

1 Kathodenstrahlröhren

1.1 Braunsche Röhre

Der Physiker Ferdinand Braun konstruierte 1897 eine Röhre, um *durch einen aufgeblendeten Kathodenstrahl die Kurvenform von Wechselströmen auf einen innerhalb der Röhre angebrachten Fluoreszenzschirm aufzuzeichnen*. Weil in den Anfängen der Funktechnik noch nicht bekannt war, dass die von der Kathode ausgehende Strahlung aus Elektronen besteht, wurde sie Kathodenstrahlung genannt.

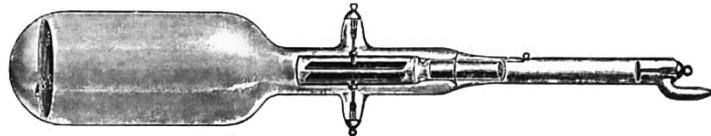


Abb. 1-1

Braunsche Röhre¹

Die ursprüngliche Kathodenstrahlröhre von Braun hatte eine kalte Kathode und eine Lochblende zur Fokussierung des Strahles. Die Strahlsteuerung erfolgte mit magnetischen Ablenkspulen. Für den Einsatz in Oszilloskopen wurde die Braunsche Röhre mit einem elektrostatischen Ablenkensystem ausgerüstet.

Anm.: Ferdinand Braun (1850-1918) promovierte im Jahre 1872 zum Doktor der Physik, indem seine Dissertation "Über den Einfluss von Steifigkeit, Befestigung und Amplitude auf die Schwingungen von Saiten" gutgeheissen wurde. Weil er nicht gerade begütert war, legte er auch noch das Staatsexamen für Gymnasiallehrer ab, um sich so sein Brot zu verdienen. Später wurde er ausserordentlicher Professor und dann ordentlicher Professor an verschiedenen Universitäten. Im Jahre 1895 schliesslich wurde er zum Direktor des physikalischen Instituts der Eberhard Karls Universität in Tübingen ernannt. Braun verstand es, seine Zuhörer als "Meister des verständlichen Vortrags und des auch für Laien spektakulären Experiments" zu fesseln. Seine anhaltende Bekanntheit verdankte Braun der von ihm konzipierten Kathodenstrahlröhre, welche von der Industrie (und auch seinem Assistenten Zenneck) nachhaltig verbessert wurde, bis sie als eigentliche Oszillographenröhre weite Verbreitung fand.

In der Funktechnik (wireless telefonie) war als Empfänger nur der "Kohärer" von Branly (manchmal auch "Fritter" genannt) bekannt, der nicht immer zufriedenstellend arbeitete. Braun ersetzte das zentrale Element durch einen Kristalldetektor (der selbst heute noch - als einfacher Geradeausempfänger mit Germaniumdiode - manches Bubenherz höher schlagen lässt). Auch Marconi - der um diese Zeit auf empirischer Grundlage seinen Sender baute - profitierte von Brauns profunden Kenntnissen in der Hochfrequenztechnik, indem jener den Schwingkreis vom Antennenkreis trennte und so leistungsfähigeren Anlagen den Weg bahnte. Im Jahre 1901 konnte Marconi eine Übertragung von England nach Nordamerika realisieren. Eine weitere Verbesserung durch Braun bestand in der Ersetzung der Hertzschen Funkenstrecke durch Wechselstromgeneratoren (was den Weg zu den grossen Maschinensendern ebnete). Im Jahre 1909 wurde Braun der Nobelpreis für Physik zugesprochen, den er sich mit Marconi teilte. Braun starb 1918 in New York City.

¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Kathodenstrahlr%C3%B6hre>

Verbessert wurde die Braunsche Röhre durch die von **Wehnelt** (1903) konstruierte Glühkathode. Damit konnte mit wesentlich geringeren Anodenspannungen gearbeitet werden. Der von Wehnelt zugleich erdachte und die Kathode umschließende Zylinder, bewirkte eine erste Fokussierung des Strahls. Ferner kann durch Verändern der negativen Vorspannung am "Wehnelt-Zylinders" eine Helligkeitssteuerung erzielt werden.

Dieckmann (1906) zog die Verwendung solcher Röhren für das Fernsehen in Betracht. Kommerzielle Fernsehgeräte wurden in Deutschland ab den 1930er Jahren von der Firma Lorenz gebaut.

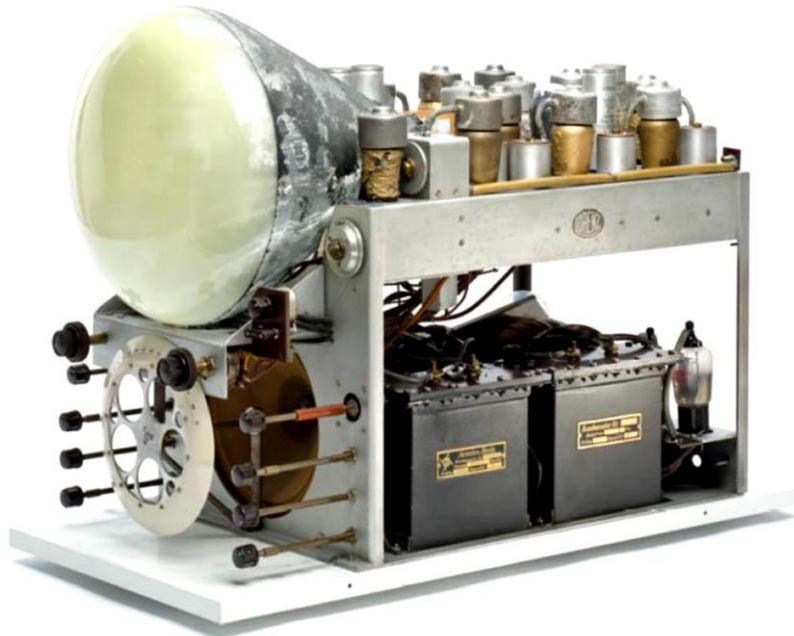


Abb. 1-2

Fernsehempfänger Modell 36 von Lorenz²
(mit einer Bildröhre des Erfinders Manfred von Ardenne)

1.2 Erzeugung eines Elektronenstrahls

1.2.1 Thermische Elektronenemission

Eine direkt beheizte Kathode (Abb. 1-3) emittiert Elektronen, die sich unter dem Einfluss eines elektrostatischen Beschleunigungsfeldes zum positiven Pol (Anode) bewegen. Durch den die Kathode umgebenden und auf negativem Potential befindlichen *Wehneltzylinder* wird der Strahl fokussiert, um dann durch den als "Lochanode" konstruierten Pluspol zu stossen. Durch Anbringen einer Leuchtschicht auf dem frontseitigen Glaskolben kann auf diese Weise ein Leuchtfleck erzeugt werden.

Die durch thermische Anregung entstehende Raumladung war bereits dem Erfinder Thomas Alva Edison durch seine Glühlampenexperimente (1883) bekannt. In der Literatur ist vom *Edison-Richardson-Effekt* (auch als Glühelektrischer Effekt bezeichnet) die Rede. Entdeckt wurde

² <https://www.radiomuseum.org/>

dieser Effekt aber bereits etliche Jahre zuvor von Hittorf, der sich der Erforschung der Elektrizitätsleitung in Gasen (1869) zuwandte und nach welchem die Hittorf-Röhre benannt ist.

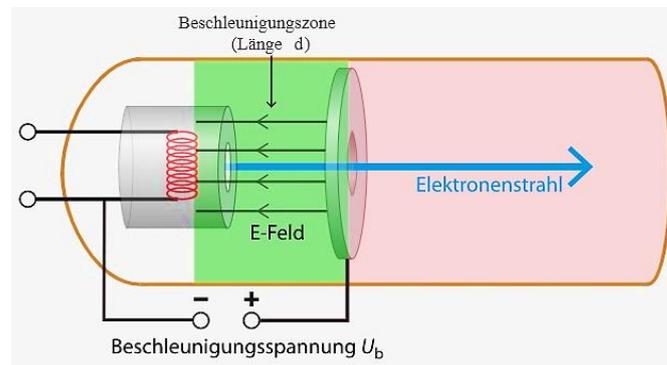


Abb. 1-3
Erzeugung eines Kathodenstrahls³

Aufgabe:

Gegeben sei eine Glühkathode. Infolge thermischer Anregung bildet sich über dem Elektronensee eine Dampfatmosphäre freier Elektronen (Fermiverteilung, Boltzmannfaktor).

Zunächst kann mittels der Richardson-Gleichung auf die Stromdichte der Raumladung geschlossen werden. Nun komme ein elektrisches Beschleunigungsfeld hinzu. Aus dem Schottky-Langmuirschen Raumladungsgesetz folgt daraus die Sättigungsstromdichte. Für ein homogenes Feld im Vakuum gilt für den Elektronenstrahl die uns letztlich interessierende Beziehung:

$$j = e \cdot n \cdot \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

Dazu siehe: Gerthsen, 8.1.1 (Glühemission) und 8.2.6 (Elektronenröhre).

1.2.2 Geradlinige Strahlausbreitung

Bei der "Schattenkreuzröhre" wird durch das den Strahl ausblendende Elektrodenkreuz ein "Negativ" auf der Leuchtschicht erzeugt.

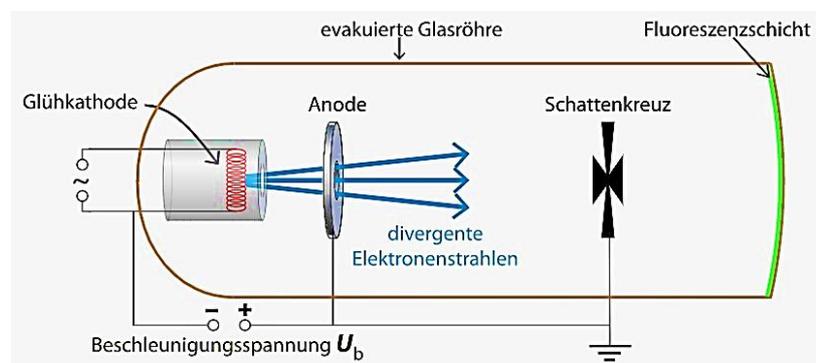


Abb. 1-4
Erzeugung eines Negativs bei der Schattenkreuzröhre⁴

³ <https://virtuelle-experimente.de/>

⁴ Ebenda

Die von Crooke erfundene Schattenkreuzröhre belegt anschaulich die geradlinige Bewegung von Elektronen im Vakuum, nachdem diese einem Beschleunigungsfeld ausgesetzt waren.

1.3 Beeinflussung des Elektronenstrahls

Das Vorhandensein von elektrischen und magnetischen Feldern führt zur Ablenkung geladener Teilchen, so dass Elektronen (dasselbe gilt mit umgekehrtem Vorzeichen für Protonen) auch Kreis- und Parabelbahnen durchlaufen können.

Prinzipiell gibt es drei Möglichkeiten, um einen Elektronenstrahl zu beeinflussen:

1) Elektrostatische Beeinflussung (Kondensatorfeld) → Auf eine Probeladung (Elektron) wirkt die Coulombkraft: $F = e \cdot E$

Elektronen werden stets in Richtung der elektrischen Feldlinien beschleunigt. Im Kondensatorfeld beschreibt das Elektron, wenn es parallel zu den Platten eindringt, eine Parabelbahn. Nach verlassen des Feldes bewegt es sich geradlinig weiter. Dies ermöglicht die Konstruktion elektrischer Fokussiereinheiten und elektrischer Strahlableitungs-systeme.

