

### Versuch C 12: Kennlinien von Elektronenröhren

**1. Literatur:** Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. II  
W. Walcher, Praktikum der Physik  
W. Westphal, Physikalisches Praktikum  
Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik,

**Stichworte:** Prinzip u. Aufbau von Elektronenröhren, therm.Emission von Elektronen aus Metallen, Austrittsarbeit, Elektronen im elektr. Feld, Steilheit, Durchgriff, innerer Widerstand einer Triode.

#### 2. Grundlagen

Neben den Halbleiter-Bauelementen findet die Elektronenröhre als aktives elektronisches Bauelement zur Gleichrichtung und Verstärkung kleiner und mittlerer elektr. Signale heute nur noch wenig Anwendung. Elektronenröhren werden jedoch noch in vielen Spezialfällen benutzt. Sie werden z.B. als Elektronenstrahlröhre in Oszillografen oder Bildschirmgeräten, als Röntgenröhre zur Erzeugung von Röntgenstrahlen oder als Senderöhre zur Erzeugung von Radio- und Mikrowellen großer Leistung verwendet. Aber auch etwa zur Messung kleinster Drucke in einem Ultra-Hochvakuum wird die Elektronenröhre heute noch eingesetzt.

Das Funktionsprinzip der Elektronenröhre beruht auf der Steuerung eines Elektronenstrahls in einem Hochvakuum. Dazu sind bei einfachen Elektronenröhren Metallelektroden in einem evakuierten Glaskolben angebracht. Aus einer Elektrode, der Kathode, werden durch (meistens) indirekte elektrische Heizung Elektronen thermisch in das Vakuum emittiert und von einer weiteren Elektrode, der Anode, aufgefangen. Die Steuerung des Elektronenstrahls zwischen Kathode und Anode erfolgt durch magnetische oder elektrische Felder. Dazu sind je nach Anwendung Magnetspulen oder eine Reihe von weiteren Elektroden an bzw. in der Röhre angebracht. Nach der Zahl der Elektroden einer Röhre unterscheidet man Diode, Triode, Tetrode oder Pentode.

#### 2.1 Diode

In Abb. 1a sind das Schaltungssymbol und die verwendeten Bezeichnungen für eine Hochvakuumdiode dargestellt. Auf die Darstellung des Heizfadens für die Kathode und seiner Anschlüsse wird dabei verzichtet. Abb. 1b zeigt schematisch die Kennlinie einer Hochvakuumdiode,  $I_a(U_a)$ , die die Abhängigkeit des Anodenstroms  $I_a$  von der zwischen Anode A und Kathode K liegenden

Anodenspannung  $U_a$  beschreibt. Ein wesentlicher Strom fließt nur bei positiver Spannung  $U_a$ . Die Diode wirkt als Gleichrichter wie das deshalb namensgleiche Halbleiter-Bauelement. Man unterscheidet bei der Vakuum-Diode drei Gebiete ihrer Kennlinie, das Anlaufstrom-, das Raumladungs- und das Sättigungsgebiet.

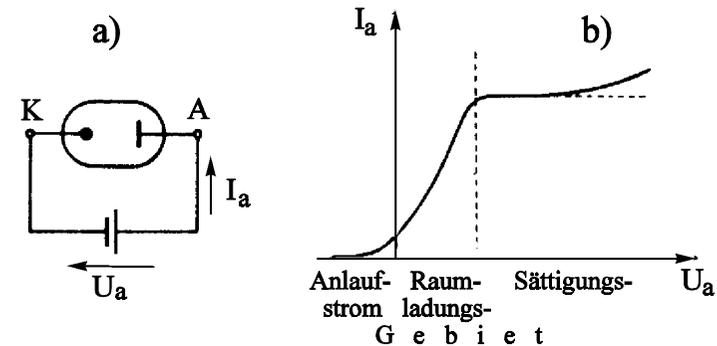
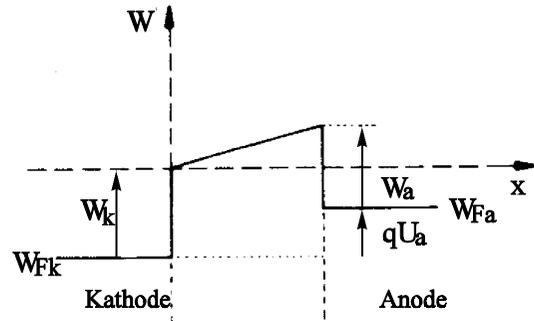


