

Versuche 501/502 – Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen und transversalen magnetischen Feld

Marco Lafrentz Philipp Leser

29.11.2005 – Abtestiert am 16.12.2005

Thema der durchgeführten Versuche war die Untersuchung von bewegten Elektronen in elektrischen und magnetischen Feldern.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Theorie	2
2.1. Aufbau einer Kathodenstrahlröhre	2
2.2. Zusammenhang zwischen der Auslenkung D und dem elektrischen Feld E	3
2.3. Zusammenhang zwischen der Auslenkung D und dem magnetischen Feld B	5
2.4. Experimentelle Bestimmung der spezifischen Elektronenladung . .	6
2.5. Prinzip eines Kathodenstrahl-Oszillographen	6
2.6. Versuchsaufbau und Durchführung	7
3. Auswertung	8
3.1. Ablenkung im elektrischen Feld	8
3.1.1. Berechnung der Empfindlichkeit des Ablenkungssystems .	8
3.1.2. Bestimmung der Frequenz des Sinusgenerators und Ermittlung des Scheitelwerts der Sinusspannung	12
3.2. Ablenkung im magnetischen Feld	13
3.2.1. Bestimmung der spezifischen Elektronenladung	14
3.2.2. Bestimmung des Erdmagnetfeldes	16
A. Anhang	16
A.1. Literatur	16
A.2. Messdaten	17

B. Konstruktionszeichnung

18

1. Einleitung

Die im folgenden beschriebenen Versuche zur Untersuchung von Elektronenstrahlen in elektrischen und magnetischen Feldern sind nur in einem Hochvakuum möglich, da die bewegten Elektronen sonst mit Luft-Molekülen wechselwirken würden. Daher verwendet man hier sogenannte Kathodenstrahlröhren. Besonderheit einer solchen Röhre ist, dass sie bis auf einen Restdruck von nur 10^{-6} mbar evakuiert ist und somit einen unbeeinflussten Elektronenstrahl erzeugen kann. Im nächsten Abschnitt soll näher auf ihren Aufbau und ihre Wirkungsweise eingegangen werden. Im weiteren Verlaufe stellen wir dann Zusammenhänge zwischen der Auslenkung des Elektronenstrahls und des elektrischen bzw. magnetischen Feldes her. Zum Schluss erklären wir noch kurz das Prinzip eines Kathodenstrahl-Oszilloskops und folgern aus den bis dahin hergeleiteten Zusammenhängen die relative Ladung der bewegten Elektronen.

2. Theorie

2.1. Aufbau einer Kathodenstrahlröhre

Der strukturelle Aufbau einer Kathodenstrahlröhre besteht aus drei wesentlichen Elementen. Zum einen aus einer Elektronenkanone, die freie Elektronen erzeugt, beschleunigt und fokussiert und zum anderen aus einem Ablenk- und einem Nachweissystems, welches den Schnittpunkt des Elektronenstrahls mit einem Schirm als Leuchtfleck sichtbar macht. Die freien Elektronen werden erzeugt, indem eine zylindrische Kathode mit geringer Elektronenaustrittsarbeit über einen im Inneren des Zylinders befindlichen Glühdraht stark erhitzt wird. Dieser Vorgang ist unter dem Ausdruck Glühemission bekannt.

Die Kathode ist von einem sogenannten WEHNELT-Zylinder umgeben. Er besitzt ein negatives Potential gegenüber der Kathode und besitzt eine kleine Öffnung in Strahlrichtung. So ist es möglich, die Intensität des Strahls zu regulieren.

Dem WEHNELT-Zylinder folgt eine Beschleunigungselektrode mit einem hohen positiven Potential der Kathode gegenüber. Elektronen, die die WEHNELT-Barriere überwunden haben, werden durch sie stark angezogen und erreichen aus Energieerhaltungsgründen eine Geschwindigkeit v in folgender Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U_B (e_0 = Elementarladung; m_0 = Elektronenmasse):

$$\frac{m_0 v_z^2}{2} = e_0 U_B \quad (2.1)$$

Wie man der Abbildung 2.1 entnehmen kann, passiert der Elektronenstrahl noch weitere Anordnungen von Elektroden; diese dienen der Strahlfokussierung. Die Brechkraft einer solchen elektronischen Linse lässt sich über die Spannung U_c regeln. Schlussendlich trifft der Elektronenstrahl auf einen Leuchtschirm, der durch

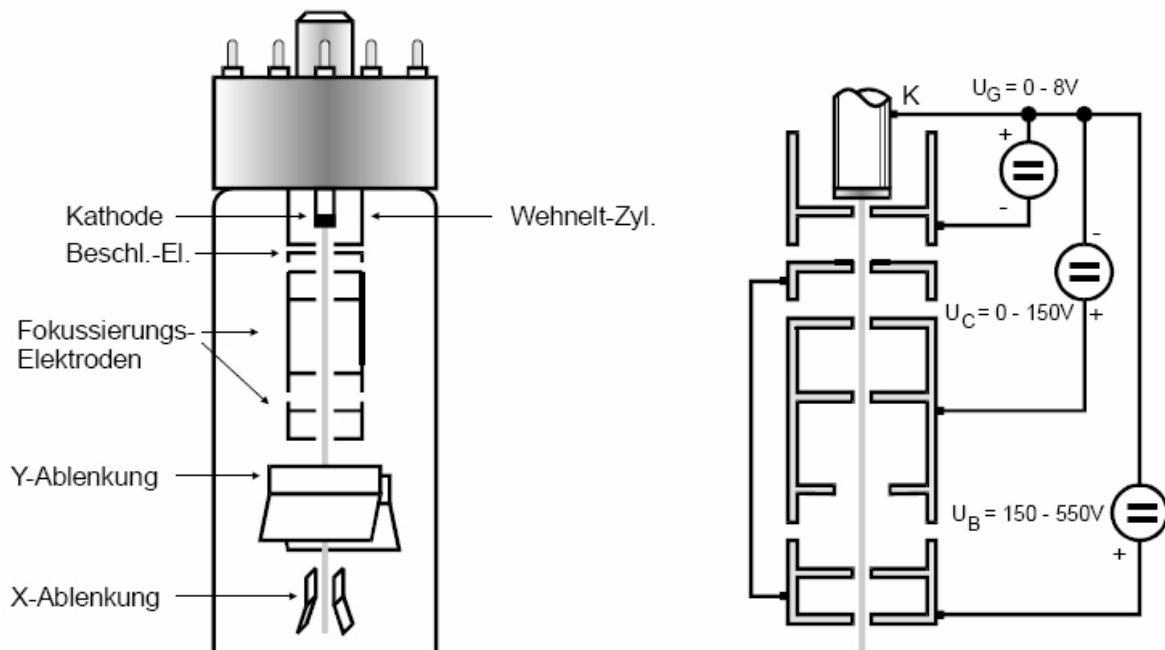


Abbildung 1: Querschnitt einer Kathodenstrahlröhre und die Beschaltungen der Elektroden [1]

die aufprallenden Elektronen Lichtquanten emittiert und die Position des Strahls sichtbar macht. Der ausgesandte Elektronenstrahl passiert nach der Fokussierung noch ein Ablensystem; entweder bestehend aus parallelen Plattenpaaren mit einer Potentialdifferenz, dessen elektrisches Feld den Elektronenstrahl ablenkt oder bestehend aus einem homogenen Magnetfeld, das die Bahn der Elektronen beeinflusst. Bei beiden Varianten trifft der Strahl mit einer leicht zu messenden Auslenkung auf den Schirm.

