

V501

## **Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld**

David Venker

david.venker@tu-dortmund.de

Nico Guth

nico.guth@tu-dortmund.de

Durchführung: 02.06.20

Abgabe: 16.06.20

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Aufbau einer Kathodenstrahlröhre . . . . .	3
2.2 Berechnung der Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld .	4
2.3 Prinzip des Kathodenstrahl-Oszillographen . . . . .	5
<b>3 Durchführung</b>	<b>5</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>6</b>
<b>5 Diskussion</b>	<b>10</b>
<b>Literatur</b>	<b>11</b>

# 1 Zielsetzung

In diesem Experiment wird das Verhalten der Ablenkung einer Kathodenstrahlröhre durch angelegte Spannung untersucht, sowie der Umbau der Röhre in ein Messgerät für periodische Spannungen.

## 2 Theorie

### 2.1 Aufbau einer Kathodenstrahlröhre

Die Ablenkung eines Elektronenstrahls in einem elektrischen Feld wird mit einer Kathodenstrahlröhre untersucht. Diese besteht grundlegend aus drei verschiedenen Bauelementen. Zu Beginn ist die "Elektronenkanone", oder auch Braun'sche Röhre. Sie emittiert freie Elektronen durch Glühemission durch die Öffnung eines Wehnelt-Zylinders hindurch. Dieser besitzt eine elektromagnetische Barriere, die von den Elektronen überwunden werden muss, da die Barriere durch eine Spannung  $U_C$  kontrolliert werden kann, ist auch der Elektronenstrahl regelbar. Nach dem Austritt werden die Elektronen auf eine Geschwindigkeit

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

beschleunigt. Dabei ist  $e_0$  die Elementarladung und  $m_0$  die Elektronenmasse.  $U_B$  ist eine einstellbare Beschleunigungsspannung. Die Elektronen passieren nach ihrem Austritt das Ablensystem, zwei Plattenpaare, die jeweils senkrecht zueinander stehen. Auf beide Paare wird eine elektrische Spannung angelegt, die passierende Elektronen ablenkt. Schließlich landet der Strahl auf dem Leuchtschirm. Dort regt der Strahl eine Reaktion an, die Lichtquanten freisetzt. Der schematische Aufbau der Kathodenstrahlröhre ist in Abbildung 1 dargestellt.

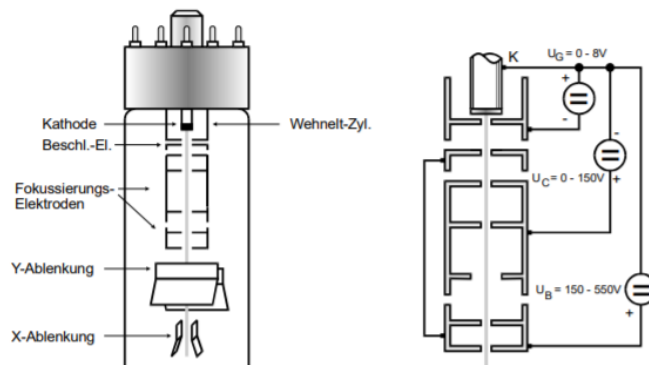


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Kathodenstrahlröhre.[1]

## 2.2 Berechnung der Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld

In Abbildung 2 ist das Prinzip hinter der Ablenkung dargestellt.

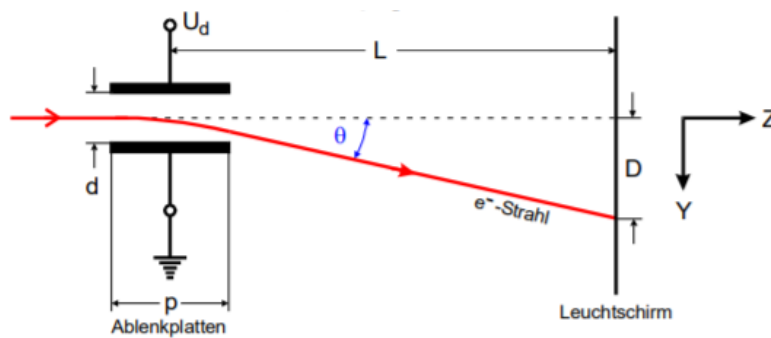


Abbildung 2: Ablenkung des Elektronenstrahls im Ablensystem.[1]

