FACHBEREICH PHYSIK DER UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN

Physikalisches Praktikum

für

Chemiker und Biologen

Teilnehmer:

____

Ausgabe: Herbst 2000

Herausgeber: Dr. Kurt Jung

Grafiken: Ingeborg Wollscheid
Gestaltung und Satz: Matthias Jung

Inhaltsverzeichnis

Anleitung zum Physikalischen Praktikum für Anfänger

Allgemeines

1. Das Praktikum findet von 9.00 – 12.00 Uhr bzw. von 13.00 – 16.00 Uhr (oder 14.00 – 17.00 Uhr) statt (Festlegung in der Vorbesprechung).

2. Während der Praktikumszeit sind Betreuer anwesend, die den Praktikumsteilnehmern bei Problemen zur Versuchsvorbereitung und zur Versuchsdurchführung helfen.

3. Zu Beginn der Aufgabe prüft der Betreuer, ob sich die AP-Teilnehmer hinreichend vorbereitet haben. Ist dies nicht der Fall, darf die Aufgabe an diesem Tag nicht durchgeführt werden.

4. Nach Abschluss der Messungen ist das Protokollheft dem Betreuer zum Zwischentestat (Stempel mit Unterschrift) vorzulegen. Aufgaben ohne Zwischentestat sind ungültig und müssen wiederholt werden.

5. Anschließend sind die Protokollhefte möglichst schnell auszuarbeiten und beim Betreuer abzugeben. Dieser sieht die Hefte durch, prüft in einem Gespräch den Stoff der Aufgabe und erteilt das Haupttestat.

6. Versäumt eine Gruppe eine Aufgabe, so hat sich diese Gruppe bei dem entsprechenden Betreuer und im Einvernehmen mit Herrn Stabel um einen Ersatztermin zu bemühen.

Hinweise zur Versuchsvorbereitung

1. Durchlesen der Anleitung. Der Fragenkatalog in den Aufgabenanleitungen hilft, sich in die physikalische Problematik des Versuches einzuarbeiten.

2. Vertrautmachen mit den wichtigsten Begriffen, insbesondere mit den zu messenden Größen.

3. Feststellen, welche Messgeräte benötigt werden, Messprinzip verstehen.

4. Den Versuchsaufbau, soweit möglich, zuvor anschauen.

5. Vertieftes Verständnis des Versuchs und des Messprinzips. Was wird wie und womit gemessen, was wird wo und wie abgebildet etc. Hintergrundwissen erarbeiten, vertieftes Literaturstudium, Theorie.

6. Messprogramm entwickeln. Überlegung, wie oft und wie genau die vorkommenden Größen gemessen werden sollten (Fehlerfortpflanzung beachten).

7. Protokoll (Teil 1 – 5) vorbereiten.

Schema des Protokolls

1. *Name* und *Nr.* des Versuchs, *Datum* der Ausführung

2. *Aufgabenstellung:* Stichwortartig aus der Versuchsanleitung übernehmen.

3. *Theorie des Experiments:* Knappe Zusammenfassung der wichtigsten Definitionsgleichungen und der für die Durchführung und Auswertung des Experiments erforderlichen Formeln. Fehlerfortpflanzungsformeln für die zu messenden Größen (schriftliche Ausarbeitung im Protokollheft). Umfang 2 – 3 Seiten.

4. *Skizze* (schematisch) des Versuchsaufbaus mit stichwortartiger Beschreibung.

5. *Messprogramm* (was wird wie und womit gemessen?)

6. *Tabellen, Messwerte, graphische Darstellung* mit Dimensionsangaben, Bezeichnung und Typ der verwendeten Messgeräte und deren Genauigkeit.

7. *Auswertung*

8. *Fehlerbetrachtung*

9. Endergebnis mit Fehlerangabe (lt. Aufgabenstellung)

10. Kurze Diskussion der Ergebnisse und der erreichten Genauigkeit.

Arbeitsschritte 1 – 5 vor Beginn des Versuchs erledigen. Arbeitsschritt 6 am Versuchstag, danach Vortestat. Arbeitsschritte 7 – 10 können nach dem Praktikum erledigt werden, müssen jedoch vor dem Haupttestat abgeschlossen sein.

Weitere Angaben zur Protokollführung

Die Anfertigung eines Protokolls ist wesentlicher Bestandteil der Versuchsdurchführung. Die Qualität der Protokollführung geht in die Beurteilung mit ein.

1. Jeder Teilnehmer benötigt (mindestens) zwei Protokollhefte. Jeder Teilnehmer führt ein eigenes Versuchsprotokoll. Benutzen Sie nur gebundene karierte Hefte DIN A4 (keinerlei(!) fliegende Blätter).

2. Das Protokoll soll es jemandem mit ähnlicher Ausbildung ermöglichen, Ihren Versuchsablauf vollständig nachzuvollziehen. Der Text kann stichwortartig sein. Die Angaben müssen jedoch eindeutig und ohne Mühe lesbar sein. Inhaltliche Klarheit ist wichtiger als gutes Aussehen.

3. Bei umfangreichen Messdaten reicht es, diese einmal zu protokollieren. Der zweite Übungsteilnehmer kann z. B. eine Kopie in sein Protokollheft kleben. Dagegen ist auch bei gemeinsamer Ausarbeitung eine Kopie des gesamten Protokolls nicht statthaft.

4. Graphische Darstellung von Messergebnissen per Hand auf Millimeterpapier, ggf. auch log oder log-log Papier. Man sollte von der Möglichkeit Gebrauch machen, gewisse funktionale Zusammenhänge linear darzustellen. Man benutze möglichst einen solchen Maßstab, dass Geraden unter 45° laufen. Messpunkte werden als Kreuze (+) dargestellt (keine Pünktchen). Die Größe der Kreuze soll den Fehler andeuten. An den Koordinatenachsen ist anzugeben, welche Messgröße dargestellt wird und in welchen Einheiten. Eine Bildunterschrift gehört zur graphischen Darstellung.

5. Zu besorgen ist: Millimeterpapier DIN A4 (etwa 1/2 Block) und Halblog-Papier (3 – 4 Dekaden) (nur wenige Blätter). Nur Original Papier verwenden! Keine Kopie!

Hinweise zur Versuchsdurchführung

1. Mit Arbeitsplatz vertraut machen, Messung vorbereiten.

2. Eingangsgespräch mit Betreuer über Theorie und Messprogramm.

3. Bei elektrischen Geräten: Messbereiche prüfen. Nach Abnahme durch Betreuer Versuch einschalten.

4. Kontinuierlich Protokoll führen.

5. Stets genau überlegen, was das Ziel des nächsten Messschrittes ist.

6. Messen, verwendete Geräte, Messbereiche und Messgenauigkeit notieren.

7. Zwischenauswertung; graphische Darstellungen gleich anfertigen. Insbesondere bei längeren Messreihen empfiehlt sich eine kurze Probemessung.

8. Auswertung, Fehlerdiskussion. Die wichtigsten Formeln zur Fehlerdiskussion finden Sie z. B. in Kohlrausch Praktische Physik, Bd. 1, Kap. 1 – 2 und Westphal, Physik, Praktikum, Kap. 1, B.

9. Die Studenten sind angehalten, die im Praktikum aushängenden Sicherheitsvorschriften zu beachten.

10. Essen, Trinken und Rauchen ist in den Praktikumsräumen nicht gestattet.

Literatur

Der größte Teil der im AP durchgeführten Versuche kann anhand der Standard-Bücher der Einführungsvorlesungen verstanden werden. Benötigen Sie spezielle Zahlenwerte (Naturkonstanten, Stoffkonstanten), so können Sie nachschauen in: Kohlrausch, Praktische Physik; Handbook of Chemistry and Physics. Bei einigen Aufgaben wird Spezialliteratur benötigt, die in der Aufgabenanleitung angegeben ist. Alle benötigten Bücher finden Sie im Handapparat des AP, Raum 387.

Benotung

Die Gesamtnote im Praktikum setzt sich zu gleichen Teilen zusammen aus der Beurteilung für Versuchsdurchführungen und Ausarbeitungen, die wesentlich durch die Betreuer erfolgt, und einer Note aus der Abschlussprüfung über die physikalischen Grundlagen der Versuche beim Kursleiter. Ein benoteter Schein über die erfolgreiche Teilnahme am Praktikum wird ausgestellt, wenn beide Teilnoten besser oder gleich 4.3 sind.

M 1a Freie und erzwungene Schwingungen

Aufgabenbeschreibung

In dem Versuch sollen anhand von Drehschwingungen freie und erzwungene Schwingungen untersucht werden. Bei den freien Schwingungen sollen Begriffe wie Eigenfrequenz, Dämpfung, aperiodischer Grenzfall und Kriechfall veranschaulicht werden. Bei den erzwungenen Schwingungen soll die Schwingungsamplitude und die Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz gemessen und die Resonanzkatastrophe beobachtet werden.

Für technische Anwendungen ist z. B. die Manipulation von Resonanzkurven durch die Dämpfung von Interesse. Auf diese Art werden u. a. die Durchlasscharakteristiken von elektrischen Schwingkreisen bzw. Filtern für Wechselströme verändert. Im Automobilbau müssen alle schwingungsfähigen Systeme, z. B. Karosserie oder Motorbefestigung gedämpft werden, um Resonanzen und daraus resultierende Ermüdungserscheinungen des Materials oder eine schlechte Straßenlage zu vermeiden. In der Atomphysik lässt sich die Absorption von Licht durch die Resonanzen des Atoms erklären.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. 1, Kap. IV, 38
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 4
3. Feynmann: Vorl. über Physik, Bd. I, Kap. 23, 24-2
4. Kuypers: Klass. Mechanik, § 2.4 (Schwingungen)
5. Schäfer, Päsler: Einführung in die theoretische Physik, Bd. 1, Nr. 27 ff
6. Sommerfeld: Vorl. über theor. Physik: Mechanik, Kap. IV

Fragen zum Versuch

1. Was sind Schwingungen? Beispiele für schwingungsfähige mechanische Systeme. Was charakterisiert einen Schwingungsvorgang? (Periodizität, Schwingungsdauer, Amplitude, Energieumwandlung)
2. Definition von Trägheitsmoment, Winkelgeschwindigkeit, Winkelbeschleunigung, Winkelrichtgröße (bzw. Direktionsmoment), elastische Energie einer Feder, Rotationsenergie.
3. Differentialgleichung für ungedämpfte Drehschwingung, Herleitung und Lösungen. Wie hängt die Eigenfrequenz von vorgegebenen Größen ab? Wie hängt die Lösung von den Anfangsbedingungen φ_0 und $\dot{\varphi}_0$ ab?
4. Energieerhaltung bei der Drehschwingung. Wie verhalten sich kinetische und potentielle bzw. elastische Energie während der Schwingung?
5. Wodurch zeichnet sich eine harmonische Schwingung aus? Wie hängt die Rückstellkraft bei einer harmonischen Schwingung von der Auslenkung ab?
6. Wie macht sich die Dämpfung des Pendels bemerkbar? Was kann dämpfen?
7. Wie wird die Reibung in der Differentialgleichung berücksichtigt?
8. Wie sieht die Lösung für die gedämpfte harmonische Schwingung aus? Verifizieren Sie die Lösung einschließlich der Anfangsbedingung durch Einsetzen. Ändert sich die Eigenfrequenz der Schwingung?
9. Was zeichnet aperiodischen Grenzfall und Kriechfall aus?
10. Wie kann die Dämpfungskonstante experimentell ermittelt werden?
11. Was ist eine erzwungene Schwingung? Was ändert sich in diesem Fall an der Differentialgleichung? Diskutieren Sie die Lösung.
12. Skizzieren Sie den Verlauf der Schwingungsamplitude in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz? Welchen Einfluss hat die Reibung? Was geschieht bei verschwindender und bei sehr großer Reibung?