2.2. Zusammenhang zwischen der Auslenkung D und dem elektrischen Feld E

Zum besseren Verständnis der Herleitung des gesuchten Zusammenhangs betrachte man Abbildung 2. Geht man von einem homogenen elektrischen Feld mit der Feldstärke

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

im inneren des Kondensators aus und betrachte den Fall, dass der Plattenabstand d klein gegenüber der Plattenlänge p ist, so hat man keine effektiven Randeffekte. Auf ein Elektron wirkt die Kraft

$$|\vec{F}| = |e_0 \vec{E}| = e_0 \frac{U_0}{d}$$

in der Zeit Δt , in der es sich im Feld befindet. Die Kraft ist im gesamten Feld konstant und beschleunigt ein Elektron während eines kompletten Durchgangs

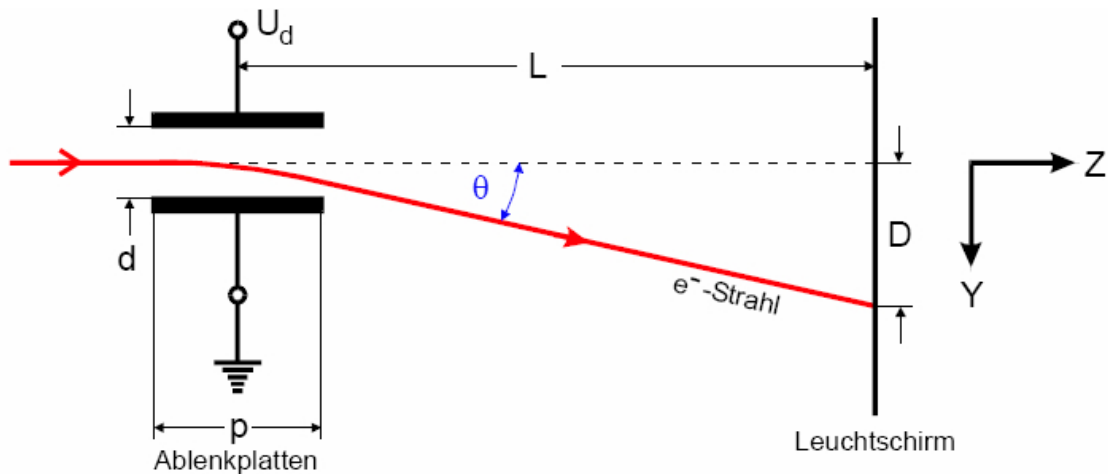


Abbildung 2: geometrische Betrachtung der Strahlablenkung in einer Kathodenstrahlröhre durch ein elektrisches Feld [1]

gleichmäßig in y -Richtung bis auf eine Endgeschwindigkeit von

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

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

Unser Elektron bewegt sich mit Geschwindigkeit v_z durch den Kondensator. Wir ersetzen also

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

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

Da wir nur kleine Ablenkungen θ betrachten, nähern wir

$$\theta = \frac{D}{L} = \frac{v_y}{v_z}.$$

Somit erhalten wir unsere gesuchte Beziehung für die Auslenkung

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

Wir erhalten eine direkte Proportionalität zwischen der Auslenkung D und der Ablenkspannung U_d . Weiter erkennt man, dass man einen Kompromiss zwischen Ablenkempfindlichkeit - große Länge p , kleine Spannung U_B - und einer schnellen Kathodenstrahlröhre ($\Delta t < \text{Periode von } U_d$) - kleine Länge p , große Spannung U_B - eingehen muss.

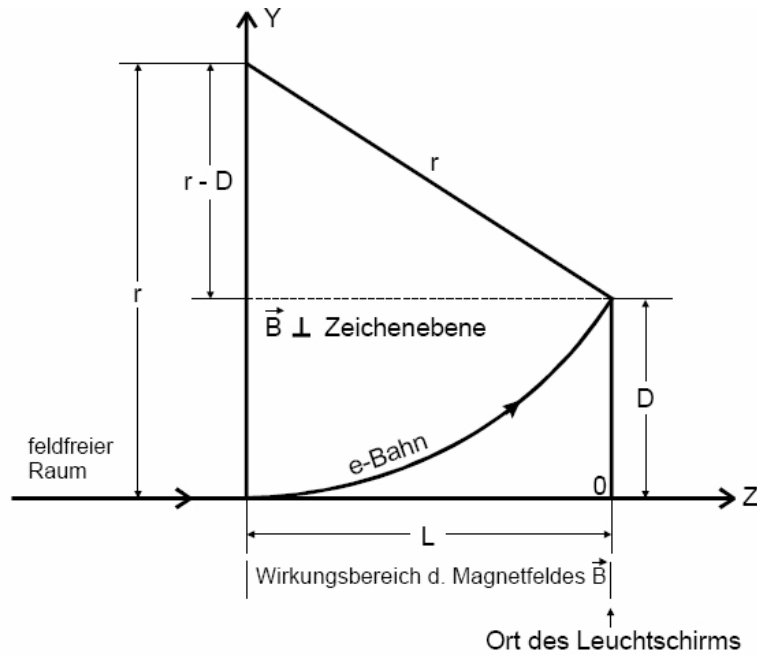


Abbildung 3: geometrische Betrachtung der Strahlablenkung in einer Kathodenstrahlröhre durch ein magnetisches Feld [1]

2.3. Zusammenhang zwischen der Auslenkung D und dem magnetischen Feld B

Bewegt sich eine Ladung q mit der Geschwindigkeit \vec{v} , wie in unseren Versuchen, senkrecht gegenüber einem homogenen Magnetfeld der Größe \vec{B} , so wirkt auf diese Ladung die LORENTZ-Kraft

$$F_L = qvB$$

$$(\text{allg. } \vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}).$$

Die Richtung der Ablenkung kann mit Hilfe der linken-Hand-Regel bestimmt werden: der Daumen entspricht der Richtung der Geschwindigkeit der Elektronen, der Zeigefinger entspricht der Richtung der magnetischen Feldlinien und der Mittelfinger zeigt dann die Richtung der Beschleunigung an. Bewegt sich nun ein Elektron in z -Richtung, so wird es bei einem Magnetfeld in x -Richtung in z -Richtung abgelenkt und bewegt sich auf einer gekrümmten Bahn in der z - y -Ebene. Da der Geschwindigkeitsvektor immer senkrecht auf den Feldlinien steht und sich die potentielle Energie des Elektrons nicht ändert, bewegt es sich auf einer Kreisbahn. Es gilt für alle Punkte der Bahn

$$|\vec{v}| = v_z$$

Der Betrag der Geschwindigkeit ändert sich also beim Durchlaufen des Feldes nicht.

