



Technische Universität München
TUM School of Education

TUM Science Labs

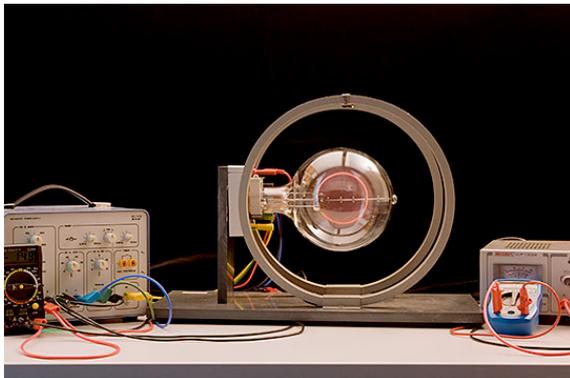
Gefördert durch die

Deutsche Telekom Stiftung



Bestimmung der spezifischen Elektronenladung (SEL)

Versuch im Physikalischen Anfängerpraktikum



Bearbeitet von:

Verena Kratzer und Christian Clemens

Stand: 5. Dezember 2011

Organisation

Dieses Angebot eignet sich besonders für Schüler/-innen der gymnasialen Oberstufe, die Physik als naturwissenschaftliches Fach gewählt haben. Es handelt sich hierbei um ein Experiment, welches Bezug auf den Abschnitt: „Bewegung geladener Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern“ des bayerischen Lehrplans nimmt. Die vorliegende Anleitung folgt daher den Ausführungen des Schulbuchs *Metzler Physik* und setzt die dort erarbeiteten Grundlagen voraus.

Die jeweiligen Versuchsaufbauten sind für eine Gruppenstärke von sechs bis neun Personen ausgelegt. Deswegen ist es zu empfehlen den Versuch mit einer Führung am „Maier-Leibnitz-Laboratorium“ zu kombinieren, da so insgesamt zwölf bis 18 Personen teilnehmen können. Größere Gruppen mit bis zu 36 Personen sind auch möglich, und werden auf zwei unterschiedliche Versuche aufgeteilt.

Ziele

Die Schüler/-innen lernen

- den Aufbau eines Versuchs im Physikalischen Anfängerpraktikum,
- das selbständige Experimentieren,
- das Protokollieren ihres Experiments und
- die Auswertung eines selbständig durchgeführten Experiments.

Arbeitsunterlagen und -mittel

Die Bearbeitung der gestellten Aufgaben erfordert die folgenden Arbeitsunterlagen und -mittel, die die Schüler/-innen am Besuchstag bitte selbst mitbringen: diese Versuchsanleitung, einen Schreibblock sowie Stifte, einen Taschenrechner und ggf. eine Digitalkamera oder ein Mobiltelefon mit Photofunktion zur Illustration der gemeinsamen Ausarbeitung. (USB-Kabel und ein Kartenlesegerät stehen zur Verfügung.)

Zeitplan

Der Tagesablauf eines Science Labs besteht aus einer Versuchsdurchführung (90 min) und einer Führung an einem Forschungsinstitut (90 min) am Vormittag, sowie der Auswertung des Versuchs (2,5 h) im Mathematik-Rechnerraum am Nachmittag. Das Programm beginnt somit üblicherweise um 9 Uhr und endet um 16 Uhr, wobei eine halbstündige Mittagspause vorgesehen ist. Der detaillierte Zeitplan hängt jedoch stark von der Gruppengröße ab und muß daher individuell festgelegt werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	4
1.1. Vorwissen	4
1.2. Grundlagen	5
1.2.1. Bewegung eines geladenen Teilchens im elektrischen Feld	5
1.2.2. Bewegung eines geladenen Teilchens im magnetischen Feld	5
1.2.3. Magnetisches Feld in einem Helmholtz-Spulenpaar	6
2. Versuchsaufbau	7
3. Versuchsdurchführung	8
4. Versuchsauswertung	9

1. Einführung

1.1. Vorwissen

Folgende Begriffe sollten Ihnen für diesen Versuch geläufig sein:

- Bestimmung der Elementarladung (Millikan-Versuch)
- Begriff des elektrischen und magnetischen Felds
- Bewegung von Elektronen im elektrischen und magnetischen Feld und zugehörige Kräfte
- Aufbau und Funktion eines Fadenstrahlrohrs

Sie sollten folgende Fragen beantworten können:

