

# Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld

## 1. Problemstellung

In den beiden folgenden Experimenten soll die Ablenkung eines Elektronenstrahls sowohl im elektrischen als auch im magnetischen Feld untersucht werden. Derartige Experimente sind nur im Hochvakuum möglich, da die Elektronen sonst mit den Luftmolekülen in Wechselwirkung treten würden. Man verwendet aus diesem Grunde sogenannte **Kathodenstrahlröhren**<sup>1</sup>, die bis auf einen Restdruck von ca  $10^{-6}$  mbar evakuiert sind, um einen unbeeinflussten Elektronenstrahl zu erzeugen. Im nächsten Kapitel soll daher zunächst der Aufbau und die Wirkungsweise einer Kathodenstrahlröhre näher beschrieben werden. Sodann wird untersucht, von welchen Parametern die Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld abhängt. Die abgeleiteten Gleichungen sollen im Experiment überprüft werden. Zum Abschluss wird noch kurz das Prinzip eines Kathodenstrahl-Oszilloskops dargestellt.

Die Ablenkung eines Elektronenstrahls im Magnetfeld wird erst im nächsten Versuch (V502) beschrieben. Die hier abgeleiteten Zusammenhänge werden verwendet, um die Größe  $e_0/m_0$  des Elektrons und um das Magnetfeld der Erde am Ort des Experimentes zu messen.

## 2. Aufbau einer Kathodenstrahlröhre

Die **Kathodenstrahlröhre** besteht im wesentlichen aus drei Baugruppen: einer "Elektronenkanone" (siehe Abb.1)., welche freie Elektronen erzeugt, beschleunigt und den entstehenden Elektronenstrahl fokussiert, sowie einem Ablenk- und einem Nachweis-system, das den Auftreffpunkt des Elektronenstrahls auf einem Leuchtschirm sichtbar macht.

Die freien Elektronen werden durch Glühemission (siehe z.B. V504) erzeugt. Hierzu dient ein zylindrischer Körper, Kathode genannt, dessen Oberfläche aus einem Material mit niedriger Elektronenaustrittsarbeit besteht. Die Heizung der Kathode erfolgt über einen durch elektrischen Strom bis zur Rotglut erhitzten Draht, welcher im Innern des Kathodenzylinders, von diesem elektrisch isoliert, angebracht ist („indirekte Heizung“).

---

<sup>1</sup> Der Name ist historisch bedingt. Er stammt aus der Zeit, als die Natur der von einer geheizten Kathode ausgehenden Strahlen noch nicht bekannt war. Man findet auch die Bezeichnung "Braunsche Röhre". Sie geht auf den deutschen Physiker Karl Ferdinand Braun (1850 – 1918) zurück.

