkung*  $v_c$  definiert. Sie entspricht dem Quotienten aus der Amplitude der Zwischenfrequenzspannung zur Amplitude der Hochfrequenzspannung am Eingang der Stufe.

$$v_c = \frac{U_z}{U_{g1}} \quad \begin{array}{l} v_c = \text{Mischverstärkung} \\ U_z = \text{Amplitude der Zwischenfrequenzspannung} \\ U_{g1} = \text{Amplitude der Wechselspannung am ersten Steuergitter} \end{array}$$

Mischsteilheit und Mischverstärkung sind von der Gittervorspannung am Gitter 1 und von der Amplitude des Oszillatorsignals abhängig.

## 4. Die Mischröhren

### a) Die Hexode

#### – Definition

Die Hexode ist eine Röhre mit sechs Elektroden, vier davon sind Gitter. Sie wird als Mischröhre oder als Regelröhre verwendet.

#### – Symbol

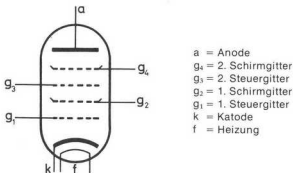


Bild 326

#### – Aufbau

Das Elektrodensystem der Hexode besteht aus einer Katode, vier Gittern und einer Anode. Zwei Gitter sind als Steuergitter ausgeführt, die beiden anderen dienen als Schirmgitter. Bild 327 zeigt den Aufbau einer Hexode.

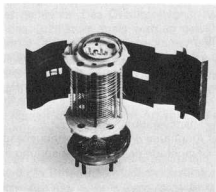


Bild 327

## – Wirkungsweise

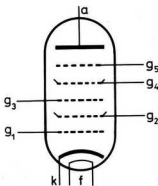
Die Hexode bietet die Möglichkeit, den Anodenstrom durch zwei verschiedene, gegeneinander abgeschirmte Gitter zu steuern. Gitter 1 und Gitter 3 dienen als Steuergitter; der Anodenstrom lässt sich durch die angelegten Spannungen beider Gitter beeinflussen. Gitter 2 und Gitter 4 wirken als Schirmgitter; sie liegen gegenüber der Katode an einem positiven Potential. Die beiden Steuergitter 1 und 3 werden durch das Schirmgitter 2 gegenseitig entkoppelt. Der gesamte Katodenstrom wird von der Spannung am ersten Steuergitter beeinflusst. Das zweite Steuergitter  $g_3$  reguliert den Strom, der zur Anode fliesst. Wird  $g_3$  stark negativ gemacht, so fliesst nur ein kleiner Teil des Katodenstromes zur Anode, der grössere Teil fliesst über  $g_2$  als Schirmgitterstrom ab. Wird die negative Vorspannung an  $g_3$  geringer, so wächst der Anodenstrom und der Strom über  $g_2$  nimmt ab. *Das zweite Steuergitter  $g_3$  verteilt den Katodenstrom auf die Anode und das erste Schirmgitter  $g_2$ .* Der Vorgang heisst deshalb *Verteilungssteuerung*. Das zweite Steuergitter  $g_3$  trägt den Namen *Verteilungsgitter*.

## b) Die Heptode

### – Definition

Die *Heptode* ist eine Röhre mit 7 Elektroden, wovon 5 Gitter sind. Sie wird als Mischröhre, als Regelröhre oder als Konverterröhre verwendet. Als Konverterröhre übt sie eine Doppelfunktion aus, sie erzeugt eine elektrische Schwingung – d. h. sie wirkt als Oszillator – und gleichzeitig dient sie als Mischstufe.

### – Symbol



- a = Anode
- g<sub>5</sub> = Bremsgitter
- g<sub>4</sub> = 2. Schirmgitter
- g<sub>3</sub> = 2. Steuergitter
- g<sub>2</sub> = 1. Schirmgitter
- g<sub>1</sub> = 1. Steuergitter
- k = Katode
- f = Heizung

Bild 328

## - Aufbau

Die Heptode ist gleich aufgebaut wie die Hexode. Sie verfügt jedoch im Gegensatz zu dieser zusätzlich über ein Bremsgitter, welches zwischen dem zweiten Schirmgitter und der Anode angebracht ist. Bild 329 zeigt eine Heptode.

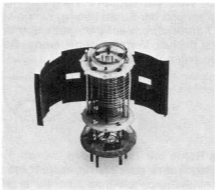


Bild 329

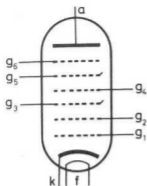
## - Wirkungsweise

Als Misch- oder Verstärkerröhre funktioniert die Heptode gleich wie die Hexode. Dank dem Bremsgitter werden die Sekundärelektronen zur Anode zurückgedrängt; das Röhrenrauschen wird dadurch herabgesetzt.

## c) Die Oktode

### - Definition

Die Oktode ist eine Röhre mit acht Elektroden, sechs davon sind Gitter. Sie wird als Misch- und Oszillatortröhre verwendet. Sie erfüllt die gleiche Funktion wie die Heptode als Konverter; sie erzeugt als Generator das Oszillatorsignal und wirkt gleichzeitig als Mischstufe.



- a = Anode
- $g_6$  = Bremsgitter
- $g_5$  = 2. Schirmgitter
- $g_4$  = Steuergitter
- $g_3$  = 1. Schirmgitter
- $g_2$  = Oszillatoranode
- $g_1$  = Oszillatorgitter
- k = Katode
- f = Heizung

Bild 330

- Aufbau

Die Oktode ist ähnlich aufgebaut wie die Heptode. Zusätzlich wurde zwischen dem ersten Steuergitter und dem ersten Schirmgitter ein weiteres Gitter angebracht. Dieses Gitter dient als Hilfsanode und wird zur Erzeugung des Oszillatorsignals verwendet. Bild 331 zeigt eine Oktode.

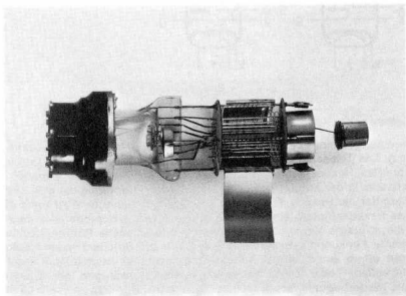


Bild 331



## – Wirkungsweise

Das erste und das zweite Gitter wirken wie eine Triode. Sie dienen zur Erzeugung des Oszillatorsignals. Die Gitter drei bis sechs wirken zusammen mit der Anode wie eine Heptode, sie werden zur Mischung verwendet.

## d) Verbundröhren

### – Definition

Verbundröhren sind eine besondere Art von Mischröhren. Eine gemeinsame Katode versorgt zwei Röhrensysteme. Für Mischstufen werden *Trioden-Hexoden* oder *Trioden-Heptoden* gebaut. Im Triodenteil wird die Oszillatorspannung erzeugt, der Hexoden- oder Heptodenteil arbeitet als Mischstufe.

### – Symbol

Bild 332 zeigt die Symbole für eine Triode-Hexode und eine Triode-Heptode.

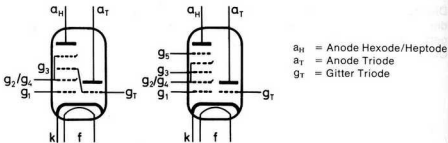


Bild 332

### – Aufbau

Über einer gemeinsamen Katode sind zwei verschiedene Röhrensysteme aufgebaut. Das Triodensystem arbeitet als Oszillator, es erzeugt das Oszillatorsignal. Das Hexoden- oder Heptodensystem übernimmt die Funktion der Mischstufe. In der Triode-Hexode ist das Triodengitter direkt mit dem zweiten Steuergrill der Hexode verbunden. Die Oszillatorspannung wird somit direkt in das Hexodensystem eingekoppelt. Für die Triode-Heptode wird meistens auf diese interne Verbindung verzichtet, wodurch beide Röhrensysteme für getrennte Funktionen verwendet werden können. Solche Trioden-Heptoden werden oft in einer Doppelfunktion eingesetzt; der Heptodenteil dient als Hochfrequenz- oder Zwischenfrequenzverstärker, während der Triodenteil oft als Niederfrequenzverstärker geschaltet wird. Bild 333 zeigt eine Triode-Hexode und eine Triode-Heptode.

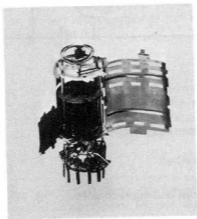
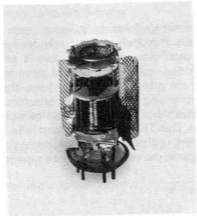


Bild 333

## – Wirkungsweise

Verbundröhren mit interner Verbindung zwischen dem Triodengitter und dem zweiten Steuergitter des Hexoden- oder Heptodensystems können nur als Konverterstufen eingesetzt werden. Im Triodenteil wird die Oszillatorspannung erzeugt, der Hexoden- oder Heptodenteil arbeitet als Mischstufe, wobei die Empfangsfrequenz am ersten Steuergitter liegt. Das Oszillatorsignal wird durch die interne Verbindung direkt in die Mischstufe eingekoppelt. Verbundröhren ohne interne Verbindung zwischen den beiden Systemen lassen sich getrennt einsetzen. Das Triodensystem kann jede Funktion übernehmen, die eine Triode erfordert, während das Heptodensystem unabhängig davon jede Aufgabe erfüllen kann, die von einer Heptode gelöst werden muss.

## 5. Beispiel

Der Mischstufe nach Bild 334 wird eine Hochfrequenzspannung von 15 mV zugeführt. Der Effektivwert des Zwischenfrequenzstromes beträgt  $16,5 \mu\text{A}$ . Die Mischsteilheit und die Mischverstärkung sind zu bestimmen.

