

BARKHAUSEN

LEHRBUCH DER  
ELEKTRONENRÖHREN

I. BAND  
ALLGEMEINE GRUNDLAGEN  
II. AUFLAGE



S. HIRZEL VERLAG LEIPZIG

# LEHRBUCH DER ELEKTRONENRÖHREN

UND IHRER TECHNISCHEN ANWENDUNGEN

VON

**PROF. DR. H. BARKHAUSEN†**

Ehemal. Direktor des Instituts für Schwachstromtechnik  
an der Technischen Hochschule Dresden

Herausgegeben und überarbeitet von

**PROF. DR.-ING. HABIL. E.-G. WOSCHNI**

Direktor des Instituts für Elektrotechnik  
an der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt

*1. Band: Allgemeine Grundlagen*



Elfte Auflage

Mit 177 Bildern

Archiv-Exemplar

**S. Hirzel Verlag**

**7 STUTTGART 1**

**Postfach 347**



**S. HIRZEL VERLAG LEIPZIG**

1965

**Alle Rechte dieser Ausgabe vorbehalten**

**Lizenz-Nr. 267-245/35/65 · ES 20 K 5**

**Copyright 1928 by S. Hirzel Verlag, Leipzig**

**Printed in the German Democratic Republic**

**Schutzumschlaggestaltung: Walter Schenk, Leipzig**

**Satz und Druck: Oswald Schmidt KG, Leipzig (III/18/65)**

**Bindearbeit: Großbuchbinderei E. P. Berger, Leipzig**

## Vorwort zur 8. Auflage

Bis auf kleinere Änderungen entspricht diese Auflage den vorhergehenden. Insbesondere wurde am klassischen Text nichts geändert.

Neu hinzugekommen ist lediglich eine Zusammenfassung von Teil B (Theorie der Schaltungen), die in den bisherigen Auflagen fehlte. Ferner wurden die Bezüge zu den anderen Bänden, wie seinerzeit vor 2 Jahren bei der Neuauflage von Band 3, auf den neuesten Stand gebracht. Sonst beschränkten sich die Änderungen auf einige Korrekturen sinnentstellender Druckfehler sowie einige kleinere Berichtigungen und Ergänzungen auch an einigen Bildern. Wo unumgänglich notwendig, wurden die im Text enthaltenen Daten (insbesondere Röhrendaten) entsprechend den inzwischen eingetretenen Neuentwicklungen korrigiert. Vielfach lassen sich jedoch spezielle Erscheinungen, die zum physikalischen Verständnis wesentlich beitragen, bei den alten Röhren (RE 134 usw.) viel besser erkennen. Aus diesem Grunde werden sich wohl die zwei Forderungen, am Originaltext möglichst wenig zu verändern und trotzdem die Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik zu berücksichtigen, gerade bei der gedachten Verwendung der Bände als Lehrbuch vereinen lassen.

Dresden, Frühjahr 1958

*E.-G. Woschni*

## Vorwort zur 10. Auflage

Die Formelzeichen und die Schreibweise der Formeln wurden auf die heute übliche Form gebracht. Im einzelnen bedeuten

$\bar{U}, \bar{I}$	Gleichstromgrößen
$\tilde{U}, \tilde{I}$	Effektivwerte
$\hat{U}, \hat{I}$	Spitzenwerte
$\mathbb{U}, \mathbb{I}$	gerichtete Größen (komplex)
$u, i$	Augenblickswerte (allgemein)
$u_{\sim}, i_{\sim}$	Augenblickswerte des Wechselanteiles
$u, i$	gerichtete Augenblickswerte des Wechselanteiles (komplex).

Es ergibt sich also z. B.

$$i_a = I_a + I_a \cos(\omega t + \varphi); \quad i_{a_{\sim}} = I_a \cos(\omega t + \varphi)$$

$$i = I e^{j(\omega t + \varphi)} = \mathbb{I} e^{j\omega t}.$$

Der gerichtete Widerstand wird mit  $\mathbb{Z}$  bezeichnet; es gilt

$$\mathbb{Z} = Z e^{j\varphi_z} = R + jX$$

bzw. beim Leitwert  $\mathbb{Y} = \frac{1}{\mathbb{Z}}$

$$\mathbb{Y} = Y e^{j\varphi_y} = G + jB.$$

Ferner wurden Formelzeichen (*Schrägdruck*) und Einheiten (gerade) im Schriftbild unterschieden. Die Einführung positiver Zählpfeile bei den Bildern dürfte insbesondere zum Verständnis der Vorzeichen wesentlich sein.

Am Originaltext brauchten kaum Änderungen vorgenommen zu werden.

