

V501

# **Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld**

Evelyn Romanjuk  
evelyn.romanjuk@tu-dortmund.de

Ramona-Gabriela Kallo  
ramonagabriela.kallo@tu-dortmund.de

Durchführung: 10.04.18

Abgabe: 17.04.18

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 des Elektronenstrahls im elektrischen Feld . .	4
2.3 Prinzip des Kathodenstrahl-Oszillographen . . . . .	5
<b>3 Durchführung</b>	<b>5</b>
3.1 Überprüfung der Proportionalität . . . . .	5
3.2 Erzeugung stehender Wellen mittels Kathodenstrahl-Oszillographen . . .	6
<b>4 Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1 Linearer Zusammenhang zwischen der Leuchtpunktverschiebung und Ab- lenkspannung . . . . .	7
4.2 Bestimmung der Apparaturkonstante . . . . .	8
4.3 Wechselstromfrequenz des Sinusgenerators . . . . .	10
<b>5 Diskussion</b>	<b>11</b>
<b>Literatur</b>	<b>11</b>

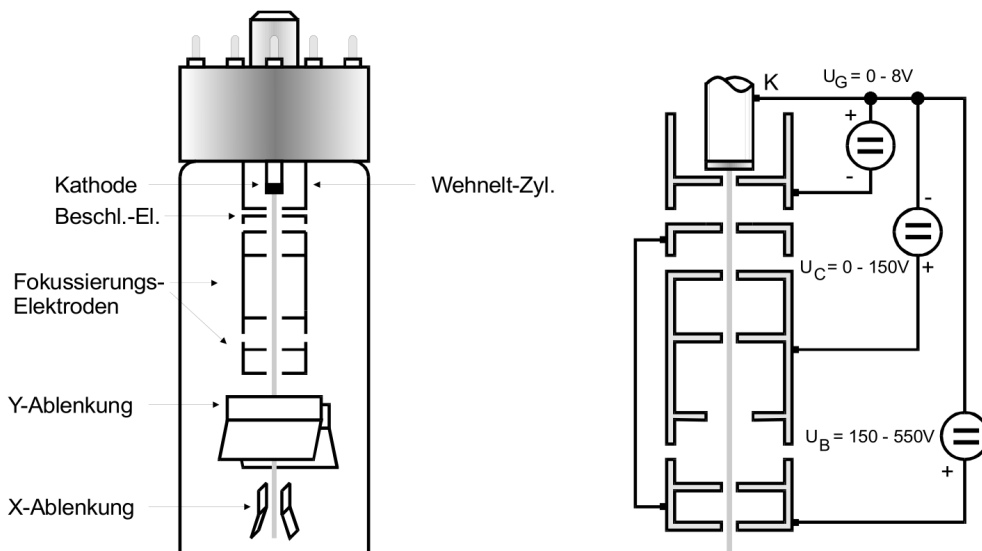
# 1 Zielsetzung

In diesen Versuchen soll die Ablenkung eines Elektronenstrahls sowohl in einem elektrischen Feld, als auch in einem transversalen Magnetfeld untersucht werden.

## 2 Theorie

### 2.1 Aufbau einer Kathodenstrahlröhre

Für den in den Versuchen benötigten Elektronenstrahl wird eine Kathodenstrahlröhre verwendet, welche aus drei Baugruppen zusammengesetzt ist.