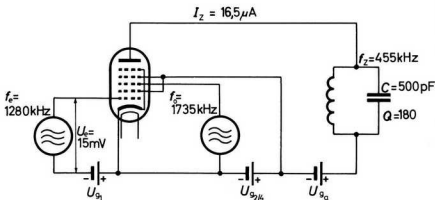


Bild 334

Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen der Mischsteilheit

– Grundformel anschreiben

$$S_c = \frac{I_z}{U_{g1}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$S_c = \frac{16,5 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

$$S_c = 1,1 \text{ mA/V}$$

## 2. Schritt: Bestimmen der Mischverstärkung

– Grundformel anschreiben

$$v_c = \frac{U_x}{U_{g1}}$$

– Formel für  $U_x$  anschreiben

$$U_x = I_x \cdot Z_o \quad (Z_o = \text{Kreisimpedanz für den Resonanzfall})$$

– Grundformel für  $Z_o$  anschreiben

$$Z_o = Q \cdot X_c = \frac{Q}{\omega C}$$

– Formel für  $I_x$  und  $Z_o$  in Grundformel für  $v_c$  einsetzen

$$v_c = \frac{I_x \cdot Q}{\omega \cdot C \cdot U_{g1}}; [V_c] = \frac{A \cdot s \cdot V}{As \cdot V} = 1$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$v_c = \frac{16,5 \cdot 10^{-6} \cdot 180}{2 \cdot \pi \cdot 455 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot 15 \cdot 10^{-3}}$$

$$v_c = 138,5$$

## 6. Das Wesentliche

Moderne Sende- und Empfangsgeräte arbeiten mit Mischstufen. In einer Mischstufe werden zwei Frequenzen miteinander gemischt. Das Mischprodukt besteht aus einer Vielzahl von Frequenzen, wobei die Summe und die Differenz der beiden Eingangsfrequenzen amplitudenmässig besonders stark in Erscheinung treten. Im Überlagerungsempfänger wird die zu empfangende Frequenz mit einer in der Mischstufe erzeugten Oszillatorfrequenz gemischt. Die Differenzfrequenz wird mit Bandfiltern herausgesiebt und als Zwischenfrequenz weiterverstärkt. Die Mischung erfolgt in Mischröhren.

Damit eine Mischung erfolgen kann, muss die Mischstufe eine nichtlineare Kennlinie aufweisen. Es eignen sich daher grundsätzlich alle Röhren zur Mischung. In Sonderfällen wird in Dioden und Trioden gemischt. Die Standardschaltungen arbeiten jedoch fast durchwegs mit Mischröhren. Wir kennen folgende Arten von Mischröhren:

### – Die Hexode

Sie hat sechs Elektroden, vier davon sind Gitter. Zwei haben die Funktion von Schirmgittern, während zwei Gitter als Steuergitter wirken. Der Anodenstrom lässt sich über zwei Gitter steuern. Jedes dieser Steuergitter wird mit einem Signal angesteuert. An der Anode lassen sich die Mischprodukte abnehmen.

### – Die Heptode

Sie hat sieben Elektroden, wovon fünf Gitter. Das eingebaute Bremsgitter verbessert die Rauscheigenschaften der Röhre. Mit der Heptode lassen sich Konverterstufen bauen, das sind Mischstufen, die das zur Mischung notwendige Oszillatorsignal mit dem Elektrodensystem der Mischröhre erzeugen.

## – Die Oktode

Sie hat acht Elektroden, wovon sechs Gitter. Sie wird fast immer als Konverter geschaltet.

## – Die Verbundröhren

Verbundröhren bestehen aus zwei Röhrensystemen mit gemeinsamer Katode. In Mischstufen trifft man meistens die Kombination Triode-Hexode oder Triode-Heptode an. Die Triode dient zur Erzeugung des Oszillatorsignals, die Heptode oder die Hexode arbeiten als Mischstufe. Trioden-Heptoden lassen sich auch für getrennte Funktionen einsetzen, falls intern zwischen der Triode und der Heptode keine Verbindung besteht.

Die Mischsteilheit entspricht dem Quotienten aus der Amplitude des Zwischenfrequenzstromes zur Amplitude der Hochfrequenzeingangsspannung. Die Mischverstärkung entspricht dem Quotienten aus der Amplitude der Zwischenfrequenzspannung zur Amplitude der Hochfrequenzeingangsspannung.

## 7. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 492)

- Was bedeutet der Ausdruck «Mischung» im Zusammenhang mit einem Überlagerungsempfänger?
- Welche Charakteristik muss die Mischstufe aufweisen, damit eine Mischung zwischen zwei zugeführten Signalen zustandekommt?
- Ein Empfänger wird auf eine Eingangsfrequenz von 1400 kHz eingestellt. Der Oszillator erzeugt ein Signal mit einer Frequenz von 1870 kHz. Wie gross ist die Zwischenfrequenz des Empfängers?
- Welches Steuergitter bestimmt in der Hexode weitgehend den Katodenstrom?

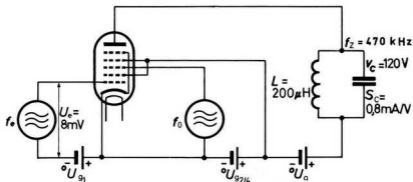


Bild 335

- e) Welches ist die Funktion des zweiten Steuergitters der Hexode?
- f) Worin besteht der Unterschied zwischen einer Hexode und einer Heptode?
- g) Welches sind die hauptsächlichsten Anwendungen der Heptode?
- h) Was ist ein Konverter?
- i) In welcher Funktion wird die Oktode verwendet?
- k) Was ist eine Verbundröhre?
- l) Definieren Sie die Mischsteilheit.
- m) Geben Sie die Definition für die Mischverstärkung.
- n) Bestimmen Sie die Kreisgüte des Anodenschwingkreises der Schaltung nach Bild 335.

# VI. Gasgefüllte Röhren

## 1. Einführung

Gasgefüllte Röhren werden bei der Fabrikation zuerst leer gepumpt und anschliessend mit einem Gas unter geringem Druck gefüllt. In gasgefüllten Röhren werden im Gegensatz zu den Vakuumröhren nicht nur Elektronen, sondern auch Ionen zur Stromleitung herangezogen. Gasgefüllte Röhren werden deshalb oft auch Ionenröhren genannt. Es wird unterschieden zwischen Ionenröhren mit kalter und solchen mit geheizter Katode. Das Anwendungsgebiet dieser Röhrenart ist sehr vielseitig. Glimmröhren werden zur Spannungsstabilisierung oder zur Signalerzeugung herangezogen, während Relaisröhren Schaltfunktionen ausüben und Thyratrons oder Ignitrons zur Steuerung von Motoren und Maschinen eingesetzt werden. Leistungsgleichrichter werden oft mit gasgefüllten Gleichrichterröhren bestückt.

## 2. Was wissen Sie schon über gasgefüllte Röhren?

(Lösung Seite 494)

- Was ist ein Ion?
- Zu welcher Elektrode wandern die Anionen?
- Welche Elektrode wird die Kationen anziehen?
- Was verstehen Sie unter dem Begriff «Ionisation»?
- Erklären Sie den Aufbau einer Glimmröhre.
- Lässt sich die Zündung eines Thyratrons von aussen steuern?
- Kann die erfolgte Zündung eines Thyratrons mit Hilfe der Zündelektrode wieder rückgängig gemacht werden?

## 3. Gasgefüllte Röhren

### a) Glimmröhren

#### – Definition

Die *Glimmröhre* ist die einfachste *Ionenröhre*. Sie besteht aus zwei in einem Glaskolben eingeschmolzenen Elektroden. Der Kolben ist mit einem Gas gefüllt. Der Gasdruck beträgt  $1/100$  bis  $1/10$  des normalen Luftdruckes. Die Katode der Röhre wird nicht geheizt.

In früheren Schaltbildern wurde die Gasfüllung durch Schraffur dargestellt. Die Schraffur deutet in neueren Schemas den leitenden Zustand der Röhre an. In neueren Zeichnungen wird die Gasfüllung durch einen Punkt dargestellt.

- Symbol

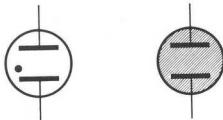


Bild 336

- Aufbau

Die beiden Elektroden der Glimmröhre haben je nach Verwendungszweck verschiedene Formen. Im einfachsten Fall bestehen Katode und Anode aus einfachen Blechen. Als Gasfüllung werden vorwiegend Edelgase wie Neon, Argon oder Xenon verwendet. Bild 337 zeigt eine Glimmröhre.

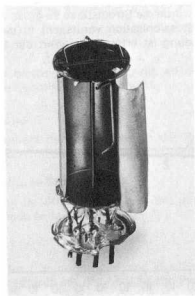


Bild 337



## – Wirkungsweise

Die Moleküle der Gasfüllung sind ständig in Bewegung; Zusammenstösse sind deshalb häufig. Solche Zusammenstösse können dazu führen, dass einzelne Moleküle ein Elektron der Hülle verlieren oder ein freies Elektron einfangen. Diese Moleküle sind zu Ionen geworden. Liegt eine Gleichspannung an den Elektroden, so werden die positiven Ionen von der Katode und die negativen Ionen sowie die Elektronen von der Anode angezogen. Die Geschwindigkeit dieser Ladungsträger wird umso grösser sein, je höher die angelegte Spannung ist. Trotz des geringen Gasdruckes in der Röhre ist die Anzahl der Gasmoleküle noch gross. Entspricht der Gasdruck 1/100 des normalen Luftdruckes, so sind pro Kubikmillimeter noch 300 Billionen Gasmoleküle vorhanden. Zusammenstösse zwischen den bewegten Ladungsträgern und den Molekülen sind deshalb unvermeidlich. Falls die Geschwindigkeit des Ladungsträgers genügend gross ist, verfügt er über eine kinetische Energie (Energie der Bewegung), die ausreicht, um dem Gasmolekül ein Elektron zu entreissen. Das Molekül wird zum positiven Ion und als solches von der Katode angezogen. Das frei gewordene Elektron wird durch die angelegte Spannung zur Anode hin beschleunigt. Der Vorgang heisst *Ionisation*. Für einen bestimmten Wert der angelegten Spannung werden durch Ionisation mehr Ladungsträger frei, als durch Rekombination (Wiedervereinigung von positiven Ionen mit Elektronen) und Verluste verloren gehen. Der Strom in der Röhre steigt lawinenartig an. Der Vorgang heisst *Stossionisation*. Der Strom muss durch einen Widerstand im Anodenkreis begrenzt werden. Ohne Begrenzerwiderstand würde die Stromstärke so gross werden, dass die Röhre zerstört würde. Die Stossionisation verursacht in der Röhre eine Leuchterscheinung; die Zündung ist erfolgt. Der Wert der Spannung, der für das

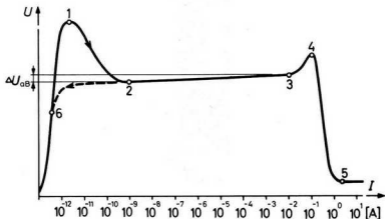


Bild 338

Zünden der Röhre erforderlich ist, ist abhängig vom verwendeten Gas und vom Gasdruck. Bild 338 zeigt den Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und Anodenstrom. Die **Zündspannung** (1) liegt etwas höher als die **Brennspannung** (2–3), da zum Auslösen der Elektronenlawine eine verhältnismässig hohe Elektronengeschwindigkeit erforderlich ist. Diese Geschwindigkeit wird den Elektronen durch eine entsprechend hohe Anodenspannung erteilt. Sobald der Zündvorgang einmal eingeleitet ist, kann die Ionisation mit einer geringeren Spannung aufrechterhalten werden.

