

Dieter's Nixie Tube Data Archive

This file is a part of Dieter's Nixie- and display tubes data archive

If you have more datasheets, articles, books, pictures or other information about Nixie tubes or other display devices please let me know.

Thank you!

Document in this file	Unknown German tube date book
Display devices in this document	EZ10B, ECT100

Steuergitter. Thyratrons finden Verwendung in Motorsteueranlagen, in Schweißgeräten mit Ignitronsteuerung, in Lichtsteuergeräten zur stufenlosen Lichtstärkeregelung von Leuchtstoffröhren, bei Wickelvorrichtungen in der Textilindustrie, für Aufzugssteuerungen und Fördereinrichtungen, für Programmsteuerungen bei Werkzeugmaschinen u. a. m. Eine Auswahl dieser Anwendungen wird in späteren Abschnitten behandelt werden. Immer stärker wird das Thyatron allerdings durch das Halbleiter-Thyatron, den Thyristor, konkurrenziert, vor allem wenn es sich um den Einsatz in Geräten mit kleineren und mittleren Spannungen bis zu einigen 100 V handelt. In Hochspannungsgeräten dürfte das Thyatron seine Stellung bis auf weiteres behaupten.

4. Kaltkathodenröhren

a) Die Diode

Den bis jetzt behandelten Elektronenröhren ist gemeinsam, daß sie alle eine Kathode mit Glühemission aufweisen. Diese Emissionsart ist mit einer Reihe von Nachteilen verbunden: es wird dauernd Heizleistung verbraucht, auch wenn im Anodenkreis kein oder wenig Strom fließt; die Heizung verursacht zusätzliche Erwärmung; es muß immer eine gewisse Anheizzeit in Kauf genommen werden; die Lebensdauer der Glühkathode ist begrenzt. Es lag daher nahe, daß man bei der Entwicklung der Elektronenröhren auch Röhren mit ungeheizter oder kalter Kathode untersuchte, wobei es sich allerdings zeigte, daß man bei üblichen Spannungen nur mit Hilfe einer Gasfüllung brauchbare Ergebnisse erzielen konnte. Die Gasfüllung dient nicht nur zur Bildung des leitenden Plasmas zwischen den Elektroden (S. 29), sondern liefert auch die positiven Ionen, die beim Aufprall auf die Kathode die Elektronen befreien, die zur Aufrechterhaltung der Ionisierung erforderlich sind. Wie bei allen Gasentladungen braucht es auch hier in Serie mit der Röhre einen Widerstand, der den Anodenstrom auf einen Wert begrenzt, der einer Glimmentladung entspricht. Bei höherem Strom würde die Kathode durch den Aufprall der positiven Ionen so stark aufgeheizt, daß Glühemission und ein Lichtbogen auftreten würden, was rasch zur Zerstörung der Röhre führen könnte.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie der Glimmentladung ist bereits auf S. 31 behandelt worden. Sie zeigt die typischen Merkmale der relativ hohen Zündspannung U_Z , die zur Einleitung der Entladung erforderlich ist, und eines flachen Minimums, deren Spannung als Brennspannung U_B bezeichnet wurde. Die Ausnützung dieses nahezu horizontal verlaufenden Teils der Kennlinie erfolgt in den Stabilisierungsröhren, die dazu dienen, gewisse in elektronischen Geräten benötigte Gleichspannungen trotz Schwankungen der Netzspannungen auf möglichst konstantem Wert zu behalten. In Ergänzung zu Fig. 31 wird in Fig. 83 die Glimmdiode 85 A 2 gezeigt, die nicht nur zur Spannungsstabilisierung, sondern als eigentliche Spannungsreferenzröhre dienen kann. Sie liefert eine sehr konstante Bezugs- oder Referenzspannung, wie sie zum Beispiel in Kompensationsschaltungen oder für automatische Regelungen benötigt wird. Im Gegensatz zu den Vakuum-Elektronenröhren ist hier die Anode der zentrale Stab, die sehr sorgfältig aus möglichst homogenem Metall hergestellte Kathode das zylindrische Blech.