13. Wie hängt die Phasenverschiebung von der Frequenz und der Reibung ab?
14. Wie funktioniert eine Wirbelstrombremse?

Theoretische Grundlagen

Die Differentialgleichung für die freie, ungedämpfte Schwingung des Drehpendels lautet:

$$\Theta\ddot{\varphi} + D\varphi = 0 \tag{1}$$

mit Θ = Trägheitsmoment, D = Direktionsmoment oder Winkelrichtgröße und φ = Drehwinkel.

Die Lösung lautet: $\varphi(t) = A \cdot \sin \omega_0 t + B \cdot \cos \omega_0 t$, wobei die Konstanten A, B durch die Vorgabe von Drehwinkel $\varphi(0)$ und Drehgeschwindigkeit $\dot{\varphi}(0)$ zur Zeit $t = 0$ bestimmt werden. $\omega_0 = \sqrt{D/\Theta}$ ist die Resonanzfrequenz der ungedämpften Schwingung.

Im Fall des gedämpften Pendels wird Gleichung (1) ein geschwindigkeitsabhängiger Term hinzugefügt. Es ergibt sich die Differentialgleichung der freien, gedämpften Schwingung:

$$\Theta\ddot{\varphi} + r\dot{\varphi} + D\varphi = 0 \tag{2}$$

Der Proportionalitätsfaktor r wird Reibungskonstante genannt.

Die allgemeine Lösung dieser Gleichung lautet:

$$\varphi(t) = \mathrm{e}^{-\delta t}(A \cdot \mathrm{e}^{\beta t} + B \cdot \mathrm{e}^{-\beta t}) \tag{3}$$

Dabei ist $\delta = r/2\Theta$ und $\beta = \sqrt{\delta^2 - D/\Theta}$.

Man nennt δ die Dämpfungskonstante und den Kehrwert von δ die Dämpfungszeit $\tau = 1/\delta$. Nach der Zeit τ ist die Amplitude auf den e-ten Teil des Anfangswertes abgefallen. Bei der Lösung Gl. (3) unterscheidet man drei Fälle.

$$\begin{aligned} \beta^2 < 0 \quad &: \quad \text{Schwingfall}(\beta \text{ imaginär}) \\ \beta^2 = 0 \quad &: \quad \text{aperiodischerGrenzfall} \\ \beta^2 > 0 \quad &: \quad \text{Kriechfall} \end{aligned}$$

Schwingfall $\beta^2 < 0$

Wir setzen $\beta = \mathrm{i}\omega_R$ und erhalten: $\varphi(t) = \mathrm{e}^{-\delta t}(A \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega_R t} + B \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega_R t})$. ω_R ist die Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung.

Da $\omega_0^2 = D/\Theta$ ist, erhält man $\omega_R^2 = D/\Theta - \delta^2$. Mit der Anfangsbedingung $\varphi(0) = \varphi_0, \dot{\varphi}(0) = 0$ erhält man (nachrechnen!):

$$\varphi(t) = \mathrm{e}^{-\delta t}\varphi_0 \cos \omega_R t + \frac{\delta}{\omega_R} \sin \omega_R t$$

Wenn $\delta \ll \omega_R$, also bei schwacher Dämpfung, wird $\frac{\delta}{\omega_R}$ sehr klein und man kann schreiben:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \mathrm{e}^{-\delta t} \cos \omega_R t$$

Wenn $T = 2\pi/\omega_R$ die Periodendauer der gedämpften Schwingung ist, so wird

$$\delta \cdot T$$

das logarithmische Dekrement genannt.

Aperiodischer Grenzfall $\beta^2 = 0$

Aus Gl. (3) folgt mit den gleichen Anfangsbedingungen:

$$\varphi(t) = \varphi_0(1 + \delta t)\mathrm{e}^{-\delta t}$$

Das Drehpendel geht also nach der Auslenkung sofort ohne Schwingungen auszuführen, in die Nullage zurück. (Eine Anwendung findet man in Messgeräten, um unerwünschte Schwingungen des Zeigers zu unterdrücken.)

Kriechfall $\beta^2 > 0$

β ist reell und gemäß Gl. (3) nimmt der Ausschlag des Pendels nur exponentiell (nicht oszillierend) ab. Der Unterschied zwischen aperiodischem Grenzfall und Kriechfall liegt in der größeren Abklingzeit beim Kriechfall.

Erzwungene Schwingungen

Für die erzwungene gedämpfte Schwingung gilt:

$$\Theta\ddot{\varphi} + r\dot{\varphi} + D\varphi = D_0 \cos \omega t$$

D_0 ist ein Drehmoment und φ_0 ist jetzt die Amplitude des Erregers.

Es soll im folgenden nur der stationäre Endzustand betrachtet werden. Von Einschwingvorgängen wird abgesehen. (Bei kleiner Dämpfung des Drehpendels können im Versuch die Einschwingzeiten bis zu 6 Minuten betragen.) Die stationäre Lösung der obigen Gleichung ($t \to \infty$) lautet:

$$\varphi(t) = \frac{D \cdot \varphi_0}{[\Theta^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + r^2\omega^2]^{1/2}} \cdot \cos(\omega t - \psi)$$

ψ ist die Phasendifferenz zwischen dem erregenden Drehmoment und der Amplitude der erzwungenen Schwingung.

$$\tan \psi = \frac{\omega \cdot r}{\Theta(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

Der maximale Wert der Schwingung ($\cos(\omega t - \psi) = 1$) wird Amplitude genannt und ist abhängig von der erregenden Frequenz ω.

$$\frac{\varphi(\omega)}{\varphi_0} = \frac{D}{[\Theta^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + r^2\omega^2]^{1/2}}$$

Maximale Amplitude (Resonanz) tritt auf, wenn die Erregerfrequenz etwa gleich ω_0 ist. Genauer gilt bei Resonanz:

$$\omega_R^2 = \omega_0^2 - 2\delta^2$$

Maximale kinetische Energie dagegen tritt auf für

$$\omega^2 = \omega_0^2$$

(Nachprüfen!). Bei Abweichung von der Resonanzfrequenz nimmt die Amplitude schnell ab.

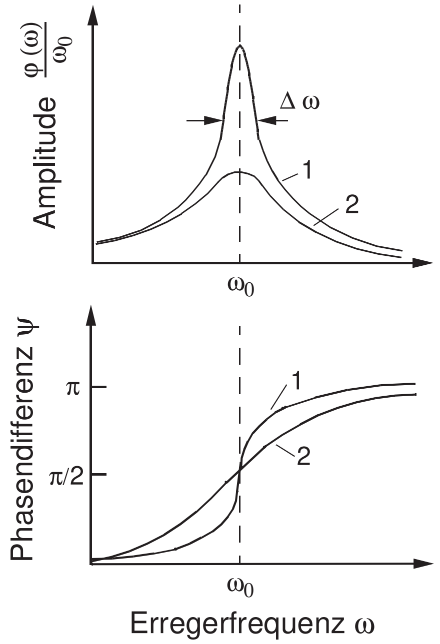


Abb. 1: Amplituden und Phasenlagen für erzwungene Schwingungen bei verschiedenen Dämpfungen

Ein Maß für die Schärfe des Maximums bei ω_R ist die so genannte Halbwertsbreite. Darunter versteht man den Abstand $\Delta\omega$ derjenigen Frequenzen ω_1 und ω_2, bei denen sich die Amplitude $\varphi(\omega)/\varphi_0$ gegenüber ihrem Maximalwert um einen Faktor $1/\sqrt{2}$ verringert hat. Die im System gespeicherte Energie ist proportional dem Quadrat der Amplitude und hat sich bei $\omega = \omega_{1,2}$ auf die Hälfte verringert. Bei schwacher Dämpfung gilt dann

$$\Delta\omega \simeq 2\delta = \frac{2}{\tau}$$

Halbwertsbreite und Dämpfungszeit τ sind einander umgekehrt proportional. Das Verhältnis von Maximalamplitude $\varphi(\omega_R)$ im Resonanzfall zur Amplitude φ_0 des Erregers wird Resonanzüberhöhung genannt. Es gilt bei kleiner Dämpfung (nachrechnen für $\omega_0 \simeq \omega_R$)

$$\frac{\varphi(\omega_0)}{\varphi_0} = \frac{D}{r\omega_0}$$

Die Resonanzüberhöhung wird auch Güte Q des Systems genannt. Es gilt

$$Q = \frac{D}{r\omega_0} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}$$

Im Fall verschwindender Dämpfung ($r \to 0$) strebt die Amplitude gegen unendlich. Es kommt dann zu der Resonanzkatastrophe, die dem schwingenden System ein Ende setzt.

Beschreibung des Versuchsaufbaus

Die Potentiometer am Motor sind überbrückt. Dafür steht ein stromstabilisiertes Netzgerät zur Verfügung mit dem die Feineinstellung der Drehzahl möglich ist. Zur Kontrolle von Spannung und Strom wird ein Vielfachmessgerät benutzt.