- Was ist die physikalische Ursache eines elektrischen sowie eines magnetischen Felds?
- Wie werden geladene Teilchen im elektrischen Feld qualitativ abgelenkt und wie lautet die zugehörige Formel?
- Wie werden geladene Teilchen im magnetischen Feld qualitativ abgelenkt und wie lautet die zugehörige Formel?
- Was ist der glühelektrische Effekt und welche Schwelle muß für diesen im Material überwunden werden?
- Wie ist ein Fadenstrahlrohr grundlegend aufgebaut?
- Wozu werden Heizspannung, Beschleunigungsspannung und die Spannung am Wehneltzylinder bei einem Fadenstrahlrohr benötigt?

Zusatzfragen:

- Wie hoch ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum?
- Wann müssen Sie relativistisch rechnen? Welche relativistischen Phänomene sind bei diesem Versuch zu erwarten?

Recherchieren Sie vor dem Praktikum:

- Abhängigkeit der kinetischen Energie von Gasteilchen von der Temperatur
- Stärke und Richtung des Erdmagnetfelds in München

1.2. Grundlagen

1.2.1. Bewegung eines geladenen Teilchens im elektrischen Feld

Durchläuft ein geladenes Teilchen mit der Ladung q den Weg s im elektrischen Feld E mit der Spannung U_B , so gewinnt es die kinetische Energie

$$E_{\text{kin}} = q \cdot U_B . \quad (1.1)$$

Ist das Teilchen zu Beginn in Ruhe, dann gilt bei nichtrelativistischer Rechnung

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 , \quad (1.2)$$

wobei m die Masse und v die Geschwindigkeit des Teilchens ist. Durch Gleichsetzen der Energien (Gl. 1.1 und Gl. 1.2) erhält man die Geschwindigkeit v , die das Teilchen nach Durchlaufen der Beschleunigungsspannung U_B hat, zu

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{q}{m} \cdot U_B} . \quad (1.3)$$

1.2.2. Bewegung eines geladenen Teilchens im magnetischen Feld

Auf ein Teilchen mit der Ladung q , das sich mit der Geschwindigkeit v in einem Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte B bewegt, wirkt die Lorentz-Kraft F_L . Es gilt sofern die Richtung der Geschwindigkeit senkrecht zu den Magnetfeldlinien steht:

$$F_L = q \cdot v \cdot B . \quad (1.4)$$

Die Lorentz-Kraft wiederum steht senkrecht sowohl zu B als auch zu v , d.h. es ändert sich nur die Richtung der Geschwindigkeit, nicht aber ihr Betrag! Die Lorentz-Kraft verschwindet, wenn sich das geladene Teilchen in Richtung des Magnetfelds bewegt.

Betrachtet man nun den Spezialfall eines homogenen, statischen Magnetfelds B , mit der zusätzlichen Annahme, dass v senkrecht auf B steht, dann bewegt sich das Teilchen auf einer Kreisbahn. Die Lorentz-Kraft F_L ist stets auf den Kreismittelpunkt gerichtet, ihr Betrag ist

$$F_L = |q| \cdot v_n \cdot B , \quad (1.5)$$

wobei v_n der Betrag der Geschwindigkeit (senkrecht zu B) ist. Für die Zentripetalkraft F_n auf das Teilchen gilt außerdem

$$F_n = \frac{m \cdot v_n^2}{r} , \quad (1.6)$$

wobei m die Masse des Teilchens und r der Radius der Kreisbahn ist. Durch Gleichsetzen der beiden Kräfte (Gl. 1.5 und Gl. 1.6), erhält man als Beziehung für die spezifische Ladung des Teilchens

$$\frac{|q|}{m} = \frac{v_n}{B \cdot r} . \quad (1.7)$$

Wurde die Geschwindigkeit v_n durch Beschleunigung in einem elektrischen Feld erreicht, so ergibt sich aus Gl. 1.7 durch Einsetzen von Gl. 1.3 und anschließendem Quadrieren

$$\frac{q}{m} = \frac{2 \cdot U_B}{B^2 \cdot r^2} \quad (1.8)$$

Für Elektronen ist $q = -e$ (Elementarladung e). Deswegen muss die Polung der Beschleunigungsspannung U_B entsprechend ausgewählt werden. Nun muss nur noch das Magnetfeld auf direkt messbare Größen zurückgeführt werden.