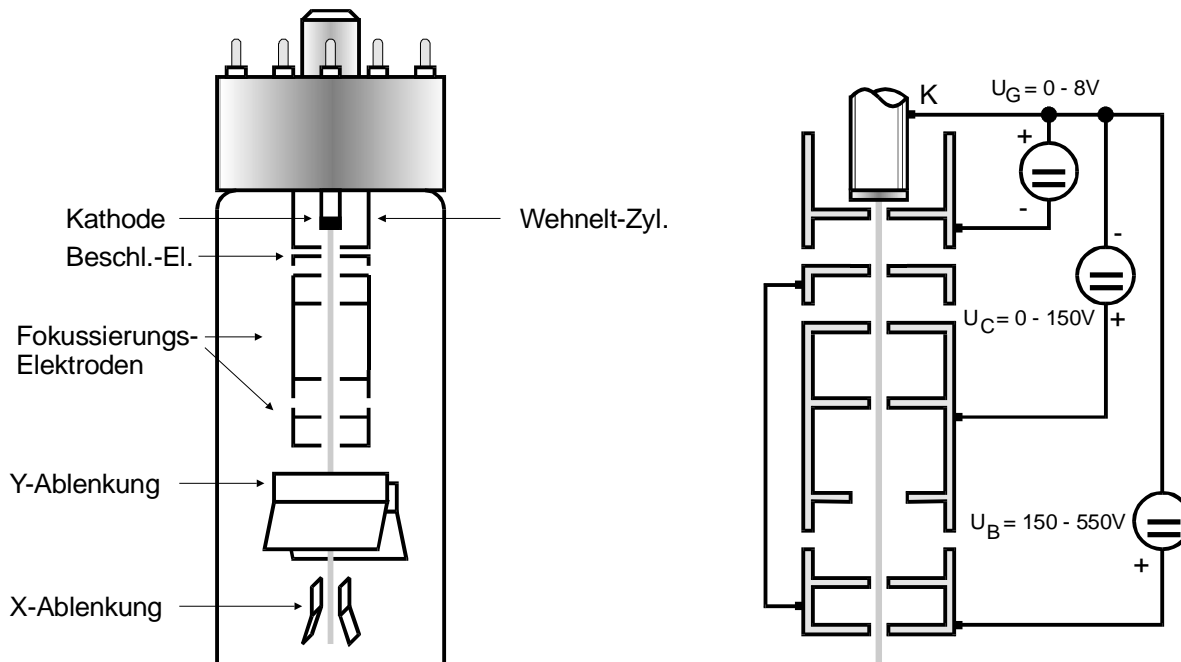


Abb. 1: Querschnitt durch eine Kathodenstrahlröhre und die Beschaltung ihrer „Elektronenkanone“

Die Kathode ist von einem zylindrischen Hohlkörper, dem **Wehnelt-Zylinder**, umgeben, der in Strahlrichtung eine Bohrung besitzt. Mit dem negativen Potential, das derselbe gegenüber der Kathode hat, kann man die Intensität des Elektronenstrahls steuern.

Vor dem Wehnelt-Zylinder befindet sich eine Elektrode, die ein hohes positives Potential  $U_B$  gegenüber der Kathode besitzt. Sie beschleunigt diejenigen Elektronen, die in der Lage sind, die Barriere des Wehnelt-Zylinders zu überwinden, auf eine Geschwindigkeit  $v_z$ , die sich aus dem Energiesatz berechnen lässt:

$$(1) \quad \frac{m_0 v_z^2}{2} = e_0 U_B \quad .$$

( $e_0$  = Elementarladung,  $m_0$  = Elektronenmasse,  $v_z \ll c$  = Lichtgeschwindigkeit).

Die hinter der Beschleunigungselektrode angeordneten Elektroden stellen eine elektronische Linse dar, mit der das divergente Strahlenbündel auf den Leuchtschirm fokussiert werden kann. Dies geschieht mit Hilfe der inhomogenen elektrischen Felder zwischen den Stirnseiten der Elektroden, die sich gemäß Abb.1 auf unterschiedlichem Potential befinden. Die Brechkraft der Elektronenlinse lässt sich mit Hilfe der Spannung  $U_C$  regeln. Der gebündelte Elektronenstrahl fällt schließlich auf den Leuchtschirm, der auf die Innenseite der Röhre aufgedampft ist. Die auftreffenden Elektronen regen die Aktivatorzentren (Störstellen im Kristallgitter des Schirmmaterials) zur Emission von Lichtquanten an. Auf diese Weise kann der Auftreffpunkt des Strahls sichtbar gemacht werden. Der Leuchtschirm ist elektrisch leitend mit der Beschleunigungselektrode verbunden, damit er sich durch die auftreffenden Elektronen nicht negativ aufladen kann. Auf seinem Wege von der Elektronen-Kanone passiert der Elektronenstrahl das Ablenkensystem. Dieses besteht aus zwei Plattenpaaren, deren Normalen senkrecht aufeinander stehen. Legt man an diese eine elektrische Spannung an, dann übt das zwischen

den Platten entstehende elektrische Feld eine Kraftwirkung auf die Elektronen aus. Das hat zur Folge, dass die Elektronen aus ihrer ursprünglich geradlinigen Bahn abgelenkt werden. Damit verschiebt sich der Leuchtfleck auf dem Bildschirm. Die Größe der Verschiebung hängt von der Feldstärke und von der Elektronengeschwindigkeit ab, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird.