Abb.1: Hochvakuumdiode: a) Schaltsymbol, b) Kennlinie

Zur Erklärung der Kennlinie werden im folgenden Kathode und Anode in einem einfachen Potenzialtopfmodell betrachtet. Abb. 2 zeigt den Verlauf der Energie  $W$  der Leitungselektronen als Funktion der Ortskoordinate  $x$  vom Inneren der Kathode bis ins Innere der Anode für die Temperatur  $T = 0$  K.  $W_{Fk}$  und  $W_{Fa}$  bzw.  $W_k$  und  $W_a$  sind die Fermienergien bzw. Austrittsarbeiten der Leitungselektronen für Kathode und Anode,  $q U_a = - e U_a$  die Energiedifferenz der Fermienergien aufgrund der zwischen Anode und Kathode liegenden Spannung  $U_a$ . Das sogenannte *Fermienergie*  $W_F$  ist die Maximalenergie der Leitungselektronen in einem Metall bei  $T = 0$ . Die *Austrittsarbeit*  $W$  ist die Energie, die ein Leitungselektron benötigt, um vom Energieniveau  $W_F$  im Inneren eines Metalls durch die Oberfläche in den Außenraum (das feldfreie Vakuum) zu gelangen. Fermienergie und Austrittsarbeit sind für jedes Element spezifische Größen. Die Austrittsarbeit liegt für metallische Elemente zwischen ca. 2 und 5 eV, für Metalle mit spezieller Oxidbeschichtung kann sie auf ca. 1 eV reduziert werden.

Für endliche Temperaturen haben die Leitungselektronen eines Metalls zusätzlich zu  $W_F$  eine mittlere thermische Energie  $W_T$  von der Größenordnung  $k_B T$  ( $k_B =$  Boltzmann-Konstante). Diese Energie ist selbst bei einer Temperatur von ca. 1000 K (der üblichen Kathodentemperatur einer Röhre) viel zu klein, um ein Austreten der Elektronen aus dem Metall zu ermöglichen. Nur aufgrund der sehr unter-



**Abb.2:** Verlauf der Elektronenenergie zwischen Kathode und Anode einer Diode im Anlaufstromgebiet ( $U_a < 0$ ,  $T = 0$ )

schiedlichen Verteilung der thermischen Energie auf die Elektronen sind einige von diesen in der Lage, die Potenzialbarriere  $W$  an der Oberfläche zu überwinden. Man findet für den Strom aufgrund dieser thermischen Emission der Elektronen (Richardson-Dushman-Formel):

$$I_{th} = AT^2 \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) \quad (1)$$

mit einer Konstanten  $A$ .

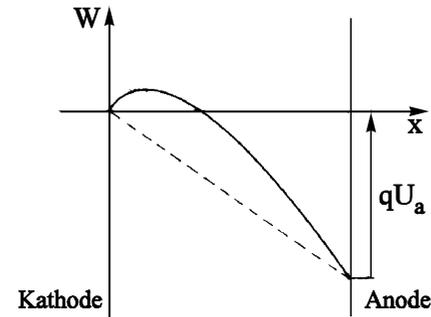
Im Anlaufstromgebiet einer Vakuumdiode fließt, wie Abb. 1b andeutet, kein oder nur ein geringer Elektronenstrom von der Kathode zur Anode. Dieser wird durch die Elektronen aus der Kathode verursacht, deren thermische Energie zur Überwindung des Potenzialberges  $W_e = W_a - eU_a > W_k$  ausreicht (s. Abb. 2). Man findet mit Gl. (1) und  $W = W_e$  das Anlaufstromgesetz:

$$I_A = AT^2 \exp\left(\frac{-W_a + eU_a}{k_B T}\right) = I_0 \exp\left(\frac{eU_a}{k_B T}\right) \quad (2)$$

$T$  ist hierbei die Temperatur der Kathode,  $I_0$  eine Konstante, die von der Temperatur, der Austrittsarbeit  $W_a$  der Anode und von der Geometrie der Diode abhängt.

Im Raumladungsgebiet der Diodenkennlinie, also bei genügend positiver

Anodenspannung  $U_a$ , wird das Potenzial auf der Anodenseite soweit abgesenkt, dass für die Elektronen zwischen Kathode und Anode eine beschleunigende Feldstärke entsteht. Mit den von der Kathode emittierten Elektronen ist zum anderen eine negative Raumladung verbunden, die aufgrund der Abstoßung gleicher Ladungen untereinander ein Maximum im Potenzialverlauf zwischen Kathode und Anode bewirkt und den Elektronenstrom vermindert.