1.2.3. Magnetisches Feld in einem Helmholtz-Spulenpaar

In diesem Versuch wird das Magnetfeld durch ein Leiterschleifenpaar erzeugt:

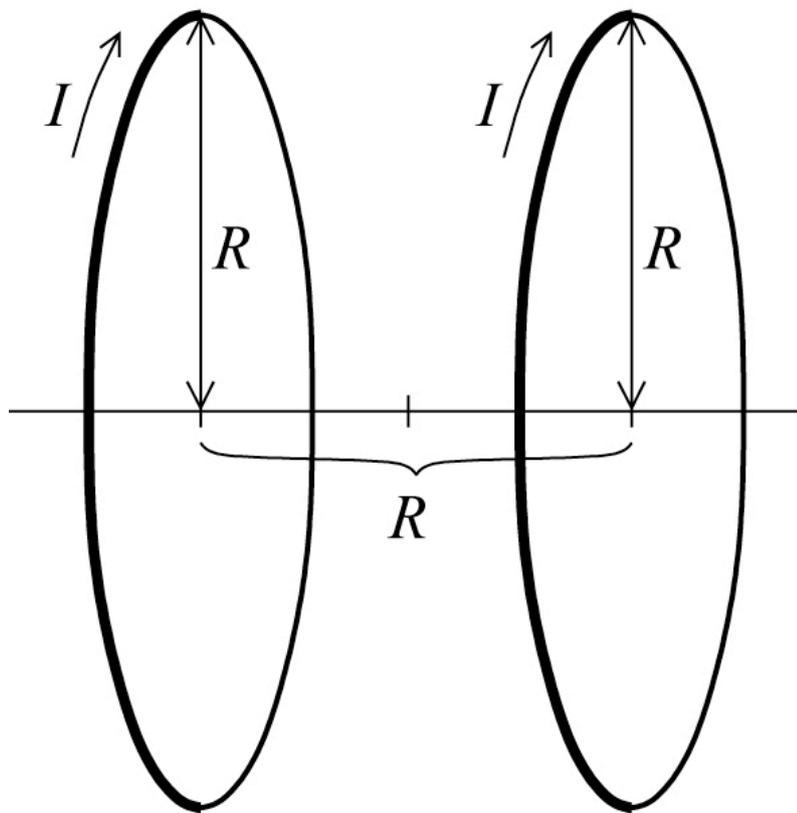


Abb. 1: Geometrie des Helmholtz-Spulenpaars

Durch die geschickte Kombination zweier Spulen kann man erreichen, dass auch außerhalb der Achse in einem gewissen Bereich das Magnetfeld achsenparallel und nahezu homogen verläuft. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Anordnung eines Helmholtz-Spulenpaars zu. Darunter versteht man zwei gleiche Spulen (Radius R , Windungszahl N), die im Abstand ihres Radius positioniert sind (vgl. Abb. 1), und gleichsinnig vom Strom I durchflossen werden. Die Abmessungen der Spulen müssen klein gegenüber ihrem Radius sein, so dass sie als kreisförmige Stromfäden genähert werden können. Das Feld jeder einzelnen Spule ist inhomogen. Durch die Überlagerung beider Felder ergibt sich zwischen beiden Spulen nahe der Spulenachse ein Bereich mit weitgehend homogenem Magnetfeld, der für Experimente zugänglich ist.

Die magnetische Flussdichte B für den relevanten Bereich berechnet sich nach:

$$B = \mu_0 \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot N \cdot \frac{I}{R} = I \cdot \alpha \quad (1.9)$$

mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$ (magnetische Feldkonstante). Die magnetische Flussdichte B ist direkt proportional zum Spulenstrom I (Proportionalitätsfaktor α).

