

Sammlung Göschen

---

# Radiotechnik

V

**Die Elektronen-Röhre**

Von

**Dipl.-Ing. Otto Stürner**

Patent-Ingenieur in Calw

Mit 88 Figuren und 35 Ab-  
bildungen auf 16 Tafeln



Berlin und Leipzig

**Walter de Gruyter & Co.**

vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung · J. Guttentag, Verlags-  
buchhandlung · Georg Reimer · Karl J. Trübner · Veit & Comp.

1927

Alle Rechte, insbesondere das Übersetzungsrecht,  
von der Verlagshandlung vorbehalten.

Druck von C. G. Röder G. m. b. H., Leipzig. 906127.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Literaturverzeichnis . . . . .	5
1. Physik und Vakuumtechnik der Elektronenröhren.	
1. Elektrizitätsleitung in festen Körpern . . . . .	7
2. Elektrizitätsleitung in Flüssigkeiten . . . . .	8
3. Elektrizitätsleitung in Gasen . . . . .	9
4. Kathodenstrahlen . . . . .	10
5. Elektronen . . . . .	11
6. Die Röntgenstrahlen . . . . .	13
7. Stoßionisation . . . . .	15
8. Kinetische Gas-Theorie . . . . .	16
9. Unselbständige Entladungen . . . . .	17
10. Elektronentheorie . . . . .	18
11. Die Gesetze der Glühelctronen-Emission . . . . .	19
12. Die Raumladung . . . . .	21
13. Das Raumladungsgesetz von Langmuir-Schottky . . . . .	22
14. Güte des Vakuums . . . . .	24
15. Der Fleming-Detektor . . . . .	25
16. Die Lieben-Röhre . . . . .	26
17. Erfahrungen aus der Glühlampentechnik . . . . .	28
18. Die Grundbegriffe der Pumptechnik . . . . .	29
19. Einteilung der Vakuumpumpen . . . . .	30
20. Quecksilberstrahlpumpen . . . . .	32
21. Kondensationspumpen . . . . .	34
22. Die Evakuierung mit Absorptionsmitteln . . . . .	35
23. Elektrische Gas-Aufzehrung . . . . .	37
24. Das Glühpotential . . . . .	38
25. Die Vakuum-Meßmethoden . . . . .	41
II. Wesen und Wirkungsweise der Elektronenröhre.	
26. Die technischen Möglichkeiten der Elektronenröhre . . . . .	42
27. Der Verstärker . . . . .	43
28. Der Gitterstrom . . . . .	46
29. Die Sekundär-Elektronen . . . . .	48
30. Die Steilheit . . . . .	50
31. Die Arbeitskurve . . . . .	51
32. Die Bildung des Anodenstromes . . . . .	53

	Seite
33. Der Durchgriff . . . . .	54
34. Der innere Widerstand . . . . .	56
35. Die Röhrenkonstanten . . . . .	58
36. Die Anpassung . . . . .	59
37. Röhren- und Schaltungsgüte . . . . .	60
38. Der Verstärkungsgrad . . . . .	61
39. Anpassung durch Resonanzkreise . . . . .	62
40. Der wirksame Gitterwiderstand . . . . .	65
41. Pseudodämpfung . . . . .	67
42. Rückkopplung . . . . .	70
43. Der Röhrensender . . . . .	72
44. Die Stabilitätsbedingungen des Röhrensenders . . . . .	73
45. Rückkopplung und Resonanz . . . . .	75
46. Der Amplitudenverlauf in Abhängigkeit von der mittleren Steilheit . . . . .	78
47. Reißdiagramme . . . . .	80
48. Röhren-Gleichrichter . . . . .	82
49. Die Audionschaltung . . . . .	85
50. Dämpfungsreduktion . . . . .	86
III. Besondere Verhältnisse und Anordnungen von Elektronenröhren.	
51. Heizleistung und Lebensdauer von Glühkathoden . . . . .	88
52. Die Heizung von Empfangs- und Verstärkerröhren . . . . .	93
53. Die Heizung von Senderröhren . . . . .	95
54. Stromquellen kleiner Leistung für kleinere und mittlere Röhren . . . . .	99
55. Die Anodenspannung bei Senderröhren . . . . .	100
56. Die Gleichrichtung von technischem Wechselstrom . . . . .	102
57. Der Wirkungsgrad des Röhrensenders . . . . .	104
58. Grenzgitterspannung und Grenzwiderstand . . . . .	105
59. Oberwellen . . . . .	109
60. Parallelschaltung von Senderröhren . . . . .	111
61. Betriebsstörungen bei Verstärkern . . . . .	113
62. Die Fabrikation von Röhren . . . . .	116
63. Fabrikationsbeispiel . . . . .	117
64. Besondere Röhrenanordnungen . . . . .	118
Register . . . . .	122

