

# **Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld**

Versuch 501

Marcel Kebekus

marcel.kebekus@tu-dortmund.de

Konstantin Mrozik

konstantin.mrozik@tu-dortmund.de

Abgabe: 8. Juli 2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Ablenkung . . . . .	4
2.2 Kathodenstrahl Oszillograph . . . . .	5
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1 Sinusspannung . . . . .	9
<b>5 Diskussion</b>	<b>10</b>
<b>Literatur</b>	<b>11</b>

## 1 Ziel

In diesem Versuch soll die Ablenkung eines Elektronenstrahls durch ein elektrisches Feld untersucht werden. Genauer zu bestimmen ist dabei von welchen Parametern die Ablenkung abhängt und die aus der Theorie bestimmten Gleichungen sollen überprüft werden.

## 2 Theorie

Um Elektronenstrahlen zu untersuchen müssen experimentelle Aufbauten in einem Hochvakuum aufgebaut werden, damit die Elektronen nicht mit der Luft wechselwirken. In diesem Experiment wird dazu eine sogenannte Kathodenstrahlröhre verwendet, die mit einem Vakuum von bis zu  $10^{-6}$  mbar Restdruck arbeitet. Die Kathodenstrahlröhre besteht dabei im wesentlichen aus drei Bauteilen, einer „Elektronenkanone“, einem Ablenkensystem und einem Nachweissystem.

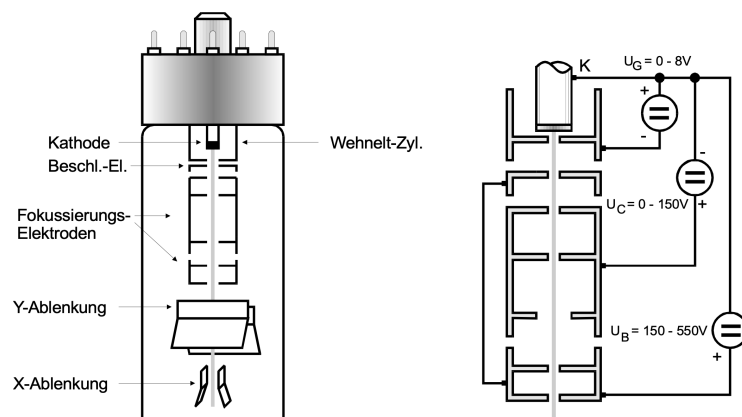


Abb. 1: Querschnitt durch eine Kathodenstrahlröhre und die Beschaltung ihrer „Elektronenkanone“

**Abbildung 1:** Bild Querschnitt

Der Elektronenstrahl wird dabei in der Elektronenkanone erzeugt. Die „Kanone“ besteht aus einem Zylinder aus einem Kathodenmaterial, welches eine geringe Austrittsarbeit hat, und einem darinliegenden elektrisch vom Zylinder isolierten, Heizdraht der Rot glüht. Um diese Glühkathode herum befindet sich mit etwas Zwischenraum ein sogenannter Wehnelt zylinder, welcher negativ geladen ist und einen kleinen runden Loch in Richtung des Schirms besitzt. Mit der negativen Ladung des Wehnelt zylinders werden die Elektronen nicht nur in die entsprechende Richtung gelenkt, sondern es lässt sich auch die Intensität des Elektronenstrahls steuern. Unmittelbar nach dem Wehnelt Zylinder befindet sich eine positiv geladene Beschleunigungselektrode, welche die Elektronen auf die Geschwindigkeit

$v_Z$  (nach Gl. 1) beschleunigt.

