Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

Band: 32 (1954)

Heft: 10

Artikel: Das freie Elektron in der Nachrichtentechnik

Autor: Rusterholz, A.A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-874493

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Nº 10 - BERN, 1. X. 1954 - JAHRGANG - ANNÉE - ANNO XXXII

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Das freie Elektron in der Nachrichtentechnik

Von A. A. Rusterholz, Zürich

621.385:621.39

Zusammenfassung. *Es wird eine kurze Übersicht über diejenigen physikalischen Vorgänge gegeben, die für die Arbeitsweise der modernen Elektronenröhren von Wichtigkeit sind. Darauf werden die verschiedenen Ausführungsformen der heute in der Nachrichtentechnik verwendeten Elektronenröhren beschrieben.*

Résumé. *L'auteur donne un bref aperçu des phénomènes physiques qui jouent un rôle dans le fonctionnement des tubes électroniques modernes. Il décrit ensuite les différents types de tubes électroniques utilisés aujourd'hui dans la technique des télécommunications.*

Bekanntlich ist alle Materie aus Atomen aufgebaut. Auf Grund jahrzehntelanger Forschungsarbeiten wissen wir heute, dass jedes Atom aus einem positiv geladenen Kern besteht, der von einem oder mehreren leichten, negativ geladenen Teilchen, den Elektronen, umgeben ist. Ist die Gesamtladung dieser Elektronen gleich der Ladung des Kernes, so ist das Atom elektrisch neutral. Werden aus der Elektronenhülle des Atoms ein oder auch mehrere Elektronen entfernt oder ihr angelagert, so erhält man Gebilde, welche elektrisch positiv oder negativ sind: wir sprechen dann von positiven oder negativen Ionen.

Jeder feste Körper ist seinerseits aus Atomen oder Ionen aufgebaut. Die Kristalle zeichnen sich dadurch aus, dass ihr Aufbau ein besonders regelmässiger ist (Kristallgitter); dies äussert sich nach aussen in den Symmetrieeigenschaften der Kristalle. Auch die Atome eines Metalles bilden ein solches Gitter; nur kann hier ein Teil der Elektronen die Elektronenhülle der einzelnen Atome verlassen und sich frei innerhalb des Gitters bewegen. Legen wir an einen Metalldraht eine Spannungsdifferenz an (indem wir dessen Enden mit den Klemmen einer Batterie verbinden), so werden sich diese Leitungselektronen längs des Drahtes bewegen; wir beobachten das Fliessen eines elektrischen Stromes. Die Richtung dieses Stromes ist infolge der negativen Ladung der Elektronen zu deren Bewegungsrichtung entgegengesetzt.

Unter besonderen Umständen gelingt es nun, die Leitungselektronen aus dem Inneren eines festen Körpers in den angrenzenden Aussenraum austreten zu lassen; diesen Vorgang bezeichnen wir als Elektronenemission. Wir können diese austretenden, freien Elektronen mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Kräften beeinflussen und damit ihre Bewegung im Aussenraume lenken.

Als einfachstes Beispiel sei in Figur 1 eine Anordnung dargestellt, in welcher zwei Metallteile, die Elektroden K und A, innerhalb eines luftleer gepumpten Glaskolbens angebracht sind. Der Druck im Innern des Kolbens betrage etwa 10^{-6} mm Quecksilbersäule (Hochvakuum). Die Elektroden können durch Drähte, die durch die Glaswand hindurchtreten, mit den Klemmen der Batterie E_a verbunden werden. Die

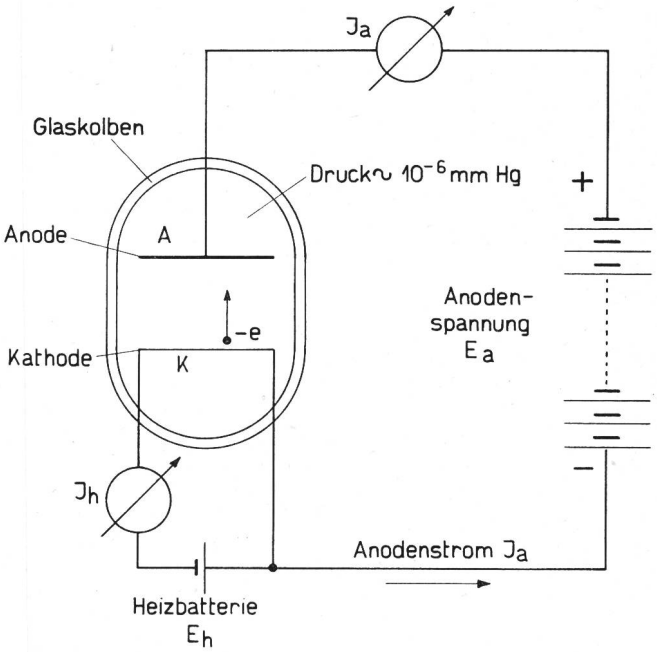

Fig. 1. Zweielektrodenröhre (Diode)

Elektrode K ist ein Draht, der mittels elektrischer Heizung auf hohe Temperatur gebracht werden kann (der Heizstrom wird der Heizbatterie E_h entnommen). Bei genügend hoher Temperatur der Elektrode K (Kathode) treten aus ihr Elektronen aus (thermische Elektronenemission).

Wir verbinden zunächst den positiven Pol der Batterie E_a mit der Elektrode A (Anode) und legen den negativen Pol der Batterie an die Kathode K. Da die Elektronen negativ sind, wandern sie von der Kathode aus zur positiven Anode hinüber; da das Innere des Glaskolbens gasfrei ist, erfolgen keine Zusammenstösse der Elektronen mit Gasmolekülen, und die Elektronen erreichen ungehindert die Anode; gleichzeitig fliesst im äusseren Stromkreis AEK ein elektrischer Strom. Legen wir hingegen den Minus-Pol an die Anode, so werden die Elektronen nicht mehr zur Anode hinübergezogen, und es kann auch kein Strom im äusseren Stromkreis fliessen.

Verbinden wir Kathode und Anode mit den Sekundärklemmen eines Transformators (Fig. 2), dessen Primärseite am Wechselstrom-Lichtnetz liegt, so wird die Anode abwechselnd positiv und negativ, und zwar geschieht dies 50mal in der Sekunde. Im äusseren Stromkreis fliesst jedoch nur dann ein Strom, wenn die Anode positiv ist; wir beobachten deshalb eine Aufeinanderfolge von Stromstössen (50 Stromstösse in der Sekunde), und zwar stets in der gleichen, in Figur 2 eingetragenen Richtung. Diese Stromstösse können zum Beispiel zur Aufladung einer Akkumulatorenbatterie oder eines Kondensators verwendet

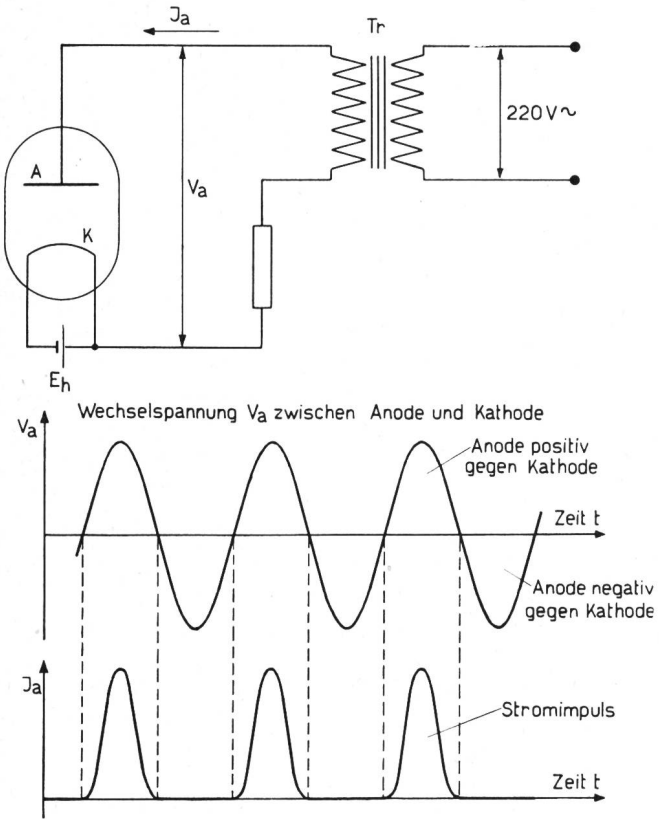

Fig. 2. Gleichrichtung durch Diode

werden: unsere Anordnung nach Figur 2 stellt also einen Gleichrichter dar.

Elektronik ist Physik und Technik des freien Elektrons. Sie untersucht die verschiedenen Arten der Auslösung von Elektronen aus dem Inneren von Leitern (und auch von Isolatoren), die Beeinflussung der Bewegung freier Elektronen mittels elektrischer und magnetischer Kräfte und die Wirkungen, welche die bewegten freien Elektronen ausüben können. Die Verwertung der gewonnenen Erkenntnisse hat zu einer ungemein grossen Zahl von technisch interessanten Anordnungen geführt, die zu den verschiedensten Dienstleistungen herangezogen werden können. Letztere beschränken sich keineswegs auf Belange der Nachrichtenübermittlung. In der vorliegenden Skizze werden wir, entsprechend unserer Aufgabe, allerdings nur solche Anordnungen besprechen, die für die Nachrichtenübermittlung von Wichtigkeit sind, die also entweder zur Übermittlung akustischer Schwingungen dienen oder aber zur Erzeugung von leuchtenden Diagrammen auf dem Leuchtschirm spezieller Röhren (Kathodenstrahlröhren für Oszillographie, Radar und Fernsehempfang) und auf lichtempfindlichem Papier (Bildfunk). In den beiden letzten Fällen wird uns der Nachrichteninhalt auf visuellem Wege vermittelt.