### 3. Berechnung der Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld

Zur Ableitung eines Zusammenhanges zwischen der Verschiebung  $D$  des Leuchtfleckes auf dem Schirm und der Ablenkspannung  $U_d$  betrachte man die Abb.2.

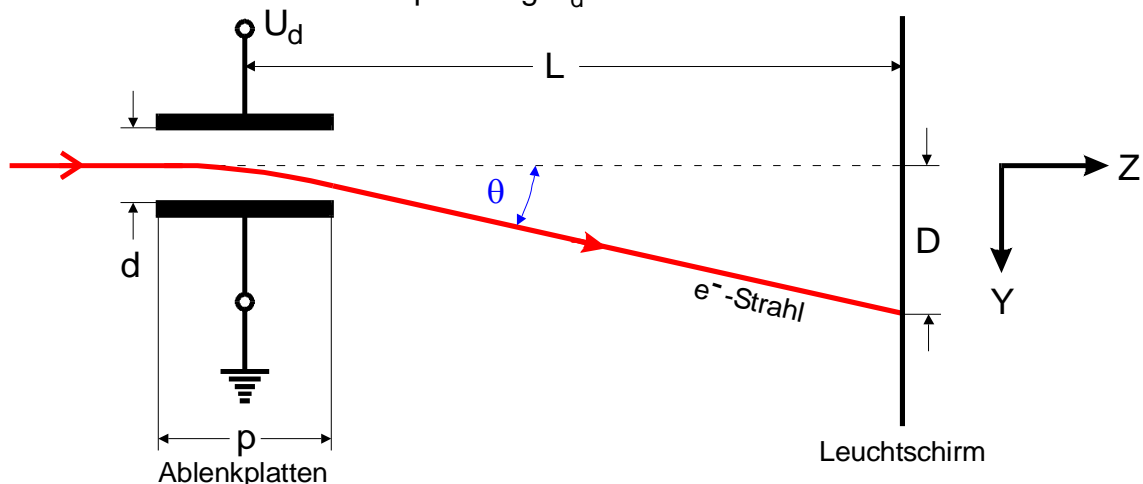


Abb.2: Strahlablenkung in der Kathodenstrahlröhre

Ist der Plattenabstand  $d$  klein gegen die Plattenlänge  $p$ , kann man annehmen, dass im Innern des Systems angenähert ein homogenes elektrisches Feld mit der Feldstärke

$$E = \frac{U_d}{d}$$

herrscht, welches außerhalb des Plattenpaares praktisch null ist. Auf ein Elektron wirkt dann die Kraft

$$(2) \quad |\vec{F}| = |e_0 \vec{E}| = e_0 \frac{U_d}{d} ,$$

während seiner Aufenthaltsdauer  $\Delta t$  innerhalb des Feldvolumens. Da  $\vec{F}$  konstant ist, führt es eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung in Y-Richtung aus. Seine Geschwindigkeit  $v_y$ , die es nach dem Durchgang durch das Plattensystem erreicht, ist

$$v_y = b_y \Delta t = \frac{F}{m_0} \Delta t$$

oder unter Benutzung von (2)

$$v_y = \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \Delta t .$$

Da sich das Elektron nach Durchlaufen des Beschleunigungspotentials  $U_B$  mit der durch (1) gegebenen Geschwindigkeit  $v_z$  in Richtung der Röhrenachse bewegt, ist

$$\Delta t = \frac{p}{v_z}$$

und

$$v_y = \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \frac{p}{v_z} .$$

Der Winkel  $\theta$  der Richtungsänderung des Strahls beträgt - außerhalb des Feldvolumens bewegt sich das Elektron geradlinig -

$$\theta \cong \frac{v_y}{v_z} \quad \text{oder} \quad \theta = \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \frac{p}{v_z^2} .$$