Die hierzu notwendige Spannung heisst **Brennspannung**; sie liegt immer unterhalb der Zündspannung. Die Spannung, bei der die Ionisation aufhört, heisst **Löschspannung** (6); sie liegt tiefer als die Brennspannung. Innerhalb des Bereiches 2–3 der Kennlinie bleibt die Spannung über der Röhre fast unabhängig vom Strom. Dieser Kennlinienbereich wird zur Spannungsstabilisierung ausgenutzt.

Wird der Strom über den Punkt 3 hinaus erhöht, so steigt die Brennspannung an, bis im Punkt 4 die Lichtbogenbildung einsetzt. Die Katode wird dabei durch den Emissionsstrom soweit erhitzt, dass sie thermisch emittiert. Die Spannung bricht dabei auf den Wert der **Bogenspannung** (5) zusammen. In diesem Betriebszustand wird die Röhre zerstört.

## – Röhrendaten

### Zündspannung $U_z$

Die Zündspannung ist diejenige Spannung, die zur Zündung der Röhre erforderlich ist.

### Brennspannung $U_B$

Die **Brennspannung** ist diejenige Spannung, die an der Röhre liegt, wenn diese im Bereich 2–3 der Kennlinie betrieben wird.

### Strombereich $I_{a \min} \dots I_{a \max}$

Der **Strombereich** entspricht dem Regelbereich der Röhre als Spannungsstabilisator. Er ist identisch mit der Strecke 2–3 im Diagramm.

### Spannungsänderung $\Delta U_{aB}$ im Strombereich

Die Spannungsänderung im Strombereich gibt an, um welchen Betrag die Spannung im Strombereich ändert.

### Innenwiderstand

Der **Innenwiderstand** der Glimmröhre ist der Wechselstromwiderstand im Strombereich. Er wird graphisch aus der  $I_a-U_a$ -Kennlinie ermittelt, indem man das Verhältnis von Spannungsänderung zu Stromänderung bestimmt. Bild 339 zeigt das Vorgehen.

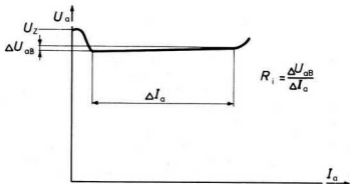


Bild 339

### – Beispiel

Die Stabilisatorröhre STV 108/30 soll zur Stabilisierung der Anodenspannung eines Oszillators verwendet werden. Die Röhre hat folgende Daten:

#### STV 108/30

- Brennspannung  $U_B$  106 ... 111 V
- Zündspannung  $U_z$  127 V
- Strombereich  $I_{a \max} \dots I_{a \min}$  30 ... 5 mA
- Innenwiderstand  $R_i$  100 Ohm
- Spannungsänderung  $\Delta U_{aB}$  im Strombereich 3,5 V

Der Oszillator benötigt eine Anodenspannung von etwa 110 V, der Stromverbrauch beträgt 12 mA. Als Spannungsquelle steht eine Anodenspannung von 200 V zur Verfügung. Diese Anodenspannung soll  $\pm 20$  V schwanken dürfen. Der Vorwiderstand nach Bild 340 ist zu bestimmen. Nach erfolgter Wahl des Vorwiderstandes ist zu untersuchen, in welchem Bereich die Spannung  $U_a$  schwanken darf, ohne dass dabei das richtige Funktionieren des Stabilisators beeinträchtigt wird.

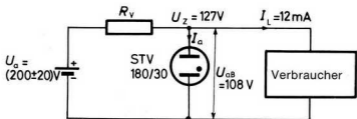


Bild 340

### Vorgehen:

#### 1. Schritt: Bestimmen des Vorwiderstandes

Der Vorwiderstand muss die Differenz zwischen Anodenspannung und Brennspannung aufnehmen. Um den Regelbereich maximal auszunutzen, wählen wir den Arbeitspunkt für den Stabilisator in der Mitte des Strombereiches. Nach Bild 341 fliesst im Arbeitspunkt ein Strom von 17,5 mA. Durch den Vorwiderstand fliesst die Summe der Ströme  $I_a$  (Strom durch den Stabilisator) und  $I_L$  (Strom durch die Last).

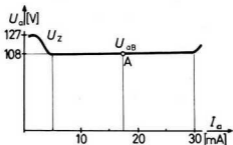


Bild 341

– Formel für  $R_v$  anschreiben

$$R_v = \frac{U_a - U_{aB}}{I_a + I_L}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_v = \frac{200 - 108}{(17,5 + 12) \cdot 10^{-3}} \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_v = \mathbf{3,12 \text{ k}\Omega}$$

#### 2. Schritt: Kontrolle, ob die Zündung der Röhre (bei normaler Anodenspannung) noch sichergestellt ist.

Der Vorwiderstand bildet mit dem Belastungswiderstand einen Spannungsteiler. Die Spannung am Belastungswiderstand muss im Einschaltmoment grösser sein als die Zündspannung.

– Formel für  $R_L$  anschreiben

$$R_L = \frac{U_{aB}}{I_L}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_L = \frac{108}{12 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_L = \mathbf{9 \text{ k}\Omega}$$

– Spannungsteilerformel anschreiben

$$U_{aB_0} = \frac{U_a \cdot R_L}{R_v + R_L}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen 
$$U_{ab_0} = \frac{200 \cdot 9 \cdot 10^3}{(3,12 + 9) \cdot 10^{-3}} \frac{V \cdot V \cdot A}{A \cdot V}$$

$$U_{ab_0} = 148,5 \text{ V} > U_z$$

Die notwendige Zündspannung beträgt 127 V, die Zündung ist somit sichergestellt.

### 3. Schritt: Kontrolle des Regelbereiches

Der Regelbereich des Stabilisators ist durch den Strombereich der Röhre begrenzt. Die gesamte zulässige Abweichung der Anodenspannung ist durch das Produkt von Vorwiderstand und Strombereich gegeben.

– Grundformel anschreiben 
$$\Delta U_a = R_v \cdot \Delta I_a$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen 
$$\Delta U_a = 3,12 \cdot 10^3 \cdot (30-5) 10^{-3} \frac{V}{A}$$

$$\Delta U_a = 78 \text{ V}$$

Da der geforderte Regelbereich  $\pm 20 \text{ V}$  beträgt, ist auch diese Bedingung erfüllt.

4. Schritt: Kontrolle, ob für die minimale Anodenspannung die Zündung noch sichergestellt ist.

– Spannungsteilerformel anschreiben 
$$U_{ab_0, \min} = \frac{U_{a \min} \cdot R_L}{R_v + R_L}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen 
$$U_{ab_0, \min} = \frac{180 \cdot 9 \cdot 10^3}{(3,12 + 9) \cdot 10^3}$$

$$U_{ab_0} = 133,5 \text{ V} > U_z$$

Die notwendige Zündspannung beträgt 127 V, die Zündung ist somit auch für die untere Grenze des Regelbereiches sichergestellt.

## b) Die Relaisröhre

### – Definition

Die *Relaisröhre* ist eine Kaltkathodenröhre; die Katode benötigt keine Heizleistung. Das Röhrensystem – bestehend aus Katode, Anode und Starteranode – befindet sich in einem Glaskolben mit Gasfüllung.

Einige Typen enthalten zusätzlich noch eine Hilfsanode. Die Relaisröhre kennt nur zwei Betriebszustände: Leitend oder gesperrt.

## - Symbol

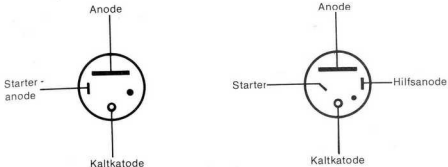


Bild 342

## - Aufbau

Die Katode besteht aus besonders präpariertem Barium oder Molybdän. Diese Materialien sind in der Lage, bereits unter normalen Temperaturverhältnissen Elektronen zu emittieren. Der Starter oder die *Starteranode* liegt bedeutend näher bei der Katode als die Anode, damit wird erreicht, dass die Röhre über den Starter mit Spannungen gezündet werden kann, die unterhalb der Zündspannung der Röhre liegen. Bild 343 zeigt eine Relaisröhre.



Bild 343

## – Wirkungsweise

Der Ionisationsvorgang vollzieht sich nach den gleichen Gesetzen wie in der Glimmröhre. Das bedeutet, dass die Relaisröhre bei genügend hoher Anodenspannung ohne Spannung am Starter wie eine gewöhnliche Glimmröhre zündet. Da der Starter näher bei der Kathode liegt als die Anode, kann die Röhre mit einer Spannung am Starter gezündet werden, die unterhalb der Zündspannung der Röhre liegt. Die Zündspannung am Starter löst den Ionisationsvorgang aus, welcher zur Hauptentladung der Strecke Kathode-Anode führt.

## – Röhrendaten

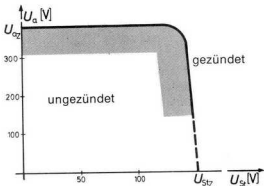


Bild 344

## Zündkennlinie

Die **Zündkennlinie** (Bild 344) gibt Auskunft über die Zündeigenschaften der Röhre. Sie zeigt den Zusammenhang zwischen Anodenspannung und benötigter Starterzündspannung. Erreicht die Starterspannung den Wert  $U_{stz}$ , so zündet die Röhre auf jeden Fall, auch wenn die Anodenspannung niedrig ist. Unterhalb der Starterzündspannung zündet die Röhre nur mit einer relativ hohen Anodenspannung  $U_{az}$ .