Den Krümmungsradius r erhalten wir über das Gleichgewicht von LORENTZ-Kraft

und Zentrifugalkraft:

$$e_0 v_z B = \frac{m_0 |\vec{v}|^2}{r}$$
$$\Rightarrow r = \frac{m_0 v_z}{e_0 B}.$$

Betrachten wir nun den geometrischen Zusammenhang zwischen dem schwer zu messenden Krümmungsradius r und der leicht zu messenden Auslenkung D : Zum leichteren Verständnis betrachten wir erneut Abbildung 3. Nach dem Satz von PYTHAGORAS gilt:

$$L^2 + (r - D)^2 = r^2$$
$$\Rightarrow r = \frac{L^2 + D^2}{2D}$$

Mit unseren Kenntnissen über den Radius r bekommen wir

$$\frac{L^2 + D^2}{2D} = \frac{m_0 v_z}{e_0 B}.$$

Ersetzen wir nun noch die Anfangsbeschleunigung aus ihrem Zusammenhang mit der leicht messbaren Beschleunigungsspannung U_B (siehe Gleichung 2.1) erhalten wir unsere gesuchte Beziehung zwischen der Auslenkung D und dem Magnetfeld B :

$$\frac{L^2 + D^2}{2D} = \frac{1}{\sqrt{8U_B}} \sqrt{\frac{e_0}{m_0}} B \quad (2.2)$$

2.4. Experimentelle Bestimmung der spezifischen Elektronenladung

Die soeben hergeleitete Beziehung ermöglicht es uns auch die spezifische Elektronenladung unserer im Versuch vorkommenden Elektronen zu bestimmen.

$$\frac{e_0}{m_0} = \left(\frac{\frac{L^2 + D^2}{2D} \sqrt{8U_B}}{B} \right)^2 \quad (2.3)$$

2.5. Prinzip eines Kathodenstrahl-Oszillographen

Erweitert man eine Kathodenstrahlröhre um ein weiteres elektrisches Ablenssystem in x -Richtung, so kann man sie zu einem Kathodenstrahl-Oszillographen umfunktionieren. Legt man an das zweite Ablenssystem eine Sägezahnspannung an, erhält man eine gleichmäßige Bewegung des Leuchtflecks in horizontaler Richtung. Stehen nun noch Sägezahnspannung und die zu untersuchende Wechselspannung, angelegt an das vertikale Ablenssystem, in einem rationalen Verhältnis zueinander (Synchronisationsbedingung), so zeichnet der Kathodenstrahl-Oszillograph in einem kartesischen Koordinatensystem den Verlauf der Wechselspannung auf.

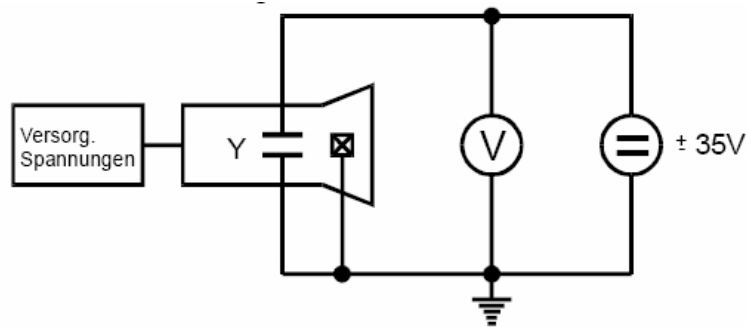


Abbildung 4: Schaltung der Kathodenstrahlröhre [1]

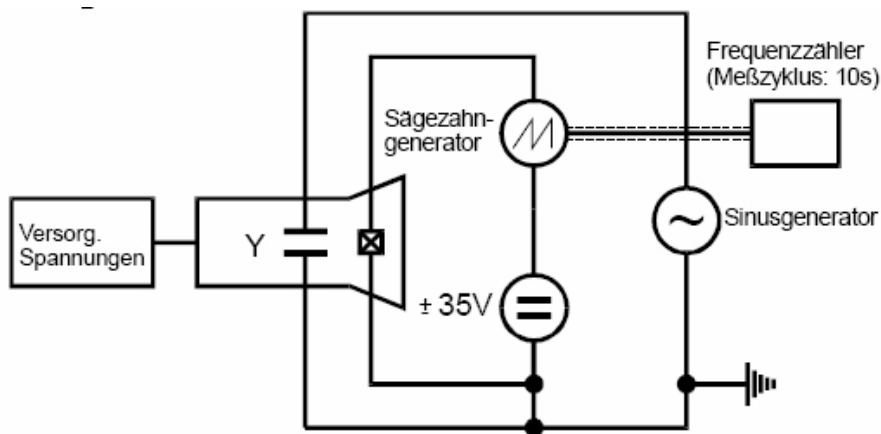


Abbildung 5: prinzipieller Aufbau eines Kathodenstrahl-Oszillographen [1]

2.6. Versuchsaufbau und Durchführung

Zunächst betrachten wir den Elektronenstrahl im elektrischen Feld: Hierzu wird die Kathodenstrahlröhre wie in Abbildung 4 angeschlossen. Wir regulieren bei konstanter horizontaler Ablenkspannung die vertikale Ablenkspannung so, dass unser Leuchtfleck nacheinander auf eine der neun äquidistanten ($\frac{1}{4}$ "") Gitterlinien unseres Koordinatennetzes trifft. Wir notieren die entsprechenden Spannungen und wiederholen diese Messreihe für fünf verschiedene Beschleunigungsspannungen. Im Anschluss bauen wir einen einfachen Kathodenstrahl-Oszillographen (siehe Abbildung 5). Wir legen an das Ablenkensystem in horizontaler Richtung eine Sägezahnspannung an und variieren diese, bis wir ein stehendes Bild auf dem Schirm erhalten. Dies geschieht genau dann, wenn Sägezahnspannung und die Sinusspannung des vertikalen Ablenkensystems in einem rationalen Verhältnis zueinander stehen. Wir notieren die Verhältnisse und die entsprechenden Sägezahnspannung um daraus die unbekannte Frequenz der Sinusspannung zu ermitteln. Desweiteren vermessen wir die maximale Auslenkung bei konstanter Beschleunigungsspannung U_B .