$$\frac{m_0 v_Z^2}{2} = e_0 U_B$$

$$v_Z = \sqrt{\frac{2e_0 U_B}{m_0}} \quad (1)$$

Nach der Beschleunigungselektrode durchläuft der Elektronenstrahl noch einen Aufbau einer elektronischen Linse, die den erzeugten Strahl fokussiert. Die Brechkraft der Linse kann dabei über die Spannung  $U_C$  (Abb. 1, rechte Seite) verändert werden. Nach diesem Aufbau der „Elektronenkanone“ befinden sich 2 Plattenpaare die der Ablenkung des Strahls in X und Y Richtung dienen. Die Normalen der beiden Plattenpaare stehen dabei senkrecht zueinander, so dass jedes Plattenpaar nur Einfluss auf eine Komponente der Elektronengeschwindigkeit hat. Die Ablenkung hängt dabei sowohl von der Geschwindigkeit der Elektronen, als auch von der Angelegten Kondensatorspannung ab, näheres dazu in 2.1. Der nun abgelenkte Elektronenstrahl fällt nun auf das Nachweissystem, welches aus einem speziell beschichteten Leuchtschirm innerhalb der Kathodenröhre besteht. Wenn nun Elektronen die Aktivatorzellen auf dem Schirm anregen geben diese Lichtquanten ab und der Beobachter kann den Punkt bestimmen an dem die Elektronen auftreffen. Der Leuchtschirm ist dabei elektrisch mit der Beschleunigungselektrode verbunden, damit der Schirm sich nicht negativ auflädt.

## 2.1 Ablenkung

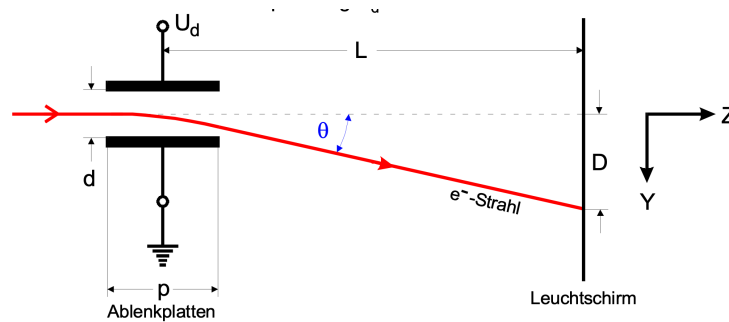


Abb.2: Strahlablenkung in der Kathodenstrahlröhre

**Abbildung 2:** Bild Strahlablenkung

Wenn der Plattenabstand  $d$  klein gegenüber der Plattenbreite  $p$  ist kann für das induzierte elektrische Feld angenommen werden:

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

Damit ergibt sich für die Kraft auf die Elektronen im Feld

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

Zusammen mit 2 ergibt sich somit für ein Elektron welches in der Zeit  $\Delta t$  durch den Plattenkondensator fliegt die Geschwindigkeit

$$v_y = a_y \Delta t = \frac{F}{m_0} \Delta t = \frac{e_0 U_d}{m_0 d} \Delta t \quad (3)$$

Die Zeit in der das Elektron die Platten durchfliegt lässt sich mit der Geschwindigkeit der Elektronen vor dem Kondensator bestimmen  $\Delta t = \frac{p}{v_z}$  und damit ergibt sich

$$v_y = \frac{e_0 U_d p}{m_0 d v_z} \quad (4)$$

Der Ablenkwinkel  $\theta$  über den im Anschluss die Verschiebung  $D$  des Aufttrittpunktes auf dem Schirm berechnet wird ergibt sich Ablensystem als

$$\theta \approx \frac{v_y}{v_z} = \frac{e_0 U_d p}{m_0 d v_z^2} \quad (5)$$

Und damit

$$D = \theta L = \frac{v_y}{v_z} L = \frac{e_0 U_d p}{m_0 d v_z^2} L \quad (6)$$

Die Geschwindigkeit  $v_z$  lässt sich über die Spannung an der Beschleunigungselektrode bestimmen (1) und wir erhalten

$$D = \frac{p}{2d} L \frac{U_d}{U_B} \quad (7)$$

Es ist nun leicht zu erkennen, dass die Ablenkung proportional zur Spannung des Kondensators ist, und somit lässt sich der Aufbau auch nutzen um Spannungen zu messen. Allerdings müssen beim Betrieb der Kathodenstrahlröhre auch Kompromisse eingegangen werden....