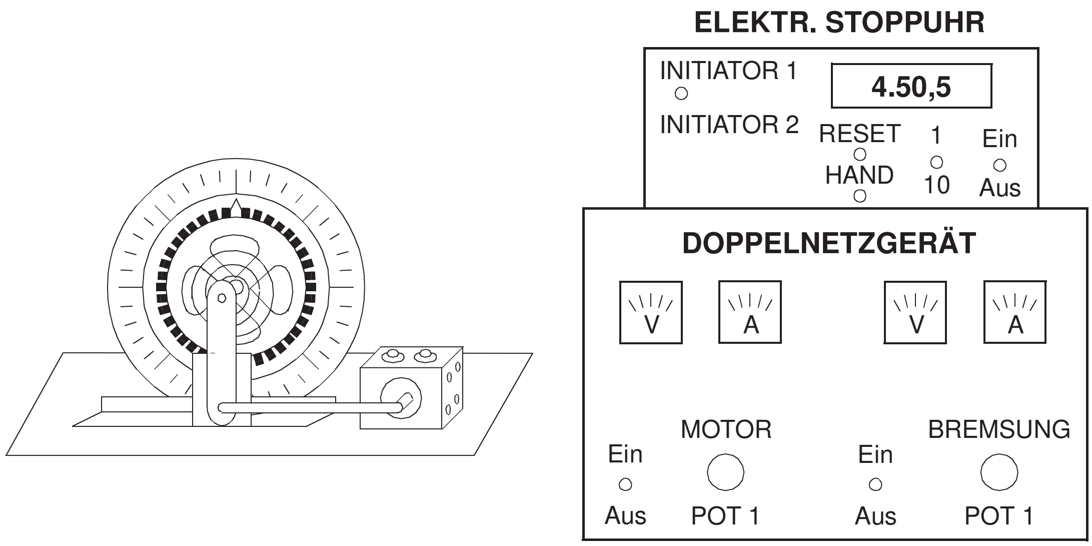


Abb. 2: Skizze des Versuchaufbaus

Mit einer elektronischen Stoppuhr wird sowohl die Eigenfrequenz des Oszillators als auch die Erregerfrequenz gemessen. Der Initiator I ist hinter dem Zeiger des Drehpendels befestigt, der Initiator II unter dem Exzenter.

Beachten Sie, dass die Initiatoren I und II sind auf gleiche Weise geschaltet sind.

Initiator I: Bei einer Schwingung kommt der Auslöser 2mal vorbei.
Initiator II: Bei einer Schwingung kommt der Auslöser 1mal vorbei.
Was folgt für die Anzahl der gemessenen Schwingungen?

Aufgabendurchführung

1. Bestimmen Sie die Eigenfrequenz $\omega_R \cong \omega_0$ der schwach gedämpften Schwingung (Spulenstrom $\mathrm{J} = 0$).

2. Messen Sie für die Stromstärken 0.2 A und 0.4 A die Abklingzeit τ der freien Schwingung. Hierzu wird die Amplitude φ als Funktion der Zeit bestimmt. Die Abhängigkeit $\varphi(t)$ liefert in einer halblogarithmischen Darstellung eine Gerade, die Steigung der Geraden ist proportional zum Kehrwert der Dämpfungszeit.

3. Realisieren Sie den aperiodischen Grenzfall und den Kriechfall. Geben Sie die Dämpfungsstromstärke für den aperiodischen Grenzfall an.

   Bei der Bestimmung des aperiodischen Grenzfalles und des Kriechfalles darf die Dämpfungsspule nur kurzzeitig belastet werden.

4. Bestimmen Sie die resonanzkurven der erzwungenen gedämpften Schwingungen für die Dämpfungsstromstärken $\mathrm{J}_1 = 0.2\,\mathrm{A}$, $\mathrm{J}_2 = 0.4\,\mathrm{A}$. Hierbei ist $\varphi(\omega)/\varphi_0$ gegen die Erregerfrequenz aufzutragen. Geben Sie außerdem durch Beobachtung und Rechnung die Phasendifferenz ψ an für die Fälle

   - $\omega \ll \omega_0$ (Erregerfrequenz klein gegen Eigenfrequenz)
   - $\omega = \omega_0$ (Erregerfrequenz gleich Eigenfrequenz)
   - $\omega \gg \omega_0$ (Erregerfrequenz groß gegen Eigenfrequenz)

   Ermitteln Sie die Halbwertsbreite $\Delta\omega$ der Resonanzkurven und zeigen Sie, dass $\Delta\omega \approx 2/\tau$ gilt.

Anmerkung zur Versuchsdurchführung

Zu 1: Messen Sie die Dauer von jeweils 10 Schwingungen. Wiederholen Sie die Messung mehrmals und mitteln Sie die Einzelmessungen

Zu 2: Lesen Sie den Ausschlag alle 2–6 Schwingungen ab (je nach Dämpfung) und nehmen Sie die Periodendauer $T = 2\pi/\omega_0$ als konstant an.

Zu 4: Lesen Sie jeweils den linken und rechten Ausschlag ab und bilden Sie den Mittelwert.

M 4a Viskosität

Aufgabenbeschreibung

Die Viskosität von Rizinusöl wird mit Hilfe der Kugelfall-Methode bestimmt. Das Hagen-Poiseuillesche Gesetz wird nachgeprüft und die kritische Reynolds-Zahl für eine Kapillare bestimmt.

Literatur

1. Gerthsen-Kneser-Vogel, 16. Aufl., Kap. 3.3, 5.4.6
2. Bergmann-Schäfer: Bd. 1, Kap. VI, Nr. 59
3. Alonso-Finn I, Kap. 7.10, Bd. II, Kap. 24.5
4. Grimsehl: Lehrbuch der Physik, Bd. 1
5. Kohlrausch: Praktische Physik 1 und 3
6. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap. 8

Fragen zum Versuch

1. Was versteht man unter den Begriffen: Viskosität, Kompressibilität und Strömung idealer Flüssigkeiten?
2. Erklären Sie mit Hilfe der Viskosität die Strömungswiderstände sowie die Begriffe Turbulenz und Grenzschicht.
3. Skizzieren Sie die Geschwindigkeitsverteilung laminarer und turbulenter Rohrströmung.
4. Diskutieren Sie die unterschiedlichen Formen von Strömungen.
5. Wie lautet das Hagen-Poiseuillesche Gesetz? Wie wird es hergeleitet und unter welcher Voraussetzung gilt es?
6. Wie lautet die Bewegungsgleichung der Kugel in einem viskosen Medium?
7. Dimensionen und Einheiten der Viskosität (dynamisch und kinematisch) und der Reynolds-Zahl.

8. Wie lautet das Reynoldsche Kriterium?
9. Beschreiben Sie die Kugelfallmethode.
10. Bedeutung der Viskosität in Technik und Medizin.
11. Was ist der Magnus-Effekt?
12. Skizzieren Sie die Stromlinien um einen Zylinder und eine Platte.
13. Warum stellt sich eine Platte stets senkrecht zu den Stromlinien?

Theoretische Grundlagen

Bewegt sich ein Körper in einem Gas oder einer Flüssigkeit, so entsteht eine seiner Bewegung entgegengerichtete Reibungskraft. Diese ist abhängig von der Form des Körpers, dessen Geschwindigkeit und der inneren Reibung (Viskosität) der Flüssigkeit. Um in einer Flüssigkeit eine ebene Platte parallel zu einer ebenen Wand im Abstand z mit konstanter Geschwindigkeit $\vec{v}$ zu führen, bedarf es einer Kraft

$$\vec{F} = \eta \cdot A \cdot \frac{\vec{v}}{z}$$

wobei A die Fläche der Platte ist. Man nennt η die Viskosität (oder dynamische Zähigkeit), eine stark temperaturabhängige Stoffkonstante. Außerdem definiert man $\nu = \eta/\varrho_{Fl}$ als kinematische Zähigkeit, wobei ϱ_{Fl} die Dichte der Flüssigkeit ist.

Für eine Kugel gilt bei laminarer Strömung und Gefäßdimensionen, die groß gegen den Kugelradius sind

$$\vec{F} = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot \vec{v}$$

mit dem Kugelradius r und der stationären Geschwindigkeit $\vec{v}$.

Für ein Rohr mit Radius R und $r \leq R$ wird der Ladenburgsche Korrekturfaktor eingeführt, so dass gilt:

$$\vec{F} = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot \vec{v} \cdot \left(1 + 2.4\frac{r}{R}\right)$$

Im stationären Fall gilt:

$$\text{Schwerkraft} - \text{Auftrieb} = \text{Reibungskraft}$$

$$m \cdot g - \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \varrho_{Fl} \cdot g = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \cdot \left(1 + 2.4\frac{r}{R}\right)$$

woraus sich mit der Dichte der Kugel ϱ_K für η ergibt:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot r^2 \cdot (\varrho_K - \varrho_{Fl})}{v \cdot \left(1 + 2.4\frac{r}{R}\right)} \tag{1}$$

Hagen-Poiseuillesches Gesetz

Strömt eine Flüssigkeit durch eine Kapillare, so gilt für das pro Zeiteinheit hindurch fließende Volumen im stationären Fall bei laminarer Strömung das Gesetz von Hagen-Poiseuille:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi r^4}{8\eta l}(p_2 - p_1) \tag{2}$$

Dabei ist r der Rohrradius, l die Rohrlänge und $(p_2 - p_1)$ die Druckdifferenz.

Wichtig ist hierbei die r^4-Abhängigkeit bei der Dimensionierung von Rohrleitungen.