## Anodenzündspannung $U_{az}$

Die **Anodenzündspannung** entspricht der Anodenspannung, bei welcher die Röhre zündet, ohne dass am Starter eine Spannung liegt.

## Starterzündspannung $U_{stz}$

Die **Starterzündspannung** entspricht der Starterspannung, bei welcher der Zündvorgang ausgelöst wird.

### **Anodenbrennspannung $U_{aB}$**

Die *Anodenbrennspannung* ist diejenige Spannung, welche im Betrieb zwischen Katode und Anode auftritt.

### **Starterbrennspannung $U_{sB}$**

Die *Starterbrennspannung* ist diejenige Spannung, welche im Betrieb am Starter liegt.

### **Entionisierungszeit $t_d$**

Die *Entionisierungszeit* ist diejenige Zeit, die nach dem Löschen der Röhre vergehen muss, damit alle Ladungsträger neutralisiert sind. Wird der Röhre vor Ablauf der Entionisierungszeit wieder eine positive Anodenspannung grösser als die Brennspannung zugeführt, so bleibt diese nicht gelöscht; sie zündet sofort wieder.

### **Anodenspitzenstrom $I_{asp}$**

Der *Anodenspitzenstrom* ist der kurzzeitig maximal zulässige Anodenstrom.

### **Maximaler Anodenstrom $I_{amax}$**

Der *maximale Anodenstrom* ist der höchst zulässige Anodenstrom im Dauerbetrieb.

### **Minimaler Anodenstrom $I_{amin}$**

Der *minimale Anodenstrom* entspricht dem kleinsten Anodenstrom, für welchen die Entladung noch sicher aufrechterhalten bleibt.

### **Maximaler Starterstrom $I_{stsp}$**

Der maximale *Starterstrom* entspricht dem höchst zulässigen Strom zwischen Starter und Katode.

### **Integrationszeit $\tau_{max}$**

Die *Integrationszeit* spielt für den Impulsbetrieb der Röhre eine Rolle. Sie gibt die Höchstzeit an, während welcher der maximale Anodenstrom überschritten werden darf. Ein Beispiel soll diese Aussage erläutern:

Die Relaisröhre 5823 weist folgende Daten auf:

- Anodenspitzenstrom  $I_{asp}$  100 mA
- Maximaler Anodenstrom  $I_{amax}$  25 mA
- Integrationszeit  $\tau_{max}$  5 s

Das Produkt aus maximalem Anodenstrom und Integrationszeit beträgt  $25 \text{ mA} \cdot 5 \text{ s} = 125 \text{ mAs}$ . Der Anodenspitzenstrom darf auch im Impulsbetrieb nicht überschritten werden. Man darf demzufolge die Röhre beispielsweise wäh-



rend 1,25 s mit 100 mA oder während 2 s mit 62,5 mA belasten. Das Produkt  $I_a \cdot t$  darf nie grösser werden als  $I_{a\max} \cdot t_{\max}$ , wobei  $I_a$  den Wert  $I_{asp}$  nie überschreiten darf.

### – Beispiel

Die Relaisröhre 5823A hat folgende Daten:

$U_{az}$	350 V	$\tau_{\max}$	5 s
$U_{az}$	70 ... 90 V	$I_{asp}$	100 mA
$U_{ab}$	65 V	$I_{amax}$	25 mA
$U_{stb}$	60 V	$I_{amin}$	5 mA
$t_d$	1 ms	$I_{stsp}$	0,5 mA

Bild 345 zeigt eine Schaltung, die zur elektronischen Steuerung einer Punkt-Schweissmaschine mit Hilfe der Relaisröhre 5823 A dient. Die Schweissung soll jeweils durch einen Kommandoimpuls beliebiger Länge (Tastendruck) ausgelöst und nach 50 ms automatisch unterbrochen werden. Durch eine

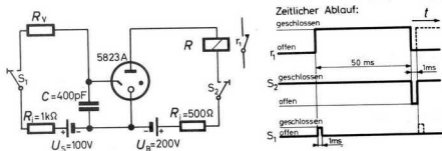


Bild 345

Impulsformer- und Verzögerungsschaltung (in Bild 345 nicht gezeichnet) schliesst bei Beginn des Tastendrucks der Kontakt  $S_1$  während 1 ms und löst damit den Zündvorgang der Relaisröhre aus. Der in Bereitschaftsstellung geschlossene Kontakt  $S_2$  öffnet durch die Verzögerungsschaltung 50 ms nach Beginn der Schweissung. Er unterbricht damit den Anodenstrom in der Relaisröhre und damit die Schweissung. Der Relaiskontakt  $r_1$  steuert den Strom in der Primärwicklung des Schweissttransformators.

Folgende Werte für die Steuerung der Relaisröhre sind zu bestimmen:

- Der minimale ohmsche Widerstand des Relais  $R$
- Der Vorwiderstand  $R_v$  für einen Steuerstrom von 25% des Spitzensteuerstromes
- Die Zeit  $\Delta t$ , die verstreichen muss, bis  $S_2$  wieder schliessen darf. Im Extremfall kann mit dem Schliessen von  $S_2$  der nächste Steuerimpuls zusammenfallen.
- Die Zeitkonstante des Gliedes  $R_v-C$

### Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen des minimalen ohmschen Widerstandes der Relaiswicklung.

*Bedingung:* Der minimale Wicklungswiderstand muss so gross sein, dass der Spannungsabfall am Relais für den maximal zulässigen Anodenstrom der Differenz zwischen Brenn- und Klemmenspannung der Batterie entspricht.

- Bedingung in Formel kleiden:  $(I_{a_{max}} \cdot R_r) = U_B - (U_{aB} + I_{a_{max}} \cdot R_i)$
- nach  $R_r$  umstellen  $R_r = \frac{U_B - (U_{aB} + I_{a_{max}} \cdot R_i)}{I_{a_{max}}}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen  $R_r = \frac{200 - 65 - (25 \cdot 10^{-3} \cdot 500)}{25 \cdot 10^{-3}}$   
 $R_r = 4,9 \text{ k}\Omega$

2. Schritt: Bestimmen des Vorwiderstandes  $R_v$

*Bedingung:* Ein Viertel des Steuerspitzenstromes muss an  $R_v$  einen Spannungsabfall verursachen, der der Differenz von Batteriespannung und Starterbrenns spannung entspricht.

- Bedingung in Formel kleiden  $(R_v \cdot I_{st_{sp}} \cdot 0,25) = U_s - (U_{stB} + R_{i_s} \cdot I_{st_{sp}} \cdot 0,25)$
- nach  $R_v$  umstellen  $R_v = \frac{U_s - (U_{stB} + R_{i_s} \cdot I_{st_{sp}} \cdot 0,25)}{I_{st_{sp}} \cdot 0,25}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen  $R_v = \frac{100 - (60 + 1 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25)}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25}$   
 $R_v = 319 \text{ k}\Omega$

3. Schritt: Bestimmen von  $\Delta t$

$t$  entspricht der Entionisierungszeit  $t_d$ .

$$\Delta t = t_d = 1 \text{ ms}$$

Würde  $S_2$  vor Ablauf von  $t_d$  wieder geschlossen, dann würde die Röhre zünden, ohne dass eine Zündspannung am Starter vorhanden wäre.

4. Schritt: Bestimmen der Zeitkonstante von  $R_v-C$

- Grundformel anschreiben  $\tau = R_v C \quad \frac{\text{VAs}}{\text{AV}}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen  $\tau = 319 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-10}$   
 $\tau = 0,128 \text{ ms}$

## c) Das Thyatron

### - Definition

Das *Thyatron* ist eine gasgefüllte Dreipolröhre. Das Elektrodensystem besteht aus einer geheizten Katode, einem Steuergitter und einer Anode. Das Thyatron kennt wie die Relaisröhre nur zwei Schaltzustände; leitend oder gesperrt.

### - Symbol

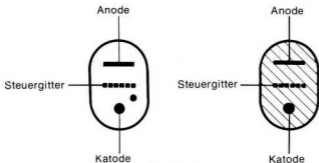


Bild 346

### - Aufbau

Die Katode weist eine sehr grosse Oberfläche auf, da in Thyatrons hohe Ströme fließen. Die meisten Typen werden indirekt geheizt. Das Gitter ist meistens als Lochblende ausgeführt. Die Anode besteht aus einer Scheibe.

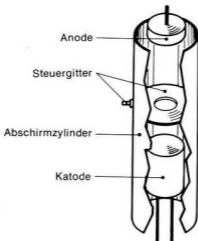


Bild 347

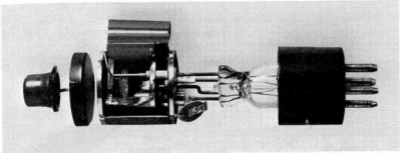


Bild 348

Diese ist oft direkt mit einem Kolbenkontakt verbunden, um die hohen Sperrspannungen überschlagsicher zuzuführen. Die Gasfüllung besteht aus einem Edelgas oder aus Quecksilberdampf. Bild 347 zeigt schematisch den Aufbau und Bild 348 die Ausführung eines Thyratrons.

#### – Wirkungsweise

Die Kennlinie des Thyratrons wird mit der Schaltung nach Bild 349 aufgenommen.

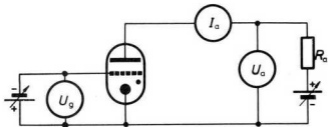


Bild 349

Beim Thyatron interessiert das Verhältnis von Anodenspannung zu Gitterspannung, bei welchem die Röhre zündet. Zur Aufnahme dieser *Steuerkennlinie* wird für verschiedene Werte der Gittervorspannung die Anodenspannung so lange verändert, bis die Röhre zündet. Die gemessenen Werte werden im  $U_a-U_g$ -Diagramm eingetragen. Die Messwerte für ein und denselben Typ weisen relativ grosse Streuungen auf. Die Toleranzen sind grösser als für

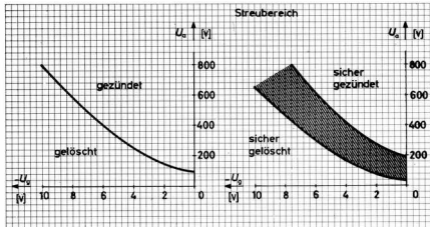


Bild 350

Vakuümöhren. Zudem wird der Zündvorgang durch die Temperatur der Röhre stark beeinflusst.