2. Versuchsaufbau

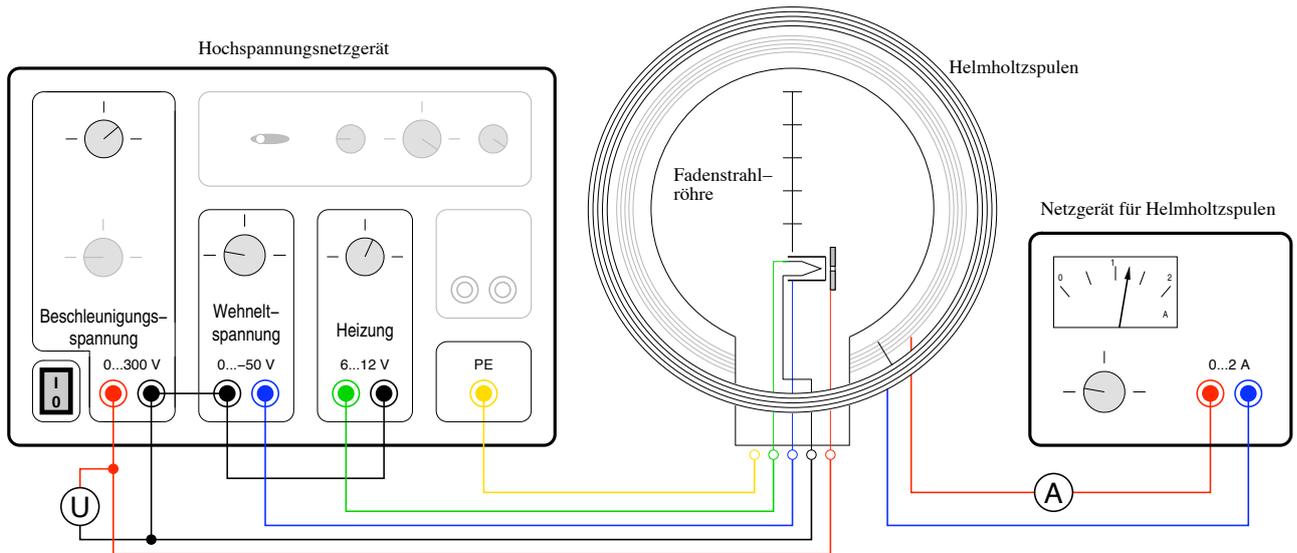


Abb. 2: Versuchsaufbau e/m

Mit Gl. 1.8 und Gl. 1.9 kann die spezifische Ladung e/m des Elektrons bestimmt werden, wenn man die Beschleunigungsspannung U_B , den Strom I durch die Helmholtzspulen und den Bahnradius r der Elektronen misst. Verwenden Sie hierzu den Versuchsaufbau in Abb. 2:

Ein Fadenstrahlrohr ist ein physikalischer Versuchsaufbau bei dem sich beschleunigte Elektronen aufgrund der Lorentz-Kraft, die ins Innere des Fadenstrahlrohrs gerichtet ist, auf einer Kreisbahn bewegen. Beim Zusammenstoßen mit Gasmolekülen entsteht Licht, welches die Bahn der Elektronen sichtbar macht.

Das Fadenstrahlrohr ist ein dünnwandiger (Vorsicht, empfindlich!), evakuierter Glaskolben mit einer Elektronenkanone. Diese besteht aus einer indirekt beheizten Oxidkathode, einem Wehneltzylinder (eine zylinderförmige Steuerelektrode zur Regelung der Helligkeit in Kathodenstrahlröhren und zum Fokussieren des Elektronenstrahls) und einer Lochanode. Aus der Kathode treten Elektronen aus, die zur positiv geladenen Anode hin beschleunigt werden. Durch ein Loch in der Anode verlassen die Elektronen das Strahlerzeugungssystem und werden im Wehneltzylinder gebündelt.

Die Anschlüsse der Elektroden sind nach außen geführt und werden mit dem Hochspannungsnetzgerät gemäß Abb. 2 verbunden. Um den Elektronenstrahl sichtbar zu machen, befindet sich im Glaskolben Neongas bei einem Restdruck von etwa 1,3 Pa (Pascal). Die Bestimmung des Fadenstrahldurchmessers erfolgt durch Messmarken, die im Kolben angebracht sind.

Das Fadenstrahlrohr befindet sich in einem Helmholtzspulenpaar, dessen Magnetfeldstärke eingestellt werden kann. Die Spulen werden an ein zweites Netzteil angeschlossen, über das der Spulenstrom geregelt wird. Die hier verwendeten Spulen haben jeweils $N = 130$ Windungen und einen Radius $R = 150$ mm.

3. Versuchsdurchführung

In der Wissenschaft ist das Erstellen eines detaillierten Versuchsprotokolls sehr wichtig, denn es macht den Ablauf Ihrer Arbeit für eine spätere Auswertung nachvollziehbar. Ebenso ist eine lückenlose Dokumentation wichtig, falls ein Experiment z.B. aufgrund neuer Erkenntnisse wiederholt werden soll. Auch können bei längeren Experimenten Probleme auftauchen, und Ihre Partner müssen die genaue Vorgeschichte nachlesen können. So ist in erster Linie der Inhalt des Protokolls wichtig, nicht seine äußere Form. Allerdings soll es auch für andere nachvollziehbar sein und muß deshalb übersichtlich und sauber geführt werden.