2) Beeinflussung durch ein magnetisches Feld → Auf eine Probeladung (Elektron) wirkt die Lorentzkraft: $F = e \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha)$

Elektronen, die sich quer zum Feld bewegen, werden auf eine Kreisbahn gezwungen. Elektronen, die sich schiefwinklig zu einem Längsfeld bewegen, werden auf Schraubenbahnen - deren Achsen mit den Feldlinien zusammenfallen - gezwungen. Dies ermöglicht die Konstruktion magnetischer Fokussiereinheiten und magnetischer Strahlableitungs-systeme.

3) Intensitätsbeeinflussung durch ein Steuergitter (Triodensystem) → Braun wählte aus den zu seiner Zeit bekannten zwei Möglichkeiten (die Funktion des Steuergitters wurde erst von De Forest und v. Lieben erkannt) die elektrostatische Strahlbeeinflussung, vermutlich, weil diese aus konstruktiven wie auch schaltungstechnischen Gründen einfacher zu realisieren war.

Wird an die Horizontalablenkplatten eine sägezahnförmige Spannung (Kippspannung) angelegt, um so eine zeitproportionale Ablenkung zu erzielen, bewegt sich der Strahl gleichmässig von links nach rechts. Während dem Rücklauf sperrt der Wehneltzylinder den Strahl, so dass nur die eigentliche Auslenkung angezeigt wird. Wird zugleich an die Vertikalablenkung ein Messsignal angelegt, lässt sich dessen zeitlicher Verlauf direkt als zeitfunktionale Kurve (Oszillogramm) abbilden.

Nach diesem Prinzip funktionieren alle Kathodenstrahloszillographen. Um bei verschiedenen Frequenzen des Messsignals ein stehendes Bild zu erhalten, muss die entsprechende Zeitbasis und der Triggerpegel eingestellt werden. Ansonsten wandert das Oszillogramm vor- oder rückwärts aus dem Sichtbereich hinaus. Um zugleich zwei Messsignale darzustellen, werden Zweistrahlröhren verwendet. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Strahl jeweils kurzzeitig mit einem integrierten elektronischen Schalter zu unterbrechen und so alternierend beide Signale abzubilden. Dem menschlichen Auge fallen die kurzen Unterbrechungen nicht auf.

1.4 Das Problem der Strahldivergenz

Die aus einer Bariumoxidkathode mit hohlspiegelartiger Emissionsfläche austretenden Elektronen können mit einer konstruktiv dafür geeigneten Steuerelektrode zu einem Strahl gebündelt werden. Ungeachtet dieser Massnahme läuft der Strahl ohne zusätzliche Elektronenoptik nach einer gewissen Zeit auseinander. Ursache dieses Phänomens sind elektrisch bedingte Wechselwirkungen.

Aufgrund innerer Raumladungskräfte durch die negativen Elektronenladungen beginnt jedes Strahlenbündel nach dem Coulombschen Gesetz unweigerlich zu divergieren. Für eine analytische Lösung erschwerend ist, dass wir es hier mit einem Mehrkörperproblem (Ladungswolke) zu tun haben.

Wie schnell sich der Expansionseffekt bemerkbar macht, ist auch eine Frage der Randbedingungen und kann nicht abschliessend beantwortet werden. Die Güte des Vakuums spielt ebenfalls eine Rolle. Die diesbezüglichen Berechnungen sind kompliziert und in der Regel nur numerisch zu bewältigen. In praxi werden dafür Simulationsprogramme benutzt.

Das Auseinanderlaufen des Strahls kann durch eine zur Strahlachse geneigte Randelektrode (entscheidend dabei ist der sog. *Piercewinkel*) korrigiert werden.

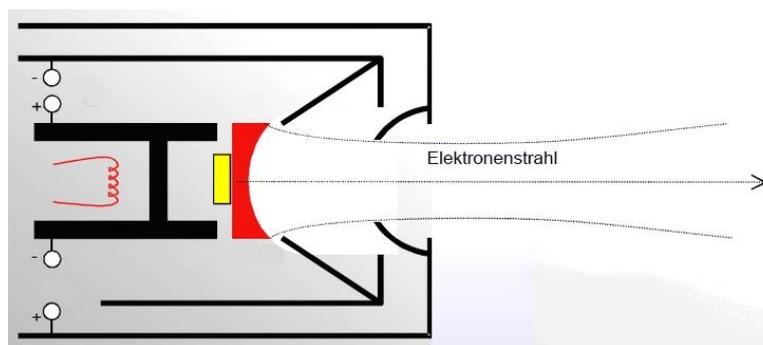


Abb. 1-5

Kollimierter Elektronenstrahl mit Pierce-Elektronenquelle

In Speicherringen, wo die Strahldivergenz ebenfalls problematisch ist, muss in regelmässigen Abständen mit Quadrupolmagneten fokussiert werden. In Teilchenbeschleunigern sind bezüglich der Strahlqualität (Luminosität) die *Emittanz* (transversale Strahlbündelung) und *Brillanz* (Phasenraumdicke) massgebend. Damit greife ich aber bereits einem anderen Thema vor.

Andererseits wirkt die magnetische Selbstkompression paralleler Ströme dem Auseinanderlaufen etwas entgegen. Infolge der relativ geringen Stromstärken (einige hundert Mikro-Ampere bei Fernsehern bis einige Ampere bei Beschleunigern) ist dieser Effekt aber vernachlässigbar. In Plasmen (mit Strömen von einigen Kiloampere) macht sich hingegen der *Pinch-Effekt* (Einschnürung einer Stromröhre) signifikant bemerkbar. Bewegte Ladungen (parallele Ströme) erzeugen ein Magnetfeld, das den Strahl "pincht" bzw. einschnürt. Nach aussen (Rand) wirken Raumladungskräfte diesem Effekt entgegen, welche mit der Strahlstromstärke bzw. Ladungsdichte zunehmen (keine Kraft im Strahlzentrum, grösste Kraft am Strahlrand).

Bei kleinen Teilchengeschwindigkeiten überwiegen die repulsiven Raumladungskräfte deutlich, was bei langen Strahlwegen zu Instabilitäten führt. Mit zunehmender Energie bzw. Teilchengeschwindigkeit geht dieser Einfluss aber zurück, so dass die Strahlaufweitung nachlässt.

Es gilt die relativistische Kräfteproportionalität:

$$F \sim \frac{1}{\beta \cdot \gamma^2} \quad \beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \begin{array}{l} v = \text{Teilchengeschwindigkeit} \\ c = \text{Lichtgeschwindigkeit} \end{array}$$

Weil die magnetische Komponente proportional zu β^2 ist, erfolgt im relativistischen Grenzfall ($\beta \approx 1$) eine Kompensation der repulsiven Coulombwechselwirkung. Um der Strahldivergenz entgegenzuwirken müssen die geladenen Teilchen somit rasch auf hohe Energien beschleunigt werden. Im relativistischen Grenzfall ($v \approx c$) kompensiert die magnetische Attraktion die elektrostatische Repulsion gerade so, dass sich ein stabiler Gleichgewichtszustand der "bewegten Ladungswolke" (Bunch) herausbildet.

In diesem Zusammenhang sollte man zunächst wissen, wie sich die Lineargeschwindigkeit elektrisch geladener Partikel nach klassischem Verständnis berechnet. Die erzielbare Geschwindigkeit ist von der Ladung, der Spannung und der Masse abhängig:

$$v(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}$$

Aufgrund ihrer wesentlich grösseren Masse erreichen die Ionen eine erheblich kleinere Endgeschwindigkeit, obwohl die dieselbe Potentialdifferenz durchlaufen. Eine dünne Metallfolie ist somit ausreichend genug, um sie abzubremesen und unschädlich zu machen, indem sie ihre Ladung ans Metall abgeben.

Anm.: Relativistische Effekte müssen bei Oszilloskopröhren (dasselbe gilt für TV-Bildröhren) kaum berücksichtigt werden, weil die Strahlkorrektur im Werk mittels Justierung der Fokussier- und Ablenkeinheiten erfolgt. Es ist nackter Unsinn, wenn in populärwissenschaftlichen Darstellungen zu lesen ist: *Egal ob im Auto, im Fernseher oder CD-Player - überall steckt Technologie drin, die ohne Einsteins Theorien nicht funktionieren würde.* Dabei ist doch ersichtlich, dass die Entwicklung der Röhrentechnik gänzlich ohne Einstein stattfand! Offensichtlich schreibt ein Autor vom andern ab. Das Gross der Wissenschaftsjournalisten ist m.E. schlichtweg unfähig, sich aufgrund eigener Recherchen ein fundiertes Bild vom Thema zu machen. Das ist deshalb sehr ärgerlich, weil dadurch den "Kritikern" unnötigerweise Anlass zu Attacken auf die RT gegeben wird. Zwar ist es völlig richtig, dass beschleunigte Teilchen sich anders verhalten, als von der Newtonschen Mechanik vorausgesagt. Die Versuche von Kaufmann (1901-03, 1905) - und insbesondere von Bucherer (1908) und Neumann (1914) - belegen, dass sich schnelle Elektronen so verhalten, als ob ihre Masse zunähme. Kaufmann vermochte sich aber noch nicht zugunsten der SRT festzulegen und gab der Theorie von Abraham den Vorzug. Erst Bucherer sah im Experiment eine gute Übereinstimmung mit dem Lorentz-Einsteinschen Modell. Dieses Phänomen lässt sich bspw. an Stossprozessen wie Elektron-Elektron-Streuung noch deutlicher nachweisen (Champion 1932). Auch steigt die Geschwindigkeit der beschleunigten Elektronen - entgegen obiger Formel - nicht beliebig an, weil sich c als unüberschreitbare Grenzgeschwindigkeit offenbart (Bertozzi 1964). Ab Geschwindigkeiten $> 0,9 c$ machen sich die relativistischen Effekte zunehmend bemerkbar. Bei $0,995 c$ verhalten sich

Elektronen bereits so, als wenn ihre Masse zehnmal ihrer Ruhmasse entspräche. In Teilchenbeschleunigern muss dieses Verhalten berücksichtigt werden, um den Radius des Strahlrohrs zu korrigieren.

Der Strahl ist nichts anderes als die Summe seiner Teile (Elektronen, Protonen etc.). Somit beruhen die Raumladungskräfte letztlich auf der Existenz der beteiligten Elementarladungen. Ein einzelnes Teilchen sieht ein defokussierendes radiales Feld aufgrund der Coulombwechselwirkung mit den benachbarten Teilchen. Bei kleinen Energien ist die defokussierende Wirkung besonders gross. In linearer Näherung kann sie mittels der *Enveloppengleichung* berechnet werden. Ansonsten sind aufwendige Simulationsrechnungen erforderlich. Poisson- und Laplace-Gleichung(en) sollte man im Kontext ebenfalls verstehen und anwenden können.

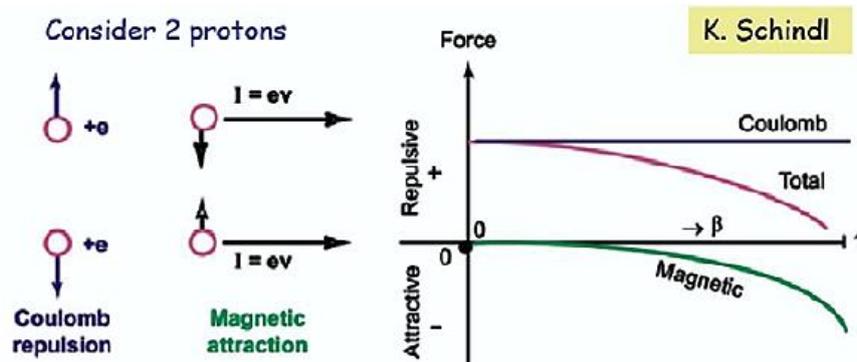


Abb. 1-6

Im relativistischen Grenzfall ($\beta \rightarrow 1$) wird die Coulombabstossung durch die magnetische Anziehung kompensiert.⁵

Andererseits nehmen mit zunehmender Energie die Sekundäreffekte (Spiegelladungen und Spiegelströme) massiv zu. Es bilden sich sog. Wake-Felder, die auf den Strahl zurückwirken (ohne Begrenzung durch die Innenwand des Strahlrohrs wäre dies natürlich nicht der Fall).