**Abb.3:**

Energieverlauf im Raumladungsgebiet einer Diode, schematisch ( $U_a > 0$ , Differenz der Austrittsarbeiten  $W_a - W_k$  vernachlässigt)  
 — mit Raumladung  
 - - - ohne Raumladung

Abb. 3 zeigt schematisch den Potenzialverlauf zwischen Kathode und Anode. Man findet für den Strom im Raumladungsgebiet der Kennlinie (Langmuir und Schottky):

$$I_R = C U_a^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

Hierbei ist  $C$  eine weitere Konstante, die von der Bauart der Röhre abhängt.

Im Sättigungsgebiet der Diodenkennlinie ist die beschleunigende Anodenspannung  $U_a$  hinreichend groß, so dass der Einfluss der Raumladungen verschwindet und alle thermisch emittierten Elektronen der Kathode zur Anode gelangen. Es fließt der Sättigungsstrom  $I_S$ , der mit Gl. (1),  $W = W_k$  gegeben ist:

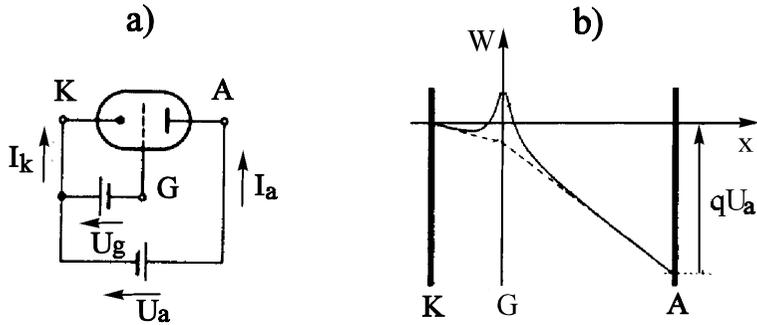
$$I_S = AT^2 \exp\left(-\frac{W_k}{k_B T}\right) \quad (4)$$

$W_k$  ist die Austrittsarbeit und  $T$  die Temperatur der Kathode. Ein weiteres schwaches Ansteigen des Anodenstromes mit steigender Anodenspannung beruht

auf einem Feldeffekt an der Kathodenoberfläche und kann mit dem einfachen Potenzialtopf-Modell (Abb. 2) nicht erklärt werden.

### 2.2 Triode

Bei einer Triode ist zwischen Kathode und Anode eine weitere Elektrode, das Gitter, angebracht. Es besteht aus einer Reihe von Stäben oder aus einem Drahtnetz. Abb. 4a zeigt das Schaltsymbol der Triode, Abb. 4b schematisch den Potenzialverlauf zwischen Kathode und Anode bei negativer Gitterspannung  $U_g$  zwischen Gitter und Kathode:



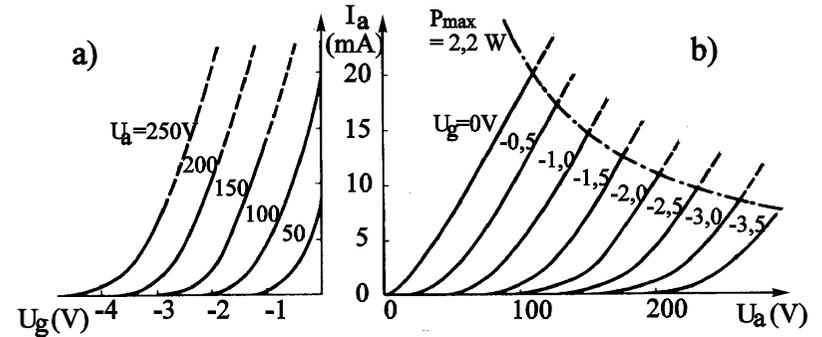
**Abb.4:** Hochvakuumtriode: a) Schaltsymbol, b) Potenzialverlauf zwischen Kathode und Anode, schematisch; ——— Verlauf in der Ebene eines Gitterstabes G, - - - Verlauf zwischen dem Gitter

Man kann schon durch eine relativ kleine negative Gitterspannung den Potenzialverlauf zwischen Kathode und Anode so verändern, dass der Anodenstrom  $I_a$  sich stark ändert. Darauf beruht die Verstärkerwirkung der Triode.