Für die Druckdifferenz gilt:

$$p_2 - p_1 = \varrho \cdot g \cdot (h + l) \tag{3}$$

wobei h die Flüssigkeitshöhe im Behälter ist. Am Hagen-Poiseuilleschen Gesetz sind Korrekturen anzubringen, da die Flüssigkeit beim Einlauf in die Kapillare beschleunigt werden muss und das Geschwindigkeitsprofil zunächst nicht parabelförmig ist. Aus Gl. (2) und (3) folgt:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \varrho \cdot g(h + l)}{8l} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V} - \frac{\varrho}{8\pi l}\frac{\Delta V}{\Delta t} \tag{4}$$

wobei der zweite Term die oben erwähnte empirisch gefundenen Korrektur ist (Hagenbachsche Korrektur). Durch geeignete Wahl von

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$ und l kann man erreichen, dass die Korrektur vernachlässigbar ist. Ändert sich die Höhe h merklich während der Messung, so muss Gl. (2) integriert werden. Aus Gl. (2) und (3) folgt mit (A = Querschnitt des Behälters):

$$dV = -A\,dh$$

$$A\,dh = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \cdot \varrho g(h+l)\,dt$$

Integration liefert mit $h(0) = h_a$, $h(t) = h_e$, (h_a, h_e: Höhe der Flüssigkeit im Behälter zu Beginn bzw. am Ende der Messung) die endgültige Formel für die Viskosität

$$\eta = \frac{\pi r^4 \varrho g}{8lA} \cdot \frac{\Delta t}{\ln\left[\frac{h_a+l}{h_e+l}\right]} \tag{5}$$

Reynolds-Zahl

Verändert man die Abmessungen der Strömungen (Längen, Radien, Geschwindigkeiten), so ändert sich auch das Strömungsbild und eine laminare Strömung kann in eine turbulente umschlagen. Strömungen sind ähnlich, wenn die Reynolds-Zahlen Re gleich sind. Die Reynolds-Zahl ist eine dimensionslose Zahl. In allgemeiner Form lautet sie:

$$Re = \frac{\varrho \cdot r \cdot v}{\eta} \tag{6}$$

Überschreitet Re einen für die Geometrie der Strömung charakteristischen Wert, so schlägt die Strömung in eine turbulente Strömung um.

Setzt man in Gl. (6) für v die mittlere Geschwindigkeit der Strömung ein:

$$\overline{v} = \frac{\Delta V}{\pi f^2 \cdot \Delta t} \tag{7}$$

so folgt die Bedingung für laminare Strömung in einer kapillare

$$Re = \frac{\varrho}{\eta \cdot \pi \cdot r} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} < Re_{\text{krit}} \approx 1000 \text{ bis } 2000 \tag{8}$$

Versuchsdurchführung

1. Bestimmen Sie die Viskosität von Rizinusöl mit Stahlkugeln von verschiedenen Radien

2. Nachweis der Abhängigkeit des Volumenstromes vom Radius. Bei laminarer Rohrströmung gilt das Gesetz von Hagen-Poiseuille. Zeigen Sie die Proportionalität der Durchflußmenge pro Zeiteinheit V/t zur 4. Potenz des Rohrradius r der Kapillare.

3. Nachweis der Temperaturabhängigkeit von η und Bestimmung von Re_{krit} für die Kapillare.

Von den Aufgaben 2. und 3. braucht nur eine durchgeführt zu werden!

Hinweise zur Versuchsdurchführung

zu Versuch 1

Das Fallrohr mit dem Rizinusöl ist mit 3 Plastikringen versehen (oben O, Mitte M, unten U). Jeder Ring enthält eine kleine Glühlampe und dieser gegenüber einen Fototransistor. Fällt die Kugel hindurch, liefert der Fototransistor einen Dunkelimpuls, der den Zähler startet bzw. stoppt. Durch den Wahlschalter am Zähler können alternativ die Fallzeiten zwischen O, M und U gemessen werden.

Um die Stokessche Widerstandsformel anwenden zu können, muss zunächst festgestellt werden, nach welcher Fallstrecke die Kugelgeschwindigkeit als stationär anzusehen ist. Zur Messung werden Stahlkugeln mit den Durchmessern D = 5, 6 und 7 mm verwendet. Es wird die Zeit zwischen dem Eintauchen der Kugel und einer Strecke s gemessen. Dazu wird der Zähler auf O M gestellt. Der Zähler registriert jetzt die Zeit zwischen den Dunkelimpulsen der Fototransistoren im oberen und mittleren Plastikring. Nehmen Sie t für verschiedene Abstände der Plastikringe auf, beginnend mit dem geringsten Abstand. Tragen Sie s(t) auf und bestimmen Sie die Geschwindigkeit v.

Für die weiteren Messungen wird der mittlere Ring M so eingestellt, dass die Geschwindigkeit den stationären Wert erreicht hat. Stellen Sie den Zähler auf M U und messen Sie für verschiedene Kugeln jeweils 10 mal die Fallzeit. Berechnen Sie danach die Geschwindigkeit und tragen Sie v als Funktion des Kugelradius auf. Zeigen Sie, dass v proportional r^2 ist und bestimmen Sie η. Notieren Sie die Temperatur der Flüssigkeit, da η stark temperaturabhängig ist.

zu Versuch 2

Der Flüssigkeitsbehälter mit der unteren Ausflussöffnung ist mit einer Heizwicklung versehen ($3\,\Omega$, $I_{max} = 8\,A$).

Als Verschluss dient ein vertikal angeordneter Hubmagnet, dessen verlängerte Achse durch das Ankergewicht auf die Einlauföffnung gepresst wird.

Der Hubmagnet wird mit Netzspannung betrieben.

Uhr und Hubmagnet sind über einen Kippschalter miteinander gekoppelt. In Stellung EIN wird die Magnetspule mit Strom versorgt, zieht die Achse hoch und gibt die Einlauföffnung frei, während die Uhr zu zählen beginnt.

Der Vorratsbehälter wird mit ca. 1000 ml Wasser gefüllt. Ermitteln Sie die Zeit, in der $20\,cm^3$ Wasser bei einer konstanten Temperatur ausfließen für 5 verschiedene Kapillaren (jeweils 5 Messungen). Tragen Sie V/t als Funktion von r auf und verifizieren Sie die r^4-Abhängigkeit. Bestimmen Sie die kinematische Zähigkeit η/σ.

zu Versuch 3

Der Vorratsbehälter wird auf ca. 70° C erwärmt. Wählen Sie als Ausflussrohr eine Kapillare mit $r = 0.85\,mm$ und $l = 25\,cm$. Messen Sie die Zeit t in der $20\,cm^3$ ausfließen als Funktion der Temperatur T, die in Schritten von ca. 5° C durch Zusatz von kaltem Wasser herabgesetzt wird. Tragen Sie t auf halblog-Papier als Funktion von

1/T auf. Die Viskosität nimmt mit steigender Temperatur ab. Es gilt

$$\eta = A \cdot \exp(B/T)$$

wobei T die absolute Temperatur und A, B Konstanten sind. Infolgedessen muss die Ausflusszeit für ein konstantes Volumen mit steigender Temperatur stark abnehmen. Wird jedoch η so klein, dass die kritische Reynolds-Zahl überschritten wird, schlägt die Strömung in eine turbulente um und die Ausflusszeit nimmt wieder zu. Bestimmen Sie die Reynolds-Zahl am Umschlagpunkt und vergleichen Sie sie mit der kritischen Reynolds-Zahl.

W 3a Gasthermometer

Aufgabenbeschreibung

Bei diesem Versuch sollen Temperaturen von Wasser in einem Bereich von $0° - 100°$ C gemessen werden und zwar einmal direkt mit einem Flüssigkeitsthermometer und einmal indirekt mit dem auf dem Gay-Lussacschen Gesetz beruhenden Gasthermometer.

Literatur

1. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 5.1, 5.2
2. Bergmann-Schäfer: Bd. 1, Kap. 10, Nr. 92, 94
3. Pohl: Einführung in die Physik I, § 161
4. Atkins: Physik, Kap. 11, 12
5. Alonso-Finn I: Kap. 9.13
6. Westphal; Praktikum der Physik, Kap. 15
7. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap. 11.1.3, 11.1.4

Fragen zum Versuch

1. Wie ist die Temperatur definiert und in welchen Einheiten wird sie gemessen?
2. Welche Arten der Temperaturmessung kennen Sie?
3. Was versteht man unter einer Zustandsänderung eines Gases und welche verschiedenen Arten von Zustandsänderungen unterscheidet man?
4. Welche Gasgesetze gelten für diese Zustandsänderung?
5. Wie sind der Spannungskoeffizient γ und wie der Ausdehnungskoeffizient α eines Gases definiert?

6. Überzeugen Sie sich davon, dass bei strenger Gültigkeit des Gay-Lussacschen und Boyle-Mariotteschen Gasgesetzes diese beiden Koeffizienten γ und α gleich sind.
7. Leiten Sie aus den speziellen Gasgesetzen die allgemeine Gasgleichung für ideale Gase her.
8. Leiten Sie umgekehrt aus der allgemeinen Gasgleichung die speziellen Gasgesetze idealer Gase her.
9. Was versteht man unter einem idealen Gas und worin bestehen die Unterschiede zu einem realen Gas?
10. Unter welchen Bedingungen verhält sich ein reales Gas annähernd wie ein ideales?
11. Was versteht man unter dem Begriff der kritischen Temperatur eines Gases?
12. In welcher Weise muss man die allgemeine Gasgleichung für ideale Gase abändern, so dass sie auch das Verhalten realer Gase beschreibt und wie heißt diese Gleichung?
13. Was versteht man unter den Begriffen „Binnendruck“ und „Kovolumen“ und wie hängen diese mit dem Eigenvolumen realer Gase zusammen?
14. Wie gut beschreibt die Van der Waalsche Zustandsgleichung das Verhalten realer Gase und wo treten immer noch Abweichungen auf?
15. Veranschaulichen Sie sich die Isothermen idealer und realer Gase in einem p-V-Diagramm.
16. Welche Unterschiede bestehen zwischen einem Gas und einem Dampf und was versteht man unter einen gesättigten Dampf?
17. Was versteht man unter dem Begriff „Dampfdruck“ und wie kann man seine Größe aus der Isothermen eines realen Gases entnehmen?
18. Auf welchem Gasgesetz beruht das in diesem Versuch verwendete Gasthermometer?
19. Welche Fehlerquellen treten bei dem Ihnen zur Verfügung stehenden Gasthermometer auf?
20. Was versteht man unter den Begriffen „schädliches Volumen“ und „Temperaturausgleich“ und welche Bedeutung haben sie für diesen Versuch?

21. Wie wirkt sich die Kapillarität des Quecksilbers auf die Genauigkeit der Höhenmessungen der Quecksilbersäule aus?
22. Bei diesem Versuchsaufbau verwenden Sie Luft als Füllgas des Gasthermometers. Welche Gase würden sich besser eignen als Luft, welches Gas wäre am geeignetsten und warum?