Zu den kollektiven Effekten zählt auch die *Coulombstreuung* (Intra-Beam-Scattering) zwischen den einzelnen Teilchen, wodurch ein langsames Anwachsen der Strahlemittanz in Speicherringen bewirkt wird. Dazu kommen Streuungen an Restgaspartikeln (ein absolutes Vakuum ist technisch nicht herstellbar).

Den Raumladungskräften entgegen wirken magnetische Kräfte, die aufgrund der bewegten Ladungsmenge entstehen. Die Teilchenstromdichte hat ein azimuthales Magnetfeld zur Folge, so dass eine resultierende radiale Kraft entsteht:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (\text{die fettgedruckten Grössen sind Vektoren})$$

Fazit: Die Ladungsträger müssen möglichst schnell auf hohe Energie beschleunigt werden, um die Strahldispersion gering zu halten. Ungeachtet dessen sind wegen der Impulsunschärfe der Teilchen fokussierende Elemente (elektrostatische Linsen, Quadrupole) notwendig.

In der Beschleunigerphysik führt die Raumladung zu einem "Verschmieren" des Tuningpunktes. Dadurch wird der Strahl mit der Zeit instabil. Bei Fernsehbildröhren ist der zurückgelegte

⁵ Bildquelle: K. Schindl (CERN)

Weg zwischen den Fokussierelektroden und dem Bildschirm dagegen viel zu gering, um eine signifikante Strahldispersion zu erhalten.

1.5 Oszilloskop-Röhre

Prinzipiell dient die Oszilloskop-Röhre der Umwandlung elektrischer Signale in adäquate Lichtemissionen. Das Geschehen spielt sich in einem Glaskolben ab, der auf 10^{-6} mm Quecksilbersäule ausgepumpt ist, ab. Die Röhre besteht aus einem zylindrischen nach vorne geweiteten Glaskolben, dessen massive Stirnfläche nach aussen gewölbt und innen mit einem Leuchtschirm ausgestattet ist. Die optisch aktive Schicht in Oszilloskopröhren besteht meist aus einer Kombination zweier silberaktiver Leuchtstoffkomponenten wie Zinksulfid (für blaue) und Zinkcadmiumsulfid (für gelbe Lumineszenzerscheinungen).

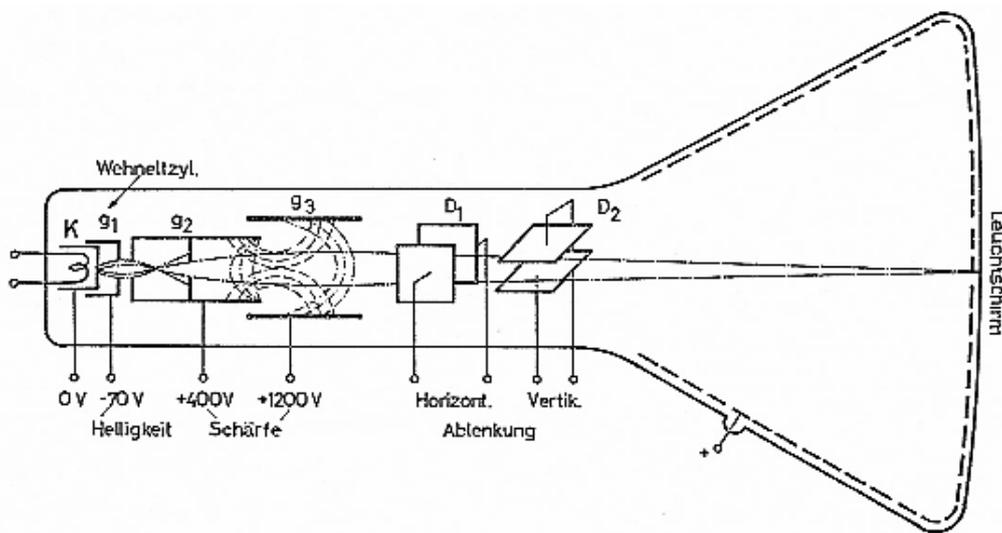


Abb. 1-7

Aufbau einer verbesserten Braunschen Röhre
(direkt beheizt und mit Loch- resp. Ringanode)

Die in der Grafik (Abb. 1-3) mit g2 und g3 bezeichneten Elektroden dienen als elektrostatische Linsen. Die Plattenpaare D1 und D2 sind für die horizontale und vertikale Strahlablenkung vorgesehen. Der Buchstabe "D" weist auf "deflection factor" (V/inch) hin.

Es gibt auch Röhren mit Nachleuchtdauer (Oszillographenröhre). Dies ist für langsam ablaufende Vorgänge, die eine gewisse Zeit sichtbar bleiben sollen, sinnvoll.



Abb. 1-8

Oszillographenröhre D7-16 GJ von AEG

Heutzutage werden anstelle der analogen Oszilloskope praktisch nur noch Digitaloszilloskope verwendet, die meist einen Speicher besitzen. Damit lassen sich Signalvorgänge auch über längere Zeit speichern.

1.3.1 Konstruktionsmerkmale

Im Röhrenhals, ganz hinten, befindet sich die *Elektronenkanone* mit Kathode und Wehneltzylinder. Die (indirekt beheizte) Kathode (K) besteht aus einem Zinkröhrchen, das vorne mit einer Bariumoxid-Schicht bestrichen ist. Um den Elektronenstrahl zu fokussieren, wurde von Wehnelt (1902) ein zylinderförmiger Topf (g1) um die Kathode herum angebracht, der stirnseitig ein kleines Loch vorwies, aus dem der Strahl heraustreten konnte. Durch Verändern der negativen Vorspannung des Wehneltzylinders konnte die Strahlintensität - und damit die Helligkeit - beeinflusst werden. Die Steuerung erfolgt leistungslos.

Weiter vorne auf dem Röhrenhals befinden sich zwei elektrostatische Ablenkeinrichtungen (x- und y-Ablenkung). Die eigentliche Anode befindet sich in diesem Beispiel an der Innenwand des aufgeweiteten Glaskolbens (gestrichelte Line). Die Anodenspannung beträgt 16 bis 20 kV. Das Grundprinzip wird auch für die späteren TV-Bildröhren beibehalten werden. Oft ist vor der Anode eine zusätzliche Elektrode (als Gitter g2 bezeichnet) eingebaut. Man sieht sehr schön, wie der Strahl durch die elektrischen Felder beeinflusst wird. Zwischen Wehneltzylinder und Anode bilden sich schalenförmige Äquipotentialflächen aus. Dadurch wird der Strahl gebündelt (ansonsten würde er auseinanderlaufen bzw. divergieren).

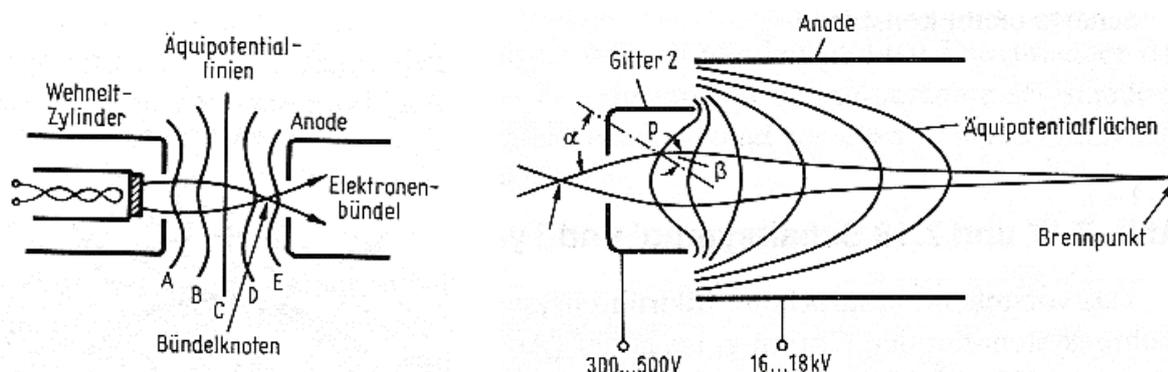


Abb. 1-9

Elektronenkanone und Fokussiersystem einer Kathodenstrahlröhre⁶

Allgemein werden Vorrichtungen zur Beeinflussung der Bewegung elektrischer Ladungsträger im Vakuum als *Elektronenoptik* bezeichnet. Ähnlich wie in der geometrischen Optik die Lichtstrahlen lassen sich Ladungsträger (Elektronen, Ionen) durch elektrische oder magnetische Felder beugen, bündeln und zu einem Brennpunkt fokussieren. Sog. *Elektronenlinsen* bestehen aus axial-symmetrischen elektrischen oder aus magnetischen Feldern mit nach aussen radial ansteigender Feldstärke.

Um den Strahl besser zu fokussieren, wird der Anodenzylinder oft in zwei Anodenhälften (g3 und g5) unterteilt. Die erste Elektrode (g2) wirkt wie das Schirmgitter einer Verstärkerröhre, andererseits - zusammen mit g3 - als bündelnde Elektronenlinse. Die zusätzliche Elektrode (g4)

⁶ Limann, Pelka: Fernsehtechnik ohne Ballast (Franzis)

erzeugt ein elektrisches Feld, das sich in die Potentiallücke zwischen den Anodenhälften einschleibt. Dadurch bilden sich an den auf 16 kV befindlichen Anodenstücken zwei plankonvexe Sammellinsen aus. Im Herstellerwerk wird die Spannung an g_4 so justiert, dass der Strahl seine optimale Schärfe erhält.

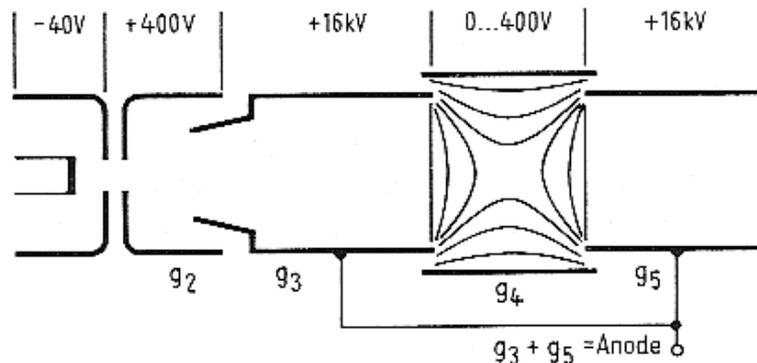


Abb. 1-10

Verbessertes Fokussiersystem einer Kathodenstrahlröhre⁷

Inhomogene elektrische Felder wirken auf Ladungsträger wie Sammellinsen. Dazu stelle man sich eine elektrostatische Fokussierung mittels Rohr-, Zylinder- oder Ringelektroden vor durch die der Strahl hindurch läuft (bei nur zwei Fokussierelektroden liegt die zweite immer auf dem höheren Potential).