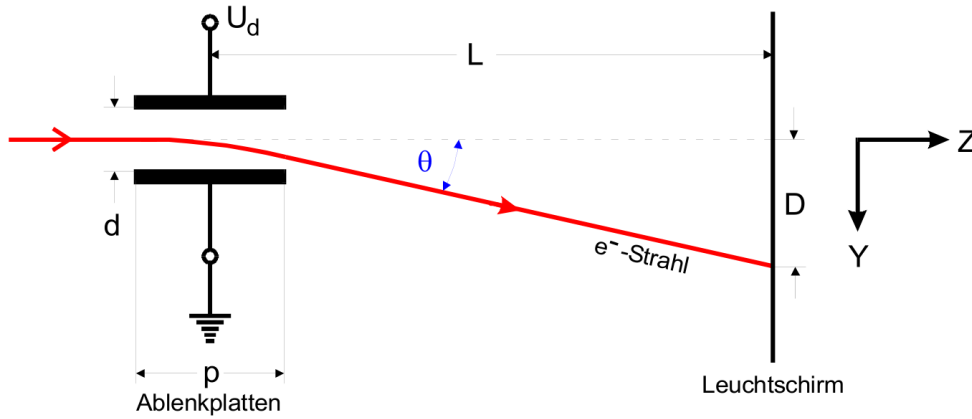


**Abbildung 1:** Aufbau der Kathodenstrahlröhre und Verschaltung der Elektronenkanone, [1, S. 2].

Zunächst ist eine sogenannte Elektronenkanone zu finden. Diese besteht aus einer Glühkathode, die durch einen erhitzten isolierten Draht geheizt wird und Elektronen emittiert. Ein Wehnelt-Zylinder mit negativem Potential umschließt die Kathode und sorgt dafür, dass die Intensität des austretenden Elektronenstrahls regelbar ist. Neben der umschlossenen Glühkathode ist eine Elektrode angebracht, die mit ihrem starken positiven Potential  $U_B$  die Elektronen auf eine Geschwindigkeit  $v_z$  beschleunigt. Die Berechnung erfolgt mit dem Energiesatz:

$$\frac{m_0 v_z^2}{2} = e_0 U_B.$$

Zur Bündelung des Strahls werden weitere Elektroden als eine Art Linse eingesetzt. Inhomogene Felder zwischen den Elektroden fokussieren den Strahl, mithilfe der angelegten Spannung  $U_C$  kann die Brechkraft eingestellt werden.



**Abbildung 2:** Ablenkung des Elektronenstrahls im elektrischen Feld, [1, S. 3].

Den zweiten Teil der Kathodenstrahlröhre stellt das Ablenkensystem dar, das aus zwei Plattenpaaren zusammengesetzt ist. Eine angelegte Spannung  $U_d$  erzeugt ein elektrisches Feld zwischen den Platten, das eine Kraft auf die hindurchtretenden Elektronen ausübt. Auf diese Weise kann der Elektronenstrahl je nach Spannung  $U_d$  abgelenkt werden.

Der letzte Teil der Röhre ist der Leuchtschirm. Dieser weist die Auftreffstelle des Elektronenstrahls als leuchtenden Fleck nach.

## 2.2 Berechnung der Ablenkung des Elektronenstrahls im elektrischen Feld

Durch die an die Platten angelegte Spannung  $U_d$  wird bei einem kleinen Plattenabstand  $d$  bei großer Plattenlänge  $p$  (Vgl. Abbildung 2) ein annähernd homogenes elektrisches Feld erzeugt. In diesem Feld wirkt auf das eintreffende Elektron eine Kraft, die abhängig von der Stärke des Feldes ist. Also gilt:

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

und

$$|F| = |e_0 \vec{E}| = e_0 \frac{U_d}{d}.$$

Die Kraft führt zu einer gleichmäßigen Beschleunigung in Y-Richtung. Die Geschwindigkeit lässt sich mithilfe der Kraft und des E-Feldes berechnen:

$$v_y = b_y \Delta t = \frac{F}{m_0} \Delta t = \frac{e_0}{m_0} \frac{U_d}{d} \Delta t. \quad (1)$$

Weiterhin hat das Elektron eine Geschwindigkeitskomponente  $v_z$  in Z-Richtung. Damit gilt für die Zeit  $\Delta t$ , für die sich das Elektron im Feld befindet:

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

Durch Einsetzen in 1 ergibt sich dann für die Geschwindigkeit in Y-Richtung:

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

Die Verschiebung des Leuchtflecks auf dem Schirm lässt sich ermitteln über den Abstand der Platten zum Schirm und dem Winkel  $\theta$ , um den der Strahl abgelenkt wird. Der Winkel lässt sich mithilfe der beiden Geschwindigkeitskomponenten berechnen:

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

Damit ist die Verschiebung  $D$ :

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

Wird 2.1 nach  $v_z^2$  umgestellt und in 2 eingesetzt, so lässt sich die Verschiebung  $D$  auf dem Schirm auch mit:

$$D = L \cdot \frac{p}{2d} \frac{U_d}{U_B}$$

berechnen. Neben der Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung  $U_B$  und den Maßen des Kondensator ist auch eine Proportionalität zwischen  $D$  und der Ablenkspannung  $U_d$  zu erkennen.