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

1. **Temperaturmessung**
   Messen Sie mehrere Temperaturen von Wasser in einem Bereich von 0° – 100° C

   a) *direkt* mit einem Flüssigkeitsthermometer: t_d

   b) *indirekt* mit einem Gasthermometer nach Jolly: t_i

2. **Vergleich der gemessenen Temperaturen t_d und t_i**

   a) Tragen Sie bereits während des Versuches die mit dem Gasthermometer ermittelte unkorrigierte Temperatur gegen die mit dem Quecksilberthermometer ermittelten Werte t_d auf. Was würde sich ergeben, wenn beide Messungen übereinstimmen?

   b) Tragen Sie in dieses Diagramm die gemäß Formel 5 in Kapitel korrigierten Temperaturen t_i und ihre in einer Fehlerfortpflanzungsrechnung ermittelten Fehlerschranken Δt_i ein.

   c) Diskutieren Sie möglichst ausführlich alle denkbaren Fehlerquellen des Versuches.

Anleitung

Stellen Sie das leere Becherglas auf die Heizplatte (der Glaskolben des Gasthermometers soll in derselben Position wie in Abb. 1 sein!)

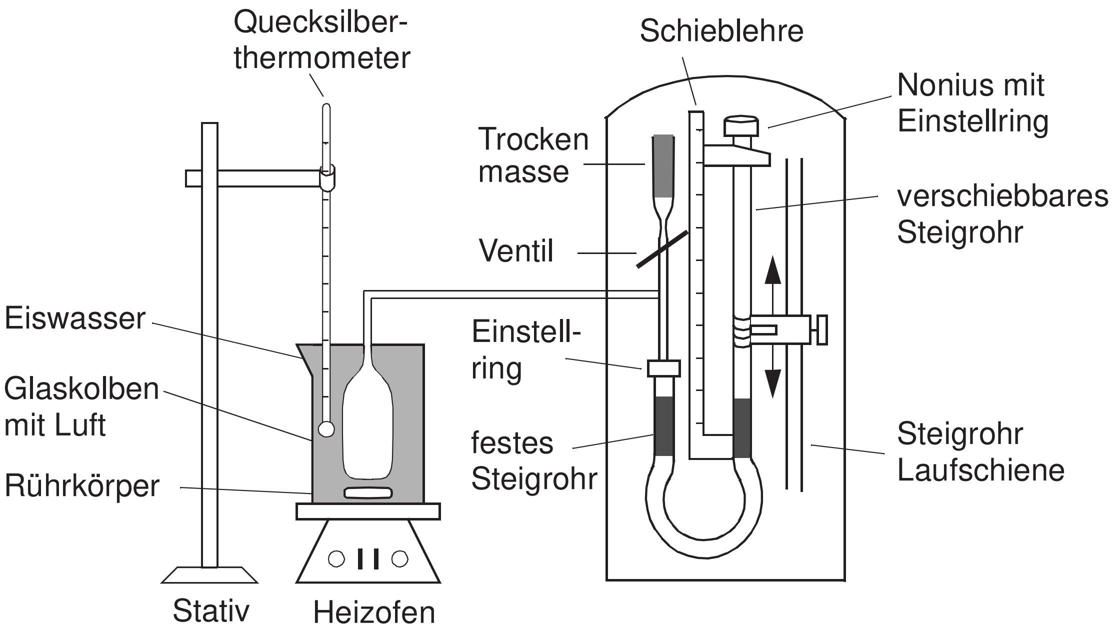


Abb. 1: Versuchsaufbauskizze

und füllen Sie zunächst möglichst fein zerstoßenes Eis um den Kolben herum bis zum Rande des Becherglases auf. Gießen Sie sodann kaltes Wasser zu, bis alle Zwischenräume zwischen den Eisstücken ausgefüllt sind. Kühlen Sie mit diesem Eis-Wassergemisch die Luft im Glaskolben, bei geöffnetem Ventil, auf 0° C ab, wobei Sie die Temperatur des Eis-Wassergemisches mit beiliegendem Quecksilberthermometer direkt messen. Hat sich im ganzen Becherglas eine Temperatur von 0° C eingestellt, stellen Sie den Messschieber auf Null und bewegen Sie das verschiebbare Steigrohr solange bis die Quecksilberkuppe mit dem Einstellring übereinstimmt. Der Einstellring am festen Rohr muss dann ebenfalls solange verschoben werden, bis er mit der Quecksilberkuppe übereinstimmt. Schließen Sie dann das Ventil und beginnen Sie das Eis-Wassergemisch mit mittlerer Heizleistung aufzutauen (linker roter Schalter und linker Drehknopf am Elektrokocher). Nehmen Sie nun auch den automatischen Rührer in Betrieb (rechter gelber Schalter und rechter Drehknopf am Elektrokocher).

Nachdem alles Eis geschmolzen ist, beginnt sich das Wasser und damit auch die Luft im Glaskolben zu erwärmen und auszudehnen. Von da an sollte man nur noch mit möglichst kleiner Heizleistung arbeiten. Warum?

Regeln Sie den Quecksilberspiegel durch Anheben des beweglichen Steigrohrs immer so nach, dass die eingeschlossene Luft immer dasselbe Volumen zur Verfügung hat, notieren Sie die direkt gemessenen Temperaturen $\mathrm{t_d}$ und die sich jeweils ergebende Höhe h(t) der Quecksilbersäule im verschiebbaren Steigrohr. Es ist dabei darauf zu achten, dass während der ganzen Meßzeit im Becherglas Temperaturausgleich herrscht.

Wie prüft man nach, wie gut diese Bedingung des Temperaturausgleichs erfüllt ist?

Drehen Sie nach Beendigung des Versuchs das verschiebbare Steigrohr wieder ganz herunter und öffnen Sie danach langsam das Ventil. Warum?

Bemerkungen zur Auswertung

Ein Gas, das in einem konstant gehaltenen Volumen erhitzt wird, ändert in charakteristischer Weise seinen Druck, und zwar lässt sich der Druck $p(t)$ bei der Temperatur t in ° C darstellen als

$$p(t) = p_0 \cdot (1 + \gamma \cdot t) \tag{1}$$

wenn p_0 der Druck des Gases bei 0° C und γ der Spannungskoeffizient des Gases ist. Damit ist es möglich, eine Temperaturmessung auf eine Druckmessung und letztlich auf eine Längenmessung einer Quecksilbersäule zurückzuführen. Auflösen von 1 nach t ergibt

$$T = \frac{1}{\gamma}\frac{p(t) - p_0}{p_0} = \frac{1}{\gamma}\frac{\Delta p}{p_0} \tag{2}$$

Verwendet man in den Steigrohren des Gasthermometers Quecksilber, dann lässt sich die Druckdifferenz Δp durch die Messung der zugehörigen Höhendifferenz der Quecksilbersäulen ersetzen

$$\Delta p = (h(t) - h_0) \cdot \varrho_{\mathrm{Hg}} \cdot g. \tag{3}$$

ϱ_{Hg} ist die Dichte von Quecksilber, g die Erdbeschleunigung; h_0 ist die Höhe der Quecksilbersäule im verschiebbaren Steigrohr bei $t = 0°$ C, $h(t)$ die bei der Temperatur t.

Das bei diesem Versuch verwendete Gasthermometer unterscheidet sich von den i. a. in den Büchern beschriebenen dadurch, dass es durch Einbau eines Ventils auf der Glaskolbenseite möglich ist, zwischen Glaskolben und Außenraum Druckausgleich herzustellen. Wird dieser Druckausgleich bei $t = 0°$ C gemacht, so ist p_0 gleich dem äußeren Luftdruck b, der mit einem am Versuch aufgestellten Quecksilberbarometer gemessen wird. Damit ergibt sich mit $p_0 = b \cdot \varrho_{\mathrm{Hg}} \cdot g$ für die mit dem Gasthermometer gemessene Temperatur t_i:

$$t_i = \frac{1}{\gamma} \frac{h(t) - h_0}{b} \tag{4}$$

Anhand der Formel 4 soll nach Aufgabe 2b) eine Fehlerfortflanzungsrechnung durchgeführt werden. Überlegen Sie sich, welche Messfehler bei diesem Versuch auftreten und welche sie anhand von Formel 4 berücksichtigen können. Tragen Sie die ermittelten absoluten Fehler Δt_i in das in Aufgabe 2b) angefertigte Diagramm ein.

Berechnen Sie die Werte t_i nach der in Westphal, Praktikum für Physik, angegebenen Formel, die das schädliche Volumen und die Ausdehnung des Glaskolbens berücksichtigt. Nach Auflösung nach t_i ergibt sich dann:

$$t_i = \frac{h(t) - h_0}{\gamma b - [h(t) - h_0 + b] \cdot [\beta + V_S/(V \cdot T_z)]} \tag{5}$$

mit V, V_T [cm^3]: Volumen des Kolbens bzw. schädliches Volumen, β [K^{-1}]: Kubischer Ausdehnungskoeffizient des Glases, T_Z [K]: Zimmertemperatur, h, h_0 [mm]: Höhe der Quecksilbersäule im Steigrohr und b [mm]: äußerer Luftdruck in mm der Quecksilbersäule.

W 3c Bestimmung von c_p/c_v nach Rüchardt und nach Clément-Desormes

Aufgabenbeschreibung

Mit Hilfe der Methode von Rüchardt wird bei diesem Versuch der Adiabatenexponent c_p/c_v für Luft und Argon bestimmt. Ferner wird der Adiabatenexponent für Luft nach der Methode von Clémont und Desormes gemessen.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. I, Kap. 11, Nr. 101
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 5.2.4 – 5.2.6
3. Alonso-Finn III: Kap. 12.4 – 12.6
4. Grimsehl: Lehrbuch der Physik I
5. Orear: Physik, Kap. 13 (Thermodynamik)
6. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap. 11.1.5 – 11.1.9

Fragen zum Versuch

1. Was sind Zustandsgrößen eines Gases?
2. Was versteht man unter einer Zustandsänderung eines Gases?
3. Welche speziellen Zustandsänderungen kennen Sie?
4. Was sind polytrope Zustandsänderungen?
5. Wie sind die spezifischen Wärmen c_p und c_v eines Gases definiert?
6. Warum ist für alle Gase c_p größer als c_v? Zeigen Sie, dass die Differenz der molaren spezifischen Wärmen gleich der allgemeinen Gaskonstanten R ist (bei idealen Gasen).
7. Welche Werte ergeben sich für c_p/c_v nach der kinetischen Gastheorie für ein Edelgas und ein zweiatomiges Molekülgas?