In den Signalglimmlampen wird lediglich die Leuchtkraft der Glimmentladung der Kaltkathodendiode ausgenützt (Fig. 27). Verglichen mit Glühlampen ist zwar die Leuchtdichte gering, dagegen sind die Glimmlampen gegen Erschütterungen unempfindlich, es wird weniger Wärme erzeugt, und vor allem haben Glimmlampen eine weit größere Lebensdauer. An sich enthält die Glimmentladung bei günstiger Gasfüllung fast nur rotes und gelbes Licht; es ist daher unmöglich, zum Beispiel durch Verwendung eines blauen Farbglases eine blauleuchtende Lampe herzustellen. Man gibt daher dem Füllgas Zusätze bei, die eine dem Auge unsichtbare ultraviolette Strahlung erzeugen. Diese wird dazu benützt, auf der Kolbeninnenseite angebrachte Leuchtstoffe zum Leuchten anzuregen, womit auch die Farben Grün und Blau erzeugt werden können.



Fig. 83
Spannungs-Stabilisierungsröhre 85 A 2 (Philips) in Miniaturtechnik mit hoher Stabilität während der gesamten Lebensdauer. Zündspannung 125 V, mittlere Brennspannung 85 V, Stabilisierungsbereich 1 bis 10 mA bei max. 4 V Spannungsänderung

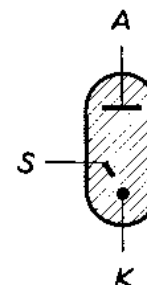


Fig. 84
Schematische Darstellung einer Glimmtriode mit Anode A, Steuerelektrode S (Starter, «trigger») und kalter Kathode K

Glimmlampen eignen sich, da sie keine sichtbare Trägheit haben, prinzipiell auch als Stroboskoplampen, die zur Auflösung rascher Bewegungen in ihre einzelnen Phasen dienen.

b) Die Relaisröhre

Führt man in eine gasgefüllte Diode mit kalter Kathode eine weitere Elektrode als Steuerelektrode ein, so entsteht die Glimmtriode oder die Relaisröhre (Fig. 84). Diese Röhre, noch während des Zweiten Weltkrieges fast unbekannt, hat sich als eines der jüngsten Glieder der Familie der Elektronenröhren sehr rasch entwickelt, wobei in der Schweiz die Firmen Cerberus AG, Männedorf, und Elesta AG, Bad Ragaz, maßgebenden Anteil haben. Der Grund für die zunehmende Verwendung

der Relaisröhre ist der, daß sie in idealer Weise wichtige Eigenschaften elektronischer und elektromechanischer Schaltelemente verbindet. Als Elektronenröhre besitzt sie hohe Steuerempfindlichkeit und große Schaltgeschwindigkeit, andererseits ist sie – wie ein elektromechanisches Relais – jederzeit ohne Vorheizung arbeitsbereit. Diese Eigenschaft ist besonders bei jenen Anwendungen von Bedeutung, bei denen nach langen Bereitschaftszeiten relativ kurze Arbeitszeiten auftreten, wie im Ionisationsfeuermelder (Fig. 19), in Netzkommandoempfängern, für die automatische Telephonie, bei Lichtsteuerungen (Ölfeuerungen), bei Zeitsteuerungen u. a. m.

Zur Erklärung des Steuermechanismus einer Glimmtriode muß auf die Strom-Spannungs-Kennlinie der Glimmstrecke zurückgekommen werden (Fig. 85), wobei im Gegensatz zu Fig. 30 die Stromstärke I in logarithmischem Maßstab aufgetragen ist. Dies gestattet es, die Kennlinie in der Umgebung der Zündspannung U_{Z_1} , welches Gebiet bei linearer Darstellung praktisch auf der Ordinate liegt, genauer zu betrachten.