## 2.3 Prinzip des Kathodenstrahl-Oszillographen

Bei einem Kathodenstrahl-Oszillographen wird eine Kathodenstrahlröhre eingesetzt und wird für die zeitliche Darstellung von Wechselspannungen verwendet. Hierzu wird an das in X-Richtung ablenkende Plattenpaar eine Sägezahnspannung angelegt und an das in Y-Richtung ablenkende eine Spannung, die untersucht werden soll. Aus diesen Spannungen lassen sich auf dem Leuchtschirm stehende Wellen erzeugen, sofern für die Frequenzen die Synchronisationsbedingung:

$$n \cdot \nu_{\text{Sä}} = m \cdot \nu_{\text{We}}$$

gilt, mit  $n = 1, 2, 3, \dots$  und  $m = 1, 2, 3, \dots$

# 3 Durchführung

## 3.1 Überprüfung der Proportionalität

Zunächst wird mithilfe von Abbildung 3 die Kathodenstrahlröhre verschaltet. Zur Überprüfung der Proportionalität zwischen der Verschiebung  $D$  des Leuchtflecks auf dem Schirm und der Ablenkspannung  $U_d$  werden fünf verschiedene Beschleunigungsspannungen  $U_B$  zwischen 180 und 500 V gewählt. Für jedes  $U_B$  wird dann  $U_d$  so eingestellt, dass der Leuchtfleck auf einer der äquidistanten Linien des Schirms liegt, woraufhin die

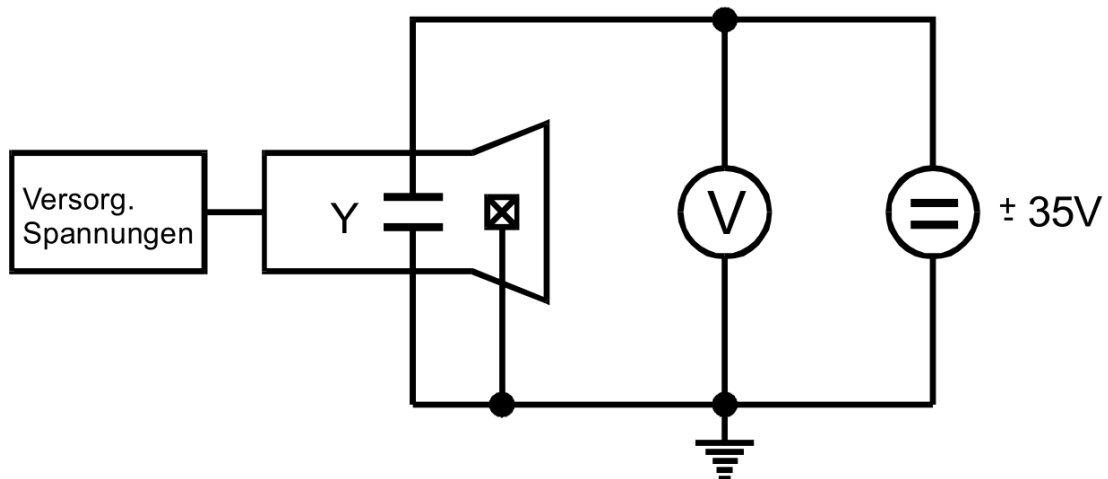


Abbildung 3: Schaltbild des Kathodenstrahlrohrs, [1, S. 5].

eingestellte Ablenkspannung  $U_d$  abgelesen wird. Genauso wird dann für die weiteren acht Linien des Schirms vorgegangen.