Skizzieren Sie zunächst den Versuchsaufbau sowie ggf. einen Schaltplan und beschriften Sie die Zeichnung mit relevanten Informationen (z.B.: Abmessungen, verwendete Substanzen, ...). Alle weiteren Eintragungen in Ihr Versuchsprotokoll müssen zeitnah und deshalb während der Versuchsdurchführung erfolgen: Schreiben Sie sich hierzu wichtige Beobachtungen auf und dokumentieren Sie alle erforderlichen Versuchsparameter (z.B.: Ströme, Spannungen, Widerstände, ...) zusammen mit den Einstellungen der Netzteile und Messgeräte (z.B.: Strom-, Spannungsbereiche, Wechsel- oder Gleichspannung, ...). Vergessen Sie dabei bitte nicht Ihre Messwerte aufzuschreiben! Notieren Sie sich ferner auch Ideen bzw. Dinge, die Sie nicht verstehen.

Aufbauen der Instrumente

Hinweis: Bitte gehen Sie mit den Versuchsaufbauten vorsichtig um!

Schließen Sie das Fadenstrahlrohr und die Helmholtzspulen gemäß Abb. 2 an. Stellen Sie zunächst eine Beschleunigungsspannung von $U_B \approx 300$ V und eine Heizspannung von $U_H \approx 7,5$ V ein. Der Elektronenstrahl sollte dann durch ein schwaches, bläuliches Licht sichtbar sein.

Stellen Sie nun die Spannung am Wehneltzylinder so ein, dass ein möglichst dünnes, scharf begrenztes Strahlenbündel zu sehen ist. Die Schärfe und Helligkeit des Strahlenbündels lässt sich über die Heizspannung weiter optimieren.

ACHTUNG: Durch eine zu hohe Heizspannung (> 10 V) kann das Gerät beschädigt werden! Die Auswirkungen der Heizspannung sind erst leicht verzögert sichtbar, also vorsichtig und geduldig einstellen!

Erhöhen Sie nun langsam den Spulenstrom. Der Elektronenstrahl müsste sich jetzt krümmen und sich schließlich zu einem Kreis schließen. Falls sich der Elektronenstrahl auf die Kolbenwand zu krümmt (nach außen), muss der Spulenstrom umgepolt werden. (**ACH-**

TUNG: Nur bei ausgeschaltetem Netzteil umstecken!

Messreihen

Es sollen zwei Messreihen, eine bei konstantem Magnetfeld und eine bei konstanter Beschleunigungsspannung, aufgenommen werden.

1. Für die Bahnradien $r = 30, 40$ und 50 mm und für ein konstantes Magnetfeld (Spulenstrom $I \approx 1,3$ A) ist die benötigte Beschleunigungsspannung U_B jeweils 10-mal zu bestimmen.
2. Für die Bahnradien $r = 30, 40$ und 50 mm und für eine konstante Beschleunigungsspannung $U_B \approx 100 - 150$ V ist die benötigte Stromstärke I durch die Magnetfeldspulen jeweils 10-mal zu bestimmen.

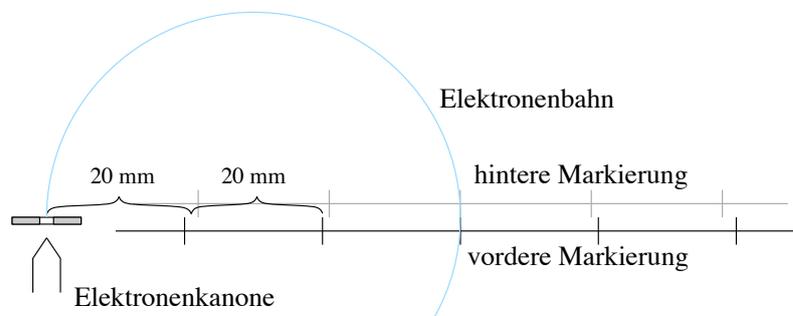


Abb. 3: Skizze zum Einstellen der Bahnradien

Um einen Bahnradius einstellen zu können sind im Kolben zwei Drähte mit Markierungen angebracht. Die Markierungen haben jeweils 20 mm Abstand, die Nullposition befindet sich bei der Elektronenkanone.