Zwischen den Ablenkplatten herrscht näherungsweise ein homogenes Feld, durch dieses werden die Elektronen abgelenkt. Und daraus folgt der logische Zusammenhang, dass schnellere Teilchen, weniger abgelenkt werden, da sie weniger Zeit im Feld verbringen. Nach dem Austreten aus dem Feld besitzt ein Elektron die Geschwindigkeit

$$v_y = \frac{e_0 \cdot U_D}{m_0 \cdot d} \cdot \Delta t \quad (2)$$

in Y Richtung. Der Ablenkwinkel  $\theta$  kann dann über den geometrischen Zusammenhang

$$\theta = \frac{v_y}{v_z} \quad (3)$$

bestimmt werden. Daraus folgt die Verschiebung  $D$  des Leuchtflecks auf dem Schirm

$$D = \frac{pLU_D}{2dU_B}. \quad (4)$$

### 2.3 Prinzip des Kathodenstrahl-Oszillographen

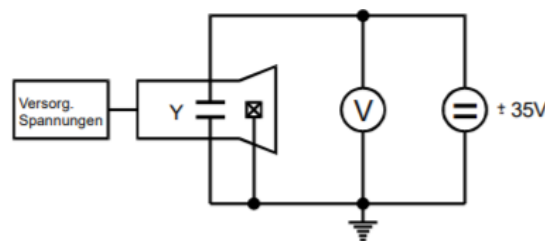
Durch einige Änderungen kann die Kathodenstrahlröhre zu einem Kathodenstrahl-Oszillographen umfunktioniert werden. Dafür wird der Teil des Ablenkensystems, der in die X-Richtung ablenkt an eine Sägezahnspannung geschaltet und die andere Platte mit der zu messenden Wechselspannung verbunden. Die beiden Spannungen müssen im Verhältnis

$$n \cdot \nu_{\text{Sä}} = m \cdot \nu_{\text{We}} \quad (5)$$

stehen, damit auf dem Leuchtschirm der zeitliche Verlauf der Wechselspannung zu sehen ist. Dabei müssen  $n$  und  $m$  ganze Zahlen sein.

## 3 Durchführung

Zunächst wird der Versuch nach Abbildung 3 aufgebaut.

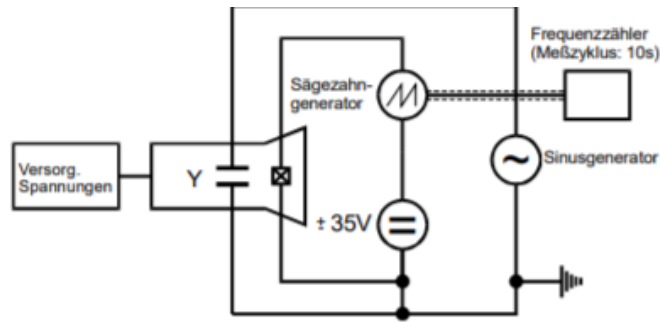


**Abbildung 3:** Skizze des Versuchsaufbaus für die Leuchtfleckverschiebung.[1]

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Leuchtfleckverschiebung und der Ablenkspannung  $U_D$  untersucht. Auf dem Koordinatennetz befinden sich neun äquidistante Linien. Die Ablenkspannung ist so einzustellen, dass der Elektronenstrahl nach einander auf alle Linien gerichtet ist. Für diese Stellen ist jeweils die Spannung abzulesen. Dieser Vorgang wird für fünf verschiedene Beschleunigungsspannungen  $U_B$  wiederholt, dabei sollte diese Spannung zwischen 180 V und 500 V liegen.

Für den zweiten Teil des Versuches wird das Experiment nach Abbildung 4 umgebaut.