Für die Verschiebung  $D$  des Leuchtfleckes bekommt man dann

$$D = L \theta = \frac{e_0}{m_0} L \frac{U_d}{d} \frac{p}{v_z^2}$$

und nach der Elimination von  $v_z$  mit Hilfe von (1)

$$(3) \quad D = \frac{p}{2d} L \frac{U_d}{U_B} .$$

Die Verschiebung  $D$  ist somit proportional zur Ablenkspannung  $U_d$ . Die Kathodenstrahlröhre kann daher zur Spannungsmessung benutzt werden. Weiterhin hängt  $D$  von den geometrischen Abmessungen des Ablenksystems und von  $U_B$  ab. Um eine hohe Ablenkempfindlichkeit zu erzielen, muss man einen langen Ablenkkondensator ( $p$  groß), einen großen Strahlweg  $L$  und eine geringe Beschleunigungsspannung benutzen. Mit einer solchen Röhre kann man jedoch nur niederfrequente Wechselspannungen untersuchen, da die Flugzeit  $\Delta t$  immer klein gegen die Periodendauer von  $U_d$  sein muss. Eine "schnelle" Kathodenstrahlröhre muss demnach ein kleines  $p$  und ein großes  $U_B$  besitzen. Man erkennt hieran, dass bei der Konstruktion einer Kathodenstrahlröhre Kompromisse geschlossen werden müssen.

#### 4. Prinzip des Kathodenstrahl-Oszillographen

Eine Kathodenstrahlröhre kann zu einem Kathodenstrahl-Oszillographen erweitert werden, der es gestattet, die Zeitabhängigkeit von Wechselspannungen darzustellen. Man braucht hierzu nur an dasjenige Plattenpaar, das den Strahl in horizontaler (X-) Richtung ablenkt, eine linear mit der Zeit anwachsende Spannung zu legen, die nach Erreichen ihres Maximalwertes schlagartig auf ihren Ausgangswert zurückspringt und von dort wieder ansteigt ("Sägezahnspannung"). An die vertikal ablenkenden Platten ist die zu untersuchende Spannung anzulegen. Stehen Sägezahn- und Wechselspannungsfrequenz in einem geeigneten Verhältnis zueinander, dann zeichnet der Elektrodenstrahl den zeitlichen Verlauf der Wechselspannung in einem kartesischen Koordinatensystem auf dem Leuchtschirm auf. Es muss gelten:

$$n v_{Sä} = m v_{We} \quad , n = 1, 2, 3, \dots ; m = 1, 2, 3, \dots$$

(Synchronisationsbedingung<sup>2</sup>)

## 5. Messprogramm

- a) Man überprüfe die Proportionalität zwischen der Leuchtfleckverschiebung und der Ablenkspannung  $U_d$  für 5 verschiedene Beschleunigungsspannungen  $U_B$  zwischen 180 und 500 V mit der Schaltung nach Abb.3.

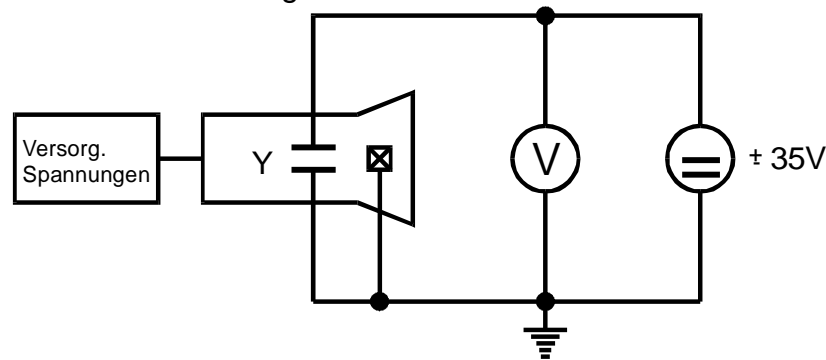


Abb.3: Schaltung zur Messung der Leuchtfleckverschiebung in Abhängigkeit von der Ablenkspannung

Man regle  $U_d$  bei jeder Messreihe so ein, dass der Leuchtfleck nacheinander auf die 9 äquidistanten Linien des Koordinatennetzes trifft - und lese  $U_d$  auf dem Voltmeter ab. (nur für Y-System)

- b) Man baue einen einfachen Kathodenstrahl-Oszillographen gemäß Abb.4 auf und versuche durch Variation der Sägezahnfrequenz  $v_{sä}$  stehende Bilder der Sinusspannung auf dem Leuchtschirm zu erhalten. Das ist immer dann möglich, wenn Sägezahn- und Sinusfrequenz ein rationales Verhältnis bilden. Man realisiere die Fälle  $n v_{sä} = v_{si}$  für  $n = \frac{1}{2}, 1, 2$  und 3 und lese  $v_{sä}$  jedesmal am Frequenzzähler (Abb.4) ab. - Man messe die durch die Sinusspannung erzeugte, maximale Strahlauslenkung in Y-Richtung bei  $U_B = \text{const}$  aus.