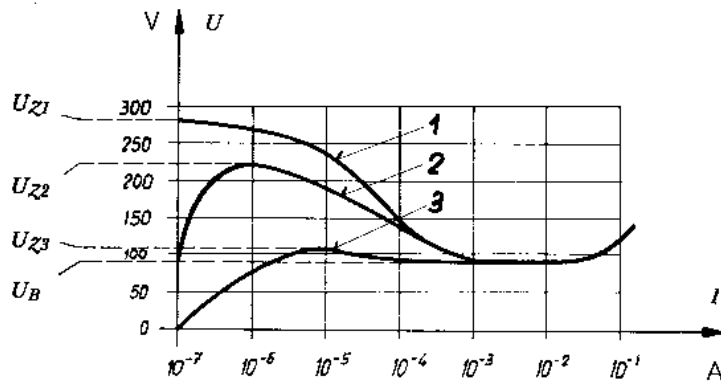


Fig. 85

Strom-Spannungs-Kennlinie einer Glimmtriode. 1 ohne Fremdstrom (Zündspannung U_{Z_1}), 2 mit schwachem Fremdstrom (Zündspannung U_{Z_2}), 3 mit starkem Fremdstrom (Zündspannung U_{Z_3}). U_B = Brennspannung

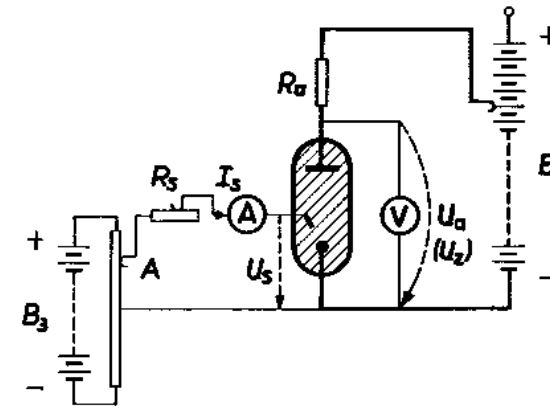
Die Glimmtriode hat eine Kennlinie nach 1. Erst bei der relativ hohen Zündspannung U_{Z_1} wird die Entladung selbständig, das heißt hält sie sich durch Stoßionisation aufrecht. Nun ist es denkbar, die Einleitung der selbständigen Entladung durch eine «Einspritzung» von Ladungsträgern in die Entladungsstrecke zu begünstigen. Man kann zum Beispiel die Röhre mit einer lichtempfindlichen Kathode versehen und von außen kräftig beleuchten. An der Kathode werden Photoelektronen ausgelöst, die zur Anode fliegen und sich auf dem Weg durch Stoßionisation noch vermehren. Unter dem Einfluß dieses von außen ausgelösten «Fremdstroms» sinkt die Kennlinie auf die Form 2 (Fig. 85) mit bedeutend kleinerer Zündspannung U_{Z_2} . Eine stärkere Beleuchtung führt zu einem kräftigeren Fremdstrom, was die Kennlinie weiter absenkt (3) mit noch tiefer liegender Zündspannung U_{Z_3} .

Normalerweise erfolgt die Einspritzung der zusätzlichen Ladungsträger durch eine besondere Steuerelektrode, den Starter S. Da dieser Starter nahe bei der Kathode

K liegt, genügt zur Zündung der Steuerstrecke S-K eine relativ niedrige Spannung von zum Beispiel etwa 100 V. Mit einem im Starterkreis liegenden Strombegrenzungswiderstand wird der Steuerstrom variiert und dadurch die Zündspannung der Hauptentladungsstrecke Anode-Kathode beeinflusst. Je stärker der Steuerstrom, desto mehr Ladungsträger existieren in der Röhre und desto niedriger ist die Zündspannung der Hauptstrecke. Der Zusammenhang zwischen Steuerstrom I_s und Zündspannung der Hauptstrecke U_z wird Steuerkennlinie der Relaisröhre genannt.