## 2.2 Kathodenstrahl Oszillograph

Die Kathodenstrahlröhre kann sehr leicht umfunktioniert werden um den zeitlichen Verlauf einer Wechselspannung zu untersuchen. Dazu wird an den Plattenkondensator für die horizontale X-Richtung eine Sägezahnspannung angeschlossen und an den Kondensator in Y-Richtung wird die untersuchte Wechselspannung angeschlossen. Wenn nun beide Frequenzen in einem bestimmten Verhältnis stehen, lässt sich auf dem Lichtschirm der zeitliche Verlauf der Wechselspannung betrachten.

$$n \cdot \nu_{S\ddot{a}} = m \cdot \nu_{We} \quad (8)$$

Dieses Verhältnis mit  $n = 1, 2, 3, \dots$  und  $m = 1, 2, 3, \dots$  wird Synchronisationsbedingung genannt.

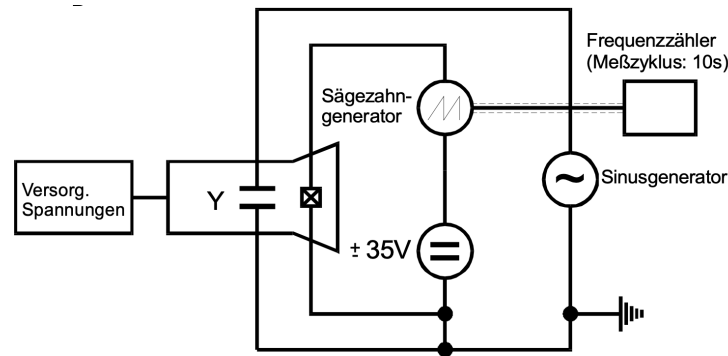


Abb. 4: Prinzipschaltbild eines Kathodenstrahl-Oszilloskopes

**Abbildung 3:** Das Schaltbild um ein Kathodenstrahlrohr in einen Oszilloskopen umzuwandeln

### 3 Durchführung

Zunächst soll mit dem in der Theorie 2 beschriebenen Aufbau für das Kathodenstrahlrohr die Verschiebung des Leuchtpunktes in Abhängigkeit von der Ablenkspannung gemessen werden. Dieser Zusammenhang wird für 5 verschiedenen Beschleunigungsspannungen untersucht. Um den Zusammenhang zu untersuchen wird  $U_d$  so variiert, dass der Leuchtpunkt nacheinander über 9 Linien des Koordinatennetzes mit gleichem Abstand läuft. Immer wenn der Leuchtpunkt nun auf einer Linie liegt wird die Ablenkspannung abgelesen. Die selbe Vorgehensweise wird anschließend für 4 weitere Beschleunigungsspannungen zwischen 180 und 500 V gemacht. (180,260,340,420,500???) Im zweiten

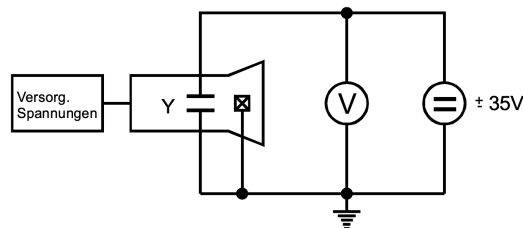


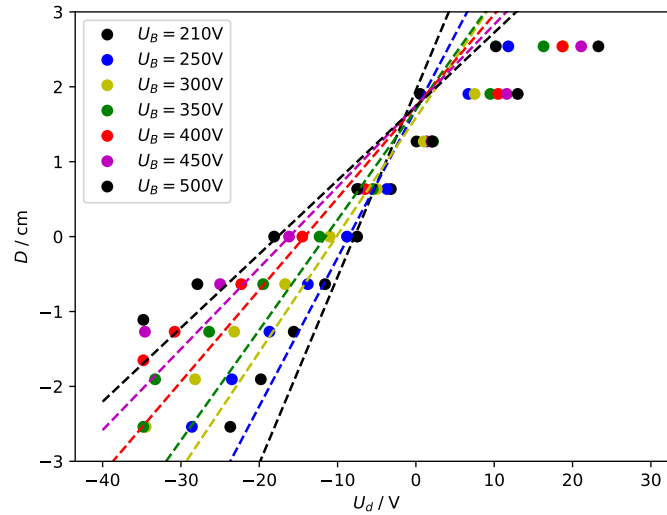
Abb.3: Schaltung zur Messung der Leuchtfleckverschiebung in Abhängigkeit von der Ablenkspannung