Abb. 5a zeigt das Kennlinienfeld  $I_a(U_g)$  mit der Anodenspannung  $U_a$  als Parameter, Abb. 5b das Kennlinienfeld  $I_a(U_a)$  mit der Gitterspannung  $U_g$  als Parameter:

Aus den Kennlinienfeldern lassen sich drei charakteristische Kenngrößen einer Triode ableiten:

Die *Steilheit*  $S$  ist das Verhältnis der Anodenstromänderung  $dI_a$  zur verursachenden Gitterspannungsänderung  $dU_g$  bei konstanter Anodenspannung  $U_a$ .



**Abb.5:** Kennlinienfeld einer Triode: a)  $I_a(U_g)$ ,  $U_a = \text{const.}$   
b)  $I_a(U_a)$ ,  $U_g = \text{const.}$

$$S = \frac{dI_a}{dU_g}, \quad U_a = \text{const.} \quad (5)$$

Der *Durchgriff*  $D$  ist das Verhältnis der Gitterspannungsänderung  $dU_g$  zur Anodenspannungsänderung  $dU_a$  bei konstantem Anodenstrom  $I_a$ .  $D$  gibt an, in welchem Maße sich  $U_g$  ändern muss, um bei einer Änderung von  $U_a$  den Anodenstrom konstant zu halten.

$$D = \frac{dU_g}{dU_a}, \quad I_a = \text{const.} \quad (6)$$

Der *Innere Widerstand*  $R_i$  beschreibt das Verhältnis von Anodenspannungsänderung  $dU_a$  zur Anodenstromänderung  $dI_a$  bei konstanter Gitterspannung  $U_g$ .

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a}, \quad U_g = \text{const.} \quad (7)$$

Für einen linearen Verlauf von Kennlinienstücken können die differentiellen Größen  $dI_a$ ,  $dU_a$  und  $dU_g$  in Gln. (5,6,7) durch entsprechende Differenzen  $\Delta I_a = I_{a1} - I_{a2}$ ,  $\Delta U_a = \dots$ ,  $\Delta U_g = \dots$  ersetzt werden. Die Beziehung zwischen den drei Kenngrößen wird durch die *Barkhausensche Röhrenformel* wiedergegeben:

$$\text{SDR}_i = 1 \quad (8)$$

Da die Röhrenkennlinien in größeren Strom-Spannungsbereichen nicht linear sind, sind Steilheit, Durchgriff und innerer Widerstand einer Triode von der Wahl des Arbeitspunktes abhängig.

### 3. Aufgabenstellung

- 1. Aufgabe:** Für eine Diode ist die Kennlinie  $I_a(U_a)$  für verschiedene Anodenspannungen  $U_a$  aufzunehmen, für negative Anodenspannungen bei zwei verschiedenen Kathodentemperaturen (Heizspannungen).
- 2. Aufgabe:** Die Kennlinien sind für die verschiedenen Gebiete geeignet aufzutragen. Aus dem Verlauf der Kennlinien im Anlaufstromgebiet sind die Kathodentemperaturen sowie die Austrittsarbeit der Anode zu bestimmen.
- 3. Aufgabe:** Für eine Triode sind die Kennlinien  $I_a(U_a)$  und  $I_a(U_g)$  bei verschiedenen konstanten Spannungen  $U_g$  bzw.  $U_a$  als Parameter aufzunehmen.
- 4. Aufgabe:** Aus den Kennlinien werden die Röhrenkennwerte  $S$ ,  $D$  und  $R_i$  entnommen. Man prüfe ob die Barkhausen-Formel erfüllt ist.

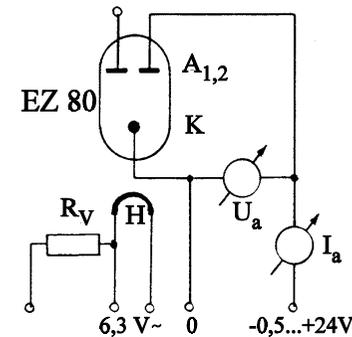
### 4. Versuchsdurchführung

#### 4.1 Diode

##### Aufgabe 1:

Es wird die Kennlinie  $I_a(U_a)$  der Doppeldiode EZ 80 für Anodenspannungen  $U_a$  von  $-0,5 \text{ V}$  bis  $+24 \text{ V}$  bestimmt. Die Heizspannung der Röhre ist  $U_H = 6,3 \text{ V}$  (indirekte Heizung), der max. Anodenstrom  $I_{a \text{ max}} = 90 \text{ mA}$ .