Zur Aufnahme dieser Steuerkennlinie dient eine ähnliche Schaltung wie die zur Ermittlung der Zündkennlinie eines Thyratrons (Fig. 78), mit dem Unterschied, daß keine Spannungsquelle für die Röhrenheizung erforderlich ist und nun hier speziell der Starterstrom I_s und die Anodenspannung U_a bei der Zündung der Hauptstrecke interessieren, was durch Einschaltung entsprechender Instrumente (Voltmeter sehr hochohmig!) hervorgehoben ist (Fig. 86). Durch Verstellen des Abgriffs an der Anodenbatterie B_2 wird eine bestimmte Anodenspannung U_a gewählt. Nun wird die Starterspannung U_s durch Hochschieben des Abgriffs A am Starterspannteiler so weit erhöht, bis die Steuerstrecke zündet und ein Steuerstrom I_s einsetzt, der zunächst noch durch den Widerstand R_s im Starterkreis auf einen kleinen Wert begrenzt ist. Die so erfolgte «Einspritzung» von Ladungsträgern genügt noch nicht zur Durchzündung der Entladung auf die Anode. Es wird nun durch Verkleinerung von R_s der Steuerstrom I_s so weit erhöht, bis auch die Hauptstrecke zündet und Anodenstrom einsetzt. So kann der für eine bestimmte Anodenspannung erforderliche Steuerstrom ermittelt werden. Die Wiederholung dieser Messung für andere Anodenspannungswerte und Einzeichnen dieser Punktepaare in einer graphischen Darstellung gibt die erwähnte Steuerkennlinie, die in Fig. 87 für die Relaisröhre 5823/Z 900 T dargestellt ist. Sie sagt zum Beispiel aus, daß diese Röhre bei einer Anodenspannung von 175 V zündet, sofern der Steuerstrom 160 μ A beträgt (Punkt P₁).

Die Schaltung nach Fig. 86 kann auch dazu dienen, die Zündung irgendeiner Entladungsstrecke bei Vorhandensein von Spannung nur im Starterkreis, nur im



Anodenkreis oder in beiden Kreisen zu untersuchen. Die so ermittelten Zündspannungen sind in der Zündkennlinie (Fig. 88) festgehalten. Bei abgeschaltetem Anodenkreis wird zum Beispiel zunächst die Starterzündspannung

Fig. 86
Schaltung zur Aufnahme der Steuerkennlinie einer Relaisröhre

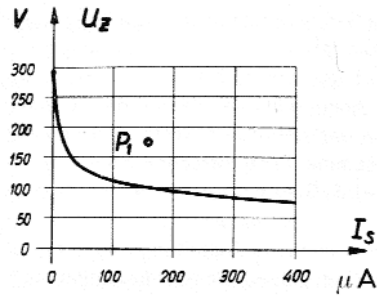


Fig. 87
Steuerkennlinie der Relaisröhre 5823/Z 900 T
(Philips)

nung bestimmt, die – wieder bei der Röhre 5823/Z 900 T – bei positiver Starterspannung 80 V (Punkt P_1), bei negativer Starterspannung -70 V beträgt (Punkt P_2). Die Anodenzündspannung (bei abgeschaltetem Starterkreis) ergibt sich zu 290 V (P_3) bzw. -275 V (P_4).

Wie verhält sich nun die Röhre, wenn an Starter S und an Anode A gleichzeitig bestimmte Spannungen gegenüber der Kathode K liegen? Je nach diesen Spannungen kann die Glimmentladung in der Hauptstrecke AK, in der Steuerstrecke SK oder zwischen Anode und Starter AS zustande kommen, wobei auch noch die Stromrichtung wechseln kann, so daß total 6 Entladungsarten möglich sind. Sie sind in Fig. 88 schematisch eingetragen unter Hinweis auf den zugehörigen Abschnitt der Zündkennlinie und unter Angabe der Stromrichtung in der Anoden- oder der Starterzuleitung. Wird zum Beispiel die Anodenspannung zu $U_a = 140$ V gewählt (P_5) und nun die Starterspannung U_s von 0 her gegen positive Werte vergrößert, so zündet bei $U_s = 80$ V (P_6) eine Entladung zwischen Starter und Kathode. Die Kennlinie zeigt, daß diese Starterzündspannung in einem weiten Bereich unabhängig von der jeweiligen Anodenspannung ist. Dies gilt praktisch auch für die Anodenzündspannung, die ihrerseits nur wenig von der Starterspannung abhängt. Wird zum Beispiel $U_s = 30$ V gewählt (P_7) und nun U_a erhöht, so zündet eine Entladung zwischen Anode und Ka-