Damit wurde nun ein Kathodenstrahl-Oszillograph gebaut, dieser kann den zeitlichen Verlauf einer einlaufenden Wechselspannung anzeigen. Am Sägezahngenerator können



**Abbildung 4:** Skizze des Versuchaufbaus für einen Kathodenstrahl-Oszillographen.[1]

nun verschiedene Frequenzen  $\nu_{\text{Sä}}$  eingestellt werden. Die Frequenz einer eingehenden Sinusspannung ist zu notieren. Dann wird  $\nu_{\text{Sä}}$  so variiert, dass die Frequenz über den Faktor

$$n = \frac{1}{2}, 1, 2, 3 \quad (6)$$

die Frequenz der Sinusspannung ergibt. Die Sägezahnfrequenzen werden notiert.

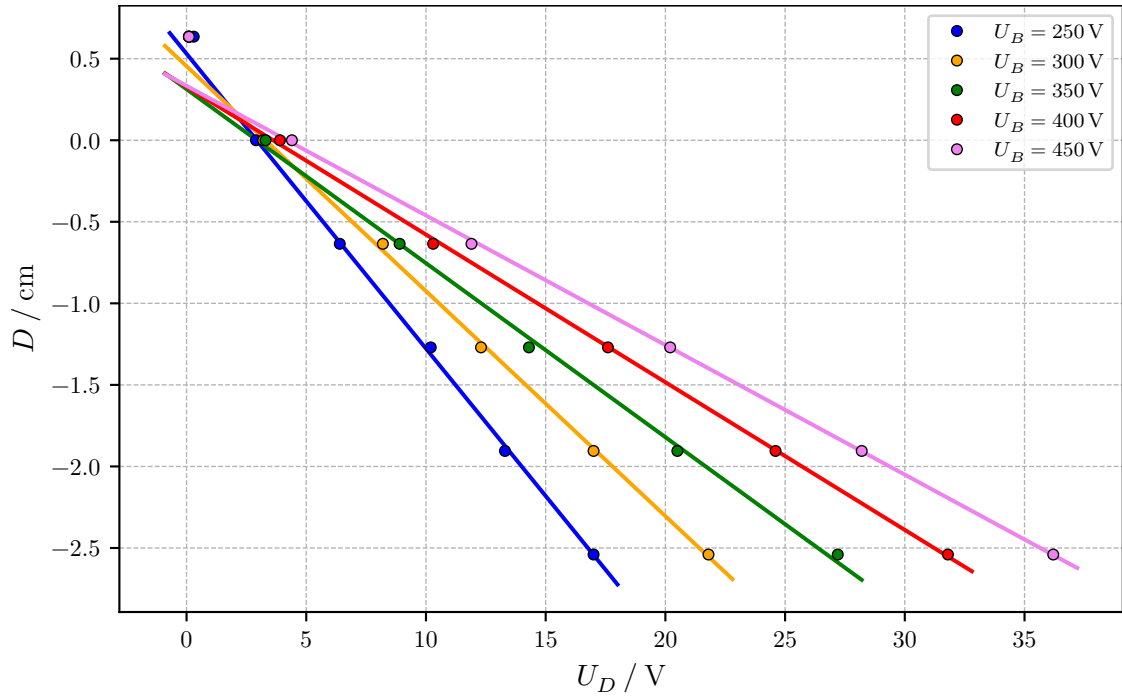
## 4 Auswertung

Die Ergebnisse der Messung der Verschiebung  $D$  des Leuchtflecks in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung  $U_B$  und der Verschiebungsspannung  $U_D$  sind in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1:** Messergebnisse der Verschiebung  $D$  des Leuchtflecks bei unterschiedlichen Beschleunigungsspannungen  $U_B$  in Abhängigkeit der Verschiebungsspannung  $U_D$ , wobei 1 Kästchen = 0,25 Zoll = 0,635 cm ist.