## Literaturverzeichnis.

- Grimsehl, Lehrbuch der Physik. Band II: Magnetismus und Elektrizität. Verlag B. G. Teubner, Leipzig-Berlin.
- Dushman, S., Hochvakuumtechnik. Verlag Julius Springer, Berlin 1926.
- Goetz, Hochvakuumtechnik. Sammlung Vieweg, Heft 64, Braunschweig.
- Barkhausen, Elektronenröhren Band I und II. Verlag S. Hirzel in Leipzig.
- Möller, G., Die Elektronenröhren und ihre technischen Anwendungen. Sammlung Vieweg, Heft 49, Braunschweig.
- Zenneck-Rukop, Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie. Verlag Ferdinand Enke, Stuttgart 1925.
- Telefunken-Zeitung.
- Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie; Zeitschrift für Hochfrequenztechnik, Verlag M. Krayn, Berlin.
- Sammlung Göschen, Radiotechnik I—IV.
-



# I. Physik und Vakuumtechnik der Elektronenröhren.

## 1. Elektrizitätsleitung in einem festen Körper.

Legt man eine elektrische Spannung an einen festen Körper, so beobachtet man bei verschiedenen Stoffen ein verschiedenes Verhalten eines in die Leitung geschalteten elektrischen Anzeigeinstrumentes. Während unter dem Einfluß eines entstehenden Stromes bei Metallen das Instrument einen Ausschlag erfährt, bleibt sein Zeiger in der Nullstellung unbeweglich bei Stoffen wie Glas, Hartgummi usw. Letztere heißen aus diesem Grunde Nichtleiter oder Isolatoren, erstere Leiter der Elektrizität. Unter der Wirkung einer elektrischen Spannung erleiden aber auch die Isolatoren eine Veränderung. Ein mit einem Glasstab geriebenes Holundermarkkugelchen erfährt an der mit dem positiven Pole einer elektrischen Stromquelle verbundenen Stelle des Isolators eine Abstoßung, an der Stelle des negativen Pols eine Anziehung. Im Isolator herrscht, hervorgerufen von der Spannung, ein elektrischer Spannungszustand, ein elektrostatisches Feld einer bestimmten Feldstärke. Entsprechend dieser Erscheinung ist mit dem elektrischen Strome in einem Leiter ein magnetisches Feld verknüpft. So wird beispielsweise unter der Wirkung des magnetischen Feldes eines geraden stromdurchflossenen Metalldrahtes ein Magnetpol in einer dem Rechtsdrall der Stromrichtung zugeordneten Kreisbewegung abgelenkt.

Bis auf den heutigen Tag ist es noch nicht gelungen, eindeutig und erschöpfend den Mechanismus der Stromleitung

in einem festen Körper zu beschreiben. Verschiedene Theorien über die Leitfähigkeit des elektrischen Stromes existieren von Drude u. a. Siehe auch § 10.

Der Erforschung zugänglicher ist die

## 2. Elektrizitätsleitung in Flüssigkeiten.

Infolge der geringen Kohäsion ist hier der Verband der Atome und Moleküle ein loserer und eine eventuelle Zustandsänderung der Moleküle selbst unter dem Einfluß eines elektrischen Stromes leichter nachzuweisen. Die bis auf die Griechen zurückgehende Auffassung über den Aufbau der Materie aus nicht weiter teilbaren Bausteinen hat durch das elektrische Verhalten von verdünnten Säuren einen ernsthaften Stoß erlitten. So wurde bei Messungen des osmotischen Druckes, der Siedepunktserhöhung und Gefrierpunktserniedrigung von stark verdünnten Säurelösungen festgestellt, daß doppelt so viel Moleküle vorhanden sind, als man nach der bisherigen Theorie finden müßte. Diese Erscheinung zwingt zu der Annahme, daß die an und für sich elektrisch neutralen Säuremoleküle in verdünnter Lösung gespalten oder dissoziiert werden. Das Produkt dieser Spaltung sind Ionen, mit positiver Ladung versehene Wasserstoff- und Metall-Atome und negativ geladene Säurereste. Setzt man unter dem Einfluß einer Spannung diese an Materie gebundenen Ladungen in Bewegung, so erhält man einen elektrischen Strom. Taucht man beispielsweise in eine Kupferchlorürlösung 2 Metallstäbe, macht den einen Stab durch Anschluß an den positiven Pol einer Stromquelle zur Anode, den anderen durch Anschluß an den negativen Pol derselben Stromquelle zur Kathode, so wandern die Kupferionen an erstere und die Chlorionen an letztere.