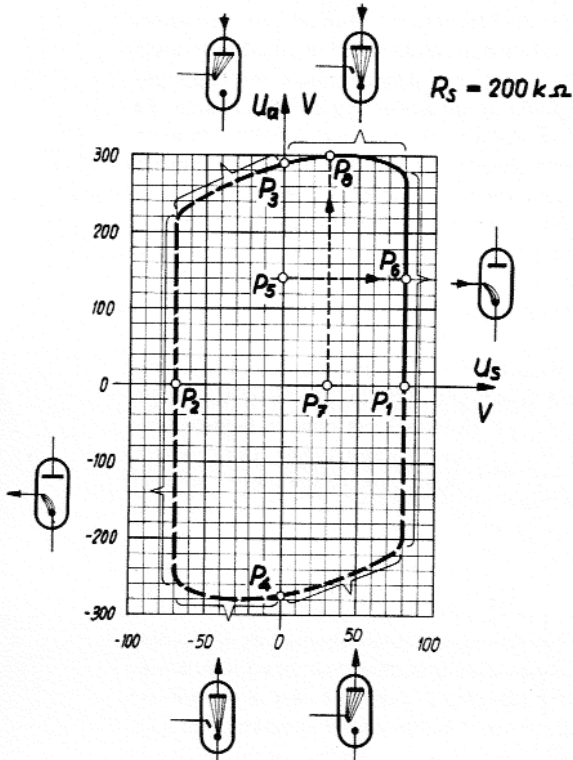


Fig. 88
Zündkennlinie der Relaisröhre 5823/Z 900 T

thode bei $U_a = 300$ V (P_3); bei einer anderen Starterspannung hätte man eine nur wenig veränderte Anodenzündspannung erhalten.

Fig. 88 zeigt, daß auch Entladungszustände gezündet werden können, bei denen entweder die Anode oder der Starter Elektronenaustrittsstellen sind, also «Kathode spielen» müssen. Diese Entladungsformen sind unnatürlich und können der Röhre schaden. Es wird daher im allgemeinen empfohlen, solche Röhren nur im ersten Quadranten des Kennlinienfeldes zu betreiben (kräftig ausgezogener Teil). Es muß noch ergänzt werden, daß wie beim Thyatron die Meßwerte sowohl für die Steuerkennlinie als auch für die Zündkennlinie bei einem bestimmten Röhrentyp von Röhre zu Röhre etwas streuen, dies selbst auch bei ein und derselben Röhre innerhalb der Lebensdauer. Die vollständigen Kennlinien enthalten daher auch Streubänder, auf deren Wiedergabe aber verzichtet wurde, um die Figuren nicht zu überlasten.

Hat die Röhre bei irgendeiner Entladungsform einmal gezündet, so kann wie beim Thyatron der Strom nur durch kurzzeitiges Absetzen der Betriebsspannung unter die Brennspannung der betreffenden Entladung unterbrochen werden. Diese Brennspannung beträgt zum Beispiel bei der 5823/Z 900 T sowohl für die Hauptstrecke als auch für die Steuerstrecke etwa 60 V. Und wie beim Thyatron wird der Entladungsraum nach dem Löschen der Entladung nur allmählich von Entladungsprodukten frei, so daß beim Wiederanlegen der Speisespannung kurz nach der Löschung unter Umständen eine Wiederzündung bei einer Spannung stattfindet, die nach Zündkennlinie nicht zur Zündung führen würde. Es braucht also auch hier eine gewisse Entionisierungszeit, die bei der 5823/Z 900 T je nach den Betriebsbedingungen $500 \mu\text{s}$ beträgt. Andererseits braucht auch der Aufbau der Entladung eine gewisse Zeit. Diese sogenannte Ionisierungszeit ist bei unserer Röhre bei normaler Beleuchtung $10 \dots 100 \mu\text{s}$.