Wir werden sehen, dass für alle diese Anordnungen Gebrauch von freien Elektronen gemacht wird. Dies hat zwei Gründe. Erstens verfügen wir heute über Mittel, um freie Elektronen in überaus grosser Zahl zu erzeugen, und zweitens ist die Beeinflussung der Elektronenbewegung infolge der im Vergleich zur Masse sehr grossen Ladung des Elektrons auf weitgehend trägheitslose Weise möglich[1]). Diese Trägheitslosigkeit ist aber von grosser Bedeutung, da es sich in der modernen Nachrichtentechnik oft darum handelt, eine sehr grosse Zahl Zeichen pro Sekunde zu übertragen. So muss zur Übertragung eines Fernsehbildes innert einer Fünfundzwanzigstelssekunde der Helligkeitswert von mehreren hunderttausend Bildpunkten übermittelt werden; anders als elektronisch lässt sich diese Aufgabe nicht lösen. Auch werden heute elektromagnetische Wellen sehr kurzer Wellenlänge und dementsprechend sehr hoher Frequenz verwendet; für Radarzwecke beträgt die Wellenlänge zum Beispiel 3 cm, was einer Frequenz von 10^{10} Schwingungen in der Sekunde oder 10 000 Megahertz (MHz) entspricht. Die Erzeugung derart kurzer Wellen kann ebenfalls nur mit Hilfe von Elektronenröhren erfolgen. Allerdings macht sich in dem angegebenen Frequenzgebiet von einigen tausend MHz

[1]) Dies ist sehr leicht einzusehen: die Kraft, welche die elektrische Feldstärke E (= Kraft auf Ladung +1) ausübt, ist durch das Produkt aus Elektronenladung e und Feldstärke E gegeben. Anderseits ist die von dieser Kraft bewirkte Beschleunigung b nach dem Newtonschen Gesetz umgekehrt proportional zur Masse m. Wir erhalten für die erreichbare Beschleunigung b $b = eE/m$. Die Beschleunigung ist also bei gegebener Feldstärke E um so grösser, je grösser die spezifische Ladung e/m ist. Von allen bekannten Teilchen haben die Elektronen die grösste spezifische Ladung.

die an sich sehr geringe Trägheit der Elektronen bereits stark bemerkbar, und die gewöhnlichen Elektronenröhren (Trioden) versagen hier. Erst die Verwendung der sogenannten Laufzeitröhren (Magnetron, Klystron) hat uns dieses extrem kurze Wellenlängengebiet erschlossen.

In der folgenden Darstellung wird versucht, die Arbeitsweise der verschiedenen, heute zur Nachrichtenübermittlung verwendeten Elektronenröhren in kurzen Zügen verständlich zu machen. Für ein eingehenderes Studium sei auf die ausgezeichnete Darstellung von *E. Brüche* und *A. Recknagel*, Elektronengeräte (Berlin 1941), verwiesen, sowie auf die neueren Werke von *K. Spangenberg*, Vacuum tubes (New York 1948) und *A. H. W. Beck*, Thermionic valves (Cambridge 1953).

Es sollen zunächst die verschiedenen Arten von Elektronenemission besprochen werden, dann die Wirkung elektrischer und magnetischer Felder auf die Elektronenbewegung, sodann die Wirkungen, welche diese Bewegung in den äusseren Stromkreisen zur Folge hat, und schliesslich die Wirkung der Elektronen am Ende ihrer Laufbahn (z. B. Anregung des Leuchtens von Leuchtstoffen durch Elektronenaufprall).

Elektronenemission

Der Austritt von Elektronen kann auf verschiedene Weise bewirkt werden. Den Elektronenaustritt aus heissen Körpern (thermische oder Glühemission) haben wir bereits erwähnt. Austritt von Elektronen erfolgt aber auch, wenn Licht auf die Oberfläche einer Elektrode fällt (lichtelektrische oder Photoemission) oder aber, wenn auf die Oberfläche einer Elektrode rasche Elektronen auffallen: durch den Einfall werden andere Elektronen (Sekundärelektronen) zum Austritt aus dem Inneren dieser Elektrode veranlasst (Sekundärelektronen-Emission).

Bei den Anwendungen handelt es sich für uns meistens darum, die Elektrodenoberfläche derart auszubilden, dass möglichst viele Elektronen emittiert werden. Es gibt aber auch Fälle, wo eine möglichst geringe Emission erwünscht ist.

Am häufigsten werden die sogenannten Glühkathoden verwendet, wie man sie in jeder Radioröhre, in jeder Sende- und Kathodenstrahlröhre vorfindet. Sie haben entweder die Form eines Drahtes, der durch Stromdurchgang auf hohe Temperatur gebracht wird (direkte Heizung), oder sie bestehen aus einem Röhrchen, in dessen Innerem sich ein von ihm elektrisch isolierter Heizdraht befindet (indirekte Heizung). Als Material für direkt geheizte Kathoden dient Wolfram (Betriebstemperatur 2300° C), thoriertes Wolfram, das eine einlagige Schicht von Thoriumatomen trägt (Betriebstemperatur 1700° C), oder auch mit Barium- und Strontiumoxyd bedecktes Nickelband (Oxydkathoden, Betriebstemperatur 700...800° Celsius). Für indirekte Heizung verwendet man Nickelröhrchen, die aussen ebenfalls einen Überzug aus Barium- und Strontiumoxyd tragen und durch einen mit Aluminiumoxyd isolierten Wolframheizdraht, der in das Röhrchen eingesteckt ist, geheizt werden. Für grosse Senderöhren wird Wolfram und thoriertes Wolfram verwendet, während Oxydkathoden vor allem in kleineren Röhren (Rundfunkröhren), in Kathodenstrahl- und Gleichrichterröhren Verwendung finden.

Wenn wir nun in der Anordnung nach Figur 1 der Kathode durch Heizung eine bestimmte Temperatur erteilen und den Strom messen, der infolge Überganges von Elektronen zur Anode im äusseren Stromkreis fliesst, so erhalten wir Figur 3 (Charakteristik einer Hochvakuum-Gleichrichterröhre). Wir sehen, dass bei geringen Anodenspannungen E_a der Anodenstrom J_a klein ist, dass er bei Vergrösserung von E_a zunächst rasch ansteigt, dann aber praktisch konstant bleibt. Der horizontale Teil der Charakteristik ist einfach zu verstehen: bei genügend grossem E_a gehen alle aus der Kathode austretenden Elektronen zur Anode hinüber, und eine weitere Vergrösserung von E_a hat keine Wirkung mehr; wir haben Sättigung. Der bei Sättigung gemessene Strom heisst Sättigungsstrom und ist ein Mass für die Emissionsgüte der Kathode. Dass bei kleinen Werten der Anodenspannung der Strom kleiner als der Sättigungsstrom ist, ist darauf zurückzuführen, dass ja bei Stromdurchgang zwischen der Kathode und der Anode stets eine Anzahl von Elektronen unterwegs sind; diese negative Ladungswolke (die Raumladung) bewirkt aber, dass ein Teil der aus der Kathode austretenden Elektronen zurückgestossen wird und nicht zur Anode gelangt. Das Gebiet zwischen O und R heisst deshalb Raumladungsgebiet.

Der Sättigungsstrom ist von der Kathodentemperatur abhängig und nimmt mit wachsender Temperatur rasch zu (Fig. 3; T_1 für tiefere, T_2 für höhere Temperatur), während der Anodenstrom im Raumladungsgebiet von der Kathodentemperatur nur sehr wenig

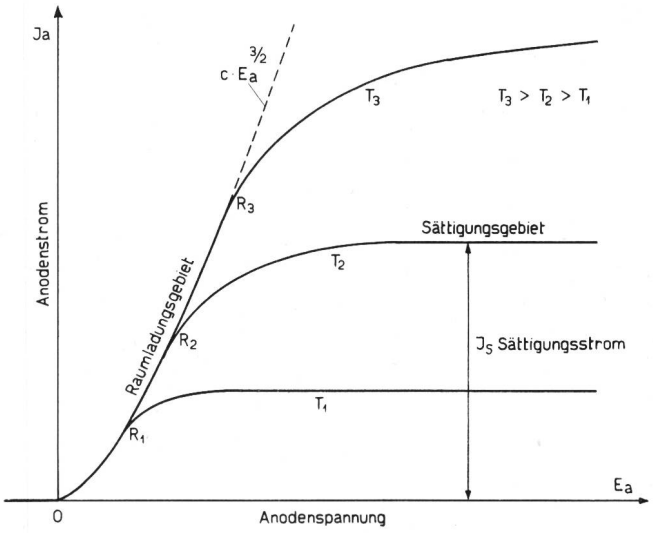

Fig. 3. Charakteristik einer Diode bei verschiedenen Kathodentemperaturen

abhängt. Die Temperatur der Kathoden kann jedoch nicht beliebig hoch gewählt werden, da das Kathodenmaterial sonst zu rasch verdampft oder auf andere Weise zerstört und unwirksam wird. Die voranstehend angegebenen Betriebstemperaturen stellen ein Optimum für möglichst grosse Emission bei genügender Lebensdauer der Kathode dar. Es können dabei Sättigungsströme von 1 A/cm² und mehr erreicht werden. Es sei bemerkt, dass Rundfunk- und Senderöhren mit wenigen Ausnahmen im Raumladungsgebiet betrieben werden.