Man blickt so durch den Kolben, dass die vordere und hintere Markierung übereinanderliegen. Dann stellt man die variable Größe (Spulenstrom bzw. Beschleunigungsspannung) entsprechend ein, dass die Elektronenbahn durch die Markierungslinie geht (vgl. Abb. 3).

Achten Sie jedes Mal darauf, dass Sie die Bahnradien auch wirklich neu einstellen, und nicht nur 10-mal Spannung oder Strom ablesen! Es sollen statistische Schwankungen durch Mehrfachmessung ermittelt werden und nicht 10-mal die gleiche Abweichung gemessen werden.

4. Versuchsauswertung

Auf Fachkonferenzen ist es üblich, die eigenen Forschungsergebnisse durch einen Vortrag und ein detailliertes Poster im Format DIN A0 zu präsentieren (vgl. Abb. 4). Diese Poster müssen inhaltlich fehlerfrei sein sowie optisch ansprechend und übersichtlich gestaltet werden, damit ein(e) Konferenzteilnehmer/-in zum Lesen angeregt wird und zudem das Wesentliche in kurzer Zeit erfassen kann. Ein solches Poster gliedert sich deswegen in

- eine aussagekräftige Überschrift,

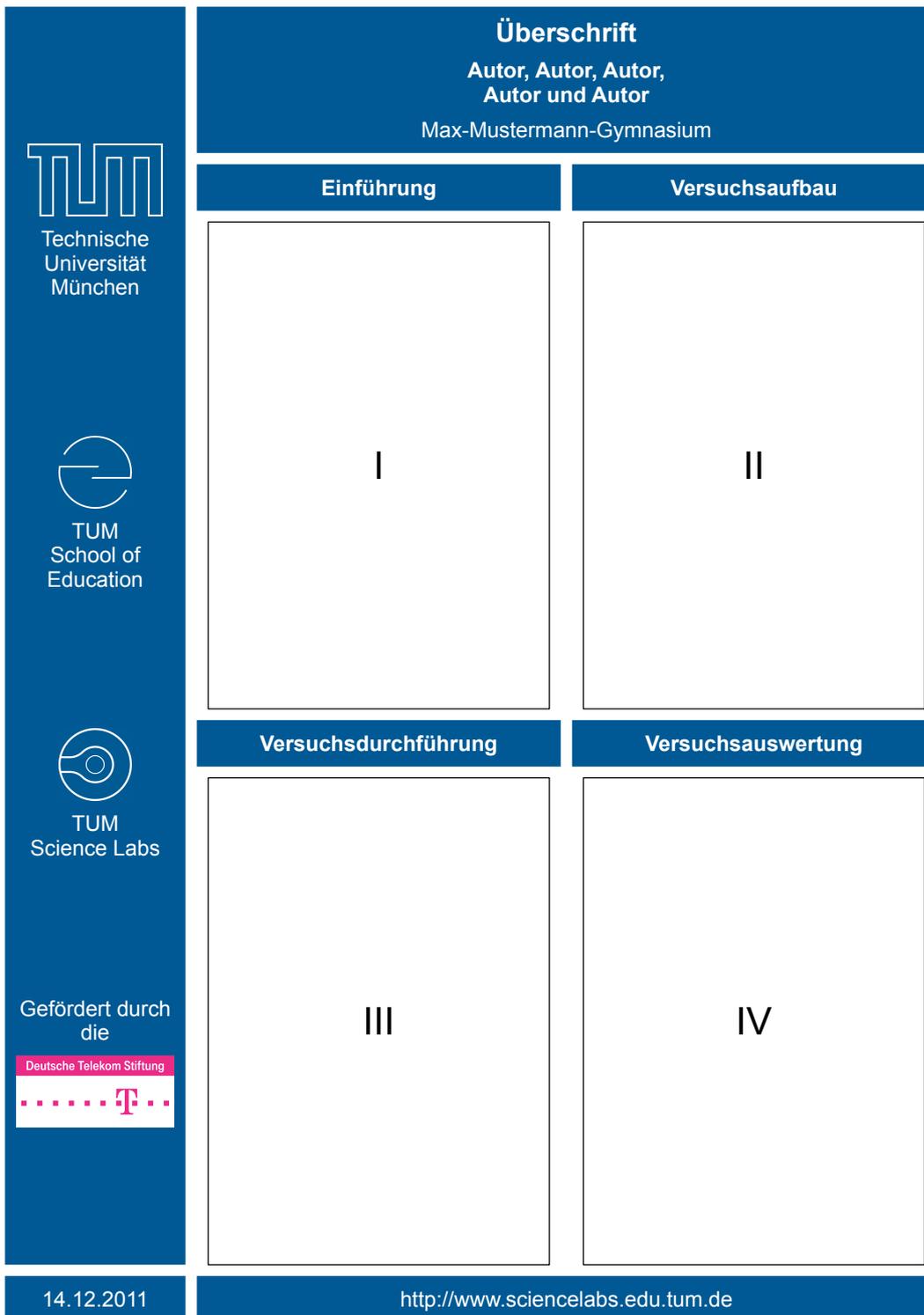


Abb. 4: Forschungspräsentation: Struktur und Aufbau eines Posters

- eine alphabetisch sortierte Autorenliste (z.B.: A. Bugl, C. Clemens, ...),
- eine Auflistung der beteiligten Forschungsinstitute bzw. Gymnasien,
- eine Einführung in die physikalischen Grundlagen des Versuchs (I),
- eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus u.a. anhand von Skizzen und Schaltplänen (II),

- eine Erläuterung der Versuchsdurchführung mit wichtigen Beobachtungen, allen erforderlichen Versuchsparametern und einer tabellarischen Aufstellung der Messwerte (III) sowie
- eine Versuchsauswertung mit Angabe der verwendeten Formeln, einer Beschreibung der angewandten Methoden (Wie haben Sie die Daten ausgewertet?), einer übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse anhand von Diagrammen sowie einer Diskussion bzw. Interpretation der Ergebnisse, wobei letzteres eine physikalische Erklärung der gemachten Beobachtungen und mögliche Folgerungen, die aus den gewonnenen Ergebnissen gezogen werden können, umfasst (IV).