Die im Versuch benutzte Schaltung zeigt Abb. 6. Es wird nur eine Anode der Röhre angeschlossen. Zur Messung der Anodenspannung wird ein Digitalvoltmeter benutzt. Als Spannungsquelle dient ein Netzgerät mit den Ausgängen  $0 \dots -20 \text{ V} =$ ,  $0 \dots +300 \text{ V} =$  und  $6,3 \text{ V} \sim$ . Der Vorwiderstand  $R_v$  dient zur Verminderung der Heizspannung.



**Abb.6:**

Schaltung zur Kennlinienbestimmung der Diode EZ 80

A <sub>1,2</sub>	Anoden
K	Kathode
H	Heizung
R <sub>v</sub>	Vorwiderstand

Betreiben Sie die Röhre zunächst mit der vollen Heizspannung von  $6,3 \text{ V}$  und bestimmen Sie den Anodenstrom  $I_a$  bei positiven Spannungen  $U_a$ :

- von ca.  $0 - 5 \text{ V}$  in ca.  $0,5 \text{ V}$  - Schritten,
- von ca.  $5 - 10 \text{ V}$  in ca.  $1 \text{ V}$  - Schritten,
- von ca.  $10 - 24 \text{ V}$  in ca.  $2 \text{ V}$  - Schritten.

Benutzen Sie für den Spannungsbereich  $0 - 10 \text{ V}$  den  $20 \text{ V}$ -Ausgang, für  $10 - 24 \text{ V}$  den  $300 \text{ V}$ -Ausgang des Netzgerätes.

Zur Aufnahme der Kennlinie bei negativer Anodenspannung wird wieder der  $20 \text{ V}$ -Ausgang benutzt und der Anodenstrom  $I_a (< 100 \mu\text{A})$  für 11 Spannungswerte  $U_a$  im Bereich von ca.  $0$  bis ca.  $-0,5 \text{ V}$  bestimmt. Schließen Sie hierfür einen dekadisch geteilten Widerstand ( $10 \times 100 \Omega$ ) mit seinen Anschlüssen  $0$  und  $10$  an den  $20 \text{ V}$ -Spannungsausgang an und die Röhre an die Anschlüsse  $0$  und den Abgriff ( $x$ ). Stellen Sie dann mit dem Netzgerät in der Position  $x = 10$  die Spannung  $U_a$  auf ca.  $0,5 \text{ V}$  ein und messen Sie den (sehr geringen) Anodenstrom  $I_a$ . Verringern Sie darauf den Betrag der Spannung  $U_a$  durch stufenweises Verstellen des Abgriffs  $x$  und bestimmen Sie  $I_a(U_a)$ . Wiederholen Sie diesen Versuchsteil, um Mess- und Ablesefehler zu verringern.

Führen Sie nun die Bestimmung der Kennlinie bei negativer Anodenspannung mit verminderter Heizspannung (Kathodentemperatur) durch, indem Sie den Vorwiderstand  $R_v$  mit dem Heizfaden der Röhre in Serie schalten. Warten Sie bis sich die Temperatur der Kathode stabilisiert hat (d.h. der Strom  $I_a$  bei  $U_a = 0$  stabil ist) und führen Sie die Messung wie bei voller Heizspannung durch.

##### Aufgabe 2:

Die Messergebnisse für positive Anodenspannungen sind sowohl linear als auch

doppelt logarithmisch auf Millimeterpapier aufzutragen, also:

$$I_a = f(U_a) \quad \text{bzw.} \quad \ln(I_a) = f(\ln(U_a)).$$

Prüfen Sie, inwieweit Gl. (3) für das Raumladungsgebiet der Kennlinie zutrifft, indem Sie den Exponenten  $n$  der Kennlinie  $I_a = C U_a^n$  für verschiedene Spannungsbereiche bestimmen.

Für negative Anodenspannungen  $U_a$  sind die Kennlinien für die verschiedenen Heizspannungen der Kathode halblogarithmisch auf Millimeterpapier aufzutragen, also:

$$\ln(I_a) = f(U_a).$$

Bestimmen Sie die Steigungen der Ausgleichsgeraden im Anlaufstromgebiet und berechnen Sie mit Gl. (2) die Kathodentemperaturen. Schätzen Sie den Fehler hierfür ab, indem Sie die Ausgleichsgeraden variieren. Aus dem Verhältnis der Achsenabschnitte  $I_a(U_a = 0)$  wird mit den berechneten Temperaturen und Gl. (2) die Austrittsarbeit  $W_a$  der Anode bestimmt. Schätzen Sie auch hierfür den durch die Ausgleichsgeraden bestimmten maximalen Fehler ab.