Bei der lichtelektrischen Emission ist die Anzahl der austretenden Elektronen von der spektralen Zusammensetzung des Lichtes abhängig. Es gibt lichtelektrische Kathoden, die auf blaues und ultraviolettes Licht empfindlich sind, während bei Bestrahlung mit rotem Licht keine Emission stattfindet; es gibt aber auch Kathoden, die besonders für rotes und infrarotes Licht empfindlich sind. Solche Kathoden erhält man zum Beispiel, wenn auf einem Träger aus Silber eine Schicht aus Zäsiumoxyd mit eingelagerten Zäsium- und Silberatomen aufgebracht wird, oder bei Verwendung von Zäsium-Antimon-Verbindungen als Elektrodenmaterial. Bei gleichbleibender Zusammensetzung des Lichtes ist die Anzahl der emittierten Elektronen zur Lichtintensität proportional; durch Messung des Sättigungsstromes können wir also die Lichtintensität messen. Allerdings sind die photoelektrisch ausgelösten Ströme sehr klein (sie sind von der Grössenordnung von 20 bis 100 Mikroampere pro Lumen) und müssen deshalb noch verstärkt werden (Fig. 15).

Beim Aufprall von raschen Elektronen werden aus der Oberfläche von Metallen und auch von Isolatoren langsamere Elektronen ausgelöst. Die Zahl dieser sekundären Elektronen kann die Zahl der einfallenden Elektronen um ein Mehrfaches übersteigen. Man kennt heute speziell behandelte Silber-Magnesium- und Kupfer-Beryllium-Legierungen, aus denen je auffallendes Elektron bis zu 10 und mehr sekundäre Elektronen austreten. Man macht davon zur Konstruktion von sogenannten Sekundärelektronen-Vervielfachern Gebrauch (s. S. 377).

Beeinflussung der Elektronenbewegung

Die Bewegung von Elektronen in Elektronenröhren erfolgt stets unter dem Einfluss von elektrischen und magnetischen Kräften.

In einem elektrischen Feld erfährt ein Elektron eine Kraft $K_e = e\,E$ (wenn E die Feldstärke bedeutet), welche – infolge der negativen Ladung des Elektrons – zur elektrischen Feldstärke entgegengesetzt gerichtet ist (Fig. 4a; F_e = elektrische Kraftlinie). Befindet sich zum Beispiel das Elektron e im Raume zwischen zwei Platten P (Fig. 5), an welche die Spannung V gelegt ist, so ist die elektrische Feldstärke in diesem Raum gleich $E = V/D$ (D = Abstand der Platten). Die elektrische Kraft K_e ist dann gleich eV/D und weist gegen die positive Platte hin. Schiessen

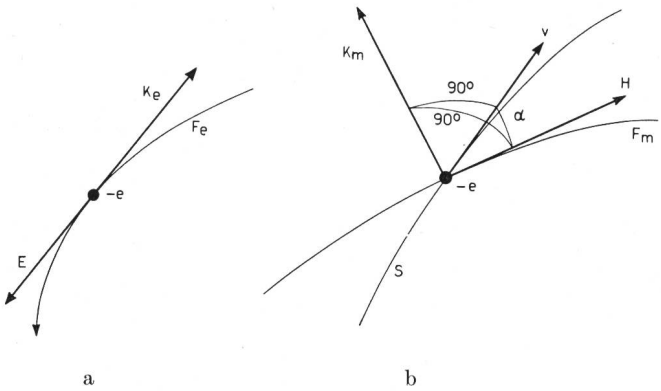

Fig. 4a und b. Elektrische und magnetische Kraft auf Elektron

wir Elektronen von links in den Raum zwischen den Platten ein, so beschreiben sie Parabelbahnen, genau gleich wie im Falle des horizontalen Wurfes im Schwerefeld. Es resultiert eine Ablenkung, und die Elektronen fliegen nach Verlassen des ablenkenden Feldes in der neuen Richtung A′A′.

Ganz anderer Art ist die Wirkung eines magnetischen Feldes auf bewegte Elektronen. Die Kraft K_m, die ein magnetisches Feld ausübt, steht stets senkrecht zur Bewegungsrichtung des Elektrons und auch senkrecht zur Richtung des magnetischen Feldes. K_m ist gegeben durch den Ausdruck $K_m = e\,v\,B \sin \alpha$, wenn v die Geschwindigkeit des Elektrons, H die magnetische Feldstärke, B die magnetische Induktion $\mu \cdot H$ und α der von v und H eingeschlossene Winkel ist (Fig. 4b; F_m = magnetische Kraftlinie, S = Elektronenbahn). Das zeitlich konstante magnetische Feld kann deshalb nie die Elektronen auf höhere

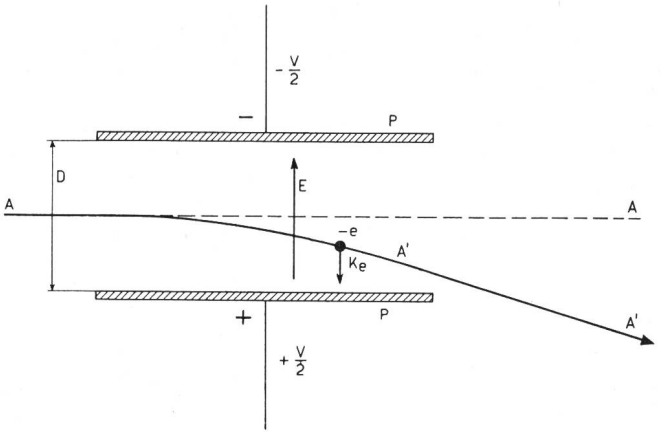

Fig. 5. Elektrische Ablenkung

Geschwindigkeit beschleunigen, sondern nur eine ablenkende Wirkung ausüben. So beschreibt ein Elektron, das in ein homogenes magnetisches Feld senkrecht zu dessen Kraftlinien hineingeschossen wird, einen Kreisbogen, der sich unter Umständen zu einer vollen Kreisbahn schliessen kann.

Da in Hochvakuumröhren keine Zusammenstösse mit Gasmolekülen stattfinden, sind K_e und K_m die einzigen Kräfte, die auf die Elektronen einwirken.

Äussere Stromkreise

Bei der Bewegung der Elektronen im Raume zwischen den Elektroden beobachten wir in den äusseren Stromkreisen das Fliessen elektrischer Ladungen. Im Falle der Anordnung Figur 1 kann das Entstehen eines solchen Stromes im Kreise AEK sehr einfach erklärt

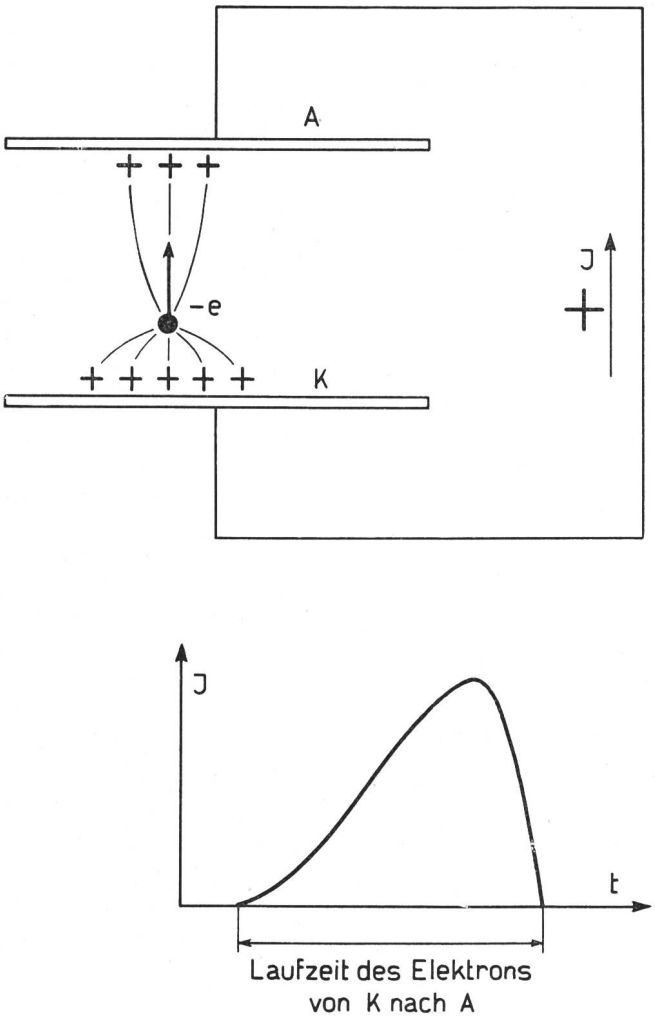

Fig. 6. Elektronenbewegung und Strom im äusseren Stromkreis

werden. Es sei (Fig. 6) e ein unterwegs sich befindendes Elektron. Da dieses negativ ist, influenziert es an K und A positive Influenzladungen. Bewegt sich nun das Elektron gegen die Anode, so nimmt seine Entfernung von K zu, und die Influenzladung auf K wird schwächer; gleichzeitig muss die Influenzladung auf A zunehmen, da e sich der Anode nähert. Der Ausgleich der Influenzladungen geschieht über den äusseren Stromkreis; während der Bewegung des Elektrons von K nach A beobachten wir einen Stromstoss in der Leitung von K über die äussere Zuleitung nach A. Ein ähnlicher Stromstoss entsteht auch dann, wenn ein Elektron an einer Elektrode vorbeifliegt (Fig. 7). Gehen ständig Elektronen von K nach A hinüber, und zwar in gleichbleibender Anzahl je Zeiteinheit, so summieren sich alle diese Stromimpulse zu einem konstanten Strom. Im Falle von Figur 7 hingegen ist die resultierende Stromstärke Null, da in diesem Falle jeder Stromstoss aus einem positiven und aus einem negativen gleich grossen Teil besteht.