8. Erläutern Sie die Methode von Rüchardt. Welche Zustandsänderungen werden vorgenommen?
9. Welche Vernachlässigung macht man bei der Herleitung der Differentialgleichung für die Schwingungen des Zylinders in dem Steigrohr?
10. Von welchen Messgrößen hängt c_p/c_v ab?
11. Erläutern Sie die Methode von Clément und Desormes. Welche Zustandsänderungen werden vorgenommen?
12. Welche Vernachlässigung macht man hier bei der Herleitung der Formel für c_p/c_v? Von welchen Messgrößen hängt c_p/c_v ab?

Versuchsdurchführung

Rüchardt

1. Füllen Sie das Gerät mit dem Messglas. Beachten Sie, dass vom Vorgänger noch ein anderen Gas im Gefäß sein kann.

2. Regulieren Sie mit dem Hahn unten am Gefäß die Gaszufuhr so, dass der Aluminiumzylinder „optimal“ schwingt.

3. Drücken Sie die RESET-Taste und starten Sie den Zählvorgang.

Messprogramm

Wiederholen Sie 3. mehrmals. Variieren Sie dabei auch ein wenig die Gaszufuhr (siehe 2.). Ergeben sich dabei systematische Änderungen? Führen Sie die Messungen mit Luft und Argon durch.

zu 1: Evakuieren Sie das Messgerät. Einige Minuten Auspumpen genügen, wenn der Hahn für Gaszufuhr unten am Gefäß offen ist. Die Absperrhähne für Luft und Argon sind geschlossen! Schließen Sie das Vakuumventil *und* das Gaszufuhrventil unten am Gefäß. Lassen Sie das Messgas ein und entfernen Sie vorsichtig den Gummistopfen. Bei Überdruck kann sonst der Aluminiumzylinder aus dem Rohr springen!

zu 2: Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, wird die Schwingung durch eine periodisch modulierte Gaszufuhr entdämpft. Die Synchronisation erfolgt durch den auf und ab schwingenden Aluminiumzylinder, der durch eine Öffnung im Zylinder im richtigen Zeitpunkt etwas Gas herauslässt.

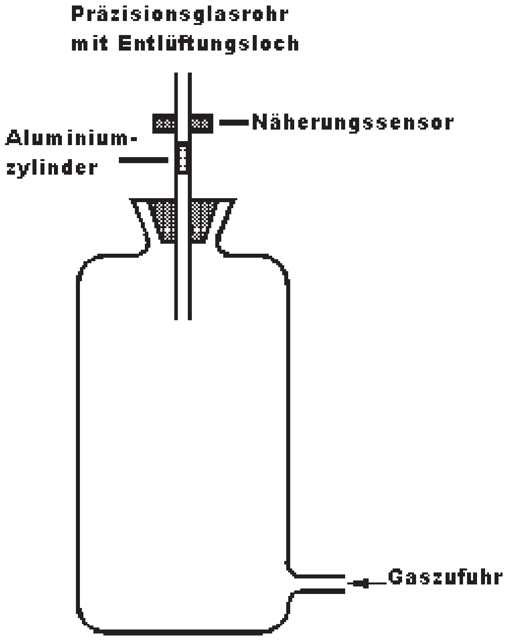


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau nach Rüchardt

zu 3: Der Näherungsinitiator erzeugt bei jeder Annäherung des Aluminiumzylinders einen Puls, der vom elektrischen Zähler registriert wird. Der Zähler zählt automatisch 1 Minute lang die ankommenden Pulse. Wieviele werden pro Schwingung erzeugt?

Clément-Desormes

Dieser Teil des Versuches wird nur mit Luft durchgeführt. Kontrollieren Sie vor Beginn der Messung, ob im Gefäß Druckausgleich vorliegt und die Flüssigkeit im U-Rohr-Manometer bei Null steht. Was ist zu tun, wenn letzteres nicht der Fall ist?

Mit dem Dreiweghahn kann das Messvolumen mit dem Blasebalg und/oder der Atmosphäre verbunden oder ganz abgeschlossen werden. Der dunkle Halbkreis zeigt die jeweils verbundenen Leitungen an.

Führen Sie die Messung mehrmals durch. Woran erkennt man, ob der Temperaturausgleich schon beendet ist? Variieren Sie den Anfangsdruck. Gibt es eine systematische Abhängigkeit (siehe Frage 11)? Wie groß ist der Druck in Torr?

Was passiert, wenn durch den anfänglichen Druck die Flüssigkeit aus einem Schenkel des U-Rohr-Manometers vollständig herausgedrückt wird?

Wählen Sie die Öffnungszeit des Hauptventils sehr kurz ($< 1\,\mathrm{s}$). Hängt das Ergebnis von der Öffnungszeit ab? Falls noch genügend Zeit ist, führen Sie Kontrollversuche mit sehr langer Öffnungszeit ($> 10\,\mathrm{s}$) durch. Wie könnte man etwaige Änderungen erklären? Gibt es syste- matische Fehlerquellen?

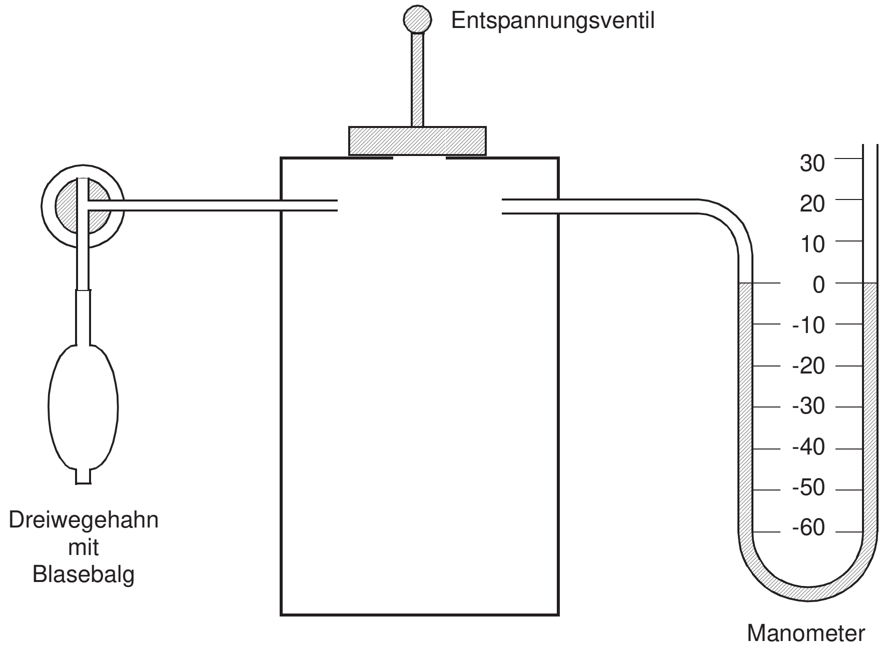


Abb. 2: Schematischer Versuchsaufbau nach Clément-Desormes

Bemerkungen zur Auswertung

Führen Sie zu beiden Messmethoden eine Fehlerabschätzung (Fehlerfortpflanzung) durch und vergleichen Sie diese mit den jeweiligen statistischen Fehlern.

O 1a Linsensysteme

Aufgabenstellung

Es sind die Abbildungseigenschaften und Abbildungsfehler einer Linse zu untersuchen. Außerdem soll ein Fernrohr aufgebaut und dessen Vergrößerung bestimmt werden.

Literatur

1. Alonso-Finn II: Kap. 21.4–21.5,21.8
2. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. 1.9, 1.10, 1.12
3. Born: Optik, Kap. 2 (Geometrische Optik)
4. Kohlrausch: Praktische Physik II, Kap. 5.1
5. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl, Kap. 9.1–9.3
6. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 9.5, 9.6

Fragen zum Versuch

Geometrische Optik

1. Was versteht man unter der geometrischen Optik und welche Erscheinungen des Lichtes kann man mit ihrer Hilfe beschreiben, welche nicht?
2. Beschreiben Sie phänomenologisch die Erscheinungen Brechung, Reflexion und Totalreflexion.
3. Durch welches Grundprinzip der geometrischen Optik lassen sich die gradlinige Ausbreitung des Lichtes sowie das Reflexions- und Brechungsgesetz theoretisch begründen?

Linsen

1. Beschreiben Sie qualitativ die Wirkung einer Linse. Was versteht man unter der Brennweite einer Linse, und wovon hängt die Brennweite ab?
2. Wie konstruiert man sich das Bild, das eine dünne Konvex- bzw. eine dünne Konkavlinse von einem Gegenstand entwirft?
3. Welche Bilder werden von einer Konvexlinse entworfen, wenn der Gegenstand sich

   a) zwischen Linse und Brennebene
   b) in der Brennebene
   c) zwischen einfacher und doppelter Brennweite
   d) im Abstand doppelter Brennweite und mehr

   befindet? Was für Bilder entwirft eine Konkavlinse?
4. Was ist der Unterschied zwischen einem reellen und einem virtuellen Bild?
5. Wie beschreibt man geometrisch die Abbildung durch dicke Linsen?
6. Was ist eine Fresnelsche Linse?

Brennweitenbestimmung einer Linse

1. Was versteht man unter dem Begriff Dioptrie einer Linse und wie hängt diese mit der Brennweite der Linse zusammen?
2. Mit welchen Verfahren lässt sich die Brennweite einer konvexen Linse bestimmen?
3. Wie kann man die Brennweite einer konkaven Linse bestimmen?
4. Informieren Sie sich über das Verfahren von Bessel zur Brennweitenbestimmung. Leiten Sie die Brennweitenformel her. Für welche Abstände zwischen Gegenstand und Schirm sind reelle Bilder zu erwarten?

Abbildungsfehler

1. Diskutieren Sie folgende Abbildungsfehler einer Linse: sphärische Aberration, chromatische Aberration und Astigmatismus.
2. Wie kann man den Einfluss dieser Abbildungsfehler möglichst gering halten?
3. Kennen Sie noch weitere Linsenfehler?
4. Wovon hängt der Brennpunktsdurchmesser eines fokussierten, parallelen Strahls bei einer idealen Linse ab?