Im zweiten Teil unseres Versuches untersuchen wir den Verlauf des Elektronenstrahls in einem magnetischen Feld. Hierzu richten wir unseren Elektronenstrahl

in Richtung des Erdmagnetfeldes aus, die wir mit Hilfe eines Deklinatorium-Inklinatoriums ermitteln. Nun erzeugen wir mit Hilfe eines HELMHOLTZ-Spulenpaares ein homogenes Magnetfeld, abhängig vom Strom I , senkrecht zur Strahlrichtung. Über die Auslenkung D lässt sich daraus nach Gleichung 2.3 die spezifische Elektronenladung errechnen. Zum Schluss messen wir noch das Erdmagnetfeld, indem wir den Versuch wiederholen, jedoch an Stelle des Spulenpaares unsere Apparatur um 90° drehen, um eine maximale Ablenkung der Elektronen durch das Magnetfeld zu erhalten. Über die Auslenkung können wir dann die horizontale Komponente des Erdmagnetfeldes bestimmen. Zur Bestimmung der Totalintensität vermessen wir noch den Inklinationswinkel ϕ , also den Winkel zwischen Horizontalebene und Richtung des Erdmagnetfeldes.

3. Auswertung

3.1. Ablenkung im elektrischen Feld

3.1.1. Berechnung der Empfindlichkeit des Ablenkungssystems

Für fünf verschiedene Beschleunigungsspannungen U_B messen wir jeweils an acht Punkten des Gitternetzes (bei 500V nur an sieben Punkten, weil die Ablenkungsspannungen nicht mehr ausreichen, um alle Gitternetzlinien auf dem Leuchtschirm zu erreichen) die Ablenkungsspannung U_D , die nötig ist, um den Elektronenstrahl in y -Richtung auf die entsprechende Gitternetzlinie zu verschieben.

Wir führen eine lineare Regression mit den Größen D (Auslenkung auf der y -Achse in Metern) gegen U_D (Ablenkspannung in Volt) durch. Die Steigung der Ausgleichsgeraden ist dann die gesuchte Empfindlichkeit.

Für die Ausführung der Regressionsrechnungen benutzen wir das Auswertungsprogramm `GNUPlot`, das die Ausgleichsrechnung wie folgt durchführt: Eine lineare Funktion der Art $y = mx + b$ wird über die Parameter m (Steigung) und b (Achsenabschnitt) an die gemessenen Werte angepasst. Zur Optimierung des Fits dient als Gütekriterium die Funktion

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{y_i - f(x_i, a)}{\sigma_i} \right)^2$$

(hier beschreibt a die Parameter der zu fittenden Funktion) Für den linearen Fit bedeutet das konkret

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{y_i - b - mx_i}{\sigma_i} \right)^2$$

Diese Funktion der Summe der quadratischen Abstände ist zu minimieren. Durch einige Umformungen erhält man die endgültige Form

$$\hat{m} = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}$$
$$\hat{b} = \langle y \rangle - \hat{m} \langle x \rangle$$

Zu diesen Parametern gehören die Fehler
(Wobei zu beachten ist, dass durch das errechnete Model zwei Freiheitsgrade verloren gehen – es verbleiben $N - 2$.)

$$\sigma_m^2 = \frac{\frac{1}{N-2} \sum_i (f(x_i) - y_i)^2}{N (\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2)}$$

$$\sigma_b^2 = \frac{\langle x^2 \rangle \frac{1}{N-2} \sum_i (f(x_i) - y_i)^2}{N (\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2)}$$

Da diese Rechnungen im folgenden Protokoll automatisch durch das Auswertungsprogramm erfolgen, entfallen die Zwischenrechnungen.

Der Abstand zwischen den Gitternetzlinien auf dem Leuchtschirm beträgt $d_{\text{Gitter}} = 0.25'' = 0.00635\text{m}$ (Diese Größe wird in der gesamten folgenden Auswertung benutzt). Wir erhalten also die Ablenkung D in Metern mit folgender Rechnung (D_n ist die Anzahl der Gitternetzlinien von der obersten an gezählt)

$$D = 0.00635\text{m} \cdot D_n$$

Die Tabelle 1 zeigt die von uns gemessenen Ablenkspannungen für die jeweiligen Auslenkungen D bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen U_B . Mit diesen

Tabelle 1: Gemessene Ablenkspannungen für verschiedene Beschleunigungsspannungen

	$U_B =$	300 V	350 V	400 V	450 V	500 V
Netzlinie	D[m]	U_D [V]	U_D [V]	U_D [V]	U_D [V]	U_D [V]
0	0.00000	22.80	26.60	30.30	34.70	–
1	0.00635	17.60	20.40	23.50	26.10	28.70
2	0.01270	12.00	14.00	15.90	17.70	19.70
3	0.01905	6.50	7.60	8.50	9.50	10.60
4	0.02540	1.10	1.20	1.00	1.30	1.40
5	0.03175	-4.30	-5.50	-6.40	-7.10	-7.80
6	0.03810	-10.00	-11.90	-13.80	-15.50	-17.30
7	0.04445	-15.70	-18.50	-21.50	-24.10	-26.70
8	0.05080	-21.30	-25.10	-29.00	-32.40	-36.00

Daten führen wir nun mit `GNUPlot` eine lineare Regression durch (Abbildung 6 zeigt die zugehörigen Plots), die uns die Empfindlichkeiten mit Ungenauigkeiten liefert.

Mit den in der Tabelle 2 aufgeführten Werten $1/U_B$ und D/U_D führen wir erneut eine lineare Regression (hierzu auch Abbildung 7) durch, um die Steigung mit dem Geometriewert $\frac{pL}{2d}$ zu vergleichen. Bei der Ausgleichsrechnung berücksichtigen wir, dass die Empfindlichkeiten bereits fehlerbehaftet waren, eine Gewichtung mit diesen Fehlern also sinnvoll ist. Wir erhalten dann als errechnete Steigung m :