Um den Ablenkwinkel zu erhöhen ohne die Röhre unnötig zu verlängern, werden die Ablenkelektroden gelegentlich aufgebogen. Um die Ablenkempfindlichkeit zu steigern, sollte die Anodenspannung wiederum nicht zu gross sein. Andererseits muss sie gross genug sein, damit die Elektronen die erforderliche Endgeschwindigkeit erhalten. Dies erreicht man mit einem Kunstgriff, indem sozusagen zwei Anoden verwendet werden. Zuerst durchlaufen die Elektronen eine Elektrode mit geringerer Spannung, danach die Ablenkeinheit, und erst danach werden sie einer Nachbeschleunigung (zusätzliche Elektrode) ausgesetzt. Meist wird dazu die konische Innenwandung des Kolbens mit einem leitenden Graphitbelag versehen. Oft wird der Graphitbelag zweigeteilt, indem er kreisförmig unterbrochen wird. Der dem Ablensystem nähere Belag wird mit der ersten Beschleunigungselektrode (Anode) verbunden, der dem Leuchtschirm nähere mit der zweiten (Nachbeschleunigungsanode). Solches führt bei Durchqueren der Röhre zu einem Potentialsprung und damit wiederum zu einer elektrischen Linse. Dadurch wird der Strahl leicht gegen das Bildzentrum gebeugt. Neuere Systeme verwenden eine spiralförmige Graphitschicht, die eine zunehmende Spannungserhöhung mit sich bringt.

Eine weitere Verbesserung besteht in der Montage einer Ionenfalle. Im Kolben befinden sich immer auch Restgasatome oder -moleküle, die durch den Strahl ionisiert und infolge ihrer Trägheit nur wenig abgelenkt werden und deshalb gegen die Schirmmitte fliegen, wo sie den berüchtigten Ionenfleck (blinder Fleck) erzeugen, indem sie die Leuchtschicht dort zerstören. Indem die Elektronen schräg in den Hals eingeschossen werden um danach durch einen Magneten in ihrer Bahn korrigiert zu werden, lässt sich das Problem lösen. Die wesentlich schwe-

⁷ Ebenda

renen Ionen fliegen geradeaus, wo sie von der Anode abgesaugt werden. Ein andere Möglichkeit besteht darin, dass vor der Leuchtschicht eine dünne Aluminiumfolie angebracht wird, welche die Elektronen mühelos durchdringen.

2 Fernsehbildröhren

2.1 Scharzweissbildröhren

Schwarzweissbildröhren unterscheiden sich von der Oszilloskopröhre durch ihre Form (größerer Ablenkwinkel, bis 110°) und die magnetische Ablenkeinheit (anstelle der elektrostatischen). Je größer der Ablenkwinkel bei gleicher Bildschirmdiagonale ist, um so kürzer kann die Bildröhre gebaut werden.

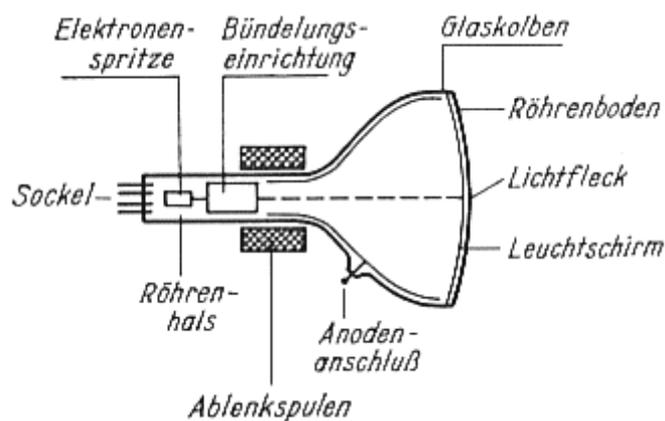


Abb. 2-1

Konstruktionsprinzip einer s/w-Bildröhre⁸

Der Röhrenboden mit der Leuchtschicht besteht aus massivem Glas. Bei einer Bildröhre mit 59 cm Bildschirmdiagonale lastet auf der Bildschirmfläche ein Druck von mehr als 1,5 Tonnen!

Die an der Innenseite des Glases aufgetragene Leuchtschicht bestimmt die Farbe. So ergibt Kalziumwolframat ein bläuliches und Zinksulfid ein gelblich-grünes Bild. Oft werden verschiedene Leuchtstoffe miteinander gemischt. Der vom Strahl getroffene Bildpunkt soll kurze Zeit nachleuchten (Nachleuchtdauer < 20 ms). Damit kein störender Lichthof entsteht, verwendet man für den Kolbenboden kein Klarglas, sondern ein graues Filterglas. Um die Lichtverluste zu minimieren, wird auf der Innenseite der Leuchtschicht eine dünne reflektierende Aluminiumschicht aufgedampft. Solche Bildschirme benötigen zudem keine Ionenfalle. Ferner wird der Glaskolben innen mit einer mattschwarzen Graphitschicht versehen.

Um den divergierenden Elektronenstrahl zu bündeln, wurde bei den ersten s/w-Röhren eine geteilte Spule an den Röhrenhals angelegt, deren Feldlinien durch einen Luftspalt ins Röhreninnere dringen konnten und prinzipiell dieselbe Wirkung wie eine elektrostatische Linse ausübten. Die das Magnetfeld durchquerenden Elektronen werden dabei auf eine schraubenförmige Bahn gezwungen und gegen die Strahlachse gelenkt. Neuere s/w-Röhren besitzen anstelle der Fokussierspule einen Permanentmagneten aus zwei entgegengesetzt polarisierten

⁸ Ebenda

Ferroxdure-Ringen. Für die Strahlschärfe kann der eine Ring mittels einer Gewindespindel verschoben werden.

Um den Strahl aus seiner axialen Richtung abzulenken und über den Bildschirm zu führen, werden magnetische Wechselfelder eingesetzt. Dazu werden zwei Ablenkpaare (x- und y-Ablenkung), die um 90° versetzt sind hintereinander auf dem Röhrenhals montiert und zwar derart, dass die Spulen eines Paares sich einander gegenüberliegend auf dem Hals in einer Flucht befinden. Fließt ein Strom durch die Wicklungen, entsteht ein magnetisches Querfeld, das den Strahl aus der Mitte bewegt (Dreifingerregel). Um die Spulen dem Hals anzupassen, werden sie sattelförmig gewickelt. Im Unterschied zu den Sattelspulen werden für neuere Bildröhren auch Toroidspulen verwendet. Deren vier Teilwicklungen befinden sich auf einem Ferritring. Um ein verzerrungsfreies Bild zu erhalten, müssen die magnetischen Feldlinien parallel durch den Glaskolben verlaufen. Der Verlauf des Wickelquerschnittes (Cosinuswicklung) spielt dabei auch eine Rolle. Oft wird eine Kombination benutzt, z.B. Sattelspulen für die Horizontal- und Toroidspulen für die Vertikalablenkung. Zusätzlich können am Röhrenhals kleine Permanentmagnete zur Strahlkorrektur angebracht werden.

Ältere Ablenkeinheit mit Fokussiermagnet:

http://www.home.datacomm.ch/chs/Container/Elektronenroehren/ablenkung_1.jpg

Gut erkennbar ist der justierbare Fokussiermagnet und die abgeschirmte Sattelspule.

Neuere Ablenkeinheit für 59 cm Rechteckbildröhren mit 110° Ablenkwinkel:

http://www.home.datacomm.ch/chs/Container/Elektronenroehren/ablenkung_2.jpg

Gut erkennbar nebst der Toroidspule (Ringkörper) sind auch die kleinen Permanentmagnete. (die Grafiken entstammen dem Buch "Fernsehtechnik ohne Ballast" von Limann, 9. Auflage)

Aufgrund der hohen Anodenspannung (16-18 kV) benötigt man starke Magnetfelder, um die Elektronen abzulenken. Die Ströme werden in einer leistungsfähigen Verstärkerstufe erzeugt.

Der Ablenkstrom für die Zeilenablenkung steigt linear an (Sägezahn), um am Ende einer Zeile in kürzester Zeit erneut die Richtung zu wechseln. Die Zeilenfrequenz beträgt 15'625 Hz (für gute Ohren ein hohes Pfeifen). Der Zeilenrücklauf findet innerhalb der sog. "Schwarzschulter" des Fernsehsignals statt; dadurch wird der Strahl solange unterdrückt, bis er erneut über eine weitere Zeile streicht. Dazu fließt in den um 90° gedrehten Spulen der Bildablenkung ebenfalls ein sägezahnförmiger Strom, dessen Frequenz aber nur 50 Hz beträgt. Durch das Zusammenwirken beider Ströme bzw. Magnetfelder wird der Strahl - von oben links beginnend - Zeile um Zeile bis nach unten gelenkt. Genauer gesagt werden zuerst nur die ungeraden Zeilen abgetastet und danach die geraden. Aus den zweimal 25 Halbbildern pro Sekunde entsteht dann das gesamte Bild. Bei den moderneren Röhren mit nahezu flachem Bildschirm weicht der Stromanstieg von der linearen Figur des Sägezahns etwas ab, indem in den Ablenkstufen eine leicht s-förmige Vorverzerrung erzeugt wird. Ohne diese Korrektur würden die Bildzeilen am oberen und unteren Rand einen grösseren Abstand erhalten, als diejenigen in der Bildmitte.

2.2 Farbbildröhren

Farbbildröhren besitzen drei Elektronenkanonen und sind um einiges komplexer aufgebaut als s/w-Bildröhren. Es steckt eine Menge an technischer Physik darin. Gebräuchlich sind, systembedingt, die Delta-Farbbildröhre und die Schlitzmaskenfarbbildröhre.

2.2.1 Lochmaskenröhre

Die **Delta-Farbbildröhre** besitzt hinter einer Lochmaske 0,4 Millionen Farb-Triplett's, bestehend aus den drei Grundfarben Rot (600 nm), Grün (540 nm) und Blau (450 nm), die exakt von den drei Elektronenstrahlen getroffen werden müssen, um ein naturgetreues Farbbild zu erzeugen. Werden die Strahlströme im Verhältnis $0.30 \cdot R$, $0.59 \cdot G$, $0.11 \cdot B$ angesteuert, leuchten die Farbpunkte in entsprechender Farbsättigung. Für das Auge erscheint ein solches Farbgemisch als reines Weiss. Je nach Aussteuerungsstärke der Strahlströme lassen sich so die gewünschten Farben erzeugen.

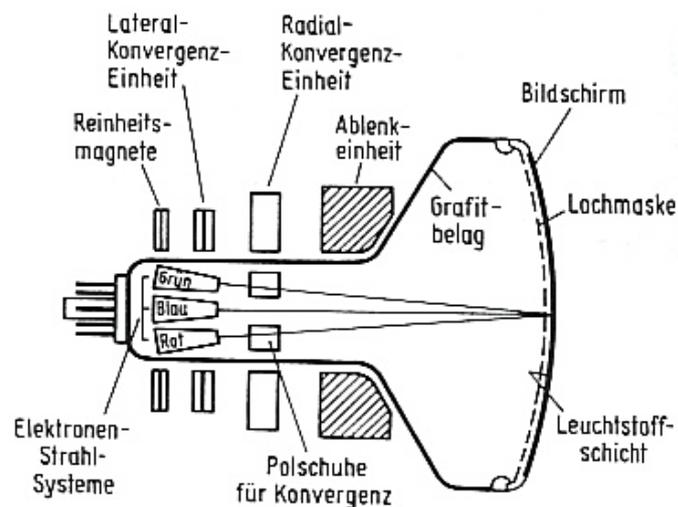


Abb. 2-2

Konstruktionsprinzip einer Lochmaskenröhre⁹
mit Ablenk- und Konvergenzspulen (von oben gesehen)

Unmittelbar am Röhrenkonus liegt die Ablenkeinheit mit den Horizontal- und Vertikalablenkspulen. Etwa in der Mitte des Röhrenhalses sitzt die Radial-Konvergenzeinheit. Mit ihr lassen sich die Elektronenstrahlen so verschieben, dass sie durch dasselbe Maskenloch fallen. Diese Einheit besteht aus drei U-förmigen Ferritkernen mit zwei Wicklungen (eine für die Vertikal- und eine für die Horizontalkonvergenz) und einem verschiebbaren Permanentmagneten (Reinheitsmagnet) auf jedem Joch. Die Ströme für die Vertikalkonvergenz müssen oben wie unten separat eingestellt werden (Nord-Süd-Korrektur). Dasselbe gilt für die Horizontalkonvergenz (Ost-West-Korrektur). Der Röhrenhals wird an dieser Stelle durch einen sektorförmigen Steg in drei Kammern unterteilt, in denen die einzelnen Elektronenstrahlen durchlaufen. Die Magnete erzeugen zwischen den Polschuhen homogene Felder zur radialen Strahlbeeinflussung. Damit wird die "statische Konvergenz" (Bildschirmmitte) eingestellt. Trotzdem treten an den Rändern weiterhin unerwünschte Farbsäume auf, welche durch Ströme in den