Eine ganze Reihe typischer Erscheinungen (z. B. die Sättigung) lassen sich besonders gut an alten Röhren zeigen. In diesen Fällen wurden daher die mit diesen Röhren (BE-Röhre, RE 134) gewonnenen experimentellen Ergebnisse beibehalten, die in hervorragenden

der Weise einen leicht verständlichen Einblick in die physikalischen Vorgänge gestatten. Dagegen wurden besonders Kennlinien und Meßergebnisse der inzwischen veralteten Röhren (z. B. P 2000, AC 2) gegen solche moderner Typen (z. B. EF 80, EABC 80) ausgetauscht. In diesem Zusammenhang bin ich Herrn Ing. Kühnrich für die Durchführung der Meßreihen, Frau Fritzsching für die Anfertigung der Zeichnungen und unseren Röhrenwerken für die freundliche Überlassung von Unterlagen dankbar.

Karl-Marx-Stadt, Winter 1961/62

*E.-G. Woschni*

## **Vorwort zur 11. Auflage**

Auch bei dieser Auflage konnte an dem Grundsatz festgehalten werden, das Buch meines hochverehrten Lehrers weitgehend im Originaltext zu erhalten. Nach der bei der 10. Auflage durchgeführten Umstellung der Formelzeichen und Schreibweise der Formeln beziehen sich die Änderungen der vorliegenden 11. Auflage im wesentlichen auf einige Abbildungen und Begriffsbezeichnungen (z. B. Äquivalentenspannung anstelle der bisher üblichen Bezeichnung Effektivpotential) sowie auf einige Textstellen, insbesondere um in der Zwischenzeit eingetretene Weiterentwicklungen (z. B. Spanngitterröhren) zu berücksichtigen.

Karl-Marx-Stadt, Herbst 1964

*E.-G. Woschni*

# Inhaltsverzeichnis

## Historische Übersicht

1. Geschrieben 1924 .....	2
2. Geschrieben 1951 .....	5

## I. Teil. Allgemeine Grundlagen

### A. Theorie der Röhren

#### 1. Physikalische Grundlagen

§ 1. Die Gesetze der Elektronenbewegung im hohen Vakuum	
a) Ladung und Masse .....	7
Zahlwerte. Strom = bewegte Ladung.	
b) Elektrische Felder .....	8
Beschleunigende Wirkung. Voltgeschwindigkeit. Von der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit, daher praktisch trägheitslos arbeiten bis zu Frequenzen von $3 \cdot 10^8$ Hz ( $\lambda = 1$ m).	
c) Braunsche Röhre .....	10
Elektronenstrahl. Elektrische Ablenkung. Katodenstrahl-Oszillograph.	
d) Magnetische Felder .....	14
Kraftwirkung nur auf bewegte Elektronen. Nur Krümmung der Bahn, keine Geschwindigkeitsänderung. Krümmungsradius. Bei kleinen Geschwindigkeiten stärkere Krümmung. Trennung von Primär- und Sekundärelektronen. Umlaufdauer. Larmorfrequenz. Magnetische Ablenkung bei der Braunschen Röhre. Magnetron. Große Steuerleistung. Magnetischer Elektronentanz.	
§ 2. Das Vakuum	
a) Stoßionisation .....	18
Ionisierungsspannung. Verminderung der Raumladewirkung. Unregelmäßiges Verhalten.	
b) Die erforderliche Höhe und Prüfung des Vakuums	19
Prüfung durch Ionenstrom. Vakuumfaktor $< 5 \cdot 10^{-5}$ , d.h. $10^{-8}$ at erforderlich. Unter 10 V keine Ionen. Über 1000 V Ionenbombardement.	

- c) Die Herstellung des Vakuums ..... 22  
 Durch „Gettern“. Hochfrequenzheizung. Gettermetall schlägt sich auch auf Isolatoren und Elektroden nieder. Bei großen Senderöhren nicht zulässig. Kurzzeitiger Lichtbogen wirkt oft wie Getter.

## 2. Röhren ohne Gitter (Dioden)

### § 3. Elektronenaustritt aus glühenden Leitern

- a) Theorie ..... 23  
 Temperaturspannung. Austrittsarbeit. Sättigungsstromgesetz. Einfluß elektrischer Felder.
- b) Katodenmaterial ..... 28  
 Wolfram, Thorium, Barium (Oxyd). Formieren und Aktivieren. Für kleine Röhren fast ausschließlich Barium verwandt.
- c) Die elektrische Heizung ..... 32  
 Direkt, Spannungsabfall längs der Katode. Indirekt, lange Anheizzeit. Wärmebilanz. Tafel I für Wolfram. Heizmaß. Magnetfeld des Heizstromes.