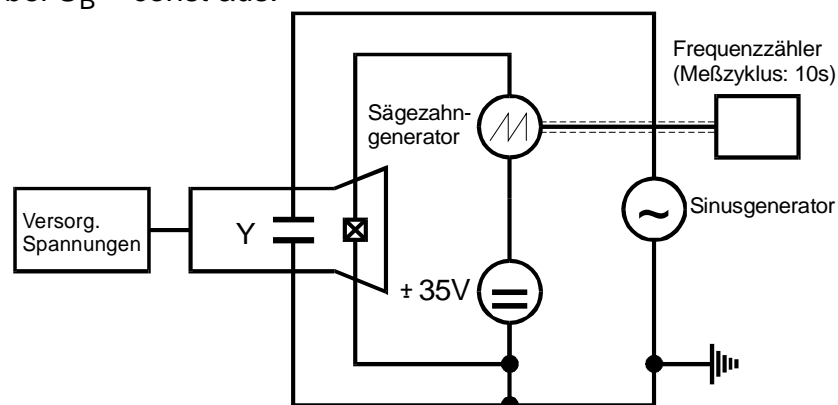


Abb. 4: Prinzipschaltbild eines Kathodenstrahl-Oszillographen

<sup>2</sup> Da die Synchronisationsbedingung in der Praxis schwer zu realisieren ist, wird bei kommerziellen Kathodenstrahl-Oszillographen eine sogenannte Trigger-Vorrichtung zur Erzeugung stehender Bilder eingesetzt. Näheres hierzu siehe z.B. „Arbeitsmethoden in der Experimentellen Physik“, Kap. c

## 6. Auswertung

zu a): Man trage in einem linearen Diagramm  $D$  gegen  $U_d$  auf und bestimme mittels einer Ausgleichsrechnung daraus die Empfindlichkeit  $D/U_d$  für die verschiedenen Beschleunigungsspannungen im Y-Ablenksystem.

Man trage die ermittelten Empfindlichkeiten in einem weiteren Diagramm gegen  $1/U_B$  auf und errechne die Steigung  $a$  der ausgleichenden Geraden. Man entnehme aus der beigefügten Konstruktionszeichnung der Röhre (Abb.5) die Werte für  $p$ ,  $d$  und  $L$ , berechne daraus die Größe  $pL/2d$  und vergleiche sie mit der Steigung  $a$ . Wie groß ist die Abweichung? Wodurch kann man sie erklären?

zu b): Man ermittle aus den 4 gemessenen Synchronisationsfrequenzen die Frequenz der Sinusspannung und berechne ihren Scheitelwert aus der Strahlauslenkung und der Empfindlichkeit der Röhre.

## 7. Hinweise zur Versuchsdurchführung

- a) Je eine Platte der X- und Y-Ablenksysteme sollte geerdet werden. (Erdpunkt: Buchse "GROUND" der Stromversorgung) Man achte beim Zusammenbau der Schaltung darauf, dass keine Kurzschlüsse der Generatorausgänge über die Erdverbindung entstehen.
- b) Nach etwa 1 min Anheizzeit, wobei der Kippschalter in der Stellung "STANDBY" stehen muss, kann die Hochspannung an die Röhre gelegt werden (Stellung "ON").
- c) Nach Vorgabe der Beschleunigungsspannung  $U_B$  werden die Fokussierungsspannung  $U_C$  und die Wehnelt-Spannung so eingestellt, dass ein möglichst kleiner Leuchtfleck auf dem Schirm entsteht.
- d) Der Elektronenstrahl sollte nicht allzulange auf einunddieselbe Stelle des Leuchtschirms fallen, da dieser sonst beschädigt werden kann.