⁹ Ebenda

Wicklungen kompensiert werden müssen. Die Konvergenzeinstellung ist auch deshalb wichtig, weil infolge der unterschiedlichen Ablenkwinkel der drei Elektronenstrahlen kartoffelartige Kreise entstünden, die zudem verschieden verzerrt würden. Um Linearität und Farbdeckung zu erhalten sind somit Konvergenzsaltungen (aus Bildkippübertrager und Zeilenendstufe) und mehrfache Justierungen nötig. Für den gesamten Abgleich gibt es mindestens 6 Trimmer und 3 Permanentmagnete, die einzeln justiert werden müssen (keine einfache Sache). Mit der Lateral-Konvergenzeinheit (Blauschiebemagnet) lässt sich der blauerzeugende Elektronenstrahl seitlich zur Bildröhrenachse verschieben. Das ist deshalb erforderlich, um den zentralen Strahl in die Symmetrieachse zu den beiden anderen Strahlen zu bringen. Alle drei Strahlen müssen im gleichen Maskenloch konvergieren. Als Anhaltspunkt für die Konvergenzeinstellung dient die Weisseinstellung mittels Bildmuster-generator. Um die Farbreinheit zu gewährleisten, befinden sich noch weitere verstellbare Magnetringe (Reinheitsmagnete) auf dem Hals der Bildröhre. Übertragen werden natürlich nur Signale und nicht Farben, nämlich die Schwarzweiss-Bildmodulation (Video- oder Y-Signal), das Farbtosignal (rot, grün, blau) und das Farbsättigungssignal (blasse oder kräftige Farbe), somit nebst der s/w-Information zwei Farbsignale, die als Differenzsignale im FBAS-Signal enthalten sind (es würde an dieser Stelle zu weit führen, auf dieses Signal näher einzugehen). Auf dem Bildschirm lassen sich durch Mischen der Grundfarben alle anderen Farben erzeugen. Damit das empfindliche Ablenssystem am Wohnort des Betrachters nicht durch externe Magnetfelder gestört wird, ist der Röhrenkolben magnetisch abgeschirmt. Beim Einschalten des Gerätes wird ein abklingender Wechselstrom durch eine Entmagnetisierungswicklung geschickt (als surrendes Geräusch hörbar).

Anm. Zur Farbphysik: Im IBK-Farbdigramm (Farbdreieck) werden alle Farben durch additive Farbmischung aus den Spektralfarben erzeugt. Ein bestimmter Farbton lässt sich aus den Spektralfarben bekanntlich dadurch erzeugen, indem die Leuchtdichten der Grundfarben in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Diese Zusammenhänge lassen sich in einem räumlichen Farbkoordinatensystem festhalten, wo die Leuchtdichten der Spektralfarben im jeweiligen Verhältnis zur Gesamtleuchtdichte der Farben enthalten sind. Weil die Summe der Leuchtdichten die Gesamtleuchtdichte $x+y+z = 1$ ergibt, kann die dritte Achse wegfallen. Es resultiert ein ebenes IBK-Farbdigramm. Jeder Ecke ist eine der Grundfarben Rot, Grün, Blau zugeordnet. Dazwischen - auf den Verbindungslinien liegen sämtliche Farbübergänge. Der Techniker spricht dabei nicht von Farben, sondern von Farbart (Chrominanz). Zur Dreiecksmitte hin werden die Farben zunehmends blasser. Bei den Koordinaten (0,3;0,3) liegt der sog. Weisspunkt. Beim Farbfernsehen wird das dreieckige Farbkoordinatennetz zu einem Farbkreis mit den Koordinatenachsen U und V umgeformt. Damit lassen sich Farbtöne durch einen Winkel angeben. Im Farbkreis gegenüberliegende Farben nennt man Komplementärfarben. An der Kreisperipherie befinden sich die gesättigten Farben, die gegen das Zentrum zu verblassen. Der Mittelpunkt ist weiss, somit entsättigt. Der Sättigungsgrad wird durch die Amplitude des Farbzeigers angegeben. Farbtöne werden somit durch den Farbwinkel und der Sättigungsgrad durch die Zeigerlänge ausgedrückt (analog zu Darstellungen in Polarkoordinaten) bzw.: Farbart = Farbton + Farbsättigung. Die Bildhelligkeit bzw. Leuchtdichte (Luminanz) wird durch das Y-Signal (Bildsignal) erzeugt. Eine Veränderung der Leuchtdichte lässt die Farbart unverändert. Stellt man das Bild dunkler ein, entsteht aber der subjektive Eindruck, dass die Farben satter werden.

Eine Farbbildröhre nach dem Lochmaskenprinzip enthält drei Strahlssysteme, bestehend jeweils aus Heizfaden, Kathode, Gitter 1 und Gitter 2. Die Fokussierelektrode (Gitter 3) und die Anode gehören allen Systemen gemeinsam.

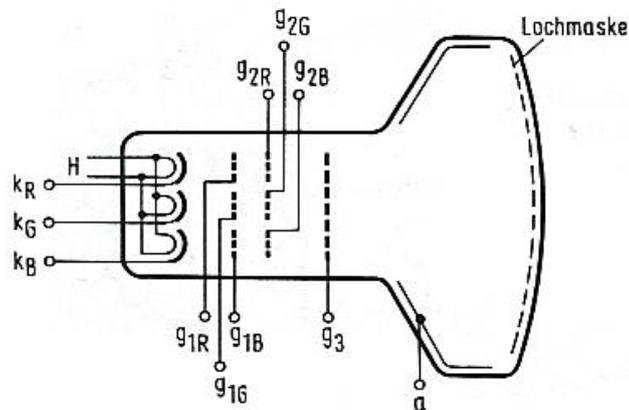


Abb. 2-3

Elektroden und Anschlüsse einer Lochmaskenröhre¹⁰

Für die Strahlsteuerung sind zwei Verfahren möglich:

- a) Die **RGB-Steuerung** gewinnt aus dem FBAS-Signal die reinen Farbsignale für Rot, Grün und Blau zurück und steuert damit die drei Kathoden der Bildröhre.
- b) Die **Farbdifferenzsteuerung** gewinnt aus dem Farbartsignal die drei Farbdifferenzsignale (R-Y, G-Y und B-Y) und steuert damit die Gitter (g1). Das Leuchtsignal (Y) wird an die Kathoden gelegt.

Bei beiden Verfahren sind die Farbsignalanteile an den Steuergittern so zu bemessen, dass die Weissbalance stimmt. Wenn "Weiss" gesendet wird, muss $Y = 0.30 \cdot R + 0.59 \cdot G + 0.11 \cdot B$ auch im Steuerteil der Bildröhre erfüllt sein.

2.2.2 Schlitzmaskenröhre

Bei der **Schlitzmaskenbildröhre** ist die Konvergenzeinstellung bereits wesentlich einfacher zu handhaben. Durch konstruktiv verbesserte Anordnungen der Elektronenkanonen (alle Strahlen in derselben Ebene) sind nur noch geringfügige Justierungen erforderlich. Der grünerzeugende Strahl wird in der Mitte angeordnet. Damit reduziert sich der Abgleich auf zwei Konvergenzeinstellungen, um die beiden äusseren Strahlen so zu verschieben, dass sie mit dem zentralen Strahl konvergieren. Mittels einer Differenzspule - in Serie zu den Zeilenablenkspulen - lassen sich die Ablenkströme so beeinflussen, dass nur noch eine ganz geringe parabelförmige Abweichung zwischen den roten und blauen Linien am rechten und linken Bildrand verbleibt, die sich mit nur einem Trimmer zur Deckung bringen lassen. Dazu wird lediglich eine zusätzliche Vierpol-Toroidspule auf der Ablenkeinheit benötigt. Ein weiterer Fortschritt besteht in einer verbesserten Bildschirmmaske, die anstelle runder Löcher Schlitzlöcher enthält sowie senkrechter Leuchtstoffstreifen. Pro Zeile befinden sich wiederholend rote, grüne und blaue Streifen

¹⁰ Ebenda

nebeneinander. Dadurch ist der Bildschirm unkritischer bezüglich möglicher Nord-Süd-Abweichungen. Eine weitere Optimierung stammt von RCA (PI-Schlitzmaskenbildröhre), wo das Ablenkensystem bereits beim Hersteller auf dem Bildröhrenhals so justiert und abgeglichen wird, dass nachher nur noch zwei Korrektursteller im Gerät betätigt werden müssen.

2.2.3 Bildröhrenregeneration

Bis zu einem gewissen Grad sind TV-Bildröhren regenerierbar, indem die Bariumoxid-Kathode bei begrenztem Anodenstrom gezielt überheizt wird. Dazu wird ein Bildröhren-Regeneriergerät benötigt. Solche Spezialgeräte werden längst nicht mehr hergestellt. Möglicherweise findet sich ein gut erhaltenes Gerät auf einer Online-Plattform wie Ebay oder Amazon.



Abb. 2-4

Bildröhren-Regeneriergerät

Ein mir bekannter Hasardeur hat sich diesen Umstand seinerzeit zunutze gemacht und einem gutgläubigen Grossmütterchen anstelle einer neuen Bildröhre eine regenerierte für teures Geld verkauft. Für solche Händel ist das Regeneriergerät gewiss nicht gedacht.

2.3 Spezielle Elektronenröhren In TV-Geräten

In einem alten s/w-Fernseher gibt es viele Doppeltrioden und Pentoden. Im Grunde nichts anderes als Radioröhren also. Es gibt aber ein paar Besonderheiten, darunter die *Boosterdiode* bzw. Schalterdiode (z.B. PY 81, PY 88, PY 500). Zusammen mit der Zeilenendstufenröhre (Pentode, z.B. PL 36, PL 500) und einer Hochspannungsgleichrichterröhre (z.B. DY 80, EY 86) ist sie an den **Zeilentrafo** (ein Spartransformator mit Ferritkern) angeschlossen. Dieser speist die Zeilenablenkspulen mit einem sägezahnförmigen Wechselstrom von 15'625 Hz, erzeugt aber auch die Hochspannung (16 kV!) für die Bildröhre.

Die Funktion der Boosterdiode besteht darin, den Zeilenrücklauf zu dämpfen. Bekanntlich fällt der Sägezahn am Zeilenende steil ab, was einmal hohe Spannungsstöße (bis 4 kV) zur Folge

hat und andernseits zu wilden Schwingungen führen könnte. Somit muss die Feldenergie der Ablenkspulen rasch abgebaut bzw. gedämpft werden. Das erfolgt durch einen elektronischen Diodenschalter (Boosterdiode) und einen Kondensator.



Abb. 2-5
Boosterdiode PY 88



Abb. 2-6
Zeilentrafo

Zur Vermeidung von Feldemission sind die Anoden von Hochspannungsdioden abgerundet und der Abstand zwischen Kathode und Anode vergrößert. Die Kathode muss spannungsfest gegenüber dem Heizfaden sein. Entgegen der sonst üblichen Bauweise ist der Kathodenanschluss aus diesem Grund als obenbefindliche Metallkappe vorhanden.

In jungen Jahren machte ich mir einen Spass daraus, mit einem Schraubenzieher die Kathodenkappen zu berühren, um dann hübsche bläuliche Funken zu ziehen. Modernere TV-Geräte besitzen anstelle der Röhren Halbleiterelemente (Transistoren, Thyristoren, Si-Dioden), wo dieses Spiel nicht länger funktioniert.