$U_B / \text{V} :$		250	300	350	400	450
$D / \text{Kästchen}$	$D / \text{cm}$	$U_D / \text{V}$				
1	0,635	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
0	0,000	2,9	3,2	3,3	3,9	4,4
-1	-0,635	6,4	8,2	8,9	10,3	11,9
-2	-1,270	10,2	12,3	14,3	17,6	20,2
-3	-1,905	13,3	17,0	20,5	24,6	28,2
-4	-2,540	17,0	21,8	27,2	31,8	36,2

Die verschiedenen Messreihen sind in Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 5:** Plot der Messwerte aus Tabelle 1 mit entsprechenden Ausgleichsgeraden der Parameter aus Tabelle 2

Die entsprechende Ausgleichsgerade wird nach Gleichung 4 über

$$D(U_D) = a \cdot U_D + b \quad (7)$$

mit der Funktion `curve_fit` aus der Python Bibliothek SciPy berechnet. Hier ist anzumerken, dass die ersten Messpunkte ( $D = 1$  Kästchen) sehr ungenau sind und nicht zum berechnen der Ausgleichsgerade verwendet werden. Damit ergeben sich die in Tabelle 2 aufgelisteten Parameter  $a$  und  $b$ .

**Tabelle 2:** Parameter der durchgeführten Ausgleichsrechnung

$U_B / \text{V}$	$a / \frac{\text{cm}}{\text{V}}$	$b / \text{cm}$
250	$-0,1808 \pm 0,0028$	$0,531 \pm 0,032$
300	$-0,1379 \pm 0,0022$	$0,454 \pm 0,031$
350	$-0,1067 \pm 0,0028$	$0,313 \pm 0,047$
400	$-0,0905 \pm 0,0011$	$0,327 \pm 0,022$
450	$-0,0795 \pm 0,0006$	$0,333 \pm 0,015$

Um nun die Empfindlichkeit des verwendeten Gerätes zu ermitteln, wird eine Ausgleichs-

rechnung der Parameter  $a(U_B)$  über

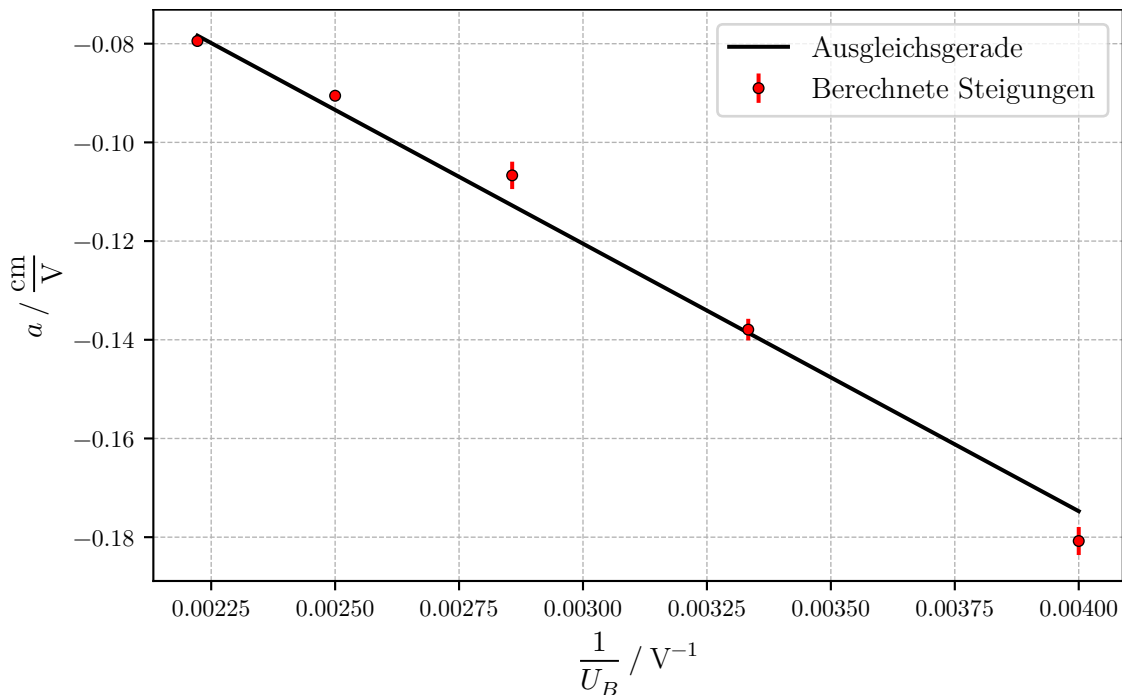
$$a(U_B) = \frac{p_1}{U_B} + p_2 \quad (8)$$