Diese vorgegebene Struktur hat sich über die Jahre hinweg bewährt und wird deswegen in der Forschung bevorzugt verwendet.

Fertigen Sie als Versuchsauswertung bitte ein solches Poster an und gehen Sie dazu wie nachfolgend beschrieben vor:

1. Überlegen Sie sich zunächst gemeinsam eine aussagekräftige Überschrift und versetzen Sie sich dabei in die Lage des Forschenden, der bzw. die auf seine bzw. ihre neuartige Entdeckung aufmerksam machen möchte.
2. Öffnen Sie dann ein neues OpenOffice-Textdokument und notieren Sie sich darin die Überschrift auf die Sie sich geeinigt haben.
3. Erstellen Sie im gleichen Dokument eine vollständige Namensliste der beteiligten Schüler/-innen und fügen Sie diesem Dokument auch den Namen Ihres Gymnasiums bei.
4. Speichern Sie nun dieses Dokument unter der Kurzbezeichnung des Versuchs (z.B.: SEL.odt) ab.
5. Überlegen Sie sich jetzt, wie Sie sich die Abschnitte I bis IV untereinander aufteilen. Jedes Team erstellt im Anschluss daran für seinen Abschnitt ein zweites OpenOffice-Textdokument. Übernehmen Sie für dieses Dokument die Standardvorgaben von OpenOffice und ändern Sie nur folgende Einstellungen:
 - Papierformat: Breite: 30,09 cm, Höhe: 43,26 cm, Ausrichtung: Hochformat
 - Seitenränder: links, rechts, oben und unten: 0,00 cm
 - Schrift: -art: Arial, -größe: 48 pt, -stil: normal, -farbe: schwarz
 - Absatzausrichtung: Blocksatz

Speichern Sie am Ende dieses Dokument unter der Kurzbezeichnung des Versuchs und der Nummer des bearbeiteten Abschnitts (z.B.: SEL I.odt) ab.

6. Die weitere Gestaltung und der genaue Inhalt Ihres Abschnitts ist frei und somit Ihnen überlassen. Bemühen Sie sich jedoch Ihren Abschnitt vollständig auszufüllen bzw. den vorhandenen Platz komplett auszunutzen.

Versuchen Sie sich beim Formulieren möglichst prägnant und unmissverständlich auszudrücken. Diskutieren Sie jedoch die physikalischen Grundlagen, den Versuchsaufbau, Ihre Beobachtungen und Messungen sowie Ihre Vorgehensweise und Ergebnisse ausführlich. Beantworten Sie zudem die Fragestellungen der Versuchsanleitung und formulieren Sie deutlich die Zielsetzung (d.h. Sinn und Zweck) des Versuchs.