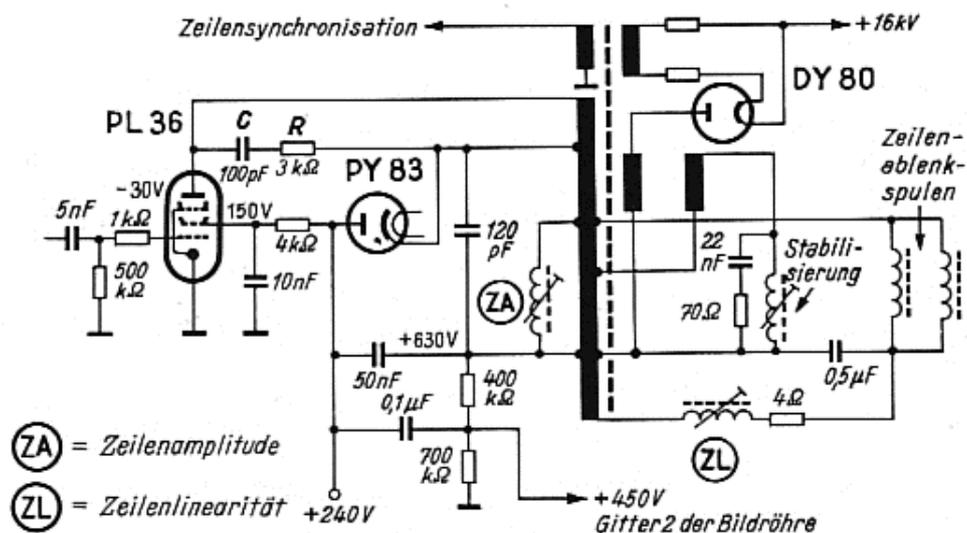


Abb. 2-7

Das Schema zeigt eine vollständige Zeilenendstufe

Moderne Zeilentrafos werden als Dioden-Split-Transformatoren (DST) gefertigt. Dadurch ste-

hen unterschiedliche Hochspannungen - für die Strahlfokussierung (7 kV) und für die Anodenspannung (25 kV) - zur Verfügung. Um harte Röntgenstrahlung zu vermeiden, darf die Anodenspannung 27 kV nicht überschreiten.

3 Bildaufnahmeröhren

3.1 Geschichtlicher Rückblick

Die Frühgeschichte der Bildaufnahme-, Bildübertragungs- und Bildwiedergabetechnik (Bildtelegraphie, Bildfunk, Television) kann in zwei resp. drei Phasen eingeteilt werden:

3.1.1 Das (opto)-mechanische Fernsehen

Die Bildabtastung erfolgte mit der Nipkowschen Spiralscheibe (elektrisches Teleskop von Nipkow, 1884). Weiterentwicklungen sind das Spiegelrad (Weiller, 1889), die Spiegelschraube (Okolicsanyi, 1927) und der Spiegelkranz (Mihály, 1933). Auch für die Bildwiedergabe wurden auf dieser Basis opto-mechanische Empfänger gebaut. Die Bildübertragung erfolgt auf elektrischem Wege (Kabel oder Funk). Angetrieben werden die Bildzerleger- und Bildwiedergabevorrichtungen durch Synchronmotoren.

3.1.2 Das semi-elektronische Fernsehen

Es folgt eine längere Übergangsphase einer von mir als semi-elektronisches Fernsehen bezeichneten Epoche. Mechanisches und semi-elektronisches Fernsehen überlappen sich und werden als gleichwertige Technologien weiterentwickelt, bis sich 1931 der Kathodenstrahlfernseher (System von Ardenne) durchzusetzen beginnt.

Die Idee zur Verwendung der Braunschen Röhre für die Wiedergabe zwanzigzeiliger Schwarzweissbilder (1906) stammt von Dieckmann - Assistent von K.F. Braun - und Glage.

Rosing (1907) entwickelt ein halbelektronisches Fernsehsystem (Reichspatent "Elektrisches Teleskop"). Die senderseitige Bildabtastung erfolgt mit Hilfe rotierender Vielfachspiegel (somit noch mechanisch). Als "Bildschreiber" wird die Braunsche Röhre vorgeschlagen. Eine Demonstration vor einer Reihe namhafter Gelehrter erfolgt im Jahre 1911.

Karolus (1924) verbessert die Kerr-Zelle zu einem weitgehend trägheitsfreien Lichtmodulator für den Fernsehempfänger. Als lichtelektrischen Wandler auf der Senderseite benutzt er eine Maschenphotozelle (mit hydrierter Kalium-Kathode und einem Argon-Wasserstoffgemisch als Füllgas).

Baird (1926) erfindet den 30-Zeilen Televisor.¹¹ Ives (Bell-Labs, 1927) verwendet als Bildzerleger einen "Flying-Spot-Geber" (Lichtstrahlabtaster) mit Nipkowscheibe. Als Empfänger dient eine Nipkowscheibe mit Neon-Flächenglimmlampe.

Die erste transatlantische Übertragung von bewegten Bildern (London-New York) nach dem Baird-System erfolgt im Jahre 1928. Das Bildsignal läuft zunächst über Telefonleitungen zu einem Kurzwellensender in Coulsdon, von wo aus es abgestrahlt wird. Im selben Jahr (1928)

¹¹ <http://www.home.datacomm.ch/chs/Container/Technik/televisor.jpg>

präsentiert Mihály in Berlin einem kleinen Kreis eine Fernsehübertragung.¹²

3.1.3 Das (voll)-elektronische Fernsehen

Das Konzept des Phototelegraph (Senlecq, 1877) beruht auf einer Bildabtastung mittels Fotozellenfeld und einer Bildwiedergabe mit Glühlämpchen. Rumer (1909) stellt eine Kontakttafel mit 10'000 Selenzellen her. Das vom Elektroingenieur Alan Archibald Campbell Swinton (1911) zunächst gedanklich entworfene TV-System kommt dem Konzept des heutigen Fernsehen bereits sehr nahe.

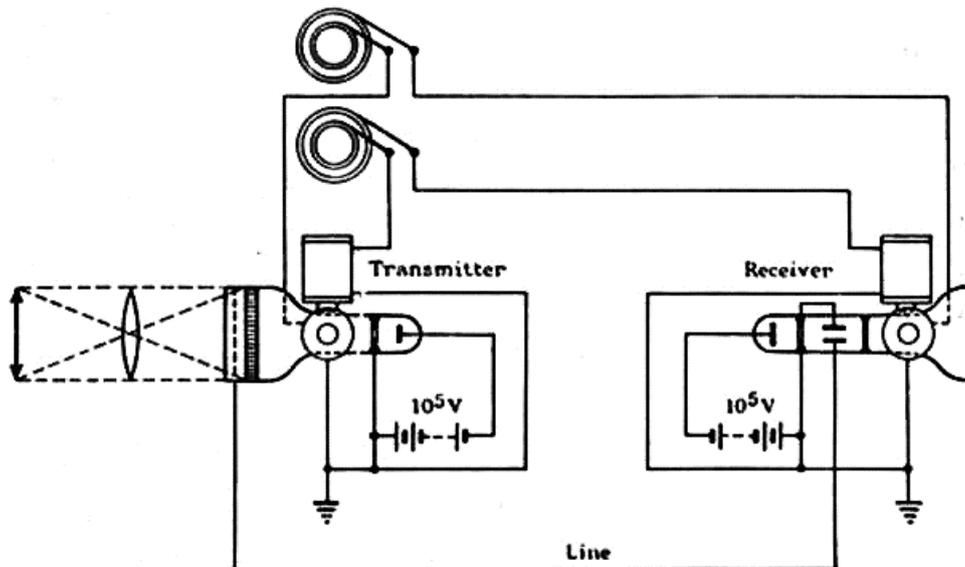


Abb. 3-1

TV-System von Swinton (1911)

Dieckmann und Hell (1925) bringen eine Bildsondenröhre (lichtelektrische Bildzerlegerröhre für Fernsehen) ins Spiel. Auf der Gewerbeausstellung in München stellen sie eine Fernsehsende- und Empfangsstation vor, wo es der damals 17-jährige Schüler und spätere Erfinder des PAL-Farbfernsehens, Walter Bruch, zu sehen bekam.

In den USA arbeitet Philo Taylor Farnsworth (und auch dessen unerbittlicher Konkurrent Zworykin, der von Westinghouse zur RCA gewechselt hatte) an einem vollelektronischen Bildübertragungssystem. Im Jahre 1927 gelingt Farnsworth die Übertragung eines Fernsehbildes. Aufgrund langwieriger Patentstreitigkeiten mit RCA ist es ihm jedoch nicht vergönnt, aus diesen Erfindungen einen bleibenden Nutzen zu erzielen. Später wird er sich der Kernfusion zuwenden (Farnsworth-Hirsch-Fusor). Farnsworth stirbt verarmt in Boston und ist heute nahezu unbekannt.

Mitte 1928 beginnt die 'Jenkins Television Corporation' über ihren Versuchssender W3XK bei Washington mit der regelmässigen Ausstrahlung 48-zeiliger Fernsehbilder von Filmen (mit 15 Bildern in der Sekunde).

Manfred von Ardenne (1930) führt im Labor einem erlauchten Kreis von Fachleuten ein vollelektronisches Fernsehsystem (100 Zeilen Raster und 20 Bildwechseln pro Sekunde) vor und

¹² <http://www.home.datacomm.ch/chs/Container/Technik/telehor.jpg>

präsentiert das System während der "Großen Deutschen Funkausstellung" erstmals öffentlich. Für die Bildabtastung eines Filmstreifens werden die Braunsche Röhre (Leuchtfleckabtaster) und Photozellen eingesetzt. Die Bildwiedergabe erfolgt ebenfalls mit der Braunschen Röhre.

Im Jahre 1931 war der technische Fortschritt im Bildfunk bereits offensichtlich:

An der "Großen Deutschen Funkausstellung" in Berlin wird der staunenden Öffentlichkeit ein Telefunken-Fernsehgerät von Karolus gezeigt. Der "Telehor" von Mihály ist für Bild- und Tonempfang geeignet. Radio Loewe baut den ersten Kathodenstrahlfernseher auf der Basis des "System Manfred von Ardenne". In Kürze wird sich das elektronische Fernsehen gegenüber den elektromechanischen Verfahren der Konkurrenz bleibend durchsetzen.

Mitgewirkt an der Entwicklung des Fernsehens haben Ingenieure, Physiker und geniale Autodidakten.

Siehe dazu:

Abramson: Die Geschichte des Fernsehens (Wilhelm Fink Verlag, 2002)

3.2 Videoröhren

Nun gilt es sich zu fragen, auf welchem Weg bewegte Bilder in das Videosignal umgewandelt werden. Dem menschlichen Einfallsreichtum, das ist gewiss, sind dabei kaum Grenzen gesetzt. Wertvolle Anregungen habe ich dem Buch "Einführung in die Elektronik" von W.A. Günther entnommen. Dieses - inzwischen vergriffene Buch (eines der besten, die ich zum Thema habe) - geht auf einen vom Verfasser in einem Wintersemester (um das Jahr 1960 herum) gehaltenen Elektronikkurs an der Kant. Volkshochschule Zürich zurück. Selbst war ich damals noch zu jung, um teilzunehmen. Das Buch hat mir später aber wesentliche Einblicke in die Röhrentechnik ermöglicht, was mir insbesondere auch im Beruflichen in abgewandelter Form sehr zugute kam.