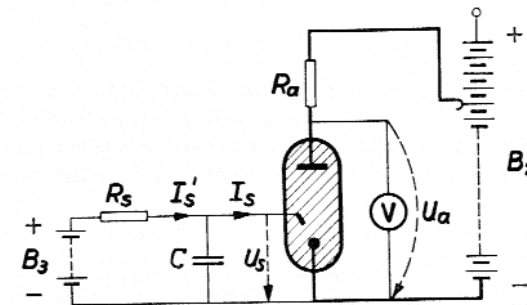


Fig. 89
Schaltung zur Aufnahme der Kipp-Steuerkennlinie einer Relaisröhre

Bei zahlreichen Anwendungen der Relaisröhre sind die verfügbaren Steuerströme so klein, daß sie nicht genügen würden, eine merkbare Verkleinerung der Zündspannung in der Hauptentladungsstrecke zu bewirken. In solchen Fällen wird die Schaltung nach Fig. 89 mit sogenannter Kippsteuerung angewendet. Gegenüber der Schaltung nach Fig. 86 ist als wesentliches Element ein Kondensator C

parallel zur Steuerstrecke hinzugekommen. Der hier über einen hochohmigen Widerstand R_s von zum Beispiel $10\text{ M}\Omega$ zufließende kleine Steuerstrom I_s' lädt den Kondensator C auf; seine Spannung U_s steigt immer mehr. Sobald U_s die Starterzündspannung erreicht hat, zündet die Steuerstrecke, und der Kondensator entlädt sich schlagartig bis auf die Brennspannung der Steuerstrecke, wobei eine relativ hohe Spitze des Starterstroms I_s entsteht, die den Steuerstrom I_s' um mehrere Größenordnungen übersteigt. Die Anodenzündspannung wird durch diesen Stromstoß in der Steuerstrecke kräftig herabgesetzt. Der Vorgang im Starterkreis gleicht der Entleerung eines zum Beispiel Sand führenden Lastwagens mit kippbarer Brücke. Erst wenn die Brücke einen bestimmten Neigungswinkel erreicht hat, kommt plötzlich die ganze Ladung ins Rutschen.

Die bei der Kippsteuerung erforderliche Kondensatorspannung ist durch die Starterzündspannung gegeben; die verfügbare Energie kann daher nur durch die Kapazität beeinflusst werden. Unter der Kippsteuerungskennlinie versteht man daher den Zusammenhang zwischen Anodenzündspannung und Kippkapazität im Starterkreis. Sie ist in Fig. 90 für die Relaisröhre GR 15 (Cerberus) dargestellt. Es kann ihr zum Beispiel entnommen werden, daß bei einer Anodenspannung von $U_a = 160\text{ V}$ eine Kippkapazität von 200 pF (Punkt P_1) zur Zündung der Hauptstrecke der Röhre genügt. Dank der Kippsteuerung ist es bei besonderen Röhren möglich, mit extrem kleinen Steuerströmen in der Größenordnung von 10^{-12} A auszukommen!

Bei den Schaltungen nach den Fig. 86 und 89 zur Untersuchung der grundsätzlichen Wirkungsweise der Relaisröhre sind ausschließlich Gleichspannungen verwendet worden. Für viele praktische Anwendungen der Röhre wäre es nun wesentlich günstiger, direkt mit Wechselspannung, zum Beispiel der normalen Netzspannung 220 V , arbeiten zu können. Dies ist auch tatsächlich bei besonders gebauten Relaisröhren, den sogenannten Wechselstromröhren wie die GR 16,

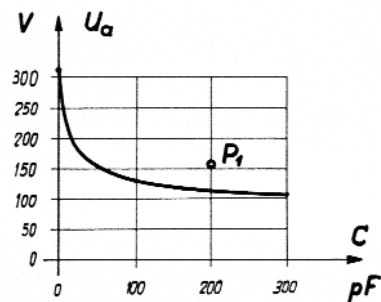


Fig. 90
Kippsteuerkennlinie der Relaisröhre GR 15
(Cerberus)

ohne weiteres möglich; sie sind so gebaut, daß sie bei normaler Netzspannung nicht ohne Hilfe der Steuerentladung zünden. Es muß dann in jeder Periode mit Hilfe des Starters neu gezündet werden, wenn die Röhre nicht gelöscht bleiben soll, da in der Nähe des Nulldurchgangs der Anodenspannung die Röhre selbst-