Optische Instrumente

1. Wie ist die Winkelvergrößerung eines optischen Systems definiert?
2. Diskutieren Sie den Strahlengang und die Vergrößerung einer Lupe.
3. Skizzieren Sie den Strahlengang des astronomischen (Keplerschen), des holländischen (Galileischen) und des terrestrischen Fernrohres.
4. Informieren Sie sich über Bau und Wirkungsweise eines Huygensschen Okulars. Welche Vorteile besitzt dieses Okular?
5. Leiten Sie die Vergrößerung für ein Fernrohr her.

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

1. **Brennweitenbestimmung einer bikonvexen Linse**
   Messen Sie die Brennweite einer Linse ($f \approx 250$ mm) für grünes Licht

   a) durch Aufsuchen des Brennpunktes eines parallel einfallenden Lichtbündels,

   b) nach dem Besselschen Verfahren.

2. **Untersuchungen der Linsenfehler**

a) Bestimmen Sie die chromatische Aberration der bikonvexen Linse durch Aufsuchen der Brennpunkte für parallel einfallendes rotes und blaues Licht.

b) Bestimmen Sie die sphärische Aberration durch Aufsuchen der Brennpunkte für achsennahe und achsenferne Strahlenbündel bei parallel einfallendem Licht.

c) Untersuchen Sie qualitativ den Astigmatismus schief einfallender Lichtbündel.

3. **Bau eines Fernrohres**

a) Bauen Sie sich aus zwei Linsen verschiedene Fernrohre.

- ein astronomisches (Keplersches Fernrohr), (eine kurz- und eine langbrennweitige Sammellinse).
- ein holländisches (Galileisches Fernrohr), (eine kurzbrennweitige Zerstreuungslinse und eine langbrennweitige Sammellinse).

b) Bestimmen Sie deren Vergrößerung und vergleichen Sie die experimentell ermittelten Werte mit den aus den angegebenen Brennweiten theoretisch berechneten.

Versuchsaufbau

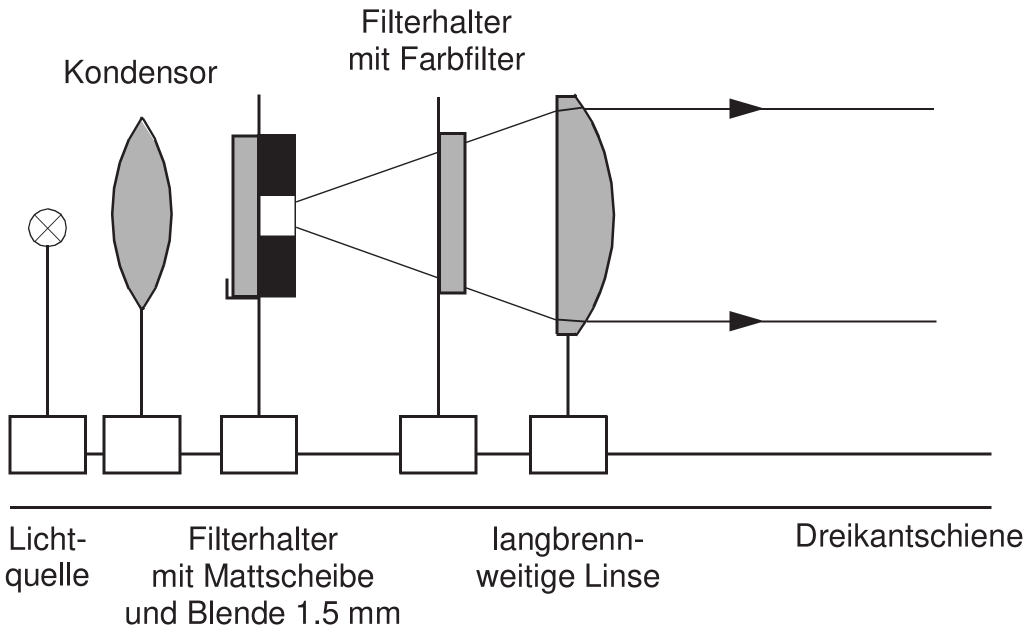


Abb. 1: Versuchsaufbauskizze

Anleitung zu den einzelnen Aufgaben

zu 1a)

Bringen Sie mittels des Verfahrens der Autokollimation alle Linsen auf eine optische Achse.

- Wodurch ist bei der gegebenen Versuchsanordnung die optische Achse definiert?

Erzeugen Sie sich mittels einer nahezu punktförmigen Lichtquelle und einer bikonvexen Linse ein paralleles Lichtbündel.

- Wie bauen Sie sich eine annähernd punktförmige Lichtquelle?
- Wie prüfen Sie nach, ob Ihr Lichtbündel nach der Linse tatsächlich parallel ist?

- Was für eine Linse muss man hierzu nehmen, um Linsenfehler möglichst klein zu halten?

Beachten Sie, dass die Linsenmitte i. a. keineswegs über der Ablesemarke des Stativs liegt und überlegen Sie sich, ob und wie dies bei den verschiedenen Messungen von Bedeutung ist.

zu 1b)

Nehmen Sie als abzubildendes Objekt die beleuchtete Lochblende.

- Wie groß muss der Abstand zwischen dem Gegenstand (Lochblende) und dem Bildschirm mindestens sein, damit auf dem Bildschirm für zwei Stellungen der abbildenden Linse ein scharfes Bild der Lochblende entsteht?
- Aus welchen Messgrößen lässt sich beim Besselschen Verfahren die Brennweite der untersuchten Linse bestimmen?
- Beim Besselverfahren ist die Messung mehrfach zu wiederholen und das Ergebnis durch Mittelwertbildung zu ermitteln.

zu 2a)

Benutzen Sie als abbildende Linse eine kurzbrennweitige Linse (f = 50 mm). Warum? Bei der Messung der chromatischen Abberation soll die sphärische Abberation ausgeschaltet werden.

zu 2b)

Bei der Messung der sphärischen Abberation soll die chromatische Abberation ausgeschaltet werden. Als abbildende Linse soll wieder die kurzbrennweitige Linse mit f = 50 mm benutzt werden. Wählen Sie für die Bestimmung des Brennpunkts für achsennahe Strahlen die Blendenöffnung nicht zu klein (8 – 10 mm). Warum?

zu 3b)

Benutzen Sie zur experimentellen Bestimmung der Vergrößerung einen Strahlteiler, der zwischen Auge und Okularlinse gesetzt wird.

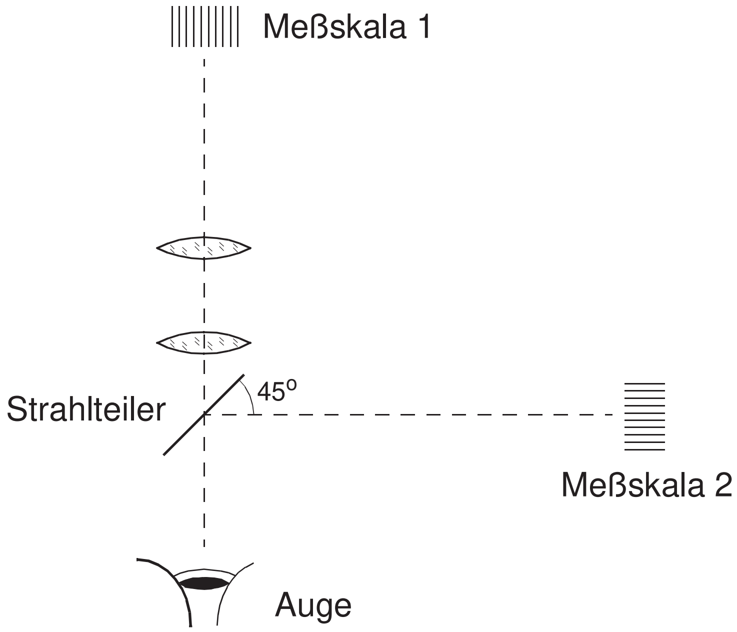


Abb. 2: Versuchsaufbauskizze zu Aufgabe 3b)

Da die Messskala 1 doppelt soweit wie Messskala 2 vom Fernrohr entfernt ist, sind die Abstände der Striche in Messskala 2 halb so groß.

Benutzen Sie für diese Art der Bestimmung der Vergrößerung v als langbrennweitige Linse nur eine Linse mit f = 250 mm.

Für langbrennweitige Systeme muß zur Bestimmung der Vergrößerung der Abstand zwischen Fernrohr und Objekt (Messskala 1) wesentlich vergrößert werden. Da dann keine Vergleichsskala zur Verfügung steht, kann die Vergrößerung dadurch bestimmt werden, dass man die Meßskala 1 mit einem Auge durch das Fernrohr und mit dem anderen Auge am Fernrohr vorbei betrachtet und beide Bilder vergleicht.

O 3a Lichtmikroskop

Aufgabenbeschreibung

Dieser Versuch soll dazu dienen, das Prinzip eines Mikroskops kennenzulernen. Deshalb wird kein kommerzielles Mikroskop verwendet, sondern mit einem mikro-optischen Bausatz ein einfaches überschaubares Mikroskop zusammengesetzt. Es soll die Vergrößerung und das Auflösungsvermögen für verschiedene Okular-Objektivkombinationen bestimmt und qualitativ überprüft werden.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. III, Optik
2. Trautwein-Kreibig-Oberhausen: Physik für Mediziner, Biologen, Pharmazeuten
3. Kurt Michel, Die Grundzüge der Theorie des Mikroskops in elementarer Darstellung, (sehr viel weiterführend, für diesen Versuch nicht notwendig)

Fragen zum Versuch

1. Machen Sie sich folgende Begriffe klar:
   Objektiv, Okular, Tubus, numerische Apertur, deutliche Sehweite, subjektive Vergrößerung, Vergrößerungszahl, Immersionssysteme, Objektivmikrometer, Okularmikrometer, Beugungsscheibchen.
2. Worin besteht der Unterschied zwischen einer Lupe und einem Mikroskop? Warum verwendet man beim Mikroskop Linsenkombinationen?

3. Was ist die Aufgabe des Objektivs und was ist die Aufgabe des Okulars beim Mikroskop?
4. Wie setzt sich die Vergrößerung bei einem Mikroskop zusammen?
5. Durch welche Effekte wird sie begrenzt?
6. Was ist das Auflösungsvermögen und wodurch wird es begrenzt?
7. Wie kann man das Auflösungsvermögen verbessern?
8. Welche Möglichkeiten der Objektbeleuchtung gibt es beim Mikroskop?