Bild 350 zeigt links die gemessene Steuerkennlinie einer Röhre. Rechts erkennen wir die Kennlinie für den gleichen Röhrentyp unter Berücksichtigung der Datenstreuung. Die schraffierte Fläche stellt den Streubereich dar, links davon ist die Röhre sicher gesperrt, rechts davon sicher leitend. Der Ionisationsvorgang ist derselbe wie bei allen gasgefüllten Röhren. Die Anodenspannung wird der Röhre über den Anodenwiderstand  $R_a$  zugeführt. Er dient der Strombegrenzung. Ohne diesen Begrenzungswiderstand würde der Anodenstrom so hohe Werte annehmen, dass die Röhre zerstört würde. Das negative Potential am Gitter bremst die von der Katode emittierten Elektronen stark ab, ihre Geschwindigkeit reicht dadurch nicht aus, um eine Stossionisation auszulösen. Wird nun entweder die Anodenspannung erhöht, oder die Gittervorspannung verkleinert, so setzt schlagartig die Ionisation des Gases in der Röhre ein, sie hat gezündet. Der Anodenstrom ist praktisch nur durch den Begrenzungswiderstand und den Innenwiderstand der Spannungsquelle begrenzt. Die Spannung an der Anode sinkt auf die *Bogenspannung*  $U_{arc}$  ab.

In der gezündeten Röhre ist die Konzentration von Gasionen so gross, dass die Wirkung des negativen Gitters neutralisiert wird. Die Röhre kann nur gelöscht werden, indem die Anodenspannung unter den Wert der Bogenspannung abgesenkt wird.

## – Technische Daten

### Steuerkennlinie

Die *Steuerkennlinie* gibt Auskunft über das Verhältnis von Anodenspannung zu Gitterspannung, bei welchem die Röhre zündet.

### Sperrspannung $U_{\text{Sperr}}$

Die *Sperrspannung* ist die an der Anode auftretende negative Spannung, wenn die Röhre als Gleichrichter betrieben wird.

### Bogenspannung $U_{\text{arc}}$

Die *Bogenspannung* ist die Spannung zwischen Anode und Katode des Thyratrons in leitendem Zustand.

### Maximaler Anodenstrom $I_{\text{a,max}}$

Der *maximale Anodenstrom* entspricht dem maximal zulässigen Anodenstrom im Dauerbetrieb.

### Anodenspitzenstrom $I_{\text{a,sp}}$

Der *Anodenspitzenstrom* entspricht dem kurzzeitig zulässigen höchsten Stromwert.

### Entionisierungszeit $t_d$

Die *Entionisierungszeit* hat die gleiche Bedeutung wie für die Relaisröhre.

### Ionisierungszeit $t_i$

Die *Ionisierungszeit* ist die Zeit vom Anlegen der Anodenspannung bis zur tatsächlichen Zündung der Röhre. Sie liegt in der Größenordnung von  $\mu\text{s}$ .

### Integrationszeit $\tau_{\text{max}}$

Die *Integrationszeit* hat die gleiche Bedeutung wie für die Relaisröhre.

### – Beispiel

Die Helligkeit der Projektionslampe eines Vergrößerungsapparates soll mit Hilfe eines Kleinthyratrons kontinuierlich geregelt werden. Bild 351 zeigt die Schaltung und die Steuerkennlinie.

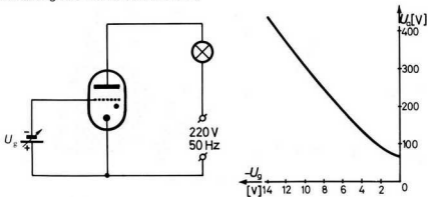


Bild 351

Die Form des durch die Lampe fließenden Stromes ist für die maximale und die minimale Helligkeit aus der Steuerkennlinie graphisch zu ermitteln. Die erforderlichen Gittervorspannungswerte sind zu bestimmen.

**Vorgehen (Bild 352):**

- Konstruktion der positiven Anodenspannungshalbwelle für 220 V.
- Ermittlung des Zündwinkels  $\varphi_1$  für  $U_g = 0$  V
- Ermittlung des Zündwinkels  $\varphi_2$  und der dazugehörigen Gittervorspannung für den Scheitelwert der positiven Anodenspannungshalbwelle.
- Abgrenzen des Flächenanteils für die beiden Zündwinkel.
- Die Kurvenform der ermittelten Flächenanteile entspricht der Form der Stromimpulse durch den ohmschen Verbraucher.
- Die Gittervorspannung für die geringste Helligkeit kann im Diagramm zu 10 V abgelesen werden.

In der Praxis kann nicht der ganze Regelbereich ausgenützt werden, da eine Zündung bei maximaler Gittervorspannung im Scheitel der positiven Anodenspannung infolge der Temperaturabhängigkeit der Kennlinie nicht in allen Fällen sicher gewährleistet wäre.

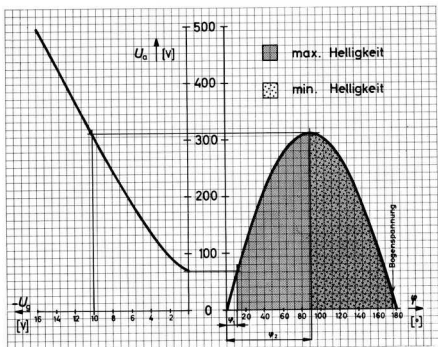


Bild 352

Man wird deshalb eine etwas kleinere maximale Gittervorspannung wählen, wodurch der Zündwinkel leicht verringert wird.

Der Nachteil dieser Schaltung ist die schlechte Ausnützung des Regelbereiches. Die Röhre muss in der ersten Hälfte der Spannungsamplitude gezündet werden, der Zündwinkel wird daher immer kleiner als  $90^\circ$  sein. Soll der Zündwinkel grösser als  $90^\circ$  gemacht werden, so muss das Gitter des Thyatron mit einer phasenverschobenen Wechselspannung angesteuert werden. Diese Art der Steuerung wird in der Praxis oft angewendet.

#### d) Das Ignitron

##### – Definition

Das Ignitron ist eine gasgefüllte Dreipolröhre. Das Elektrodensystem besteht aus einer nicht geheizten Katode, einem Zündstift und einer Anode. Das Ignitron ist in der Lage, sehr hohe Ströme zu schalten. Ein doppelwandiger, wassergekühlter Metallkolben sorgt für die Wärmeabfuhr. Das Ignitron kennt wie das Thyatron nur zwei Zustände; leitend oder gesperrt.

##### – Symbol

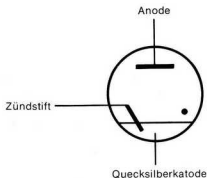


Bild 353

##### – Aufbau

Die Katode besteht aus Quecksilber. Für die Herstellung des Zündstiftes wurde ein Halbleitermaterial mit sehr hoher Temperaturbeständigkeit verwendet. Er taucht ständig in das Quecksilberbad der Katode ein. Die Graphitanode ist für hohe Anodenströme dimensioniert. Das ganze Elektrodensystem ist in einem doppelwandigen Metallkolben untergebracht. Bild 354 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines Ignitrons.



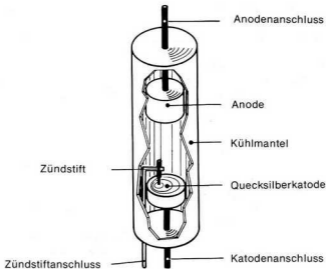


Bild 354

### – Wirkungsweise

Das Ignitron wird durch kurzzeitiges Anlegen einer Zündspannung an den Zündstift gezündet. Der Strom über den Zündstift ist relativ hoch (etwa 40 A), wodurch sich zwischen Quecksilber und Zündelektrode ein kleiner Lichtbogen bildet. Dieser Vorgang führt zur Verdampfung und Ionisation von Quecksilber. Die Entladung greift sofort auf die Katoden-Anodenstrecke über, sofern an der Anode eine positive Spannung liegt. Die positiven Ionen des verdampften Quecksilbers prallen mit grosser Geschwindigkeit auf die Katode und erzeugen dort einen Brennfleck von hoher Temperatur. Dieser Brennfleck erlischt, sobald die Anodenspannung unterhalb die Bogenspannung von etwa 16 V absinkt. Die Quecksilberkatode kann Anodenstrommittelwerte zwischen 50 und 200 A emittieren. Die erforderliche Zündspannung liegt um 150 V. Trotz der niederen Bogenspannung erzeugen die hohen Anodenströme eine beträchtliche Wärmeleistung, welche über ein Kühlsystem abgeführt werden muss. Die Kühlung erfolgt meistens mit Wasser. Ignitrons finden als gesteuerte Gleichrichter für hohe Ströme und zur Steuerung von Schweißmaschinen Verwendung.

### – Technische Daten

Mit Ausnahme der Zündspannung und des Zündstromes gelten für Ignitrons die gleichen Definitionen für die einzelnen technischen Daten wie für Thyratrons.

### Typische Daten für ein Ignitron:

Bogenspannung $U_{arc}$	13 V
Entionisierungszeit $t_d$	1 ms
maximale Anodenspannung $U_{anmax}$	500 V
Sperrspannung $U_{block}$	500 V
Spannung an der Zünderkathode	200 V
Anodenspitzenstrom $I_{ap}$	700 A
mittlerer Anodenstrom $I_a$	40 A
Temperaturgrenzen	10 ... 40° C

Die Temperaturgrenzen müssen innegehalten werden, da sonst das einwandfreie Funktionieren des Ignitrons nicht gewährleistet ist.

### - Beispiel

Bild 355 zeigt das Prinzip eines elektronischen Schweißgerätes für hohe Ströme. Das Ignitron übernimmt die Funktion des Schalters. Wird der Schalter S geschlossen, so entsteht während der positiven Halbwelle an der Kathode der Diode D eine positive Spannung. Erreicht diese Spannung den Mindestwert, der für die Zündung erforderlich ist, so zündet die Röhre. Sobald die Anodenspannung unter den Wert der Bogenspannung abfällt, löscht das Ignitron. Der Zündvorgang wiederholt sich während jeder positiven Halbwelle der Anodenwechselspannung, solange der Schalter S geschlossen bleibt. In der Primärwicklung des Schweißtransformators fließt ein pulsierender Gleichstrom.