Erwähnenswert aus der Vielzahl diesbezüglicher Erfindungen und Weiterentwicklungen sind:

- Dissector-Röhre (Farnsworth, 1925)
- Ikonoskop (Zworykin, 1923)
- Orthikon, Emitron (Iams und Rose, 1939)
- Vidicon, Endicon (RCA, 1950)
- Plumbicon (Philips, 1962)

Diverse Fernsehkameraröhren (um sich einen ersten Eindruck zu verschaffen):

<http://www.jogis-roehrenbude.de/Roehren-Geschichtliches/Spezialroehren/diverse.jpg>

Grundsätzlich sind zwei Bildwandlungsverfahren bekannt: Die "direkte Methode" bedient sich der Umwandlung eines Lichtbildes in ein Elektronenbild und dessen Zerlegung in aufeinanderfolgende Zeilen. Die "indirekte Methode" bedient sich der Zwischenspeicherung des aus dem Lichtbild gewonnenen Ladungsbildes und dessen zeilenweiser Abtastung. Wir befassen uns nachfolgend nur mit der zweiten Methode.

Am Beispiel zweier typischer Vertreter von Videoröhren (Superikonoskop und Superorthikon) soll das Prinzip der Bildumwandlung und Bildsignalerzeugung in gebotener Kürze erläutert werden.

3.2.1 Superikonoskop

Erfunden wurde das Ikonoskop ("Bildfängerröhre") in den USA von Zworykin (1923; Patentanmeldung 1928; Produktion 1934). Später wurde das Superikonoskop entwickelt. Der Zusatz "Super" deutet auf nachhaltige Verbesserungen seitens der Elektronikindustrie hin.

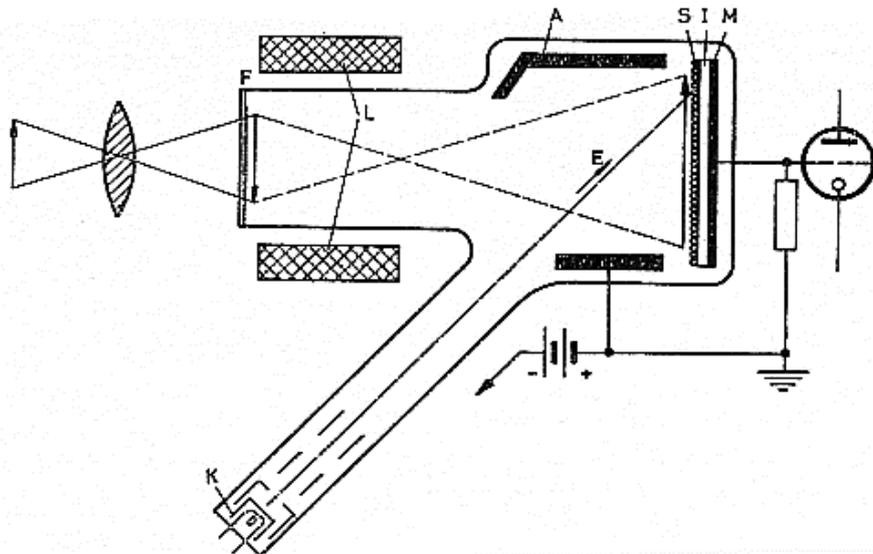


Abb. 3-2

Superikonoskop (schematisch)¹³

Durch ein Objektiv fällt das Licht des Szenenbildes auf eine Fotokathode (F). Diese besteht aus einer Glasplatte (Einfallfenster), auf der sich eine Silber-Cäsium- oder Silber-Antimon-Schicht befindet. Aus dieser austretende Primärelektronen fliegen zu einer Speicherplatte (S), aus der sie Sekundärelektronen herauslösen. Diese werden durch die seitlich angeordnete Anode (A) weggesaugt. Auf der Speicherplatte verbleibt das (inverse) elektrische Ladungsbild. Eine magnetische Linse (L) dient der optischen Strahlaufächerung.

Die Speicherplatte (auch Mosaik genannt) besteht aus einer Glimmerschicht (I), auf welcher sich ein Metalloxid mit mikroskopisch winzigen Silberpartikelchen befindet. Jeder Mosaikpunkt lädt sich auf ein zur Helligkeit des Bildes adäquates Potential auf (bis + 3 V); lediglich dort, wo im Aufnahmebild dunkle Stellen sind (und somit keine Fotoemission stattfindet), bleibt das Potential unverändert. Als Gegenelektrode dieser Mikrokapazitäten dient ein rückseitiger Metallbelag (M).

Ein schräg einfallender Kathodenstrahl (E) tastet das Ladungsrelief zeilenweise ab und neutralisiert dabei die punktuell aufgeladene Metalloxidoberfläche. Jeder Ladungsausgleich löst einen kleinen Stromstoß aus, der einer nachgeschalteten Verstärkereinheit zugeführt wird. Die

¹³ W.A. Günther: Einführung in die Elektronik

Helligkeitswerte des Bildes werden nacheinander in eine Zeitfunktion übertragen. Das auf diesem Wege gewonnene Signal wird als Videosignal bezeichnet.

Jeder Bildabtastung entspricht ein Raster. Um ein flimmerfreies Bild zu erhalten, werden pro Sekunde 50 Halbraster erzeugt. Der Strahl tastet während der ersten 1/50 Sekunde alle ungeraden Zeilen ab und - nach dem Vertikalrücklauf - in der folgenden 1/50 Sekunde alle geraden Zeilen usw. Somit werden in einer Sekunde 25 Vollbilder generiert. Dieses als "Zeilensprungverfahren" bekannte Prinzip findet noch heute in der Fernsehtechnik Verwendung. Damit der Empfänger dasselbe Bild sieht, werden dem Übertragungssignal zusätzlich Zeilen- und Bildsynchronisierungsimpulse aufgeprägt.

3.2.2 Superorthikon

Das von Iams und Rose im Jahre 1939 erfundene (Image)-Orthikon ist einige hundertmal empfindlicher als das Superikonoskop. Diese verbesserte Bildaufnahmeröhre ist besonders interessant, weil sie mehrere elektronische Elemente wie Photozelle, Bildwandler, Kathodenstrahlröhre und Elektronenmultiplifier enthält.

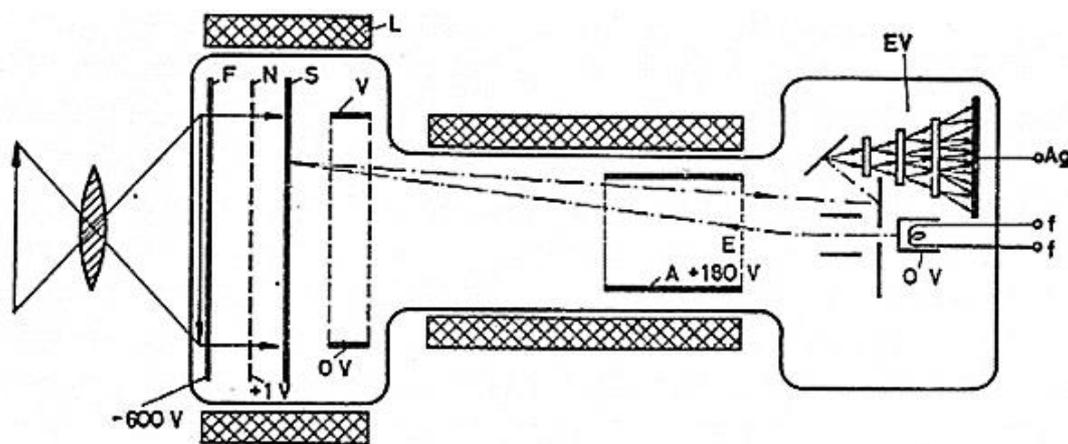


Abb. 3-3
Superorthikon(schematisch)¹⁴

Die auf negativem Potential liegende hauchdünne Fotokathode (F) emittiert den zum Aufnahmebild adäquaten Fotostrom. Im Bildwandlerteil - zwischen Fotokathode und Speicherplatte - befinden sich zwei rohrförmige Beschleunigungselektroden (350 V und 500 V, in der Grafik nicht eingezeichnet).

Die Primärelektronen lösen auf der Speicherplatte (S) wiederum Sekundärelektronen heraus. Die Speicherplatte (eine 2-5 µm dicke Glasfolie) besitzt einen Emissionsfaktor von etwa 4 und hat eine bestimmte Leitfähigkeit (die nicht zu gross sein darf, aber doch so gross, um innert 1/25 Sekunde einen Ladungsausgleich zu ermöglichen).

Die Sekundärelektronen werden von einem feinmaschigen Fadennetz (N), das sich 20-50 µm vor der Speicherplatte befindet, absorbiert. Die Netzelektrode ist mit der einen Rohrelektrode verbunden. Nachteilig wirkt sich aus, dass bei Überbelichtung derart viele Sekundärelektronen freigesetzt werden, dass diese von der Netzelektrode nicht vollständig absorbiert werden

¹⁴ Ebenda

können und dadurch die positiven Ladungen auf der Speicherplatte ausgleichen. Das Bild wird dann im Bereich der übermässig hellen Stellen dunkel.

Die Rückseite der Speicherplatte wird von einem Elektronenstrahl (E) in der gewohnten Fernsehmanier zeilenweise abgetastet. Dazu dienen Ablenkspulen. Um eine scharfe Fokussierung zu erzielen, wird zudem ein sich über den ganzen Glaskolben erstreckendes axiales Magnetfeld benötigt, in welchem die Elektronen mehrere Schraubenumgänge mit geringstem Durchmesser durchlaufen.

Eine Verlangsamungselektrode (V) - als Bremsring konstruiert - bremst den von der Anode beschleunigten Strahl auf 0 eV, so dass die Elektronen "wie schwebend" auf der Speicherplatte landen. Auf der mit positiver Ladungsverteilung besetzten Platte bleiben mehr oder weniger Elektronen "kleben". Die jeweilige Elektronenaufnahme ist beendet, sobald das lokale Punktpotential auf Null zurückgeht. Die restlichen Elektronen wenden und fliegen unter dem Einfluss einer Wandelektrode in Richtung Anode (Sammelelektrode) zurück.

Der rücklaufende Strahl ist demzufolge durch die Speicherplatte in seiner Intensität moduliert worden (was den Helligkeitsstufen im Bild entspricht). Der Bildstrom - als Differenz der hin und rücklaufenden Elektronen - erzeugt auf einer Prallelektrode (1. Dynode) eine ausgiebige Sekundäremission, welche in einem rauscharmen Elektronenvervielfacher (EV) zu einer 500 bis 2000-fachen Verstärkung führt. Weisse Bildflächen erzeugen auf diesem Wege einen kleinen Videostrom, schwarze einen grossen, während Graustufen irgendwo dazwischen liegen.

3.2.3 Fernsehgrossprojektion

Eine zweifellos und ebenso interessante Kathodenstrahlröhre - wenn auch zur Bildwiedergabe (Fernseh-Grossprojektion) dienlich - soll nicht unerwähnt bleiben, das *Eidophor*. Erfunden hat es ein Schweizer, der Ingenieur Dr. Fritz Fischer (1898-1947), der an der ETH Zürich das 'Institut für Technische Physik' einrichtete. Es braucht wahrlich ein profundes Wissen in technischer Physik, um ein solch raffiniertes System zu ersinnen und auch noch zu realisieren.

In einer Vakuumkammer befindet sich eine Glasplatte (G), welche mit einer nahezu isolierenden, transparenten (etwa 0,1 mm dicken) öligen Flüssigkeit (F) benetzt ist. Ein schräg von oben kommender Elektronenstrahl, der zeilenweise (gemäss der Fernsehnorm) über die Flüssigkeitsschicht gelenkt wird, setzt entsprechend der Intensität des Videosignals Ladungen auf der Flüssigkeit ab. Dunkle Punkte im Empfangsbild hinterlassen eine flache Oberfläche. Helle Bildpunkte hingegen führen aufgrund der intensitätsgesteuerten Elektronenberieselung (und der dabei auftretenden Coulombkräfte) zu einer Wölbung der Flüssigkeit, die von der Amplitude des Videosignals abhängig ist. Damit entsteht in der Ölhaut eine ausgeprägte Ladungsriefelung. Die Leitfähigkeit der öligen Schicht ist so gewählt, dass die Ladungen (und damit die lokalen Deformationen) nach Ablauf eines Bildwechsels wieder verschwinden, so dass die benetzte Platte im nächsten Bildzyklus erneut aufnahmebereit für den Schreibstrahl ist.