Diese Anordnung liefert bekanntlich das Grundschema für die in der Galvanoplastik üblichen Verfahren, während

die Anordnung von 2 Metallstäben mit je einem positiven und negativen Lösungsdrucke in demselben Elektolyten das Grundprinzip für die elektrische Batterie liefert. (Näheres siehe Sammlung Göschen Nr. 620.)

### 3. Die Elektrizitätsleitung in Gasen

verhält sich ähnlich wie die Elektrizitätsleitung in Flüssigkeiten, wie ja überhaupt Flüssigkeiten in mancherlei Hinsicht als Gase zu betrachten sind. Schon die elektrischen Erscheinungen der Atmosphäre wie die Gewitterbildung lehren, daß die Luft durch Ionisierung leitend wird. Die Luft ist aber kein ideales Gas, da sie immer mehr oder weniger stark mit Dämpfen geschwängert und in Dämpfen die Expansion nicht vorherrschend ist. Um experimentell die elektrischen Eigenschaften von Gasen zu untersuchen, bringt man sie daher in von dem Atmosphärendruck unabhängige, evakuierte Gefäße, die mit einer Anode und Kathode ausgerüstet sind und auf diese Weise mit einer Elektrizitätsquelle hoher Spannung verbunden werden können. Alle typischen Erscheinungen der Elektrizitätsleitung durch Gase ergeben sich schon bei der Untersuchung eines an eine elektrische Spannung gelegten Vakuumgefäßes mit einer trockenen Luftfüllung, deren Dichte unter sonst gleichen Bedingungen durch Veränderung des Druckes variiert wird.

Stellt man in einem solchen Entladungsgefäß das höchste technisch überhaupt mögliche Vakuum her, so wird man auch mit dem höchstempfindlichen Galvanometer, das man zwischen Hochspannungsbatterie und Vakuumröhre schaltet, keinen Ausschlag feststellen können. Das absolute Vakuum ist der vollkommenste Isolator. Unsere Vorrichtung ist nun nichts anderes als ein unter Spannung stehender Kondensator mit einem verlustfreien Dielektrium. Wir haben also in einer Vakuumröhre höchster Evakuierung

nicht nur keinen Stromleiter, sondern den besten Stromunterbrecher.

Entspricht der Verdünnungsgrad etwa einem Drucke von 0,01 mm Quecksilbersäule (Hg), so äußert sich eine an und für sich unsichtbare Entladung in dem mehr oder weniger großen Ausschlage eines empfindlichen Galvanometers und in einer grünlich leuchtenden Fluoreszenz der Glaswandung an der der Kathode gegenüberliegenden Stelle. Als Ursache der Fluoreszenz müssen wir ein von der Kathode ausgehendes, unsichtbares Strahlenbündel ansehen. Diese Strahlen heißen

#### 4. Die Kathodenstrahlen.

Ihren materiellen Charakter zeigen sie dadurch, daß ein in den Strahlengang nach Fig. 1 gebrachtes dünnes Metallplättchen zum Glühen gebracht wird. Diese Energieabgabe lehrt, daß man es hier mit einer sogenannten Konvektions- oder Korpuskularstrahlung zu tun hat. Trotz Schattenbildung sind die Kathodenstrahlen also keine Lichtstrahlung. Sie haben so wenig wie ein Wasserstrahl eine Wellenlänge und bestehen wie dieser aus einzelnen Körperteilchen oder Korpuskeln.



Fig. 1. Entladungsröhre.  
 A = Anode = + Pol,  
 K = Kathode = - Pol  
 einer außen angelegten Stromquelle.

Wie eine bewegte negative Ladung, also wie ein Strom negativer Elektrizität, benimmt sich der Kathodenstrahl auch in einem elektrostatischen Felde. Legt man nämlich an die beiden Platten der in Fig. 2 dargestellten Röhre senkrecht zum Strahlengang eine Hilfsspannung, so wird entgegen

Verbindet man das in Fig. 1 gezeigte Metallkreuz leitend mit einem in beliebigem Abstand von der Röhre aufgestellten Elektroskop, so wird dieses negativ geladen. Wie eine bewegte negative Ladung, also wie ein Strom negativer Elektrizität, benimmt sich der Kathodenstrahl auch in einem elektrostatischen Felde. Legt man nämlich an die beiden Platten der in Fig. 2 dargestellten Röhre senkrecht zum Strahlengang eine Hilfsspannung, so wird entgegen

dem Potentialgefälle des Plattenkondensators, also in Richtung von der negativen zur positiven Belegung, der Strahl parabolisch ausgelenkt. Die Geschwindigkeit der Korpuskeln erfährt nach Größe und Richtung somit eine Änderung. Im Wirkungsbereich des elektrischen Feldes findet ein Leistungsumsatz statt. Die Ablenkung der geraden Strahlenbahn durch ein elektrisches Feld ist ein wesentlicher Unterschied der Kathodenstrahlen gegenüber den Lichtstrahlen.