## 4.2 Triode

### Aufgabe 3 u. 4:

Es werden Kennlinienfelder der Triode EC 92 bestimmt. Die Heizspannung ist  $U_H = 6,3 \text{ V}$  (indirekte Heizung). Die Grenzdaten der Röhre sind:  $P_{a \max} = 2,5 \text{ W}$ ,  $U_{a \max} = 300 \text{ V}$ ,  $I_{k \max} = 15 \text{ mA} \approx I_{a \max}$ . Diese Grenzdaten dürfen während des Versuches nicht überschritten werden. Die Schaltung zur Aufnahme der Kennlinien zeigt Abb. 7.

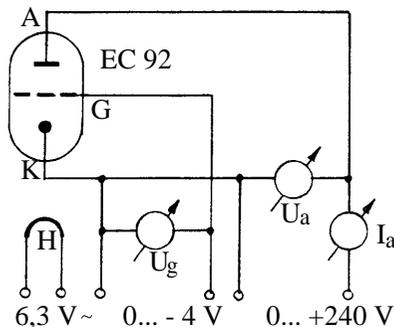


Abb.7:

Schaltung zur Kennlinienaufnahme der Triode EC 92

Als Netzgerät dient das gleiche wie das für die Diode benutzte. Zur Messung der Anodenspannung wird wieder ein Digitalvoltmeter benutzt. Vor Beginn der Messungen ist auf Millimeterpapier ein  $I_a(U_a)$ -Diagramm ( $I = 0 - 15 \text{ mA}$ ,  $U_a = 0 - 240 \text{ V}$ ) anzufertigen, auf dem die Hyperbel  $P_{a \max} = 2,5 \text{ W}$  und die Gerade  $I_{a \max} = 15 \text{ mA}$  eingezeichnet werden. Diese Grenzkurven sind bei den Messungen nicht zu überschreiten.

Es werden folgende Kennlinien bestimmt:

$$I_a(U_a) \quad \text{für } U_a = 20 - 240 \text{ V in } 20 \text{ V - Schritten} \\ \text{und jeweils } U_g = 0, -0,5, -1, -1,5, -2 \text{ V.}$$

$$I_a(U_g) \quad \text{für } U_g = 0 \text{ bis } -4 \text{ V in } 0,5 \text{ V - Schritten} \\ \text{und jeweils } U_a = 50, 100, 150, 200 \text{ V.}$$

Tragen Sie die Messergebnisse für  $I_a(U_a)$  in das vorbereitete Diagramm direkt ein. Fertigen Sie ein zweites Diagramm auf Millimeterpapier an, in dem Sie die Messergebnisse für  $I_a(U_g)$  ebenfalls direkt eintragen. Beachten Sie auch bei dieser Messung, dass die max. Leistung  $P_{a \max}$  und der max. Anodenstrom  $I_{a \max}$  nicht überschritten werden. Aus dem linearen Verlauf der Kennlinien werden die Werte für Steilheit  $S$ , Durchgriff  $D$  und innerer Widerstand  $R_i$  entnommen. Prüfen Sie die Gültigkeit der Barkhausen-Formel, Gl. (8).

## 5. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Wie ist eine *Vakuum-Diode* im wesentlichen aufgebaut und welche Funktionen haben ihre Elemente?
- 2) Beschreiben Sie den Kennlinienverlauf  $I_a(U_a)$  einer Diode. Welche Bereiche der Kennlinie lassen sich unterscheiden?
- 3) Erklären Sie mit Hilfe des *Potenzialtopfmodells* die Energieverhältnisse der Elektronen in einer Hochvakuum-Diode und begründen Sie damit den Kennlinienverlauf.
- 4) Wie ist eine Hochvakuum-Triode aufgebaut und worauf beruht ihre Verstärkerwirkung?
- 5) Beschreiben Sie den Verlauf der Kennlinien einer Triode. Wie sind die Größen *Steilheit*, *Durchgriff* und *Innerer Widerstand* definiert?
- 6) Was besagt die *Barkhausensche Röhrenformel*?