durchgeführt und ergibt

$$p_1 = (-54 \pm 3) \text{ cm} = -E$$

$$p_2 = (0,042 \pm 0,008) \frac{\text{cm}}{\text{volt}} .$$

Nach Gleichung 4 entspricht der berechnete Parameter  $p_1$  betragsmäßig der sogenannten Empfindlichkeit  $E = \frac{pL}{2d}$ .



**Abbildung 6:** Plot der Parameter  $a$  aus Tabelle 2 gegen die reziproke Beschleunigungsspannung  $1/U_B$ .

Ein Vergleichswert der Empfindlichkeit des benutzten Gerätes kann ermittelt werden, wenn diese über die Abmessungen des Gerätes aus Abbildung 7 berechnet wird. Hier wurde die Y-Verschiebung gemessen, also ist

$$p = 1,9 \text{ cm}$$

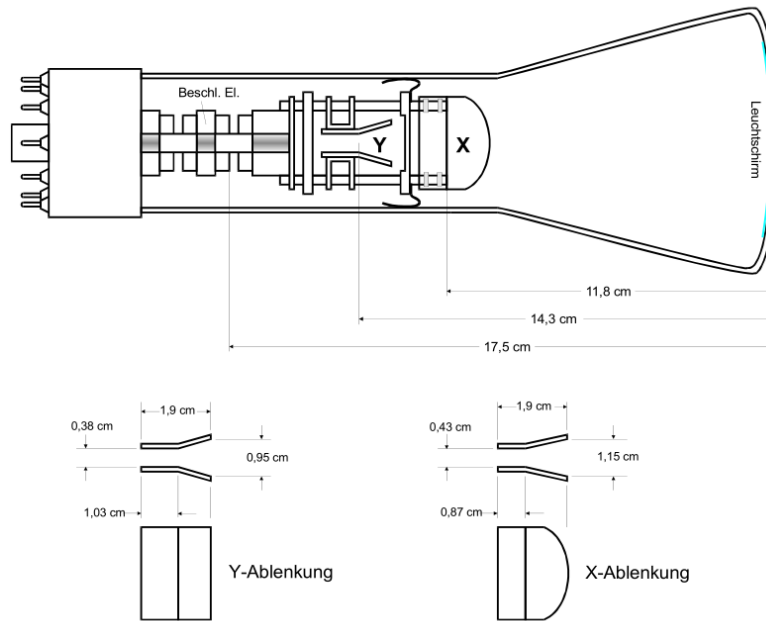
$$L = 14,3 \text{ cm}$$

$$d = 0,38 \text{ cm} .$$

Somit ergibt sich der Vergleichswert der Empfindlichkeit zu

$$E_{\text{Vergleich}} = 35,75 \text{ cm} .$$





**Abbildung 7:** Abmessungen der verwendeten Kathodenstrahlröhre.[1]

Die Untersuchung einer angelegten Sinusspannung an die X-Achse mit angelegter Sägezahnspannung an der Y-Achse ergab die Messergebnisse in Tabelle 3. Die Messung der Höhe der Sinuskurve auf dem Leuchtschirm (peak-to-peak)

$$h_{\text{Sin}} = 1,27 \text{ cm} .$$

Hier sei anzumerken, dass aufgrund eines fehlerhaften Gerätes diese Messwerte an einem anderen Gerät gemessen wurden. Also wird im Folgenden für die Empfindlichkeit der Wert  $E_{\text{Vergleich}}$  verwendet.