Wirkung von bewegten Elektronen

Treffen Elektronen, die von der Kathode ausgehen, auf eine gegenüber der Kathode positiv vorgespannte Elektrode (z. B. Anode), so geben sie ihre durch Beschleunigung im elektrischen Feld erworbene kinetische Energie an diese Elektrode ab, was bei grösseren Strömen und Spannungen eine beträchtliche Erwärmung der Elektrode bewirken kann. Die Ableitung dieser Wärme stellt bei vielen Röhren (Rundfunkröhren grösserer Leistung und Senderöhren) ein wichtiges Problem dar. Befindet sich die Anode innerhalb des Röhrenkolbens, so ist eine Wärmeableitung nur durch Abstrahlung möglich; die Anode kommt dabei oft auf Rotglut (Strahlungskühlung). Deshalb müssen die Anoden aus einem Material verfertigt wer-

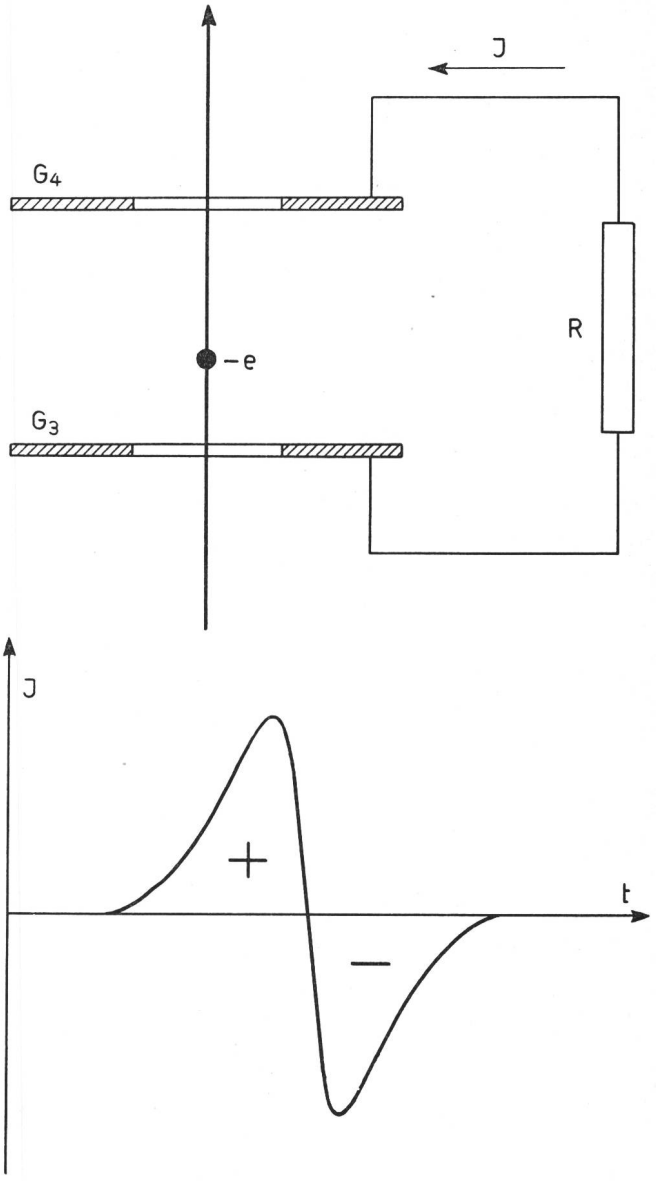

Fig. 7. Elektronenbewegung und Strom im äusseren Stromkreis

den, das die Wärme besonders gut abstrahlt (berusstes Nickelblech) oder das sehr hohe Temperaturen ertragen kann (Graphit, Molybdän, Tantal). Bei grossen Senderöhren besteht die Anode aus Kupfer und bildet zugleich einen Teil der äusseren Wand des Röhrenkolbens. Sie kann dann direkt mit Wasser oder mit Luft gekühlt werden (wasser- und luftgekühlte Röhren). Zu diesem Zweck werden die Röhren in besondere Kühler eingebaut.

Weiterhin lösen rasche Elektronen aus der Elektrode Sekundärelektronen aus und bringen gewisse Stoffe beim Aufprall zum Leuchten. Solche Leuchtstoffe werden in allen Oszillographie- und Fernsehempfangsröhren in Form von Leuchtschirmen verwendet. Wird die Bestrahlung eines Leuchtstoffes mit Elektronen unterbrochen, so leuchtet die bestrahlte Stelle noch mehr oder weniger lange nach. Die Dauer dieses Nachleuchtens ist für die Anwendungen sehr wichtig. Es stehen uns heute eine grosse Zahl von Substanzen zur Verfügung, die bei Elektronenerregung in jeder gewünschten Farbe leuchten, darunter auch weiss leuchtende Stoffe. Es sind dies beispielsweise Zinksulfide, Zink-Kadmium-Sulfide und Zinksilikate, denen ein Metall in ganz geringer Konzentration zugesetzt worden ist.

Elektronenröhren

Im folgenden sollen einige Ausführungsformen von Elektronenröhren besprochen werden, die für die Nachrichtenübermittlung von Bedeutung sind.

a) Dioden

Eine Diode enthält nur Kathode und Anode. Ihre Wirkungsweise haben wir bereits auf Seite 370 geschildert. Sofern sie zur Gleichrichtung hochfrequenter, schwacher Ströme dienen soll, muss durch möglichst kleinen Abstand KA (Bruchteile von mm) eine möglichst grosse Empfindlichkeit angestrebt werden.

Zur Gleichrichtung in Netzanschluss-Gleichrichtern werden mit Vorteil Dioden mit Dampf- oder Gasfüllung (Hg, A, Xe) verwendet.

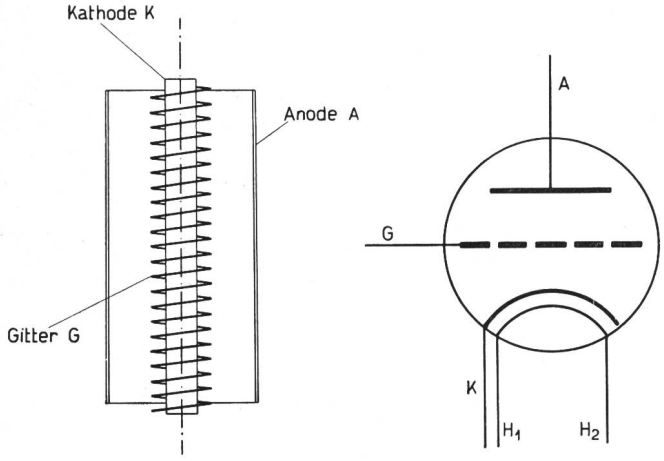

Fig. 8. Triode (Aufbau und Schaltbild)

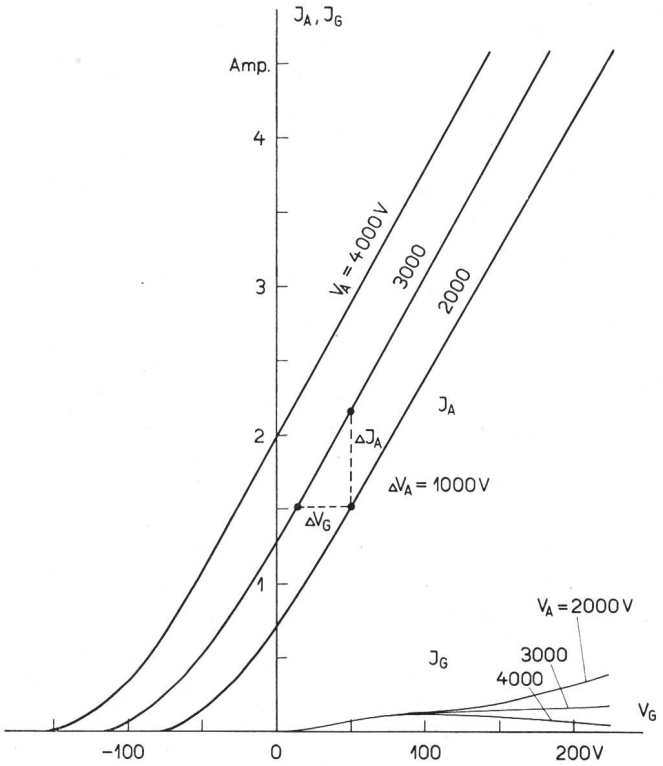

Fig. 9. Charakteristik einer Triode (Brown-Boveri-Sendetriode BTL 1–1 mit thorierter Kathode und luftgekühlter Anode für eine Anodenverlustleistung von 1 kW)

b) Trioden und Mehrgitterröhren

Von den Dioden unterscheiden sich die Trioden dadurch, dass zwischen Anode und Kathode eine dritte Elektrode, das Gitter, angebracht ist. Diese Elektrode ist durchbrochen, so dass die Elektronen von der Kathode durch das Gitter hindurch zur Anode wandern können. Vielfach besteht das Gitter aus einer um zwei Stege gewickelten Spirale, welche die Kathode käfigartig umgibt (Fig. 8). Das Gitter hat die Aufgabe, die Zahl der von der Kathode durch die Gitteröffnungen zur Anode fliegenden Elektronen und damit den im Anodenstromkreis fliessenden Anodenstrom zu beeinflussen, denn je nach dem Spannungsunterschied zwischen Gitter und Kathode wandern mehr oder weniger Elektronen zur Anode hinüber. Diese Steuerung ist sowohl bei positiver als auch bei negativer Gitterspannung vorhanden; die Änderung des Anodenstromes (bei festgehaltener Anodenspannung) mit der Gitterspannung ist in Figur 9 (Steuercharakteristik) dargestellt. Durch sehr starke negative Gitterspannung kann der Anodenstrom gänzlich unterdrückt werden. Solange das Gitter gegen die Kathode negativ vorgespannt ist, nimmt es selber keine Elektronen auf, und die Steuerung erfolgt ohne Leistungsverbrauch im Gitterkreis K-E_g-G.