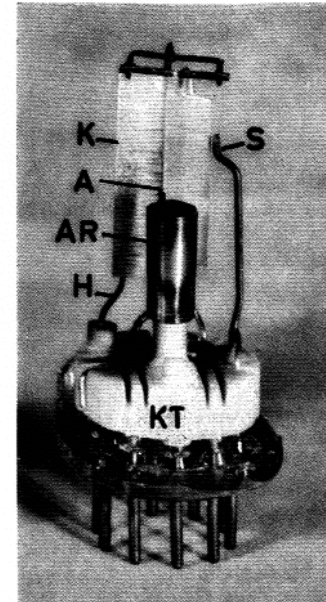


Fig. 91
Innenaufbau einer GR 16 mit Reinmetallkathode in Allglas-Neoval-Ausführung
K Kathode
S Starter
A Anode in Abschirmröhrchen
AR Abschirmröhrchen
H Hilfsanode
KT Keramikteller
Cerberus AG, Männedorf

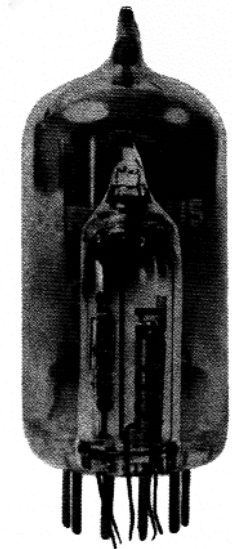


Fig. 92
Glimmrelais GR 41 mit zwei Startern, Subminiaturausführung zum Einlöten, im Größenvergleich mit Novalröhre. Cerberus AG, Männedorf

tätig löscht. Entsprechende Schaltungen werden später im Rahmen der praktischen Anwendungen zur Behandlung kommen.

Abschließend seien noch einige praktische Ausführungen gezeigt. Fig. 91 stellt die Relaisröhre GR 16 der Cerberus mit kalter Molybdänkathode dar, deren Anodenkreis mit Gleich- oder Wechselspannung betrieben werden darf und die vor allem für Kontaktschutzrelais, Zeitrelais und photoelektrische Steuerungen geeignet ist. Fig. 92 zeigt im Größenvergleich mit einer Novalröhre die Subminiaturröhre GR 41 (Cerberus), die dank des Einbaus von zwei Startern sich besonders für elektronische Automatikschaltungen und Zählkreise eignet. Daß die kalte Kathode auch für sehr hohe Impulsströme anwendbar ist, zeigt Fig. 93, die eine Hochstrom-Schaltröhre darstellt. Sie dient zum Beispiel zur gesteuerten Entladung von Kondensatoren, wobei der Einsatz der Entladung durch eine Starterelektrode bei sehr hoher Stromverstärkung von 10^8 bis 10^{10} erfolgt.

Wie bei den Vakuumröhren können auch bei Kaltkathodenröhren mehrere Elektroden zwischen Anode und Kathode eingeschaltet werden; es entstehen dann Kalt-

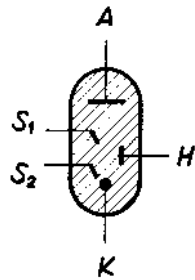
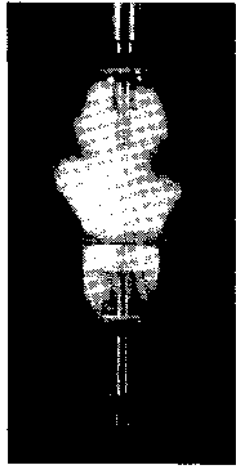


Fig. 94
Glimmpentode mit Anode A,
Kathode K, zwei Startern S₁ und
S₂ und eine Hilfsanode H

← Fig. 93
Hochstrom-Schaltröhre HSR 21 (Cerberus) für die Erzeugung
sehr hoher Stromspitzen bis zu 10000 A von kurzer Dauer.
Anodenspiessspannung 2000 V Gleichstrom

kathoden-Tetroden und -Pentoden. Fig. 94 zeigt als Beispiel die schematische Darstellung einer Glimmpentode, deren Hilfsanode H dazu dienen kann, die Zündzeiten zu verkürzen oder die Anodenzündspannung zu beeinflussen.