### 3.2 Erzeugung stehender Wellen mittels Kathodenstrahl-Oszillographen

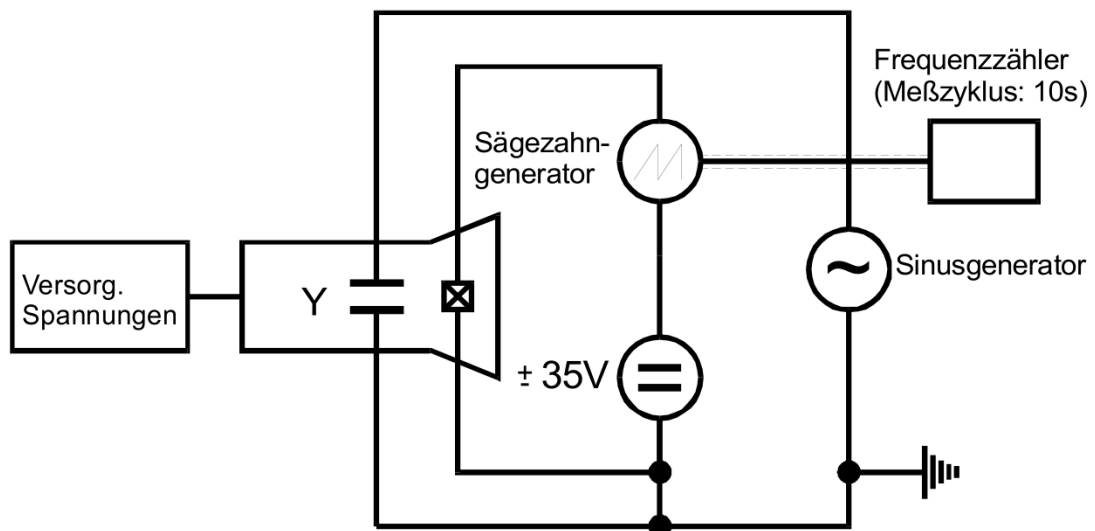


Abbildung 4: Schaltbild des Kathodenstrahl-Oszillographen, [1, S. 5].

Der Aufbau des Oszillographen erfolgt mithilfe der Abbildung 4. Nun wird die Sägezahnfrequenz  $\nu_{Sä}$  so eingestellt, dass sich ein stehendes Bild der Sinusspannung, welche vom Gerät vorgegeben eine Frequenz zwischen 80 und 90 Hz hat, auf dem Schirm ergibt. Hierbei soll:

$$n \cdot \nu_{\text{Sä}} = m \cdot \nu_{\text{Si}}$$

mit  $n = \frac{1}{2}, 1, 2$  und  $3$  gelten. Für jedes  $n$  wird die Sägezahnfrequenz notiert. Zuletzt wird die maximale Strahlauslenkung in Y-Richtung bei konstanter Beschleunigungsspannung abgemessen.

## 4 Auswertung

### 4.1 Linearer Zusammenhang zwischen der Leuchtpunktverschiebung und Ablenkspannung

Bei der Messung für die Empfindlichkeit der Röhre ergeben sich die folgenden Werte in der Tabelle 1. Mit den Wertenpaare wird eine lineare Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Empfindlichkeit der Röhre für verschiedene Beschleunigungsspannungen und in die Abbildung 5 eingetragen. Die Nummerierung der Linien erfolgte beginnend mit 1 von oben nach unten.

**Tabelle 1:** Messdaten für die Ablenkspannung  $U_D$  und Abstand  $D$  bei der Bestimmung der Empfindlichkeit der Röhre.

	$U_B/\text{V}$	220	300	350	420	450
n	D/cm	$U_d/\text{V}$	$U_d/\text{V}$	$U_d/\text{V}$	$U_d/\text{V}$	$U_d/\text{V}$
1	0	-22,80	-29,80	-34,00	-	-
2	0,635	-18,65	-24,60	-28,10	-	-
3	1,270	-14,47	-19,38	-21,60	-27,60	-29,2
4	1,905	-10,44	-14,35	-15,3	-20,00	-21,90
5	2,540	-6,60	-9,05	-8,79	-13,33	-13,74
6	3,175	-2,32	-3,60	-3,07	-5,63	-5,72
7	3,810	1,873	1,712	3,820	1,912	2,13
8	4,445	6,51	7,16	10,47	10,02	10,85
9	5,080	10,61	12,96	16,69	17,63	19,02

Eine lineare Ausgleichsgerade lässt sich berechnen wie:

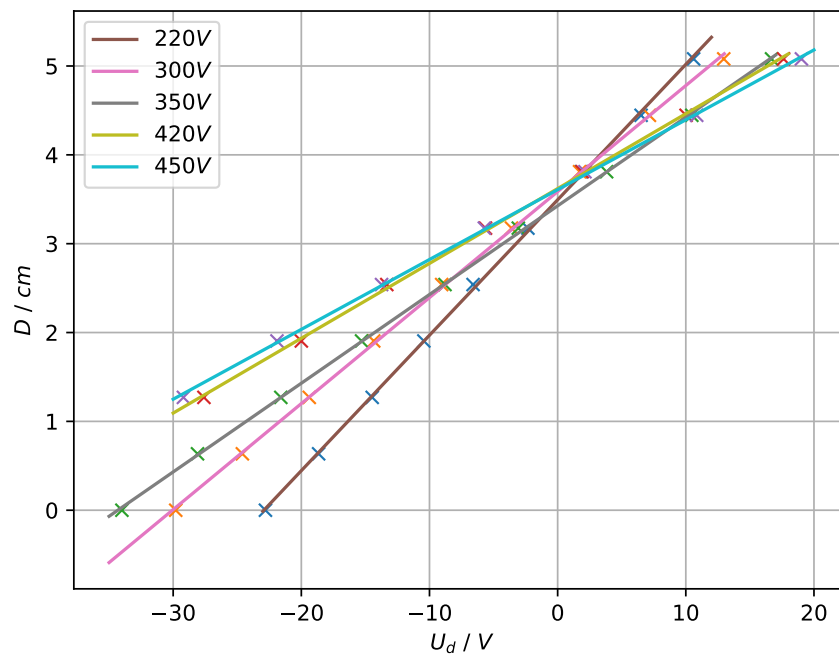
$$y = mx + b \quad (3)$$

wobei  $m$  die Steigung und  $b$  der y-Achsenabschnitt sind. Über Formel 3 werden die Steigungen und die Fehler der Ausgleichsgeraden vom Python-Modul Matplotlib berechnet.

Die Steigungen betragen dann wie folgt:

$$\begin{aligned}
 m_{220} &= (0,1524 \pm 0,0011) \frac{\text{V}}{\text{cm}} \\
 m_{300} &= (0,1193 \pm 0,0007) \frac{\text{V}}{\text{cm}} \\
 m_{350} &= (0,0998 \pm 0,0005) \frac{\text{V}}{\text{cm}} \\
 m_{400} &= (0,0842 \pm 0,0008) \frac{\text{V}}{\text{cm}} \\
 m_{450} &= (0,0786 \pm 0,0007) \frac{\text{V}}{\text{cm}}.
 \end{aligned}$$

Es ist darauf zu beachten, dass bei der Steigung als Index die jeweilige Beschleunigungsspannung steht.



**Abbildung 5:** Messwerte und zugehörige gleichfarbige Ausgleichsgeraden für verschiedene Beschleunigungsspannungen.

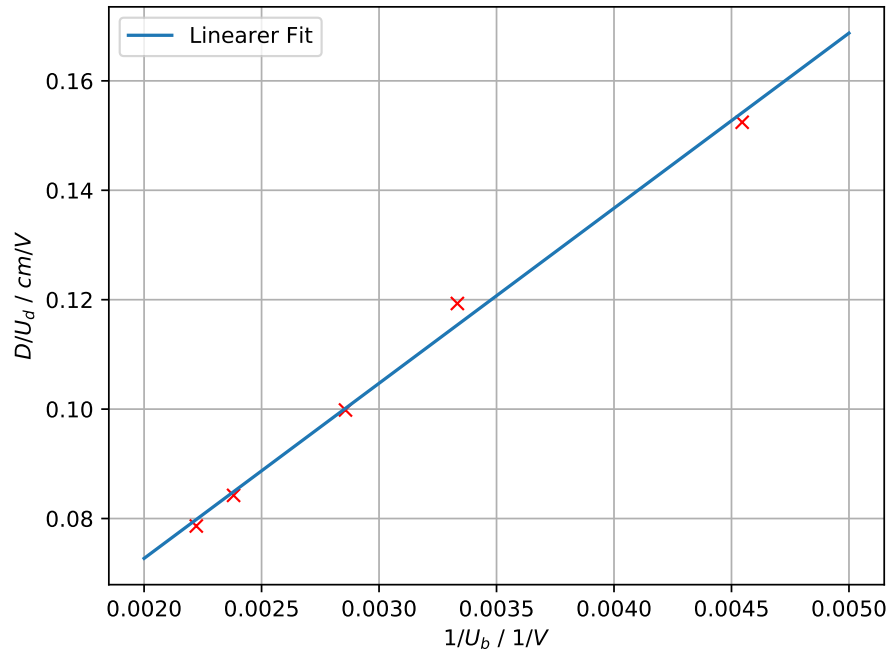
## 4.2 Bestimmung der Apparaturkonstante

Als nächstes werden die errechneten Steigungen sowie die jeweiligen Fehler für einen weiteren Diagramm verwendet. Diese müssen gegen  $\frac{1}{U_B}$  aufgetragen werden und erneut eine lineare Ausgleichsgerade mittels Gleichung 3 durchgeführt. Die neuen errechnete