Halten wir zunächst die Anodenspannung fest und ändern wir die Gitterspannung um den Betrag ΔV_g, so ändert sich der Anodenstrom um ΔJ_a (Fig. 9). Das Verhältnis $\frac{\Delta J_a}{\Delta V_g}$ wird als Steilheit S bezeichnet. Halten wir anderseits die Gitterspannung

fest und vergrössern wir die Anodenspannung um den Betrag ΔV_a, so erfolgt ebenfalls eine Zunahme des Anodenstromes. Diese Vergrösserung kann jedoch dadurch kompensiert werden, dass wir der Gitterspannung einen um ΔV_g kleineren Wert erteilen (Fig. 9). Das Verhältnis $\mu = \frac{\Delta V_g}{\Delta V_a}$ heisst Verstärkungsfaktor der Röhre. Sowohl S als auch μ sind für die mit der Röhre erzielbare Verstärkung massgebend. Figur 9 zeigt als Beispiel die Charakteristiken der Sendetriode Brown Boveri BTL 1–1.

Die Charakteristiken lassen sich durch Änderung der geometrischen Abmessungen des Kathode-Gitter-Anode-Systems in weiten Grenzen variieren und dem Verwendungszweck anpassen. Weitere Verbesserungen der Eigenschaften lassen sich durch das Anbringen weiterer Gitter zwischen Anode und Kathode erreichen: Mehrgitter-Elektronenröhren (Tetroden, Pentoden, Hexoden, Heptoden und Oktoden). Vielfach werden zwei solcher KGA-Systeme im gleichen Glaskolben eingebaut.

Der Anodenstrom folgt der Gitterspannung fast völlig trägheitslos. Nun brauchen jedoch die Elektronen zum Durchlaufen ihres Weges von der Kathode durch das Gitter zur Anode eine gewisse Zeit. Bei

Fig. 11. Triode mit Luftkühlung (Brown-Boveri-Sendetriode BTL 6–1 mit thorierter Wolframkathode; Anodenverlustleistung 6 kW)

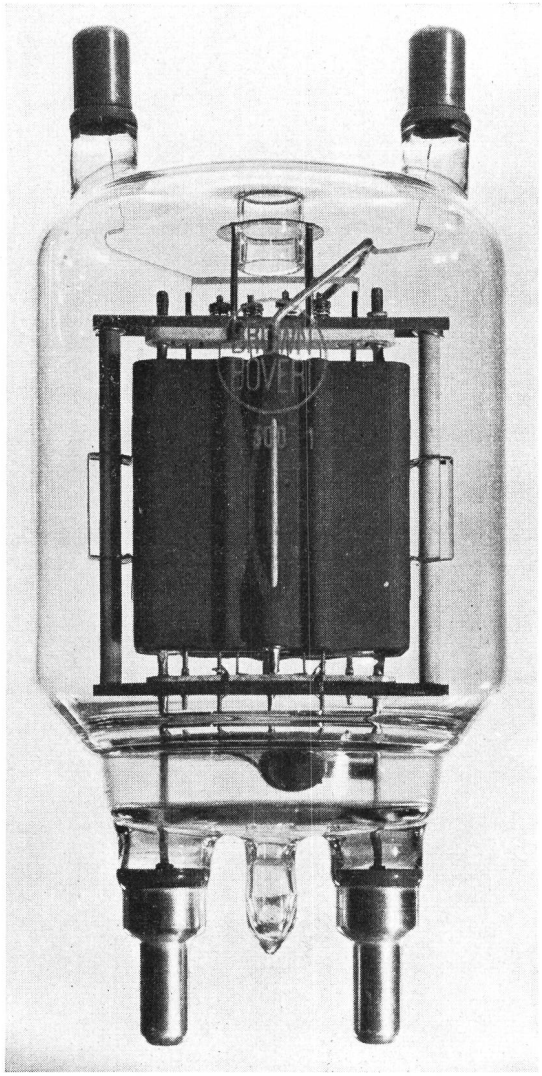

Fig. 10. Triode mit Strahlungskühlung (Brown-Boveri-Sendetriode T 300–1 mit Graphitanode)

hohen Frequenzen (je nach dem KGA-Abstand bei 30...3000 MHz) wird diese Zeit schon mit der Periode der Schwingungen vergleichbar, so dass die Gitterspannung sich während des Fluges der Elektronen merkbar ändert. Dies führt dazu, dass die Anodenstromschwankungen den Gitterspannungsschwankungen nicht ganz folgen, so dass die Verstärkungswirkung herabgesetzt und auch die Steuerung nicht mehr ganz leistungslos erfolgt. In diesem Frequenzgebiet sind nur solche Trioden verwendbar, bei denen der Abstand zwischen K und G sehr klein ist (z. B. 15 μ). Dadurch müssen aber auch die übrigen Dimensionen der Röhre klein gewählt werden, was die mit der Röhre erzielbare Leistung herabsetzt.

c) Laufzeitröhren und Magnetrone

Man hat deshalb in den letzten Jahren zu Anordnungen gegriffen, deren Wirkungsweise von derjenigen der Triode sehr stark abweicht; es sind dies die sogenannten Laufzeitröhren (Klystron, Wanderfeldröhre, Elektronenwellenröhre).

In einem Klystron wird zunächst ein Elektronenstrahl erzeugt, der durch eine in der Anode A angebrachte Öffnung austritt und den Raum zwischen den beiden Gittern G_1 und G_2 durchläuft (Fig. 12). Die Elektronen treten dabei mit einer durch die Anodenspannung U_a bestimmten Geschwindigkeit v in den Raum zwischen G_1 und G_2 ein. Legen wir nun an die Gitter eine Spannungsdifferenz an, und zwar derart, dass G_2 positiver als G_1 ist, so werden die

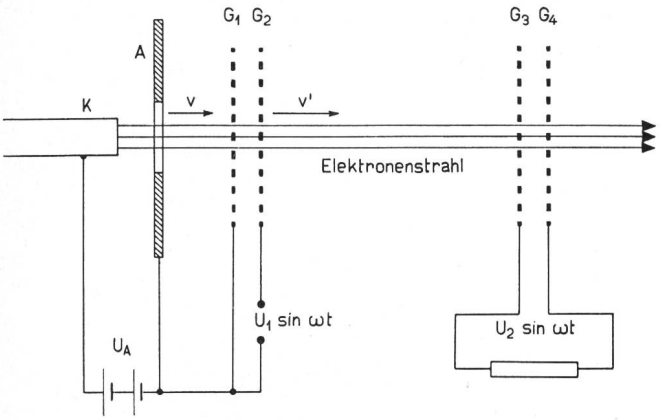

Fig. 12. Klystron. Wirkungsweise

Elektronen im Raum zwischen G_1 und G_2 beschleunigt und treten mit einer grösseren Geschwindigkeit als v aus. Ist G_2 negativer als G_1, so werden die Elektronen verlangsamt. Legen wir zwischen G_1 und G_2 eine hochfrequente Wechselspannung $U_1 \sin \omega t$ an, so werden gewisse Elektronen verzögert, während andere – in einem späteren Augenblick durch G_1 G_2 hindurchtretenden – eine Beschleunigung erfahren. Die Folge davon ist, dass die Elektronen das Gitter G_3 paketweise, stossweise erreichen und dadurch zwischen G_3 und G_4 Wechselspannungen induzieren, welche unter Umständen diejenige zwischen G_1 und G_2 übertreffen können; wir erhalten eine Spannungsverstärkung. Durch Verwendung der Laufzeitröhren wird das von uns heute beherrschte Frequenzgebiet bis etwa 150 000 MHz erweitert. Die beschriebenen Röhren lassen sich auch zur Schwingungserzeugung verwenden, indem ein Teil der zwischen G_3 und G_4 erhaltenen Spannung auf G_1–G_2 zurückgeführt wird (Rückkopplung).