Eine besonders interessante Ausführung einer Kaltkathodenröhre ist die dekadische Zählröhre EZ 10 B (Elesta). Ihr Schema zeigt Fig. 95, ihre Form Fig. 96. Die Entladung springt beim Anlegen und Wegnehmen eines Zählimpulses jeweils zur nächsten der 10 Hauptkathoden. Die Stellung der Entladung kann von Auge

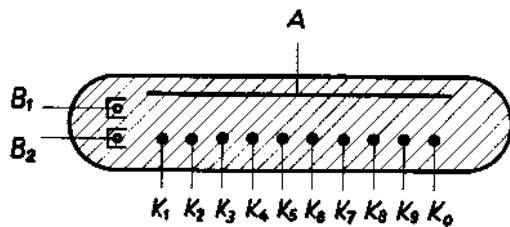
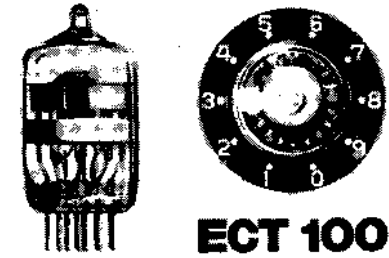


Fig. 95
Schema einer dekadischen Kaltkathoden-Zählröhre mit
Anode A, 10 Hauptkathoden K₁, K₂ usw. bis K₁₀ und zwei
Hilfskathoden B₁ und B₂



Fig. 96 >
Dekadische Zählröhre EZ 10 B (Elesta) für eine Zähl-
frequenz von über 1000000 Impulsen pro Sekunde

Fig. 97
Gasgefüllte Kaltkathoden-Zählröhre ECT 100
(Elesta) für Zählgeschwindigkeiten bis zu
1 MHz



abgelesen werden. Solche Zählröhren können leicht kombiniert werden, so daß von einer Impulsserie die Einer, Zehner, Hunderter usw. rasch und genau bestimmt werden können. Die Röhre findet praktische Anwendung in elektronischen Zähl-, Meß-, Speicher- und Steuer-Geräten, für Frequenzteiler und für genaue Zeitrelais. Für sehr hohe Zählfrequenzen bis 1 MHz eignet sich die gasgefüllte Kaltkathoden-Zählröhre ECT 100 (Fig. 97). Sie kann direkt durch Transistoren angesteuert werden, zählt vor- und rückwärts und ist bei kleinen Abmessungen (Durchmesser des Glaskolbens 21 mm) sehr robust.

5. Röhren mit Quecksilberkathode

a) Allgemeines

Um 1900 war der Amerikaner Peter Cooper Hewitt damit beschäftigt, den schon seit 1860 bekannten Quecksilberlichtbogen als Lichtquelle kommerziell auszuwerten. Bei seinen Versuchen wurde er zufällig darauf aufmerksam, daß in einer mit Wechselspannung gespeisten Anordnung mit einer Quecksilberelektrode ein Gleichstrom floß, die Entladungsstrecke also als Gleichrichter wirkte! Hewitt erkannte sofort die Bedeutung seiner Entdeckung und meldete sie 1902 zum Patent an. Fig. 98 ist die Wiedergabe des Schemas einer Vierphasen-Gleichrichtung aus dem damals erteilten schweizerischen Patent, das abgesehen von der kapazitiven Zündung (mit Außenelektrode) schon sehr modern anmutet.

Die Erfindung Hewitts ist eine interessante Parallele zu der Entdeckung der Glühemission durch Edison (Seite 51), der ebenfalls primär die Glühlampe als Lichtquelle eingehend untersuchte und dabei als «Nebeneffekt» den Austritt von Elektrizität aus dem Glühfaden entdeckte.