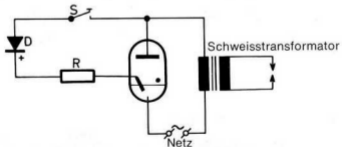


Bild 355

Das Ignitron ist viel dauerhafter als ein mechanischer Schalter, dessen Kontakte bei den hohen Schaltströmen einem grossen Verschleiss ausgesetzt wären.

In der Praxis werden zwei Ignitrons in Antiparallelschaltung verwendet, um auch die zweite Halbwelle der Anodenwechselspannung auszunützen.

## e) Gasgefüllte Gleichrichterröhren

### – Definition

Gasdioden sind Gleichrichterröhren mit geheizter Katode. Als Gasfüllung wird Quecksilberdampf oder Edelgas verwendet.

### – Symbole

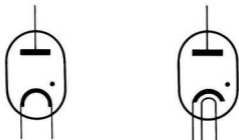


Bild 356

Direkt geheizte Gasdiode

Indirekt geheizte Gasdiode

### – Aufbau

Die meisten Gasdioden arbeiten mit einer direkt geheizten Katode. Diese besteht aus einem Heizwendel, welcher mit einem emittierenden Belag versehen ist. Die Katode ist einem intensiven Ionenbeschuss ausgesetzt. Alle positiven Gasionen werden von der negativen Katode angezogen. Diese Ionen würden mit einer grossen Geschwindigkeit auf die Katode prallen, die dabei frei werdende Energie würde die emittierende Schicht der Katode zerstören. Die Katode wird deshalb mit einer Abschirmung versehen, welche die Ionen abhält. Die emittierten Elektronen umgehen diese Abschirmung. In Bild 357 ist der Aufbau einer Gasdiode zu erkennen.

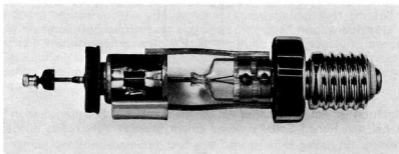


Bild 357

## - Wirkungsweise

Die Katode wird geheizt und emittiert Elektronen. Überschreitet die angelegte Spannung die Zündspannung, so setzt die Stossionisation ein. Solange die Anodenspannung unterhalb der Zündspannung bleibt, fliesst in der Röhre nur ein sehr kleiner, unwesentlicher Elektronenstrom, da die emittierten Elektronen dauernd auf Gasmoleküle stossen und dadurch stark abgebremst werden. Erst bei Erreichen der Zündspannung wird die Elektronengeschwindigkeit so gross, dass die Ionisierung des Gases eingeleitet wird. Die von der Katode angezogenen positiven Ionen verhindern die Entstehung einer Raumladung, deshalb steigt der Anodenstrom der Gasdiode im Gegensatz zur Vakuumdiode bei Erreichen der Zündspannung schlagartig an.

Bild 358 zeigt den Unterschied zwischen den Kennlinien einer Gasdiode und einer Vakuumdiode.

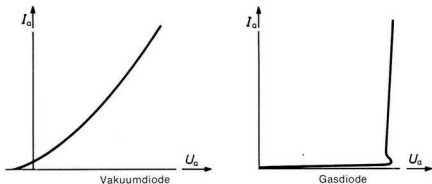


Bild 358

Da an der Stromleitung ausser den Elektronen auch noch Ionen beteiligt sind, ergibt sich ein sehr kleiner Innenwiderstand, wodurch eine Strombegrenzung notwendig wird. Im Anodenkreis der Gasdiode befindet sich deshalb immer ein ohmscher oder ein induktiver Widerstand. Über der Röhre fällt die Bogenspannung ab, diese beträgt bei Quecksilberdampf röhren etwa 15 V.

Das Arbeitsverhalten von Quecksilberdampf röhren wird stark vom Gasdruck in der Röhre beeinflusst. Die Röhrentemperatur wiederum ist mitbestimmend für den Gasdruck. Röhren für grössere Leistungen müssen deshalb vorgewärmt werden. Zu diesem Zweck wird die Heizspannung vor der Anodenspannung an die Röhre gelegt. Die Vorwärmung dauert einige Minuten. Oft wird die Anodenspannung über ein Relais verzögert eingeschaltet.

## – Beispiel

Eine Gasdiode wird als Gleichrichterröhre zur Ladung von Akkumulatoren eingesetzt. Bild 359 zeigt die Prinzipschaltung.

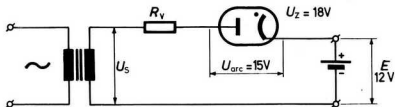


Bild 359

Die Anlage ist für 12 V dimensioniert. Die Zündspannung der Röhre beträgt 18 V, die Brennspannung 15 V. Der Transformator ist so zu dimensionieren, dass die Röhre sicher zündet. Die Sekundärspannung des Transformators ist zu bestimmen. Es ist zu untersuchen, während welcher Zeitdauer innerhalb der positiven Spannungskurve die Röhre Strom liefert und wie gross die Sperrspannung über der Röhre wird.

### Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen der notwendigen Sekundärspannung

– Bedingung: Die Sekundär-Spitzenspannung muss grösser sein als die Summe von Zündspannung der Röhre und E.M.K. der Batterie.

– Bedingung in eine Formel kleiden

$$U_s > U_z + E$$

Zur sicheren Zündung wählen wir einen Sicherheitsfaktor von 1,2. Dieser wird in die Formel einbezogen:

$$U_s = 1,2 (U_z + E)$$

– Formel für den Effektivwert auslegen:

$$U_s = \frac{1,2 (U_z + E)}{\sqrt{2}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_s = \frac{1,2 (18 + 12)}{\sqrt{2}}$$

$$U_s = 25,46 \text{ V}$$

2. Schritt: Bestimmen der Stromflussdauer  
 – Die Ermittlung erfolgt graphisch nach Bild 360:

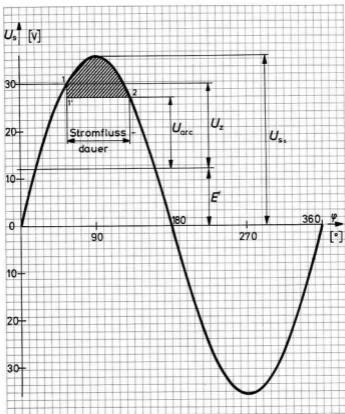


Bild 360

- Aufzeichnen der Sekundärspannung des Transformators
- Einzeichnen der E.M.K.  $E$  der Batterie
- Addition von Zündspannung und E.M.K. im Diagramm
- Addition von Brennspannung und E.M.K. im Diagramm
- Konstruktion der Fläche, welche dem Stromfluss entspricht.

Im Zündmoment Punkt 1 fällt die Spannung über der Röhre auf die Brennspannung ab (Punkt 1'). Sinkt die angelegte Spannung unter den Wert der Brennspannung ab, so erlischt die Röhre (Punkt 2). Da die E.M.K. der Batterie während der positiven Halbwelle gegen die Transformatorspannung

gerichtet ist, werden in der graphischen Darstellung Zünd- und Brennspannung um den Betrag der E.M.K. nach oben verschoben. Die Zeichnung zeigt, dass nur während einer kurzen Zeit ein Strom fliesst. Die schraffierte Fläche ist klein im Verhältnis zur positiven Halbwelle, sie deutet auf einen geringen Stromfluss hin. Will man den Ladestrom vergrössern, so muss man die Sekundärspannung des Transformators erhöhen.

### 3. Schritt: Ermitteln der Sperrspannung

– Bedingung: Während der negativen Halbwelle liegt an der Röhre die Sperrspannung. Diese setzt sich aus der E.M.K. der Batterie und dem Spitzenwert der negativen Halbwelle zusammen.

– Bedingung in eine Formel kleiden:

$$U_{\text{sperr}} = U_{\text{ss}} + E$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_{\text{sperr}} = 25,5 \cdot \sqrt{2} + 12$$

$$U_{\text{sperr}} = 48 \text{ V}$$

Das Zustandekommen der Sperrspannung ist aus Bild 361 ersichtlich.

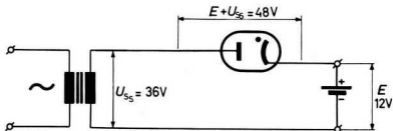


Bild 361

## 4. Das Wesentliche

Die *Glimmröhre* ist die einfachste Ionenröhre, sie besteht aus zwei Elektroden die sich in einem gasgefüllten Glaskolben gegenüberstehen. Die Zündspannung löst die Stossionisation aus, die Röhre wird leitend. Über der gezündeten Röhre stellt sich die Brennspannung ein, sie ist sehr stabil und vom Röhrenstrom praktisch unabhängig. Die Röhre eignet sich deshalb als Spannungsstabilisator. Der Wechselstrominnenwiderstand der Röhre ist sehr klein. Glimmröhren eignen sich für Gleich- und Wechselstrombetrieb. Sie müssen immer mit einem Vorwiderstand zur Strombegrenzung betrieben werden.

Die *Relaisröhre* benötigt keine Heizung, sie arbeitet mit kalter Katode. Das aus Katode, Anode und Starteranode bestehende Elektrodenystem befindet sich in einem gasgefüllten Glaskolben. Die Zündung der Röhre wird über den Starter eingeleitet. Zur Löschung muss der Anodenstromkreis unter-

brochen werden. Zwischen der Löschung der Röhre und der nächsten Zündung muss eine Zeitspanne liegen, die mindestens der Entionisierungszeit entspricht. Relaisröhren sind wartungsfrei und eignen sich deshalb besonders für Überwachungsanlagen.

Das *Thyratron* ist eine gasgefüllte Röhre, bestehend aus geheizter Katode, Steuergitter und Anode. Die Zündung der Röhre wird durch das Steuergitter eingeleitet. Zur Löschung muss die Anodenspannung unter die Bogenspannung abgesenkt werden. Das zur Zündung notwendige Verhältnis von Anodenspannung zu Gitterspannung ergibt graphisch dargestellt die Steuerkennlinie. Thyratrons werden als gesteuerte Gleichrichter bei der Drehzahlregelung von Gleichstrommotoren usw. verwendet.