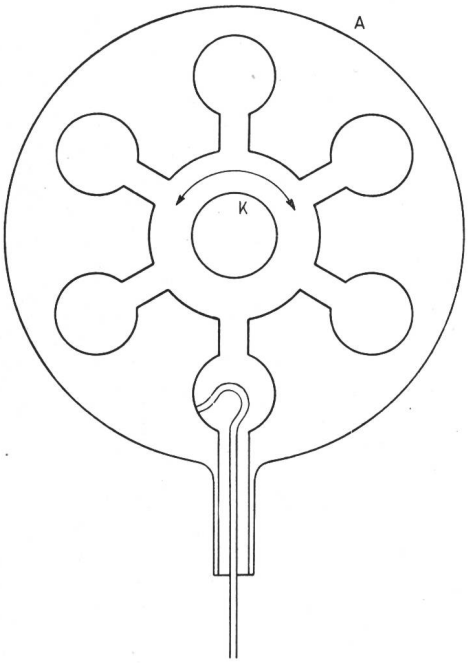

Fig. 13. Magnetron

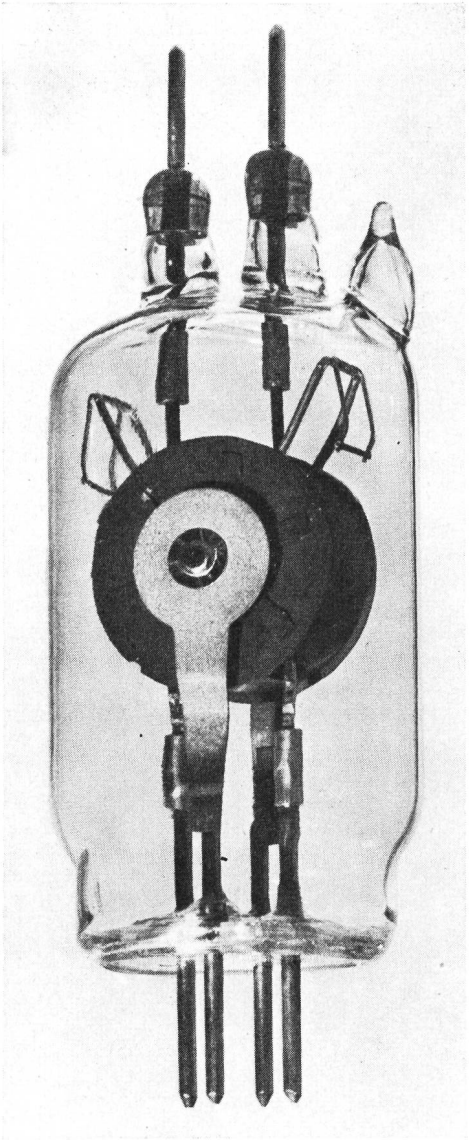

Fig. 14. Magnetron (Brown-Boveri-Turbator MD 10/2000 für 15 cm Wellenlänge)

Das Magnetron ist in seiner Arbeitsweise dem Klystron verwandt, und es treten auch ähnliche Influenzerscheinungen auf, nur dass hier durch ein magnetisches Feld eine Umlaufsbewegung der Elektronen in der in Figur 13 durch einen Pfeil angegebenen Richtung erzwungen wird. Figur 14 zeigt ein Magnetron für 15 cm Wellenlänge.

d) Photozellen

Eine Photozelle ist eine Diode, in der die Elektronen aus der Kathode durch einfallendes Licht ausgelöst werden. Die Anodenspannung wird so gewählt, dass die Diode in Sättigung arbeitet und sämtliche ausgelösten Elektronen die Anode erreichen. Der Sättigungsstrom ist nun der Lichtintensität proportional, der Anodenstrom also ein Mass für die Stärke des Lichtes. Da die Photoströme in der Regel sehr klein sind, müssen sie verstärkt werden. Dazu wird der Spannungsabfall, den der an sich kleine Photostrom

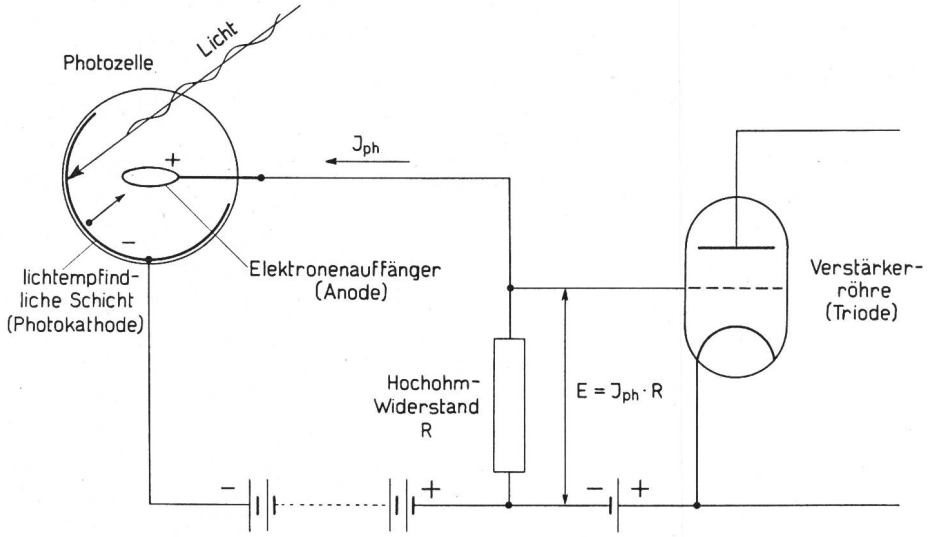

Fig. 15. Photozelle und Verstärker

J_{ph} am Hochohmwiderstand R erzeugt (Fig. 15), an das Gitter einer Verstärkerröhre gelegt. Nun bedingt aber die Verwendung eines hochohmigen Widerstandes im Gitterkreis der Röhre durch statistische Schwankungen ein Rauschen, das unter Umständen, bei sehr kleinen Lichtintensitäten, das zu verstärkende Signal übertrifft. In einem solchen Fall muss an Stelle der gewöhnlichen Photozelle ein sogenannter Sekundärelektronen-Vervielfacher verwendet werden.

e) Sekundärelektronen-Vervielfacher

In einer Photozelle mit Sekundärelektronen-Vervielfacher treffen die an der Photokathode Ph ausgelösten Elektronen (Fig. 16) auf eine Prallelektrode P_1 und lösen dort eine Anzahl Sekundärelektronen aus. Die Oberfläche der Prallelektrode ist derart ausgebildet, dass aus ihr je einfallendes Elektron mehrere Sekundärelektronen austreten (k-mal so viele). Diese Elektronen werden mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Feldern gegen eine zweite Prallelektrode P_2 geführt und lösen dort, je Photoelektron gerechnet, k^2 Sekundärelektronen aus, die ihrerseits gegen eine dritte Prallelektrode P_3 geführt werden und so fort; aus der n-ten Prallelektrode treten je Photoelektron k^n Elektronen aus. Die durch den Faktor k^n gegebene Verstärkung des Photostromes kann bei einer grösseren Zahl von Prallelektroden Werte bis $10^6 \ldots 10^9$ und darüber erreichen; es lassen sich auf diese Weise sehr geringe Lichtmengen nachweisen und messen, ohne dass durch Verwendung von hochohmigen Widerständen ein starkes statistisches Rauschen eingeführt wird. Figur 17 zeigt die Ansicht eines 10stufigen Sekundärelektronen-Vervielfachers.

f) Kathodenstrahlröhren

Kathodenstrahlröhren sind Röhren, in denen ein feiner Elektronenstrahl erzeugt wird. Sie enthalten ferner einen Leuchtschirm, der dort, wo er vom Elektronenstrahl getroffen wird, aufleuchtet (Punkt P, Figur 18).

Das System zur Erzeugung des Elektronenstrahles besteht im wesentlichen aus einer Triode (K, G, A), wobei die von der Kathode ausgehenden Elektronen durch eine in der Anode angebrachte Öffnung in Form eines divergenten Strahles hindurchtreten. Dieses Bündel wird mit Hilfe einer Fokussiervorrichtung F wieder konvergent gemacht, und zwar so, dass die einzelnen Elektronen dieses Strahlenbündels sich im gleichen Punkte des Leuchtschirmes treffen. Dort entsteht dann ein scharfer heller Leuchtfleck. Die Fokussierung erfolgt mit Hilfe von speziellen elektrischen oder magnetischen Feldern, die auf die Elektronen die gleiche Wirkung ausüben wie eine gewöhnliche optische Linse auf Lichtstrahlen, sie wirken sammelnd. Man spricht deshalb von Elektronenlinsen. In Figur 18 ist der Querschnitt durch eine magnetische Linse dargestellt.

Ferner enthält eine Kathodenstrahlröhre Vorrichtungen, um den Elektronenstrahl abzulenken; bei