Eine starke Lichtquelle (Xenarlampe mit Hohlspiegel und Optik) projiziert das auf der Ölhaut gespeicherte Reliefbild auf einen Projektionsschirm. Um die dabei entstehende Wärme abzuleiten, rotiert die Glasplatte langsam. Damit bei ebener Flüssigkeitsfläche (dunkle Bildstellen)

kein Licht auf den Schirm fällt, liegen im Strahlengang zwei gegeneinander versetzte Spaltgitter (Bo und Bu), die als Blendensystem dienen.

Nur wenn die Ölhaut ein Wellenmuster (Reliefbild) enthält, gelangt das (von der Aufwölbung der Oberfläche nun abgelenkte) Projektionslicht zwischen den Prismenstäben hindurch auf den Bildschirm. Das Projektionsbild entsteht folglich durch Beugung an den einzelnen Bildelemente. Die Lichtausbeute des Eidophors ist grösser als beim Kinoprojektor. Der Kontrast liegt bei 100:1.

Eine Verbesserung des Eidophors besteht darin, dass anstelle zweier getrennter Gitterblenden nur noch eine vorkommt. Diese besteht aus mehreren verspiegelten Barren, die in Stufenform angeordnet werden.

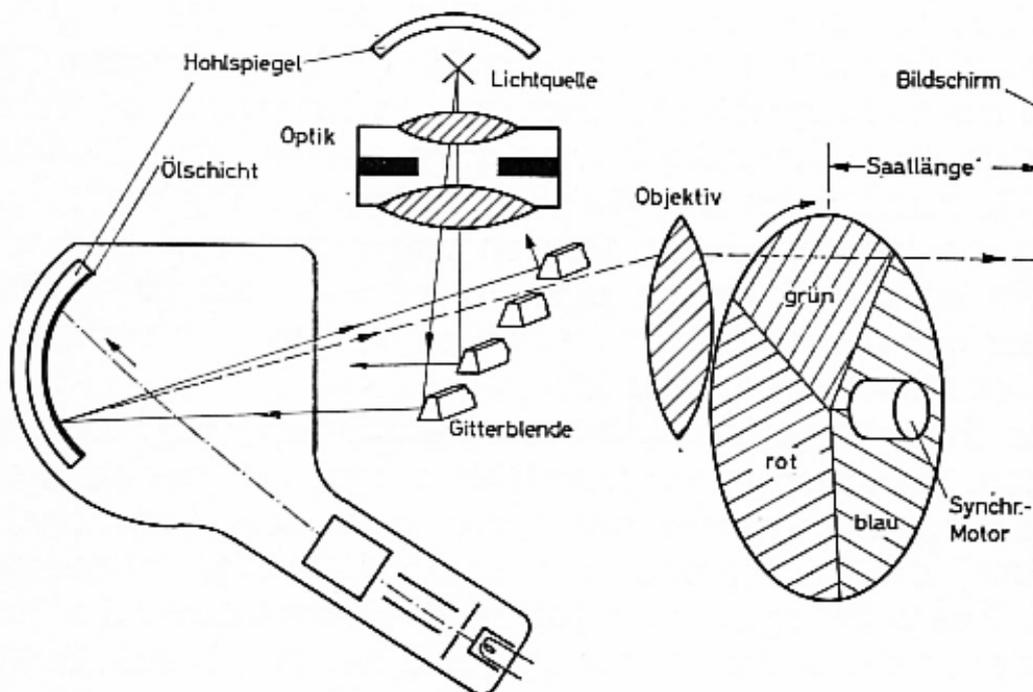


Abb. 3-4

Dunkelfeld-Projektionssystem (Eidophor verbessert)¹⁵

Das Projektionslicht gelangt über die verspiegelte Stufenblende zu einem nun hohlspiegelförmig konstruierten Reflektor, welcher mit der zu modulierenden Ölschicht benetzt ist. An der Spiegelwandung werden die Lichtstrahlen durch die transparente Ölhaut hindurch zum Blendensystem zurückgeworfen. Bei glatter Oberfläche gelangen die Strahlen nicht zum Projektionsschirm. Ein moduliertes Wellenmuster führt hingegen zu einer entsprechenden Beugung, so dass dieses Licht - zwischen der Gitterblende hindurch - zum Schirm gelangt.

Um Farbeindrücke hervorzurufen, befinden sich im Strahlengang der Ausgangsoptik drei rotierenden Sektoren aus Farbfilterscheiben, die von einem Synchronmotor angetrieben werden. Solches setzt aber voraus, dass auch bei der Bildaufnahme Farbfiler verwendet werden. Anhand der additiven Synthese lassen sich so aus den drei Grundfarben (Rot, Grün, Blau) die gewünschten Farbarten des Spektrums erzeugen. Obwohl die Projektion sequentiell erfolgt,

¹⁵ Ebenda

nimmt der Betrachter aufgrund der Trägheit des menschlichen Auges einen vollständigen und gleichzeitig erscheinenden farbigen Bildeindruck wahr. Damit ein flimmerfreies Bild entsteht, muss die Abtastgeschwindigkeit verdreifacht werden (damit alle drei Grundfarben während der Bildwechselzeit von 1/25 Sekunde gleichermaßen durchlaufen werden).

Inzwischen haben Halbleiterbildsensoren (CCD-Kamera) und DV-Projektoren (Beamer) die obigen Vakuumröhren längst verdrängt..

4 Röntgenröhre

Auch die Röntgenröhre gehört aufgrund ihres Aufbaus prinzipiell zu den Kathodenstrahlröhren. Allerdings dient sie völlig anderen Zwecken als die Braunsche Röhre.

Beschiesst man ein metallisches Target mit energiereichen Elektronen, kann Röntgenstrahlung erzeugt werden. Es entsteht - je nach Konstruktion:

- charakteristische Röntgenstrahlung (K-Schalen-Emission)
- Bremsstrahlung
- Lilienfeldstrahlung (ein gräulich-weisses Licht um die Anode)

Im einfachsten Fall besteht diese Röhre aus einem evakuierten Glaskörper, in dem sich die Glühkathode und eine Anode aus Kupfer oder Wolfram befinden.

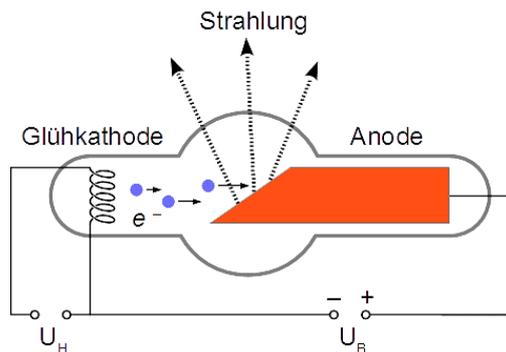


Abb. 4-1a

Konstruktionsprinzip der Röntgenröhre¹⁶



Abb. 4-1b

Röntgenröhre mit fester Anode

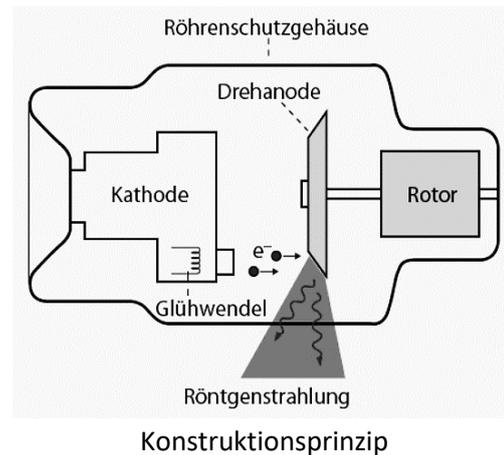
Um die Elektronen auf einen kleinen Brennfleck auf der Anode zu fokussieren, wird ein Wehneltzylinder verwendet. Für die hohe Beschleunigung muss die Anodenspannung genügend gross sein (30 kV bis 150 kV und höher).

In den heutigen Röntgenröhren werden Drehanoden aus einer Molybdän- oder einer Wolfram-Rhenium-Legierung verwendet. Die Strahlung wird über eine Blende entnommen. Um die entstehende Wärme abzuführen kommt Luft-, Wasser- oder Oelkühlung vor. Hochleistungsröhren besitzen anstelle des Glases ein massives Metallgehäuse.

¹⁶ <http://www2.physki.de/PhysKi/index.php/R%C3%B6ntgenstrahlung>



Abb. 4-2
Röntgenröhre mit Drehanode¹⁷



Konstruktionsprinzip

Für medizinische Anwendungen wird die Bremsstrahlung benutzt, um damit Organe, Venen oder Knochen auf Anomalien zu überprüfen. Bei der konventionelle Röntgenuntersuchung (auch als "Projektionsradiographie" bezeichnet) ist die Strahlenbelastung erheblich grösser, als bei der ansonsten angewandten Durchleuchtung.

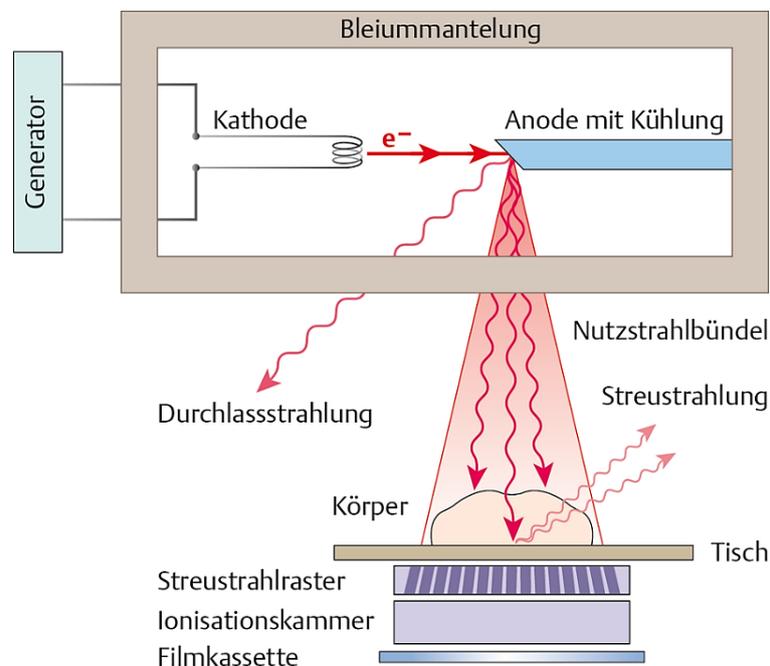


Abb. 4-3
Medizinische Röntgenanlage¹⁸

Röntgenstrahlen werden auch zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (z.B. Schweißnähte von Rohren und Stahlbehältern) verwendet. Die Strahlenquelle projiziert das Schattenbild des Prüfstückes auf eine strahlungsempfindliche Schicht. Je dichter die bestrahlte Materie ist, desto heller erscheint sie auf dem Schirmbild. Auf diese Weise können Fehlstellen wie Lunker oder Seigerungen erkannt werden. Mit einer Kamera wird das Schirmbild anschliessend zum Prüfer übertragen, welcher sich in einem strahlengeschützten Bereich befindet.

¹⁷ Heinz Morneburg: Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik (Publicis)

¹⁸ Bildquelle: AllEx – Alles fürs Examen (Thieme)