$$m = 0.34320\text{m} \pm 0.00634\text{m}$$

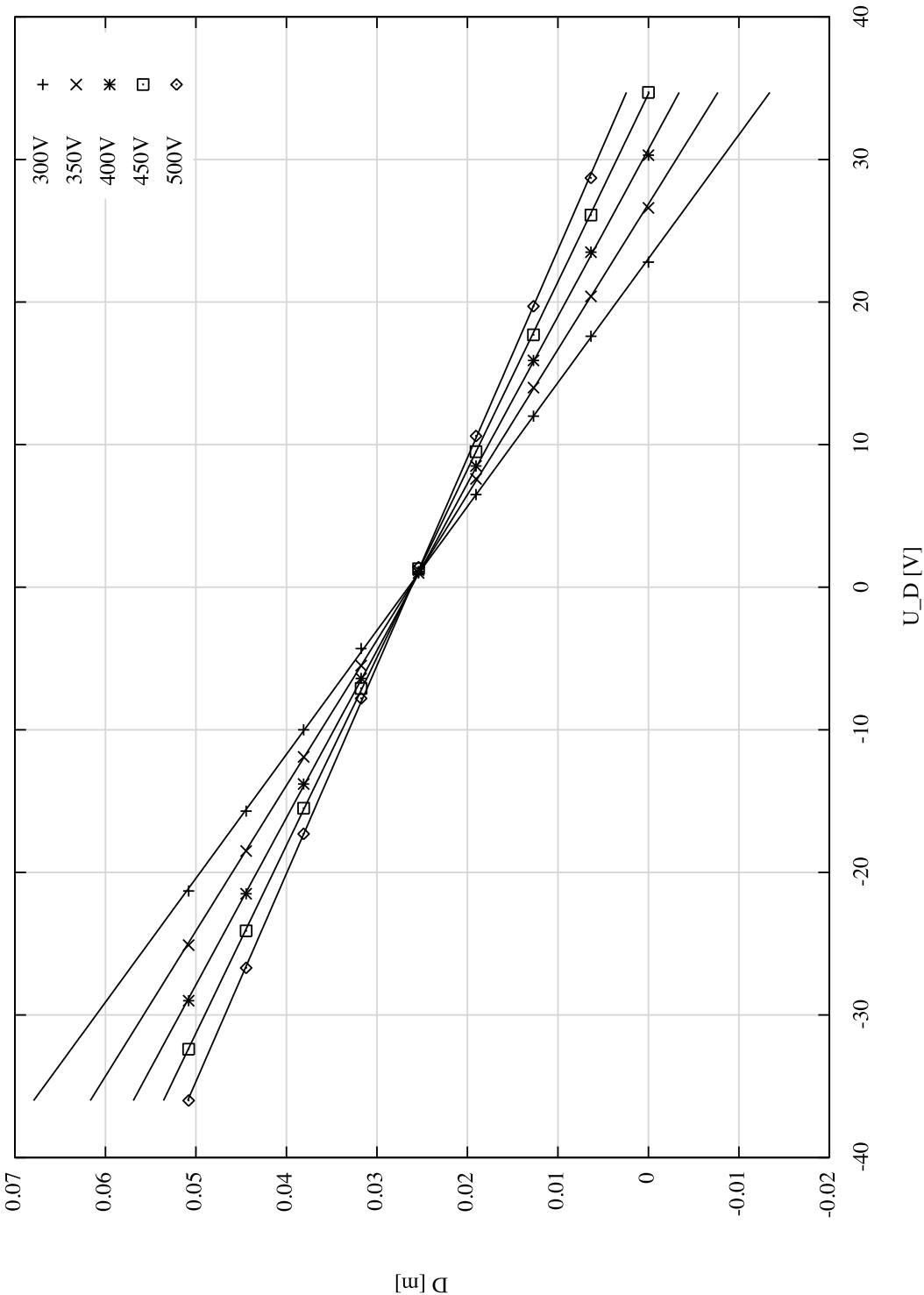


Abbildung 6: Gemessene Ablenkung D aufgetragen gegen die Ablenkspannung U_D

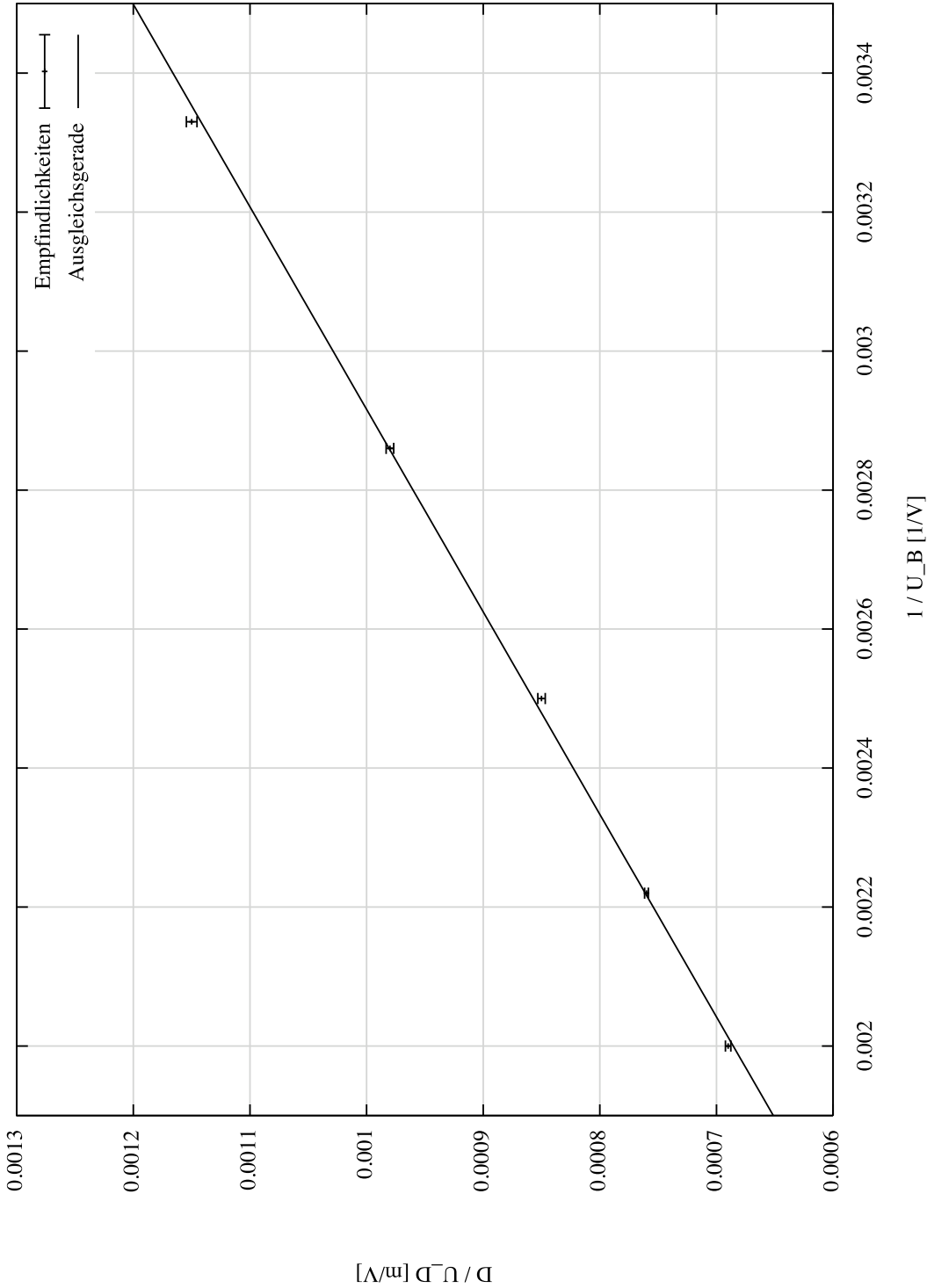


Abbildung 7: Lineare Regressionsrechnung zur experimentellen Bestimmung der Geometrie konstante $\frac{pL}{2d}$