Das *Ignitron* ist für sehr hohe Ströme geeignet. Das Elektrodensystem besteht aus einer Quecksilberkatode, dem Zündstift und einer Anode. Die Zündung kann nur erfolgen, wenn etwas Quecksilber verdampft wird. Zu diesem Zweck wird ein Spannungsimpuls an den Zündstift gelegt, der kurzzeitig fließende grosse Strom leitet die Ionisation ein. Das Ignitron kann nur gelöscht werden, indem man die Anodenspannung unter den Wert der Bogenspannung absinken lässt. Ignitrons werden überall dort eingesetzt, wo sehr hohe Ströme geschaltet werden müssen.

Die *Gasdiode* ist eine Quecksilberdampfgleichrichterröhre mit geheizter Katode. Bei Erreichen der Zündspannung setzt die Ionisation ein. Gasdioden haben einen besseren Wirkungsgrad als Vakuumdioden, auch sind die erreichbaren Stromwerte bedeutend grösser.

## 5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 494)

- Was verstehen Sie unter dem Begriff «Stossionisation»?
- Erklären Sie den Unterschied zwischen Zündspannung und Brennspannung einer Ionenröhre.
- Was hat die Löschspannung für eine Bedeutung?
- Zeichnen Sie das  $U$ - $I$ -Diagramm für eine Glimmröhre auf. Bezeichnen Sie darin die charakteristischen Strom- und Spannungswerte.
- Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild eines einfachen Gleichspannungsstabilisators mit einer Glimmröhre.
- Beschreiben Sie den Unterschied zwischen einer Relaisröhre und einem Thyatron.
- Zeichnen Sie die Steuerkennlinien für ein Thyatron unter Berücksichtigung der auftretenden Streuungen.
- Die Integrationszeit eines Thyratrons wird mit 3 s angegeben. Der Anodenspitzenstrom beträgt 25 A. Der maximale mittlere Anodenstrom darf 6 A nicht überschreiten. Das Thyatron wird periodisch alle 5 s für die Dauer von 2 s gezündet. Wie gross ist der zulässige Anodenstrom während diesen 2 s Brenndauer.
- Welche Bedeutung hat die Entionisierungszeit eines Thyratrons in bezug auf die Bemessung einer Schaltung?
- Erklären Sie den Zündvorgang des Ignitrons.
- Wo werden Ignitronen hauptsächlich verwendet?
- Welche Vorteile weisen Gasdioden gegenüber Vakuumdioden auf?



# VII. Die Katodenstrahlröhre

## 1. Einführung

Die Katodenstrahlröhre – oft auch Elektronenstrahlröhre genannt – ermöglicht das Sichtbarmachen elektrischer Vorgänge. Ein Elektronenstrahl zeichnet elektrische Spannungsänderungen auf einem Bildschirm praktisch trägeheitslos nach. Elektronenstrahlröhren sind deshalb hauptsächlich in Messgeräten anzutreffen. Im Elektronenstrahloszillograf erlaubt sie die Aufzeichnung elektrischer Vorgänge aller Art. Radargeräte wären ohne Katodenstrahlröhre undenkbar, da die Röhre das überwachte Gebiet auf dem Bildschirm festhält. Grössere Übermittlungsanlagen sind oft mit Katodenstrahlröhren zur Betriebsüberwachung ausgerüstet. Das Herz eines jeden Fernsehgerätes ist eine Katodenstrahlröhre, auf welcher das Bild erscheint. Diese Aufzählung zeigt, dass die Katodenstrahlröhre unter den Bauteilen der Elektronik einen wichtigen Platz einnimmt.

## 2. Was wissen Sie schon über Katodenstrahlröhren?

(Lösung Seite 497)

- Welches sind die wichtigsten Elemente im Elektrodensystem der Katodenstrahlröhre?
- Was ist eine Bildröhre mit statischem Ablenkensystem?
- Wie arbeitet eine Röhre mit magnetischer Strahlablenkung?
- Welches häufig verwendete Messgerät der Elektrotechnik arbeitet mit einer Katodenstrahlröhre?

## 3. Die Katodenstrahlröhre

### a) Definition

Die *Katodenstrahlröhre* ist eine Elektronenröhre, die mit ihrem Elektrodensystem einen scharf gebündelten Strahl erzeugt, welcher auf einem Bildschirm als Punkt abgebildet wird. Die Lage dieses Bildpunktes kann durch elektrostatische oder elektromagnetische Ablenkung des Strahles verändert werden. Der Strahl kann zusätzlich durch eine Spannung in seiner Helligkeit gesteuert werden.

### b) Symbol

Bild 362 zeigt das Symbol einer einfachen Katodenstrahlröhre.

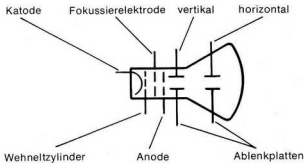


Bild 362

### c) Aufbau

In Bild 363 erkennen wir den Aufbau einer Elektronenstrahlröhre.

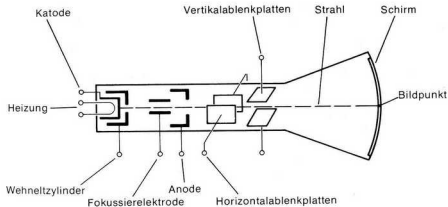


Bild 363

Die Elektronenstrahlröhre besteht aus einem Elektrodensystem, das einen scharf gebündelten Strahl erzeugt, einem Elektrodensystem oder Ablenkspulen zur Ablenkung des Strahles und dem Bildschirm, auf welchem der Strahl sichtbar gemacht wird. Das System zur Strahlerzeugung – die sogenannte *Elektronenkanone* – besteht aus einer indirekt geheizten Katode, einem zylinderförmigen Steuergitter und einer *Elektronenoptik*. Die Katode wird aus einem Nickelröhrchen gebildet, das an der Stirnseite die emittierende Schicht trägt. Die Katode ist von einem zylinderförmigen Steuergitter

umgeben. An der Stirnseite dieses Zylinders – *Wehneltzylinder* genannt – befindet sich ein kleines Loch, aus welchem der Strahl austreten kann. Am Wehneltzylinder liegt eine einstellbare negative Spannung, die es ermöglicht, den Elektronenstrom in seiner Intensität zu steuern, und damit die Helligkeit des Bildpunktes zu regeln. Der aus dem Wehneltzylinder kommende Strahl hat infolge der abstossenden Wirkung, die die Elektronen aufeinander ausüben, die unerwünschte Tendenz zur Streuung. Ein Elektronenstrahl kann, wie ein Lichtstrahl in der Optik, gebündelt und abgelenkt werden. An Stelle von Linsen treten magnetische und elektrische Felder. Katodenstrahlröhren, wie sie in der Messtechnik verwendet werden, arbeiten meistens mit elektrischen Feldern zur Ablenkung und Bündelung des Strahles. Die *Elektronenoptik* besteht aus zwei zylinder- oder ringförmigen Elektroden. Die erste Elektrode liegt an einer positiven veränderlichen Spannung. Sie dient der Fokussierung – das heisst der Scharfeinstellung – des Bildpunktes. Sie wird deshalb *Fokussierelektrode* genannt. Die zweite Elektrode übernimmt die Funktion einer Anode, sie liegt an einem hohen positiven Potential und dient unter anderem der Beschleunigung des Elektronenstrahls. Die Potentialunterschiede zwischen Fokussierelektrode und Anode verursachen elektrostatische Felder, diese wirken auf den Elektronenstrahl wie Linsen auf den Lichtstrahl. Die Fokussierelektrode wirkt zusammen mit der Anode wie ein Brennglas, das das Sonnenlicht auf einen Punkt konzentriert. Der Elektronenstrahl wird auf den Bildschirm fokussiert. Die Bildschärfe wird mit Hilfe der Spannung an der Fokussierelektrode eingestellt.

Der gebündelte Strahl durchläuft den Ablenkraum, bevor er auf den Bildschirm auftrifft. Im Ablenkraum wirkt das elektrische Feld zwischen zwei Ablenkplattenpaaren auf den Strahl ein. Ein Plattenpaar lenkt den Strahl in horizontaler Richtung ab, das andere bewirkt die Ablenkung in vertikaler Richtung. Legt man an eine Platte ein positives Potential, so wird der Strahl nach dieser Seite hin ausgelenkt. Mit einer variablen Gleichspannungsquelle an jedem Plattenpaar lässt sich der Bildpunkt in jede beliebige Lage auf dem Bildschirm bringen. Bild 364 zeigt diese Möglichkeiten.

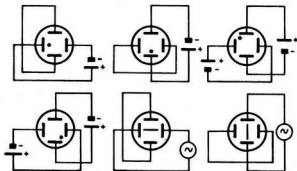


Bild 364

Der Elektronenstrahl trifft mit so grosser Geschwindigkeit auf das Schichtmaterial des Bildschirms auf, dass dieses aufleuchtet. Die Farbe der Aufzeichnung wird durch die Eigenschaften des Leuchtmaterials bestimmt.

#### d) Wirkungsweise

Das Funktionsprinzip der Katode weicht grundsätzlich nicht von demjenigen einer gewöhnlichen indirekt geheizten Katode ab. Die aktive Schicht der Katode der Katodenstrahlröhre ist nur auf der Stirnseite des zylinderförmigen Katodenröhrchens angebracht. Dank dieser Massnahme kann der Katodenstrahl nur nach vorne austreten. Der Wehneltzylinder lässt sich in seiner Wirkung auf den Katodenstrahl mit dem Steuergitter einer Verstärkerröhre vergleichen. Das negative Potential am Wehneltzylinder erlaubt eine Veränderung der Bildhelligkeit, indem damit die Intensität des Strahls gesteuert wird. Die fokussierende Wirkung der Elektronenoptik beruht auf dem Einfluss, den elektrische Feldlinien auf einen Elektronenstrahl ausüben. Der Strahl wird durch ein elektrisches Feld abgelenkt. Die Strahlablenkung durch die Elektronenoptik wird in Bild 365 gezeigt.