Fügen Sie zur Veranschaulichung ausreichend Skizzen, Photos, Messwerttabellen und Diagramme ein.

Denken Sie bei der Gestaltung des Posters daran, daß es sich um eine Forschungspräsentation handelt mit der Sie auf Ihre Ergebnisse aufmerksam machen wollen und vor allem Interesse an Ihrer Arbeit wecken möchten.

7. Der Praktikumsleiter wird aus den einzelnen Abschnitten ein gemeinsames Poster im Format DIN A0 zusammenstellen und es Ihnen sobald wie möglich als Datei sowie ausgedruckt per Post zuschicken. Sie können es dann in Ihrem Klassenzimmer oder in Ihrer Schule aufhängen.

Aufgaben

1. In Kap. 1.2. wurde immer nichtrelativistisch gerechnet. Beurteilen Sie, ob das gerechtfertigt ist.

Bestimmen Sie dazu die Geschwindigkeit, die ein Elektron beim Durchlaufen der höchsten im Versuch verwendeten Beschleunigungsspannung von -300 V erreicht. Vergleichen Sie die erreichte Elektronengeschwindigkeit mit der Lichtgeschwindigkeit.

Hinweis: Ab etwa 10% der Lichtgeschwindigkeit werden relativistische Effekte relevant.

2. Bei der Berechnung der kinetischen Energie der Teilchen, die diese beim Durchlaufen der Beschleunigungsspannung erreichen, betrachtet man die Näherung, dass die Teilchen zu Beginn in Ruhe sind. Wie groß darf die thermische Energie bzw. die Temperatur der aus der Glühkathode emittierten Elektronen höchstens sein, dass ihre Anfangsgeschwindigkeit kleiner als 1% der errechneten Endgeschwindigkeit ist? Gehen Sie hier von einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 100\text{ V}$ aus.

Die Temperatur einer Glühkathode liegt bei etwa $T = 1000^\circ\text{C}$. Diskutieren Sie dies in Zusammenhang mit Ihrer Rechnung.

3. Wie erklären Sie sich, dass das Erdmagnetfeld einen zu kleinen Einfluß hat?

Graphische Auswertung

Tragen Sie für die graphische Auswertung alle Messpunkte in einem Diagramm so auf, dass die gesuchte Größe e/m aus einer Ausgleichsgeraden bestimmt werden kann. Überlegen Sie sich dazu, welche Größen Sie wie gegeneinander auftragen müssen, dass eine lineare Abhängigkeit entsteht.

Hinweis: Zunächst müssen die Punkte ins Diagramm eingezeichnet werden. Danach zeichnet man die Geraden mit minimaler und maximaler Steigung ein, sodass alle Punkte von beiden Geraden eingeschlossen werden. Die mittlere Steigung ergibt das Ergebnis. Die kleinste sowie die größte Steigung repräsentieren die statistischen Schwankungen und somit den Messfehler.

Hilfestellung:

1. Die Beschleunigungsspannung U_B wird als konstant angenommen.

Verwendet man $B = I \cdot \alpha$ aus Gl. 1.9 und stellt man Gl. 1.8 um, so erhält man:

$$\frac{q}{m} \cdot I^2 = \frac{2 \cdot U_B}{\alpha^2 \cdot r^2}. \quad (4.1)$$

Dies entspricht der Gleichung einer Ursprungsgeraden $y = m \cdot x$ mit $m = \frac{q}{m}$, $x = I^2$ und $y = \frac{2 \cdot U_B}{\alpha^2 \cdot r^2}$.

2. Der Spulenstrom I wird als konstant angenommen.

Verwendet man $B = I \cdot \alpha$ aus Gl. 1.9 und stellt man Gl. 1.8 um, so erhält man:

$$\frac{q}{m} \cdot \frac{1}{U_B} = \frac{2}{\alpha^2 \cdot I^2 \cdot r^2}. \quad (4.2)$$

Dies entspricht der Gleichung einer Ursprungsgeraden $y = m \cdot x$ mit $m = \frac{q}{m}$, $x = \frac{1}{U_B}$ und $y = \frac{2}{\alpha^2 \cdot I^2 \cdot r^2}$.