Tabelle 2: Die errechneten Empfindlichkeiten bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen U_B

U_B [V]	$1/U_B$ [1/V]	D/U_D [m/V]
300	0.00333	$0.00115 \pm 4.55 \cdot 10^{-6}$
350	0.00286	$0.00098 \pm 3.25 \cdot 10^{-6}$
400	0.00250	$0.00085 \pm 3.16 \cdot 10^{-6}$
450	0.00222	$0.00076 \pm 1.62 \cdot 10^{-6}$
500	0.00200	$0.00069 \pm 2.32 \cdot 10^{-6}$

Für den Vergleich mit dem Theoriewert entnehmen wir der Konstruktionszeichnung der Röhre (Abbildung 10) die Größen p (Länge der Ablenkplatte), L (Strecke vom Ablenkkondensator zum Leuchtschirm) und d (Abstand der Kondensatorplatten). Diese abgelesenen Größen sind

$$d = 0.0038\text{m}$$

$$p = 0.019\text{m}$$

$$L = 0.143\text{m}.$$

Der theoretische Wert ist dann

$$\frac{pL}{2d} = 0.35750\text{m}.$$

Der Unterschied zwischen dem gemessenen und dem theoretischen Wert ist 4%.

3.1.2. Bestimmung der Frequenz des Sinusgenerators und Ermittlung des Scheitelwerts der Sinusspannung

Bei rationalen Verhältnissen der Frequenzen der Sinus- und Sägezahngeneratoren kann man ein stehendes Bild auf dem Leuchtschirm beobachten. Wir erreichen diese Situation für verschiedene Frequenzverhältnisse und notieren die eingestellte Sägezahnfrequenz. Die Messungen führen wir mit einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 520\text{V}$ durch. Eine lineare Regression liefert die gesuchte Frequenz

Tabelle 3: Bei diesen Frequenzen des Sägezahngenerators kann man ein stehendes Bild auf dem Leuchtschirm beobachten.

Frequenzverhältnis	Sägezahnfrequenz f [Hz]
0.5	39.85
1.0	79.71
2.0	159.36
3.0	239.00

des Sinusgenerators (Abbildung 8):

$$f_{\text{Sinus}} = 79.66\text{Hz} \pm 0.01\text{Hz}$$

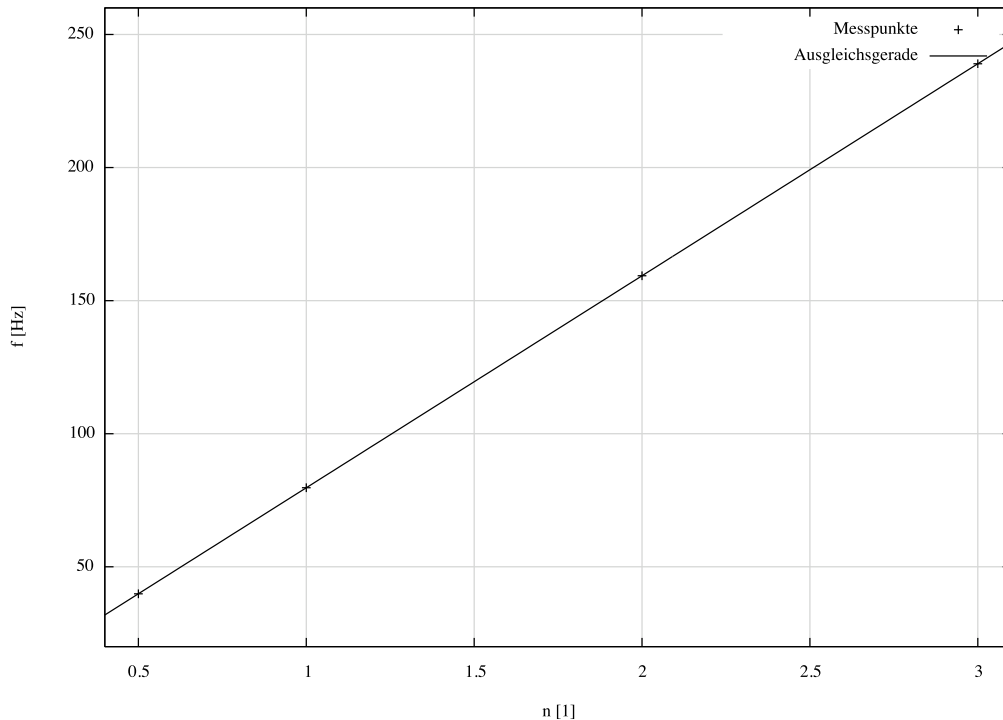


Abbildung 8: Lineare Ausgleichsrechnung zur Errechnung der Frequenz des Sinusgenerators (n ist das Frequenzverhältnis)

Bei der Durchführung des Oszilloskopteils des Versuchs benutzten wir leider eine Beschleunigungsspannung $U_B = 520\text{V}$, für die wir keine Empfindlichkeit gemessen haben; diese benötigen wir jedoch für die Berechnung des Scheitelwerts. Da allerdings ein sehr genauer linearer Zusammenhang zwischen $1/U_B$ und der Empfindlichkeit besteht (s. Abbildung 7), ermitteln wir die hier zu benutzende Empfindlichkeit für $U_B = 520\text{V}$ mit einer linearen Ausgleichsrechnung:

$$D/U_D = 0.00066 \frac{\text{m}}{\text{V}}$$

Die gemessene Höhe der gesamten Figur, also die doppelte Amplitude, ist $4.5''$, umgerechnet $D = 0.02858\text{m}$. Benutzen wir den halben Wert für die Amplitude, erhalten wir dann als Scheitelspannung

$$U_{\text{Scheitel}} = 21.65\text{V}.$$

Den Fehler auf diese Größe können wir nicht konkret angeben, mindestens muss jedoch ein Fehler in der Größenordnung des Fehlers der Empfindlichkeitsmessung angenommen werden.