### § 4. Anlaufstrom ..... 41

Exponentialgesetz. Kontaktpotential. Verschiebung der Kennlinie. Indirekte Messung des Sättigungsstromes. Allgemeine Gültigkeit, auch für negative Raumspannungen. Negative Aufladung isolierter Teile. Energieumsatz.

### § 5. Raumladungsstrom

- a) Die Wirkung der Raumladungen ..... 46  
 Anlaufstrom geht nicht unmittelbar in Sättigungsstrom über. Die negativen Raumladungen ändern das elektrische Feld, stoßen die negativen Elektronen zur Katode zurück. Der Strom begrenzt sich selbst.
- b) Eine Näherungsrechnung ..... 49  
 Aus  $Q_r = I \tau = Q_a = CU$  und  $\tau = k/\sqrt{U}$  folgt  $I = K' U^{3/2}$ . Gültig für beliebige Anordnung.  $K'$  immer klein, 1 bis  $10 \text{ mA/V}^{3/2}$ . Daher im Gegensatz zu Gasentladungen selbst bei größeren Spannungen nur kleine Ströme möglich. Sättigungsspannung  $U_s$ . Grenzen des Raumladungsgebiets. Elektronen stoßen nicht zusammen.
- c) Die genauere Theorie ..... 54  
 Durch Raumladungen  $Q_a$  und  $C^{4/3}$ -mal,  $\tau^{3/2}$ -mal größer. Daher  $K^{8/9}$ -mal kleiner. Zylindrische Anordnung. Anodenoberfläche maßgebend. Beliebige Anordnung.
- d) Berücksichtigung der Temperaturgeschwindigkeit  $E_T$  und der Sättigungsstromstärke  $I_s$  ..... 60  
 Minimumpotential. Verbesserte Formeln für die ebene und zylindrische Anordnung.

e) Eine Veranschaulichung .....	61
Elektronen fallen auf schiefer Ebene. Raumladungen heben und krümmen diese Ebene. Raumspannungskurven bei einer zylindrischen Röhre zwischen Sättigungsstrom- und Anlaufstromgebiet.	
f) Zusätzliche Einflüsse .....	65
Ungleichmäßige Temperaturverteilung und Spannungsabfall längs der Katode bei direkter Heizung. Netzbrummen. Künstliche Mitte. Einfluß des Magnetfeldes des Heizstromes.	
§ 6. Elektroneneintritt in Metalle	
a) Wärmewirkung .....	69
Leistungsumsatz. Erhitzung der Anode, des Glases.	
b) Sekundärelektronen .....	70
Auslösung durch Primärelektronen. Ausbeute. Erhöhung durch Bariumschicht. Reflexion. Zusätzlicher Gitter- und Anodenstrom. Negative Gesamtströme. Fallende Kennlinie. Dynatron. Aufladung isolierter Teile. Sekundärelektronen-Vervielfacher.	
c) Röntgenstrahlen .....	78
§ 7. Zusammenfassung von Teil I A 1 und A 2 .....	79

### 3. Röhren mit Gitter

#### a) Steuerspannung

§ 8. Eingitterröhren (Trioden) .....	81
Bezeichnungen. Für Katodenstrom $I_k$ Steuerspannung $U_g + DU_a$ maßgebend. Gitterlose Ersatzröhre. Steuerschärfe des Gitters. Äquivalentspannung. Durchgriff $D$ . Physikalische Bedeutung von $D$ . Berechnung von $D$ . Verschiebungsspannung. $(I_k U_g)$ - und $(I_k U_a)$ -Kennlinien. Unregelmäßigkeiten durch umkehrende Elektronen. 2-Platten-Röhre. Falsche Gleichrichterschaltung. Außengitterröhre.	
§ 9. Die räumliche Spannungsverteilung .....	93
Raumspannungen. Äquipotentiallinien. Meßbar im elektrolytischen Trog. Gleiches Spannungsgebirge herstellbar mit Gummimembran. Gitter wirkt wie Linse. Störungslose Gitterspannung. Äquivalentspannung. Spannungsverlauf nur vom Verhältnis $U_g/U_a$ abhängig. Zylindrische Anordnungen. Einfluß der Raumladungen.	
§ 10. Inselbildung, veränderlicher Durchgriff .....	102
$Q_k$ ungleichmäßig über die Katode verteilt. Inselbildung. Verschiedene Arten. Anoden- und Gitterschwanzstrom. Schematische Zusammensetzung aus 2 Röhren mit verschiedenem Durchgriff. Röhren mit absichtlich veränderlichem Durchgriff. Regel- (Exponential-) Röhren.	