**Tabelle 3:** Messergebnisse der Frequenz der Sägezahnspannung bei stehenden Bildern, also einem Frequenzverhältnis von  $n \cdot \nu_{\text{Säg}} = \nu_{\text{Sin}}$

n	$\nu_{\text{Säg}} / \text{Hz}$
0,5	100,07
1,0	50,07
2,0	25,05
3,0	12,54

Mithilfe dieser Messwerte kann also die Sinusfrequenz  $\nu_{\text{Sin}} = n \cdot \nu_{\text{Säg}}$  gemittelt werden und ergibt

$$\nu_{\text{Sin}} = (47 \pm 3) \text{ Hz} .$$

Außerdem wird die Amplitude der Sinusspannung nach Gleichung 4 über

$$U_{\text{Sin}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_{\text{Sin}}}{E \cdot U_B} \quad (9)$$

mit  $U_B = 300 \text{ V}$  zu

$$U_{\text{Sin}} = (5,329 \pm 0,002) \text{ V}$$

berechnet.

Vergleichswerte für die Sinusspannung und -frequenz wurden nicht gemessen.

## 5 Diskussion

Die berechneten Empfindlichkeiten der verwendeten Kathodenstrahlröhre sind

$$E_{\text{gemessen}} = (54,2 \pm 3,3) \text{ cm}$$

$$E_{\text{Vergleich}} = 35,75 \text{ cm}.$$

Hier ist eine große Abweichung zu sehen. Diese Abweichung wird mehrere Gründe haben.

Der gravierendste Grund ist vermutlich, dass die verwendete Apparatur nicht mehr ordnungsgemäß zu funktionieren scheint. Bei keiner angelegten X- oder Y-Spannung sollte der Leuchtfleck punktförmig sein. Allerdings war es bei unserer Messung nicht möglich einen Punkt zu erzeugen, sondern es wurde immer eine horizontal breitgezogene, nicht zu definierende, Form abgebildet.

Aber selbst bei einem vollkommen intakten Gerät hätten sich Abweichungen gebildet, da einige Näherungen getroffen wurden, die eventuell einen großen Einfluss haben können. Z.B. wurden die Kondensatorplatten als gerade Platten angenommen, aber in der Kathodenstrahlröhre befanden sich Platten wie in Abbildung 7 zu sehen.

Zwar sind wir für die folgenden Messungen an ein neues, besser funktionierendes Gerät gewechselt, aber das Benutzen der Kathodenstrahlröhre zum Untersuchen einer angelegten Spannung war trotzdem nur bedingt sinnvoll. Die abgebildete Sinuskurve war selbst auf maximal eingestellter Spannung der Spannungsgeneratoren nur sehr klein. Trotzdem war es möglich sowohl die Frequenz der Sägezahnspannung zu messen, als auch annähernd stehende Bilder zu erzeugen. Die Frequenz der angelegten Sinusspannung wurde zu

$$\nu_{\text{Sin}} = (47 \pm 3) \text{ Hz}$$

ermittelt. Dies ist verwunderlich, da auf dem verwendeten Sinusspannungsgenerator eine Frequenz von  $80 - 90 \text{ Hz}$  angegeben war. Allerdings wurde nicht überprüft, ob diese Frequenz der tatsächlich erzeugten Frequenz entspricht.

Auch die berechnete Amplitude der Sinusspannung

$$U_{\text{Sin}} = (5,329 \pm 0,002) \text{ V}$$

ist verwunderlich, da am Generator eine Spannung von 40 V eingestellt wurde. Allerdings ist auch hier fragwürdig, ob dies die tatsächlich erzeugte Spannung war, da sich die Abbildung nur minimal bei Änderung der Spannung verändert hat.

Abschließend sei zu sagen, dass die bestimmten Werte aufgrund schlecht funktionierender Geräte nur als ganz grobe Schätzwerte angenommen werden können. Trotzdem wurde gezeigt, dass eine Kathodenstrahlröhre dafür benutzt werden kann den zeitlichen Verlauf einer periodischen Spannung visuell darzustellen und zu untersuchen.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 501 Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld*. 2020.