## 8. Literatur

Kathodenstrahl-Oszillograph:

L. Merz, Grundkurs der Messtechnik, Teil 1, R. Oldenbourg Verlag

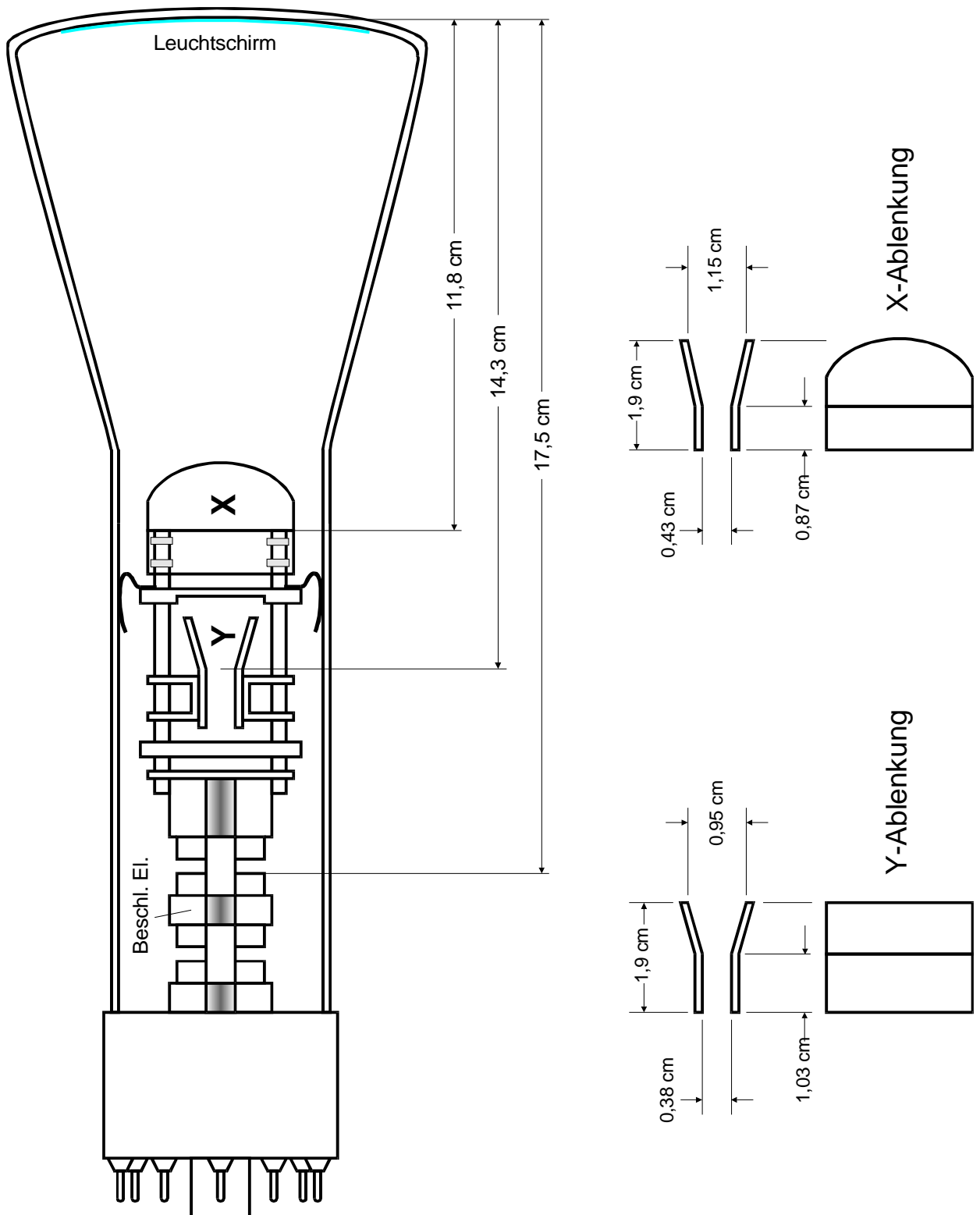


Abb. 5: Abmessungen der in den Versuchen 501, 502 und 503 verwendeten Kathodenstrahlröhre