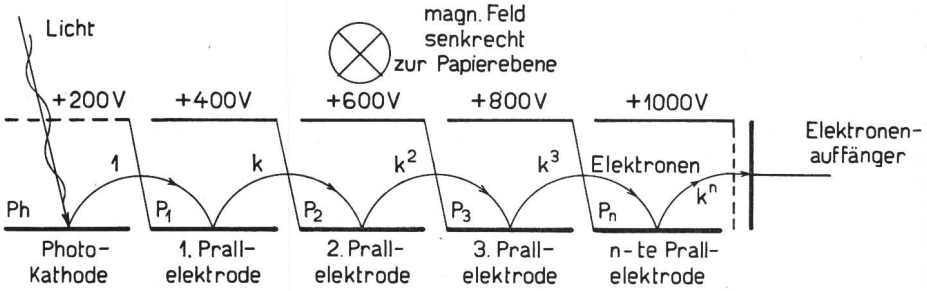

Fig. 16.
Aufbau des Sekundärelektronen-Vervielfachers

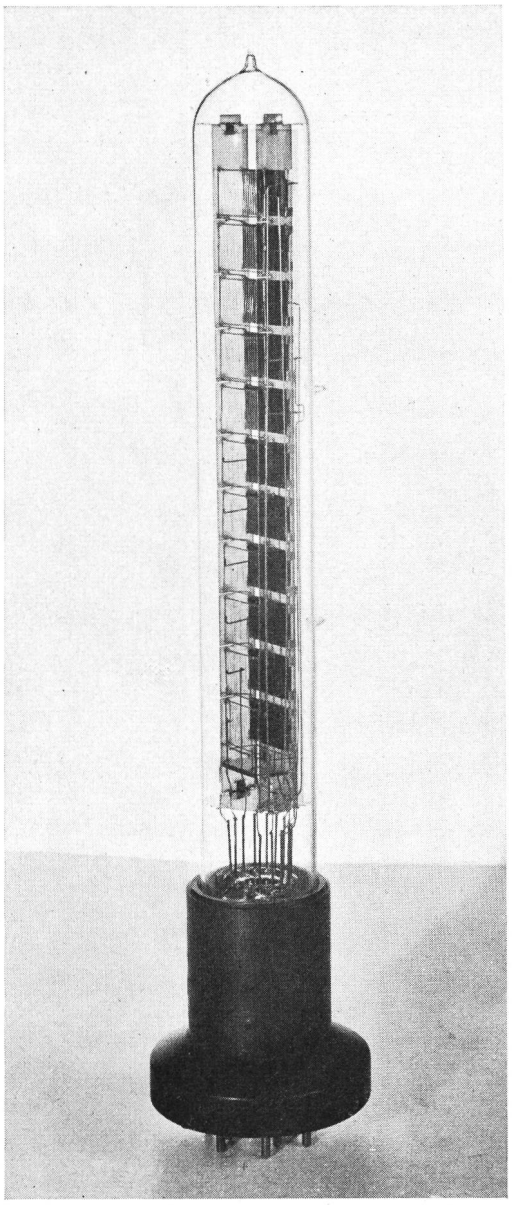

Fig. 17. Sekundärelektronen-Vervielfacher (Institut für technische Physik der Eidgenössischen Technischen Hochschule)

Ablenkung des Strahles verschiebt sich der Leuchtfleck auf dem Leuchtschirm. Die Ablenkung kann durch ein magnetisches Feld bewirkt werden, das senkrecht zum Strahl steht (magnetische Ablenkung mit Ablenkspule), oder aber durch das elektrische Feld, das zwischen zwei auf verschiedenes Potential gebrachte Platten besteht (elektrische Ablenkung im Plattenkondensator, vgl. Fig. 5). Bei der magnetischen Ablenkung ist die Verschiebung s des Leuchtfleckes proportional zur Stärke des das Magnetfeld erzeugenden Stromes; bei der elektrischen Ablenkung ist s proportional zu der zwischen den Platten angelegten Spannung. Die Ablenkung erfolgt bis zu ganz hohen Frequenzen von mehreren hundert Megahertz weitgehend trägheitsfrei.

Die beiden wichtigsten Anwendungen der Kathodenstrahlröhre sind die oszillographische Beobachtung von periodischen oder nichtperiodischen Vorgängen sowie die Bilderzeugung beim Fernsehempfang.

Normalerweise sind zwei Ablenkanordnungen (z. B. zwei Ablenkplattenpaare) vorhanden, welche Ablenkungen in zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen erlauben. Legen wir nun an das eine oder an das andere Plattenpaar eine Wechselspannung an, so erfolgt eine zeitlich veränderliche Ablenkung in der x- oder in der y-Richtung (Fig. 19a und b), und der Leuchtfleck schreibt einen geraden Strich. Legen wir an die beiden Plattenpaare gleichzeitig zwei Wechselspannungen gleicher Frequenz an und sind die beiden Wechselspannungen in Phase, so beschreibt der Leuchtfleck einen schräg stehenden Strich (Fig. 19c). Besteht zwischen den beiden Wechselspannungen eine Phasendifferenz, so entsteht auf dem Leuchtschirm eine Ellipse (Fig. 19d), die bei einem Phasenunterschied von 90° und bei gleicher Amplitude in einen Kreis übergeht (Fig. 19e).

Legen wir an das erste Plattenpaar eine mit der Zeit linear zunehmende Spannung, so zeigt uns das Leuchtbild, wie die Spannung am zweiten Plattenpaar sich zeitlich ändert. Bei einer Wechselspannung V_y erhalten wir also eine Sinuslinie (Fig. 20a), bei einem Spannungsimpuls die in Figur 20b dargestellte Zacke.

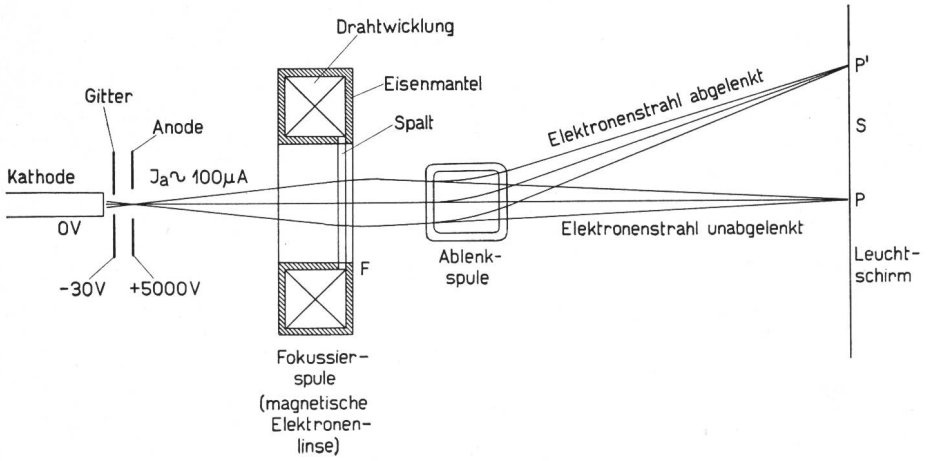

Fig. 18.
Kathodenstrahlröhre. Prinzipieller Aufbau

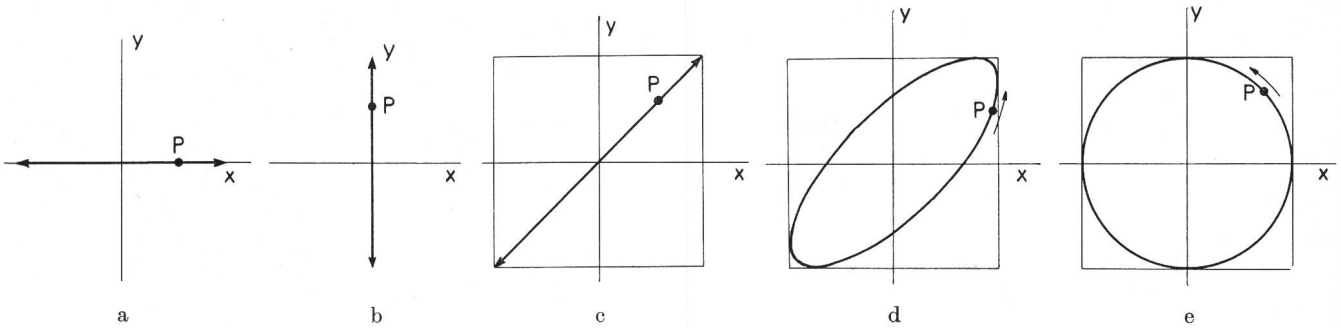

Fig. 19. a) Ablenkung in x-Richtung
b) Ablenkung in y-Richtung
c) x- und y-Ablenkung in Phase
d) x- und y-Ablenkung Phasen verschoben
e) x- und y-Ablenkung um 90° Phasen verschoben

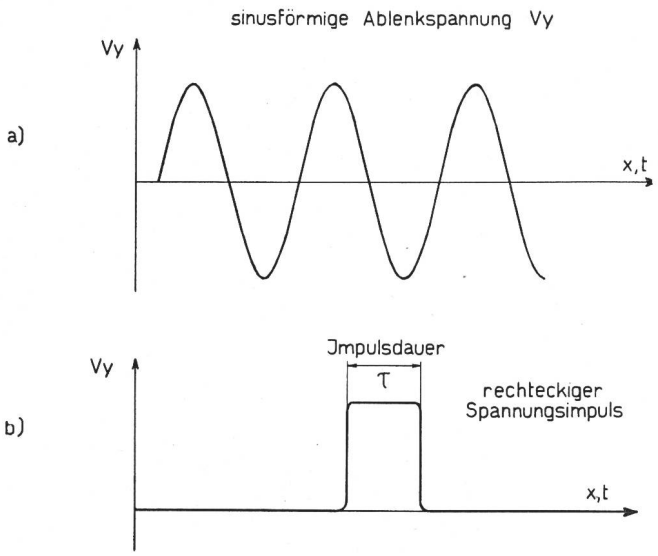

Fig. 20.

Ferner können wir den Leuchtfleck einen Kreis beschreiben lassen und ihm eine zusätzliche radial gerichtete Ablenkung erteilen, die einer dritten Spannung V_3 proportional ist. Ist V_3 eine Wechselspannung, so erhalten wir ein Leuchtdiagramm nach Figur 21a; ist V_3 ein Spannungsimpuls nach Figur 20b, so entsteht ein Leuchtdiagramm Figur 21b.

Es lassen sich so noch weitere Ablenkanordnungen angeben, die alle dazu dienen, den zeitlichen Verlauf von Spannungen oder Strömen in Form von leuchtenden Diagrammen auf dem Leuchtschirm der Kathodenstrahlröhre sichtbar zu machen (Oszillographie rasch veränderlicher Vorgänge, Indikator für Radargeräte, Fernsehempfang).