**Abbildung 4:** Eine Schaltung

Teil des Versuchs soll der Kathodenstrahl-Oszilloskoph getestet werden. Um stehende Bilder der Sinusfrequenz zu erhalten wird dazu die Sägezahnspannung variiert bis die Synchronisationsbedingung erfüllt ist. Es wird versucht durch passendes einstellen der Spannungen die Fälle für  $n = 1/2, 1, 2$  und 3 zu realisieren und die entsprechende Frequenz für  $\nu_s$  abzulesen. Außerdem soll jeweils die maximale Strahlauslenkung in Y-Richtung bei einer konstanten Beschleunigungsspannung ausgemessen werden.

## 4 Auswertung

Zunächst werden die Messwerte der Auslenkung  $D$  gegen die Ablenkspannung  $U_d$  aufgetragen und mithilfe einer linearen Ausgleichsrechnung approximiert. Mit dem linearen



**Abbildung 5:** Die Messwerte der Auslenkung  $D$  werden gegen die Ablenkspannung  $U_d$  aufgetragen. Mit einer linearen Ausgleichsrechnung wird der Verlauf der Werte approximiert.

Ausgleich ergibt sich nach,

$$D(U_d) = m \cdot U_d + b, \quad (9)$$

die Empfindlichkeit  $E$  der Braunschen Röhre mit,

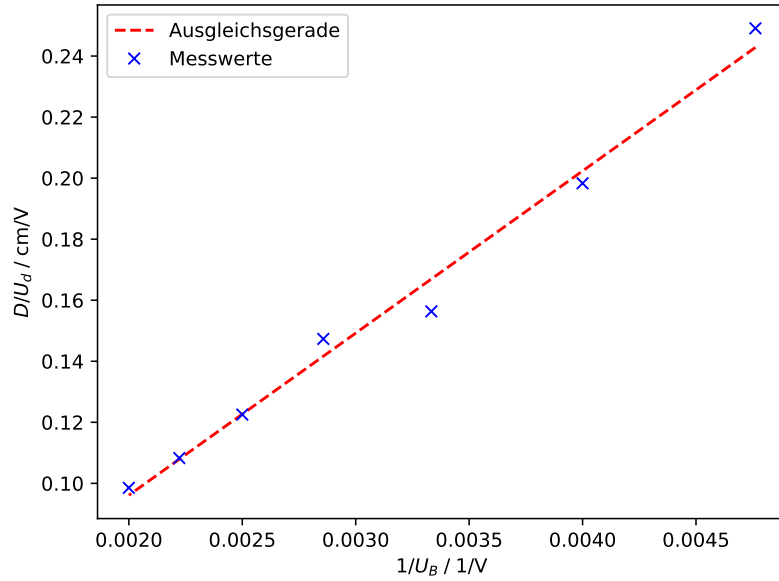
$$E(U_d) = \frac{D}{U_d} = m. \quad (10)$$

$U_B / V$	210	250	300	350	400	450	500
Empfindlichkeit $E / \frac{cm}{V}$	0.2491	0.1473	0.1563	0.1473	0.1225	0.1083	0.0985

**Tabelle 1:** Dargestellt sind die verschiedenen Steigungen  $m$ /Empfindlichkeiten  $E$  der verschiedenen Ausgleichsgerade aus Abb. 5

Für die Bestimmung der Apperaturkonstanten  $K$ , wird zunächst der Kehrwert der Beschleunigungsspannung  $U_B$  gegen die Empfindlichkeit  $E$  aufgetragen. Mithilfe einer Linearen Ausgleichsgeraden der Form,

$$E(1/U_b) = a \cdot \frac{1}{U_b} + b$$



**Abbildung 6:** Aufgetragen ist die Empfindlichkeit  $E = D/U_d$  gegen den Kehrwert der Beschleunigungsspannung  $U_B$ .

mit den Parametern,

$$a = (53.13 \pm 2.62), \quad (11)$$

$$b = (-0.01 \pm 0.0085). \quad (12)$$

Es zeigt sich, dass der y-Achsenabschnitt hinreichend klein ist, sodass er für folgende Rechnung vernachlässigt wird.