Ordnet man an Stelle des Kondensators einen Elektromagneten an und erzeugt senkrecht zur Strahlrichtung ein homogenes Magnetfeld, so

werden die Korpuskeln in Kreisbahnen abgelenkt, für die die ursprüngliche Strahlenrichtung die Drehungsachse ist. Dies kann man leicht einsehen, so-

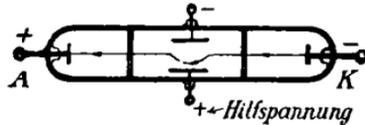


Fig. 2. Ablenkung der Kathodenstrahlen durch ein elektrostatisches Feld.

bald man diese Anordnung mit dem am Schlusse von § 1 erwähnten Beispiel vergleicht. Dort hat der elektrische Strom eine starre gerade Bahn und das magnetische Feld kreisförmige Kraftlinien; hier dagegen hat man ein homogenes Magnetfeld mit linearem Gefälle und wird deshalb für die elektrische Bahn eine kreisförmige Bewegung zu erwarten haben. Die Richtung entspricht wiederum einem Negativstrom.

## 5. Elektronen.

Als Resultat eingehender Untersuchungen erwiesen sich die Korpuskeln der Kathodenstrahlen als die Elektrizitätsatome, die sogenannten Elektronen. Dieselben hat man sich unstofflich und aus der negativen Einheitsladung bestehend vorzustellen. Positive Elektrizität gibt es nicht in Reinkultur, da immer mindestens die Masse

eines Wasserstoffatoms mit einer positiven Elementarladung verknüpft ist.

Man schreibt nun gleichwohl dem bewegten Elektron eine Masse zu in der Erkenntnis, daß das bewegte Elektron Trägheit besitzt und wie eine Masse wirkt. Eine einfache rechnerische Auswertung der in § 4 behandelten Ablenkungen des Elektrons im elektrostatischen und magnetostatischen Felde ergibt für die physikalisch außerordentlich wichtige Größe des Verhältnisses der elektrischen Ladung zur Masse  $\frac{e}{m} = 1,769 \times 10^7$  elektromagnetische Einheiten, wobei allerdings nur für Geschwindigkeiten, die wesentlich kleiner sind als die Lichtgeschwindigkeit, die Masse  $m$  als konstant zu betrachten ist. Die Elektronengeschwindigkeit  $v$  selbst läßt sich leicht berechnen, und zwar durch Gleichsetzung der kinetischen Energie des Elektrons:

$$U_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

mit der Arbeit des elektrischen Feldes, die als Produkt aus Ladung  $e$  und Spannung  $E$  sich ergibt zu

$$U_e = e E, \quad (2)$$

so daß

$$\frac{1}{2} m v^2 = e E \quad (3)$$

oder

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} E}, \quad (4)$$

woraus durch Übergang vom elektromagnetischen ins praktische Maßsystem sich ergibt:

$$v = 6 \times 10^7 \sqrt{E}. \quad (5)$$

$v$  versteht sich in cm/sec., wenn  $E$  in Volt eingesetzt wird.

Bei den Elektronenröhren handelt es sich um beschleunigende Spannungen von 10—10000 Volt, also um Ge-

schwindigkeiten von 2000—60000 km, weshalb im allgemeinen die oben für die Masse angegebenen Einschränkungen hier gelten. Da nach Formel (5) die Elektronengeschwindigkeit eine Funktion der erzeugenden Spannung ist, pflegt man auch die Geschwindigkeit in Volt anzugeben, so daß 1 Volt „Geschwindigkeit“ =  $6 \times 10^7$  cm/sec. bedeutet.