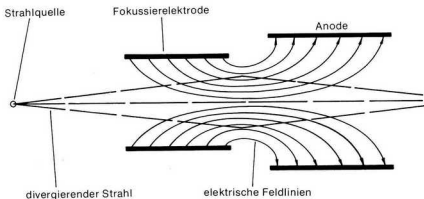


Bild 365

Durch den Potentialunterschied zwischen der Fokussierelektrode und der Anode entsteht ein elektrostatisches Feld, dessen Kraftlinien in Bild 365 angedeutet sind. Diese Kraftlinien verursachen die gewünschte Bündelung des divergierenden Katodenstrahles. Die Form des Kraftlinienverlaufes hängt vom Potentialunterschied zwischen den beiden Elektroden ab. Ändert man die Spannung an der Fokussierelektrode, so ändert sich der Verlauf der Kraftlinien und damit der Grad der Strahlablenkung. Die Spannung an der Fokussierelektrode wird so gewählt, dass die Elektronen des Strahles alle im gleichen Punkt auf dem Bildschirm auftreffen.

Den *Ablenkplatten* fällt die Aufgabe zu, den Strahl in der horizontalen und in der vertikalen Richtung abzulenken. Bild 366 zeigt den Ablenkvorgang.

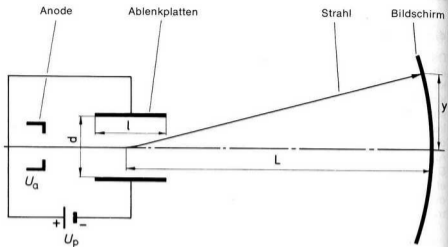


Bild 366

Die Strahlablenkung  $Y$  hängt von den geometrischen Abmessungen des Elektrodensystems, von der Anodenspannung und von der Spannung an der Ablenkplatte ab. Die Strahlablenkung erfolgt *proportional* zur Spannung an den Ablenkplatten.

$$Y = \frac{l \cdot L \cdot U_p}{2d \cdot U_a}$$

### e) Technische Daten

#### Ablenkempfindlichkeit $A_E$

Die *Ablenkempfindlichkeit* entspricht dem Quotienten aus Ablenkung und Spannung an den Ablenkplatten.

$$A_E = \frac{Y}{U_p}; [A_E] = \frac{\text{cm}}{\text{V}}$$

$Y$  = Ablenkung  
 $U_p$  = Spannung an den Ablenkplatten

#### Ablenfaktor $A_F$

Der *Ablenfaktor* ist der Reziprokwert der Ablenkempfindlichkeit.

$$A_F = \frac{U_p}{Y}; [A_F] = \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

In der Praxis ist es üblich, mit dem Ablenkfaktor zu arbeiten. Dieser ist nicht für beide Plattenpaare gleich gross. Das Plattenpaar, das näher bei der Katode liegt, weist einen kleineren Ablenkfaktor auf. In Tabelle 18 sind die technischen Daten einer typischen Katodenstrahlröhre für Messzwecke zusammengestellt.

### Typ : DG 7 – 12c

Heizspannung $U_f$	6,3	V
Heizstrom $I_f$	0,3	A
Anodenspannung $U_a$	2000	V
Spannung an der Fokussierelektrode	150 ... 250	V
Spannung am Wehneltzylinder $U_{\beta_1}$	-40 ... -75	V
Ablenkfaktor für die katodenseitigen Platten $A_{F_{pk}}$	65 ... 92	V/cm
Ablenkfaktor für schirmseitige Platten $A_{F_{ps}}$	82 ... 125	V/cm
Ausnutzbare Auslenkung	65	mm

Tabelle 18

## 4. Beispiel

Die Oszillografenröhre DG 7-12c aus Tabelle 18 wird in einem Oszillografen zur Sichtbarmachung von Wechselspannungen verwendet. Mit den angelegten Speisespannungen ergeben sich folgende Ablenkfaktoren:

- $A_{F_{pk}} = 80 \text{ V/cm}$
- $A_{F_{ps}} = 110 \text{ V/cm}$

Dem schirmseitigen horizontalen Ablenkplattenpaar wird eine Sägezahnspannung nach Bild 367 zugeführt.

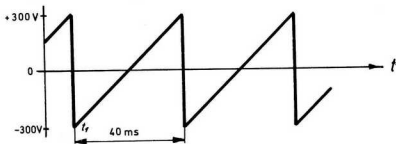


Bild 367

An das katodenseitige Plattenpaar wird eine sinusförmige Wechselspannung von 50 Hz,  $120 \text{ V}_{\text{eff}}$  gelegt. Das Bild auf der Oszillografenröhre ist im Massstab 1:1 zu zeichnen für den Fall, dass  $t_1$  mit dem Beginn der Sinusschwingung zusammenfällt.

Vorgehen:

1. Schritt: Kreis mit dem Durchmesser der ausnutzbaren Auslenkung zeichnen.

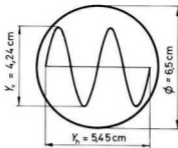


Bild 368

2. Schritt: Horizontalauslenkung berechnen.

– Formel anschreiben

$$A_{I_{\text{m}}} = \frac{U_p}{Y_h}$$

– nach  $Y_h$  umstellen

$$Y_h = \frac{U_p}{A_{I_{\text{m}}}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Y_h = \frac{600}{110} \frac{\text{V}}{\text{V/cm}}$$

$$Y_h = \mathbf{5,45 \text{ cm}}$$

– Ablenkung in Bild 368 einzeichnen

3. Schritt: Vertikalauslenkung berechnen

– Formel anschreiben

$$A_{I_{\text{m}}} = \frac{U_p}{Y_v}$$

– nach  $Y_v$  umstellen

$$Y_v = \frac{U_p}{A_{I_{\text{m}}}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Y_v = \frac{120 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{80} \frac{\text{V}}{\text{V/cm}}$$

$$Y_v = \mathbf{4,24 \text{ cm}}$$

– Auslenkung in Bild 368 einzeichnen

4. Schritt: Konstruktion des Bildes auf dem Oszillografen

Da die Zeit für die Horizontalauslenkung 40 ms beträgt und eine Periode der 50 Hz-Sinusspannung 20 ms dauert, werden zwei volle Schwingungen dargestellt.

## 5. Das Wesentliche

Katodenstrahlröhren dienen zur Sichtbarmachung elektrischer Vorgänge. Das Elektrodensystem der Röhre besteht aus einer Katode als Elektronenquelle, einem Wehneltzylinder zur Einstellung der Intensität des Strahles, einer Elektronenoptik zur Strahlfokussierung, je einem Plattenpaar für die Vertikal- und Horizontalablenkung und einem Bildschirm zur Sichtbarmachung des Strahles.

Die Helligkeit (Strahlintensität) lässt sich durch Verändern der negativen Spannung am Wehneltzylinder auf den gewünschten Wert einstellen.

Die Scharfeinstellung (Fokussierung) des Bildes erfolgt mit Hilfe einer regelbaren Spannung an der Elektronenoptik. In Katodenstrahloszillografen lassen sich diese Spannungswerte über Bedienungspotentiometer einstellen.

Der Strahl wird in Röhren mit elektrostatischer Ablenkung in horizontaler und vertikaler Richtung durch je ein Ablenkplattenpaar abgelenkt.

Der Ablenkfaktor entspricht dem Verhältnis von Ablenkspannung zu Strahlablenkung, er wird in Volt pro Zentimeter angegeben. Die für eine bestimmte Strahlablenkung notwendige Ablenkspannung wird durch den Ablenkfaktor bestimmt.

## 6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 497)

- Die Bildhelligkeit von Elektronenstrahlröhren kann variiert werden. Erklären Sie den Vorgang.
- Erklären Sie die Einrichtung, die die Fokussierung des Strahles ermöglicht.
- An das horizontale Ablenkplattenpaar einer Bildröhre wird eine Gleichspannung von 250 V gelegt. Der Leuchtpunkt wird von der Mitte aus 4 cm nach rechts abgelenkt. Welche Polarität der Spannungsquelle lag an der rechten Platte? Bestimmen Sie den Ablenkfaktor der Röhre.
- Sie betrachten auf einer Bildröhre die Figur nach Bild 369.

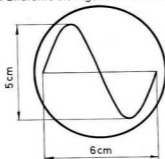


Bild 369

Der Ablenkfaktor für das horizontale Plattenpaar beträgt 70 V/cm, derjenige für die Vertikalablenkplatten 60 V/cm. Die Frequenz des Signals an den Vertikalplatten beträgt 150 kHz. Zeichnen Sie im Liniendiagramm die Spannungen an den horizontalen und an den vertikalen Ablenkplatten. Geben Sie die dazugehörigen Amplituden- und Zeitwerte an.



# VIII. Röhrenbezeichnungen

## 1. Einführung

In Europa werden die Elektronenröhren einheitlich bezeichnet. Die Typenbezeichnung einer Röhre gibt Auskunft über die Heizung und das Röhrensystem.

Der Schlüssel für die Röhrenbezeichnungen ist in Tabelle 19 zusammengestellt.

## 2. Schlüssel für die Typenbezeichnung von Vakuumröhren

1. Buchstabe: Heizung		Weitere Buchstaben: Elektrodensystem	
A	4 V	A	Diode (Hochfrequenzgleichrichter)
B	180 mA	B	Doppeldiode (Hochfrequenzgleichrichter)
C	200 mA	C	Triode (Spannungsverstärker)
D	1,2 V	D	Triode (Leistungsverstärker)
E	6,3 V	E	Tetrode (Spannungsverstärker)
F	12,6 V	F	Pentode (Spannungsverstärker)
H	150 mA	H	Hexode, Heptode
K	2 V	K	Oktode
L	-	L	Pentode, Tetrode (Leistungsverstärker)
M	2,4 .. 2,8 V	M	Leuchtschirmröhre (Magisches Auge)
P	300 mA	P	-
U	100 mA	U	-
V	50 mA	V	-
X	600 mA	X	Gasgefüllte Doppelweggleichrichterröhre
Y	450 mA	Y	Einweg-Netzgleichrichter
Z	Kaltkatode	Z	Zweiweg-Netzgleichrichter

Tabelle 19

## 3. Beispiele

**ECH 21** = Triode-Hexode mit 6,3 V Heizspannung, die Zahl 21 bezeichnet eine bestimmte Serie mit einem bestimmten Röhrensockel

**PCC 88** = Doppeltriode für Spannungsverstärkung mit 300 mA Heizstrom

**UF 85** = Pentode für Spannungsverstärkung mit 100 mA Heizstrom

**PL 82** = Pentode für Leistungsverstärkung mit 300 mA Heizstrom