Durch die Gitterspannung (Potentialdifferenz zwischen K und G) können wir die Anzahl der durch die Anodenöffnung hindurchtretenden Elektronen beeinflussen und damit auch die Helligkeit des Leuchtflecks auf dem Leuchtschirm. Eine solche Helligkeitssteuerung ist in jeder Fernsehempfangsröhre vorhanden; sie dient im Zusammenspiel mit geeigneten Ablenkungen zur Erzeugung eines Bildes auf dem Leuchtschirm.

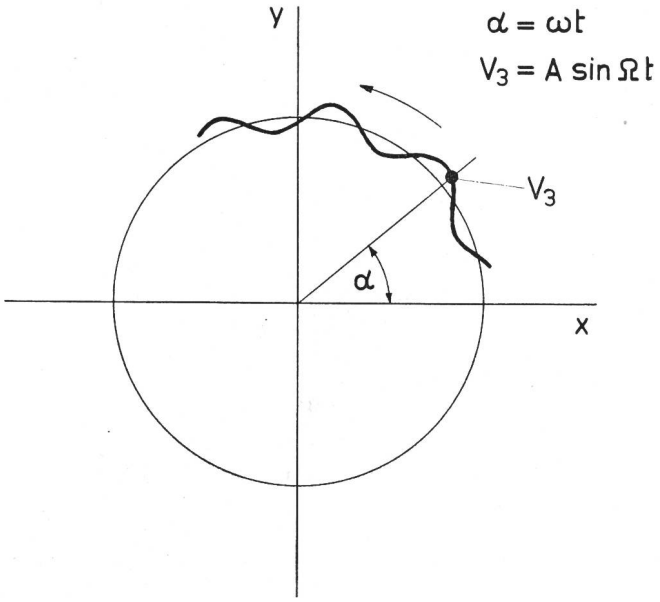

Fig. 21a.

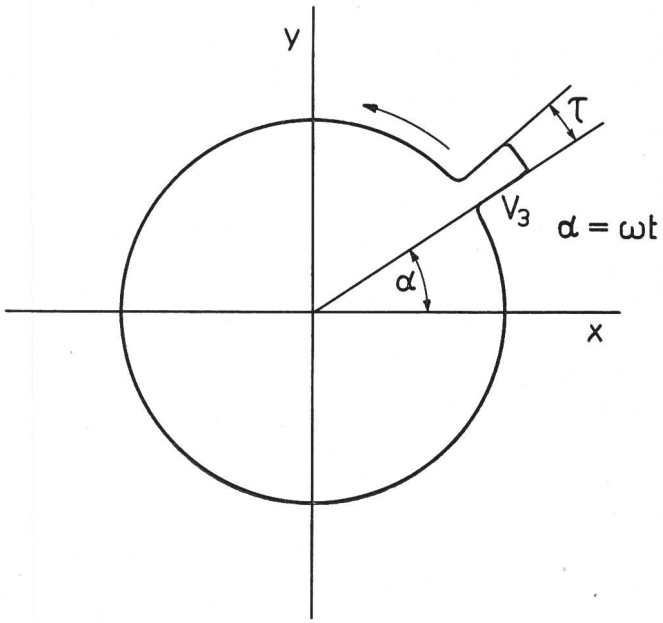

Fig. 21b.

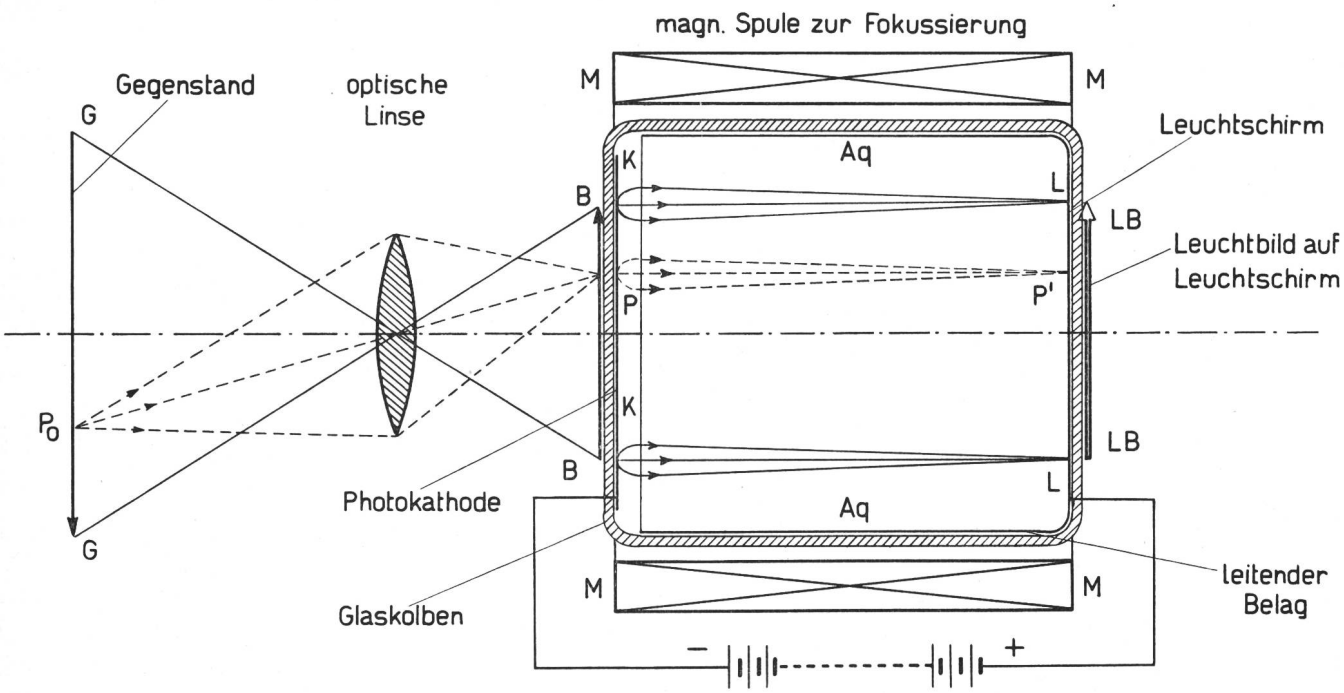

Fig. 22. Bildwandler

g) Bildwandler

In einer Bildwandlerröhre steht einer grossen photoelektrischen Kathode KK (Fig. 22) ein Leuchtschirm gegenüber. Wenn auf die Kathode ein Bild BB des Gegenstandes GG projiziert wird, so treten an den einzelnen Stellen der Kathode Photoelektronen aus, und zwar in einer Zahl, die der Helligkeit des Bildes an der betreffenden Stelle entspricht. An den leitenden Belag Aq, der die Innenfläche der Glaswand bedeckt, wird positive Spannung gelegt, so dass die Photoelektronen gegen den Leuchtschirm LL fliegen. Durch passend gewählte magnetische und elektrische Felder (in Figur 22 wird das magnetische Feld H von der stromdurchflossenen Spule MM geliefert) wird nun bewirkt, dass alle aus einem Punkt der Kathode P ausgehenden Elektronen wieder in einem Punkt P' des Leuchtschirmes zusammentreffen und dort den Schirm zum Leuchten bringen. Auf diese Weise entsteht auf dem Schirm eine Helligkeitsverteilung, die der Helligkeitsverteilung im Bild BB und somit auch der Helligkeitsverteilung im Gegenstand GG entspricht. Allerdings leuchtet das Bild in der Eigenfarbe der Leuchtsubstanz, ist also im allgemeinen von der Farbe des Lichtes, mit dem der Gegenstand GG auf KK abgebildet wird, verschieden. So kann zum Beispiel die Abbildung von GG auf KK mit infrarotem Licht erfolgen, während der Leuchtschirm ein grünes Bild liefert; dadurch wird es möglich, unter Verwendung der infraroten Strahlung, im Dunkeln zu beobachten.

Setzen wir an die Stelle des Leuchtschirmes einer Bildwandlerröhre eine sogenannte Mosaikplatte und versehen wir die Röhre mit einer Anordnung, die es ermöglicht, die Oberfläche dieser Platte mit einem Kathodenstrahl abzutasten, so erhalten wir eine Fernsehabtaströhre, (Superikonoskop) mit deren Hilfe es möglich ist, die Helligkeitswerte in einem Bild in elektrische Signale umzusetzen.

Die hier gegebene kurze Übersicht über die wichtigsten in der Nachrichtentechnik verwendeten Ausführungsformen von Elektronenröhren lässt erkennen, wie verschiedenartig die Aufgaben sind, die mit Hilfe des freien Elektrons gelöst werden können. Die Herstellung von Elektronenröhren verlangt ausser genauer feinmechanischer Fertigung auch eine Unmenge an technologischer Erfahrung. Die Röhrenfabrikation ist heute zu einem bedeutenden Industriezweig geworden. Grössere Senderöhren und Spezialröhren werden in Einzelanfertigung hergestellt. Da der Bedarf an kleinen Verstärkerröhren in ihren mannigfaltigen Formen von der Diode bis zur Oktode naturgemäss am grössten ist und hier die Senkung des Preises fühlbar ins Gewicht fällt, werden Rundfunkröhren (sowie kleinere Senderöhren und auch Gleichrichterröhren) auf automatisch arbeitenden Maschinen hergestellt und gepumpt; sie sind zu einem Massenartikel geworden. Neuerdings werden auch Fernsehempfangsröhren in weitläufigen automatisch arbeitenden Anlagen fabriziert, um ihren Preis in tragbaren Grenzen zu halten.

Adresse des Verfassers: Dr. *Alexander A. Rusterholz*, Gladbachstrasse 114, Zürich 44.