Wie elektrolytisch mit jedem Gramm einer bestimmten Substanzmenge ein gewisses Quantum Elektrizität transportiert wird, so ist auch jedes Elektron der Träger einer ganz bestimmten Elektrizitätsmenge. Da ein Gramm Wasserstoff die Ladung  $e_1 = 96494$  Coulomb mit sich führt, so ist die Elektrizitätsmenge eines Elektrons

$$\frac{e}{m} = \frac{1,77 \times 10^7}{9649,4} = 1850 \text{ mal}$$

größer und, bei Zuordnung von gleich großen Ladungen, umgekehrt die Elektronenmasse 1850 mal kleiner als die Masse eines Wasserstoffatoms, woraus man für das Elektron eine Masse  $m = 8,955 \times 10^{-28} g$  und die elektrische Elementarladung  $e = 1,591 \times 10^{-19}$  elektromagnetische Einheiten (Coulomb) errechnet. Ein Strom von 1 Amp. = 1 Coulomb/sec. entspricht also  $6,28 \times 10^{18}$  Elektronen pro Sekunde.

## 6. Die Röntgenstrahlen.

Breibt man eine gewöhnliche Kathodenröhre mit zwei kalten Elektroden mit einer sehr hohen Spannung, so kann ein mit einer fluoreszierenden Substanz bedeckter Pappschirm, der in der Nachbarschaft der fluoreszierenden Glaswand der Röhre aufgestellt wird, auch dann zu lebhaftem Leuchten erregt werden, wenn die Röhre selbst in schwarzes Papier eingewickelt wird. An einem ähnlichen



Fig. 3. Höchstleistungs-Röntgenröhre der AEG für Tiefentherapie. Leistung 1—2KW, Anodenspannung bis 230 000 V, Anode als Wolfram-Antikathode ausgebildet.



Fig. 4. Dentalröhre der Firma Siemens-Reiniger-Weifa, Röntgenröhre für zahnärztliche Diagnostik mit Rippenkühlung.

Versuche wurden erstmalig diese Strahlen von Röntgen im Jahre 1895 beobachtet, weshalb sie Röntgenstrahler heißen. Ihrem Wesen nach sind sie als Bremsstrahlung aufzufassen und zu erklären durch die plötzliche Impulsänderung beim Aufprallen der Elektronen auf der Anode. Wie eine von einem Kugelregen getroffene Glocke gleichzeitig in ihren Eigentönen erklingt und ein Getöse, das aus den Einzelknallen der aufschlagenden Geschosse resultiert, erzeugt, so besteht die Röntgenstrahlung aus einer dem Material der Antikathode zugeordneten Eigenstrahlung und der regellos geordneten Anzahl elektromagnetischer Impulse, die als

Folge des Zusammenbruchs der magnetischen Energie beim Abbremsen der Elektronen auftreten.

In der medizinischen Diagnostik und Therapie wird bekanntlich das hohe Durchdringungsvermögen der Röntgenstrahlen zur Durchleuchtung von Knochen und

Weichteilen des menschlichen Körpers angewendet. Die zu diesem Zwecke herge-

stellten technischen Röntgenröhren sind strenggenommen auch Elektronenröhren. Durch die Verwendung von sehr hohen Spannungen und durch die medizinische Aufgabensstellung wurden ausgesprochene Spezialformen entwickelt, wie sie beispielsweise in den Fig. 3 und 4 dargestellt sind.

## 7. Stoßionisation.

Bisher haben wir die Frage noch nicht beantwortet, wie die Elektronen in ungebundenem Zustande in unser Vakuumgefäß hineingekommen oder dort entstanden sind. Daß in verdünnten Gasen genau so wie in verdünnten Säuren eine Dissoziation stattfindet, beweist mit dem Auftreten von Kathodenstrahlen das gleichzeitige Vorhandensein von Kanalstrahlen auf der der Anode abgewandten Seite der Kathode. Diese Strahlen verhalten sich nämlich wie positive Ladungen. Ferner können aus den Resten der atmosphärischen Luft des Vakuumgefäßes freie Elektronen vorhanden sein. Als Ionisatoren für die Atmosphäre kommen in erster Linie die radioaktiven Substanzen in Frage, die in Erde und Luft enthalten sind. Etwa vorhandene freie Elektronen können durch Ionenstoß neutrale Gasmoleküle von einer bestimmten Geschwindigkeit ab aufspalten. Die dieser Geschwindigkeit zugeordnete elektrische Spannung ist die Ionisierungsspannung, deren Größe jedem Gase eigen ist und die zwischen 25 Volt bei Helium und etwa 4 Volt bei den Alkalimetallen liegt. Die Zertrümmerung der Gasmoleküle in Ionen kann unter Glimmlicht-Erscheinungen vor sich gehen.

In erster Linie sind die Ionisierungsvorgänge aber von der Gasdichte abhängig. Bekanntlich haben wir uns auf Grund der Gesetze, die den Zustand bei idealen Gasen regeln, und auf Grund der Vorstellungen, die zu der