Wertepaare werden in die Abbildung 6 eingetragen. Die Steigung der Ausgleichsgeraden sowie die Fehler der Form in der Gleichung 3 wird vom Python-Modul Matplotlib berechnet und beträgt:

$$m = (32,004 \pm 1,396) \text{ cm}.$$



**Abbildung 6:** Ausgleichsgerade für die Empfindlichkeit mit einer reziproken Beschleunigungsspannung.

Das neue Ergebnis soll zunächst nun mit der Größe  $\frac{pL}{2d}$  verglichen werden, wobei  $p$  die Länge der Ablenkplatte,  $L$  die Strecke zwischen Ablenkkondensator und Leuchtschirm und  $d$  der Abstand der Kondensatorplatten sind. Diese Größe kann theoretisch durch die jeweiligen angegebenen Größen aus der Konstruktionszeichnung in der Anleitung [1, S. 7] berechnet werden. Die Größen aus der Konstruktionszeichnung betragen:

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

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

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

Daraus ergibt sich dann:

$$\frac{pL}{2d} = 35,75 \text{ cm}.$$

### 4.3 Wechselstromfrequenz des Sinusgenerators

Die Wechselstromfrequenz ist auf einen Wert zwischen 80 Hz und 90 Hz eingegrenzt. Für diesen Versuchsteil wird eine Beschleunigungsspannung  $U_B = 450 \text{ V}$  verwendet. Die Amplitude der Sinuswelle beträgt 1 Kästchen auf dem Leuchtschirm, die in der aufgenommenen Abbildung 7 zu sehen ist. In der Tabelle 2 befinden sich die aufgeführten Frequenzen der Sägezahnspannung für eine stehende Darstellung.

**Tabelle 2:** Messwerte für Abgleich der Sägezahnfrequenz.

n	$\nu/\text{Hz}$	$\frac{\nu}{n}/\text{Hz}$
0,5	160,44	80
1	80,2	80
2	40,24	80
3	25,03	80

Zur Bestimmung des Scheitelwerts der Spannung (die maximale Amplitude) wird die Empfindlichkeit der Röhre benötigt. Diese wurde für die verwendete Spannung von  $U_B = 450 \text{ V}$  bestimmt. Die Gesamthöhe der Kurve betrug 1 Kästchen und somit beträgt die Amplitude:

$$D_{\max} = 0,635 \text{ cm.} \quad (4)$$

Dann wird die Frequenz mit Hilfe der Amplitude aus 4 und der Gesamthöhe der Kurve ermittelt und beträgt:

$$\begin{aligned} \frac{D_{\max}}{U_{\sin}} &= 0,0786 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \\ \leftrightarrow U_{\sin} &= \frac{D_{\max}}{0,0786 \text{ V/cm}} = 8,07 \text{ V.} \end{aligned}$$

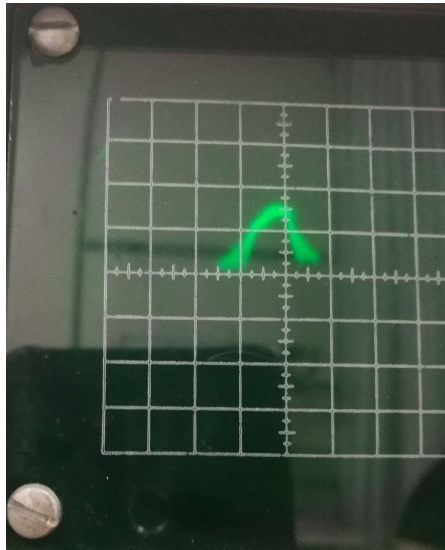


Abbildung 7: Die Amplitude der Sinuswelle auf dem Leuchtschirm.

## 5 Diskussion

Beim ersten Teil des Versuches ergaben sich Probleme bei hohen Beschleunigungsspannungen, da nicht genug Ablenkspannung angelegt werden konnte, um den Strahl über den kompletten Schirm zu bewegen. Bei den Ergebnissen für die Steigung ist zu sehen, dass die Empfindlichkeit mit zunehmender Beschleunigungsspannung deutlich abnimmt.

Bei der Bestimmung der Apparaturkonstante sollte nun die Größe  $\frac{pL}{2d}$  mit der errechneten Steigung  $m = (32,004 \pm 1,396) \text{ cm}$  verglichen werden. Es ergibt sich eine Abweichung von 10,47 %, die Messungenauigkeit ist also relativ genau.

Außerdem zeigten sich bei dem zweiten Teil des Versuchs große Schwankungen bei dem Frequenzzähler.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch 501: Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen Feld*. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/V501.pdf> (besucht am 12.04.2018).