3.2. Ablenkung im magnetischen Feld

Für die Messungen im Magnetfeld benutzen wir zur Generierung des Feldes eine HELMHOLTZ-Spule mit $n = 20$ Windungen und einem Radius $r = 0.282\text{m}$. Die benutzte Kathodenstrahlröhre ist baugleich zu der im letzten Teil benutzten.

3.2.1. Bestimmung der spezifischen Elektronenladung

Die Werte für das Magnetfeld berechnen wir mit Hilfe der Formel für die HELMHOLTZ-Spule (μ_0 ist die magnetische Permeabilitätskonstante, n die Windungszahl, r der Spulenradius und I der Strom):

$$B = \mu_0 \frac{8}{\sqrt{125}} \cdot \frac{nI}{r}$$

Da gemäß der Gleichung 2.2 im Theorieteil ein linearer Zusammenhang zwischen $D/(D^2 + L^2)$ ($L = 0.175\text{m}$ ist die Strecke, auf der das Magnetfeld die Elektronen beeinflusst) und B besteht, können wir erneut eine lineare Regression durchführen, um diese Größe zu bestimmen. Durch Umstellen erhalten wir dann die gesuchte spezifische Elektronenladung. Für die beiden benutzten Spannungen kommen

Tabelle 4: Messergebnisse für die Ablenkung im Magnetfeld

Netzlinie	D[m]	I[A]	B[T]	$\frac{D}{D^2+L^2}$ [1/m]
$U_B = 250\text{V}$				
1	0.00635	0.26250	0.00002	0.20707
2	0.01270	0.57800	0.00004	0.41252
3	0.01905	0.91500	0.00006	0.61476
4	0.02540	1.25000	0.00008	0.81228
5	0.03175	1.53000	0.00010	1.00370
6	0.03810	1.86000	0.00012	1.18778
7	0.04445	2.24000	0.00014	1.36346
8	0.05080	2.50000	0.00016	1.52986
$U_B = 500\text{V}$				
1	0.00635	0.40000	0.00003	0.20707
2	0.01270	0.86000	0.00005	0.41252
3	0.01905	1.33000	0.00008	0.61476
4	0.02540	1.76000	0.00011	0.81228
5	0.03175	2.24000	0.00014	1.00370
6	0.03810	2.70000	0.00017	1.18778
7	0.04445	3.17500	0.00020	1.36346

wir dann auf folgende Steigungen m der Geraden:

$$\begin{aligned}
 m_{250} &= 9478.99 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{T}} \pm 135.30 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{T}} \\
 &= 9478.99 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{T}} \pm 1.43\% \\
 m_{500} &= 6656.27 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{T}} \pm 205.70 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{T}} \\
 &= 6656.27 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{T}} \pm 3.09\%
 \end{aligned}$$

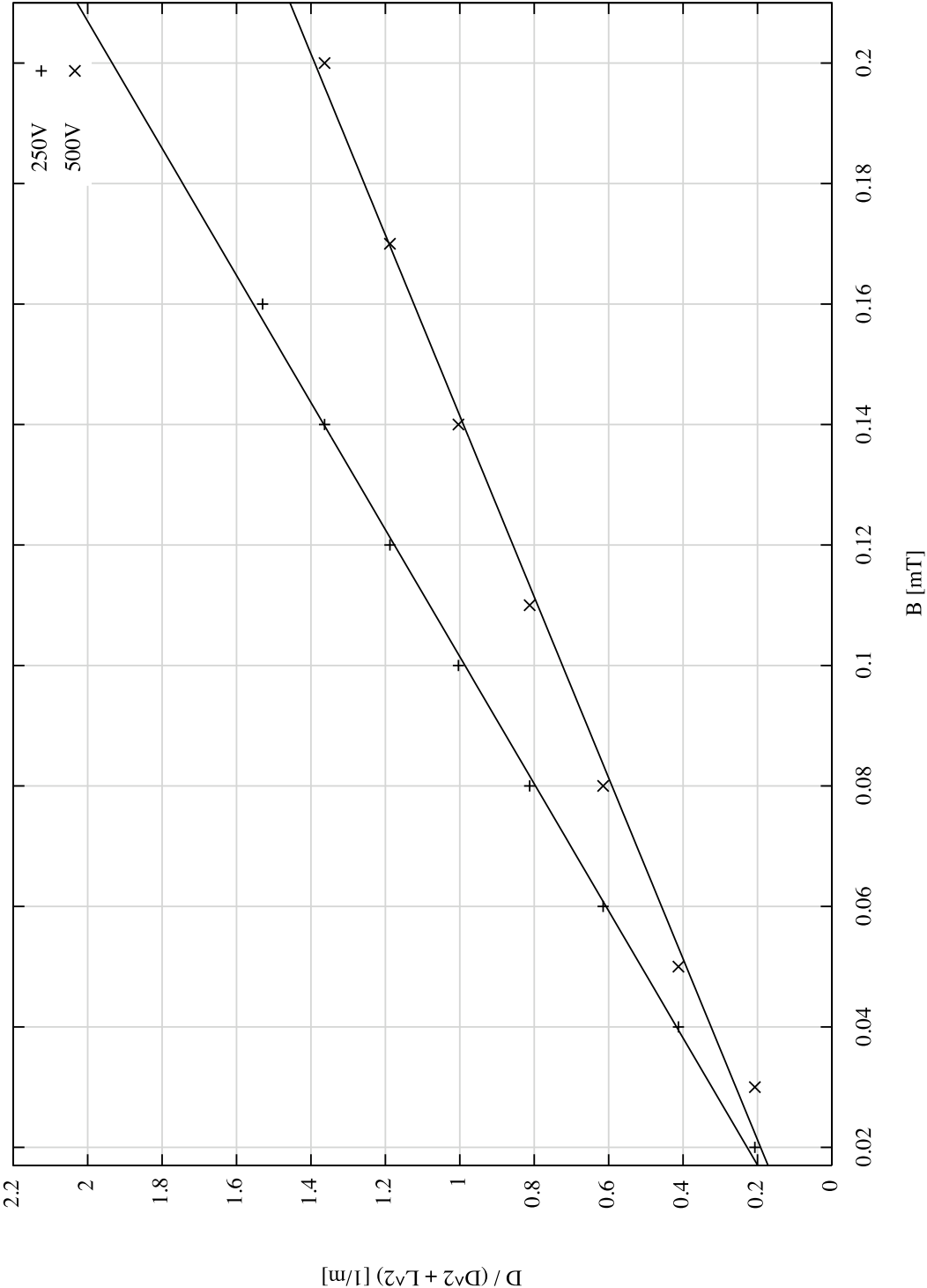


Abbildung 9: Lineare Regression für die Ablenkung im Magnetfeld

Damit kommen wir mit Gleichung 2.3 auf folgende spezifischen Elektronenladungen (der relative Fehler ist doppelt so groß wie der relative Fehler auf die Steigung):