Somit folgt aus der Beziehung

$$D = \frac{p}{2d} L \frac{U_d}{U_B} \quad (13)$$

$$\frac{D}{U_d} = \frac{Lp}{2d} \cdot \frac{1}{U_B} = a \cdot \frac{1}{U_B} \quad (14)$$



Dem Apperaturaufbau entnimmt man die Parameter,

$$p = 1.9\text{cm}, \quad (15)$$

$$d = 0.38\text{cm}, \quad (16)$$

$$L = 14.3\text{cm}, \quad (17)$$

$$(18)$$

und somit folgt,

$$\frac{pL}{2d} = 35.75\text{cm}, \quad (19)$$

$$a = (53.13 \pm 2.62)\text{cm}, \quad (20)$$

$$\text{abs. Abweichung} = (17.4 \pm 2.6)\text{cm}, \quad (21)$$

$$\text{rel. Abweichung} = 48.61\%. \quad (22)$$

## 4.1 Sinusspannung

$\nu_{\text{sä},1/2}/\text{Hz}$	$\nu_{\text{sä},1}/\text{Hz}$	$\nu_{\text{sä},2}/\text{Hz}$	$\nu_{\text{sä},3}/\text{Hz}$
150	62.5	50.0	25

**Tabelle 2:** Messung der Frequenzen der Sägezahnspannung

Mit Gl. 8 ergibt sich,

$\nu_{\text{sä},1/2}/\text{Hz}$	$\nu_{\text{sä},1}/\text{Hz}$	$\nu_{\text{sä},2}/\text{Hz}$	$\nu_{\text{sä},3}/\text{Hz}$
75.0	62.5	100.0	75.0

**Tabelle 3:** Messung der Frequenzen der Sägezahnspannung

Gemittelt nach

$$\Delta\bar{\nu}_{\text{sin}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum (\nu_{\text{sin},i} - \bar{\nu}_{\text{sin}})^2},$$

folgt damit

$$\bar{\nu}_{\text{sin}} = (78.13 \pm 7.86)\text{Hz}, \quad (23)$$

Die Höhe zwischen einem Tief- und einem Hochpunkt der Sinusspannung beträgt 0.127cm, es folgt also für den Scheitelwert  $x = 0.0635\text{cm}$ .

Der Fehler folgt schließlich mit Gl. 14

$$x \pm \Delta x = c \pm \Delta c \cdot \frac{U_d}{U_B}$$

Somit folgt für die Empfindlichkeit der Röhre der Scheitelwert

$$x \pm \Delta x = (0.0635 \pm 0.0042)\text{cm} \quad (24)$$

## 5 Diskussion

Es zeigt sich aus Tab. 1, dass die Empfindlichkeit  $E$  mit zunehmender Beschleunigungsspannung  $U_B$  abnimmt.

Die Abweichung in  $a$  aus den Messwerten zu dem berechneten Wert aus den Konstruktionsparametern  $p$ ,  $L$  und  $d$  ist mit 48.61% groß. Ein Teil des Fehler wird darüber einfließen, dass der y-Achsenabschnitt aus 12 nicht betrachtet wurde. Allerdings erklärt dies nicht, die Größenordnung der Abweichung. Vermutet wird an systematischer Fehler, der über eine unbekannte Fälschung an der Messapparatur entstanden ist.

Die Frequenz der Sinusspannung (vgl. Gl. 23) liegt im Frequenzbereich des Sinusgenerators, der eine Frequenz von 80Hz bis 90Hz erzeugt. Auch hier werden stochastische Messunsicherheiten dennoch eine Rolle gespielt haben, was aufgrund des Ablesens erfolgt sein wird.

## Literatur

- [1] Tu Dortmund. „Versuch 501: Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld“. In: ().
- [2] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [3] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.