$$\left(\frac{e_0}{m_0}\right)_{250V} = (1.80 \pm 0.05) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$
$$\left(\frac{e_0}{m_0}\right)_{500V} = (1.77 \pm 0.11) \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Auf den für $U_B = 250V$ gemessenen Wert erhalten wir also eine relative Ungenauigkeit von 2.85%. Der Wert für $U_B = 500V$ ist mit einer Ungenauigkeit von 6.18% behaftet. Ein Literaturwert aus [2] für die zu ermittelnde Größe ist

$$\left(\frac{e_0}{m_0}\right)_{Lit} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Beide Messwerte liegen also recht nahe am Literaturwert, der bei $U_B = 250V$ gemessene Wert kommt allerdings nicht ganz bis an den Referenzwert innerhalb der errechneten Ungenauigkeit. Die Abweichung des Werts für $U_B = 250V$ zum Literaturwert beträgt allerdings trotzdem nur 2.3%, die Abweichung des errechneten Werts für eine Beschleunigungsspannung von $U_B = 500V$ ist nur 0.6%.

3.2.2. Bestimmung des Erdmagnetfeldes

Bei einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 200V$ gleichen wir das Erdmagnetfeld mit einem HELMHOLTZ-Magnetfeld mit dem Strom $I = 0.1975A$ aus. Der abgelesene Winkel ist $\phi = 70^\circ$. Mit der bekannten Formel für das Magnetfeld und der Berücksichtigung des Winkels erhalten wir dann

$$B_{Erde} = \mu_0 \frac{8}{\sqrt{125}} \cdot \frac{nI}{r \cos \phi}$$
$$= 3.68 \cdot 10^{-5} T$$

Der Wert liegt innerhalb des (sehr groben) Referenzwertes von $B = (3 \text{ bis } 6) \cdot 10^{-5} T$. Abweichungen sind jedoch erklärbar durch die großen Fehler beim Ablezen des Winkels sowie durch evtl. vorhandene Störfeldern in der Umgebung der Messapparatur.

A. Anhang

A.1. Literatur

- [1] Die Abbildungen im Theorieteil stammen aus der Versuchsanleitung (<http://bernars-lee.physik.uni-dortmund.de/praktikum/AP-Anleitungen/INHALTneu.htm>).
- [2] Horst Kuchling, Taschenbuch der Physik (Fachbuchverlag Leipzig), 18. Auflage

A.2. Messdaten

Angefügt in Kopie.

B. Konstruktionszeichnung

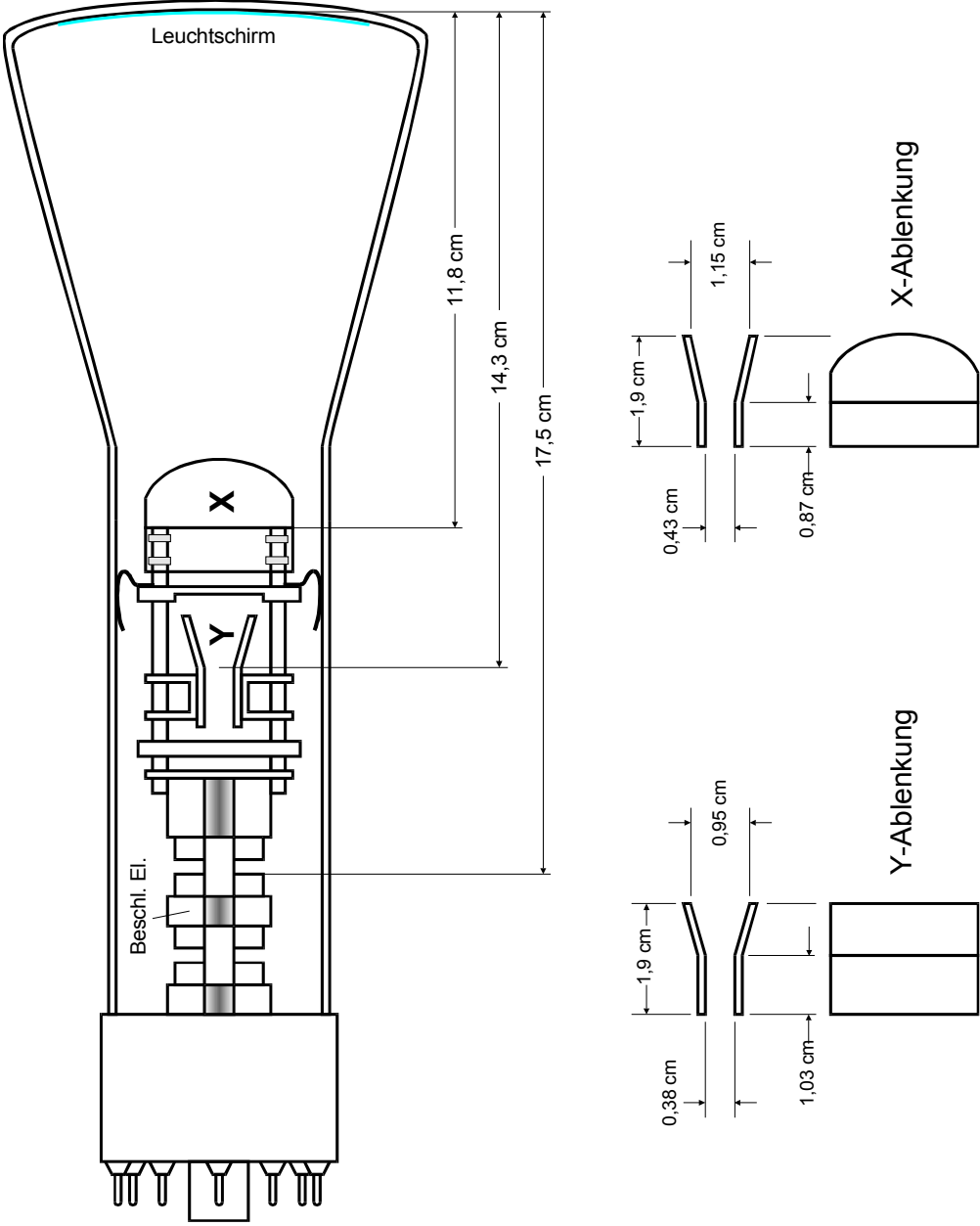


Abbildung 10: Konstruktionszeichnung der benutzten Elektronenstrahlröhre