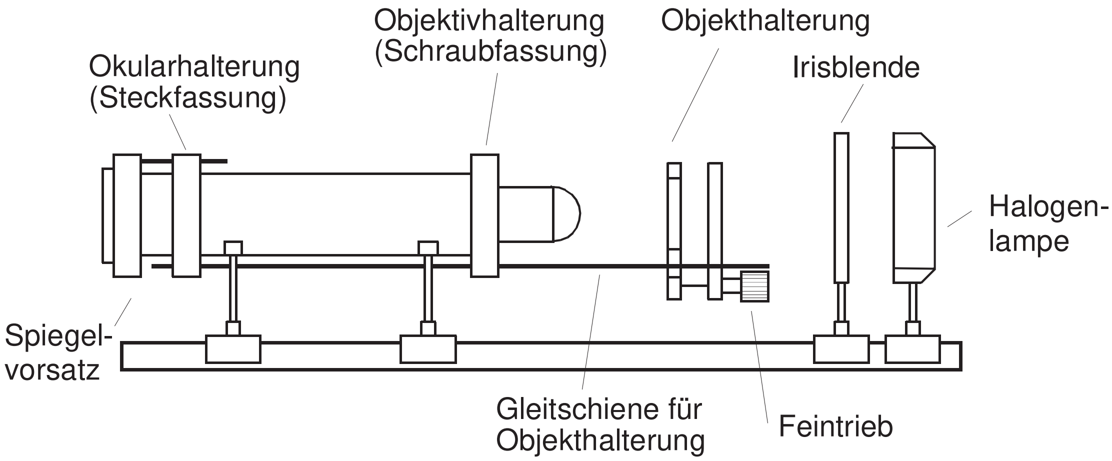


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau zu Aufgabe 1

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

1. Bauen Sie die Mikroskop-Anordnung entsprechend Abb. 1 auf. Benutzen Sie das Objektiv 4×1 und das 5× Okular. (Diese Kombination liefert die geringste Vergrößerung und ist am einfachsten zu handhaben).

   Verwenden Sie als Objekt das Objektmikrometer (200 Skt auf 5 mm), das von der Halogenlampe mit vorgesetzter Irisblende beleuchtet wird. Verschieben Sie die Objekt- und Feintriebhalterung zusammen mit der Hand, bis Sie ein Bild erhalten. Schrauben Sie die Feintriebhalterung (nicht die Objekthalterung) fest und stellen Sie das Bild mit dem Feintrieb scharf.

2. Bestimmen Sie die Gesamtvergrößerung des Mikroskop-Aufbaus. Schieben Sie dazu den Spiegelaufsatz vor das Okular. Durch den Spiegelaufsatz wird ein im Abstand der deutlichen Sehweite aufgebauter Vergleichsmaßstab eingeblendet und mit dem Bild des Objektmikrometers verglichen (siehe Abb. 2). Benutzen Sie das maximal abgebildete Gesichtsfeld (warum?). (Vorsicht! Beim Vergleichen der Bilder nicht den Kopf drehen! Warum?). Geben Sie Fehlergrenzen an und vergleichen Sie sie mit den Herstellerangaben.

   Führen Sie die gleiche Aufgabe für zwei der folgenden Objektiv-Okular-Kombinationen 4× und 25×, 10× und 5× oder 10× und 25× durch.

   Die Skala im 10× Okular wird bei der Messung nicht verwendet.

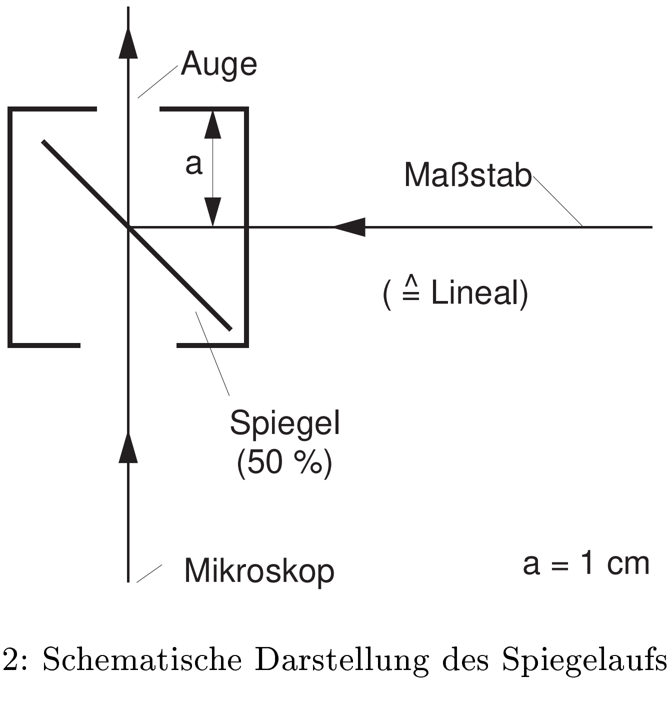


Abb. 2: Schematische Darstellung des Spiegelaufsatzes

3. Messung von Drahtdurchmessern
   Benutzen Sie das 25×-Okular, das einen Okularmaßstab enthält und ein geeignetes Objektiv. Eichen Sie das Okularmikrometer mit Hilfe des Objektmikrometers. Ersetzen Sie das Objektmikrometer mit Halterung durch die Drahthalterung. Messen Sie die Durchmesser der Drähte mit dem Okularmikrometer.

4. Messung der numerischen Apertur und Berechnung des Auflösungsvermögens.
   Bestimmen Sie die numerische Apertur der beiden Objektive nach dem Verfahren aus Abb. 3 und 4. Entfernen Sie das Okular, setzen Sie die Lochblendenhalterung ein und fokussieren Sie auf den Rand der Lochblende ($\varnothing = 1\,\mathrm{mm}$).

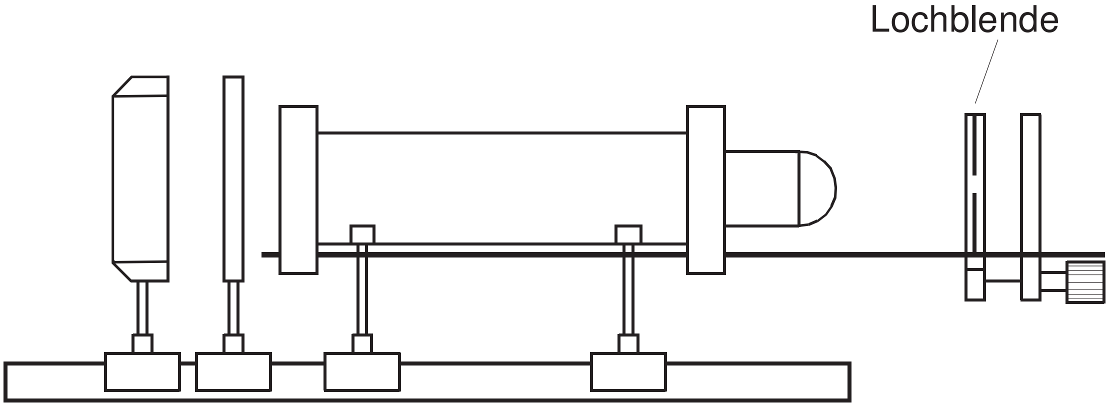


Abb. 3: Schematischer Versuchsaufbau zu Aufgabe 4

Beleuchten Sie das Objektiv von der anderen Seite. Bestimmen Sie mit dem an der Wand befindlichen Polarkoordinatenpapier den Radius des Lichtkegels und den Abstand w und berechnen Sie daraus die numerische Apertur. Berechnen Sie für $\lambda = 500\,\mathrm{nm}$ das Auflösungsvermögen und den Abstand zweier Punkte, die gerade noch getrennt gesehen werden können.

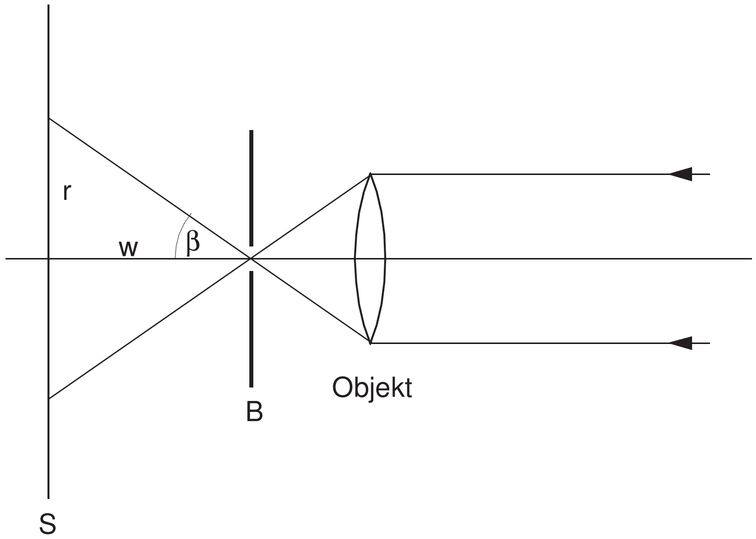


Abb. 4: Skizze zu Aufgabe 4

5. Test des Auflösungsvermögens an einem Gitter.
   Testen Sie mit einem Gitter, das die Gitterkonstante 3.3 μm hat, das Auflösungsvermögen, das Sie errechnet haben. Führen Sie diese Untersuchung bei 100-facher Vergrößerung aus. Realisieren Sie diese Vergrößerung durch zwei verschiedene Objektiv-Okularkombinationen.

   Welche wichtigen Aussagen können Sie bezüglich Vergrößerung und Auflösungsvermögen machen?

O 1c Polarisation

Aufgabenbeschreibung

In diesem Versuch sollen verschiedene Polarisationsformen von Licht untersucht werden. Beim Durchgang durch eine Rohrzuckerlösung wird die Polarisationsebene von linear polarisiertem Licht gedreht. Aus dieser Drehung soll die Konzentration der verwendeten Zuckerlösung bestimmt werden.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. III, Optik Kap. IV
2. Born: Optik, Kap. 63 und 64
3. Walcher: Praktikum der Physik, Kap. 4.8.0, 4.8.1.0, 4.8.2
4. Flügge; Studienbuch zur technischen Optik, Kap. 1.5

Fragen zum Versuch

1. Was ist eine Welle, was ist eine Schwingung? Geben Sie für beide Phänomene einige Beispiele an und machen Sie sich die jeweilige mathematische Beschreibung klar.
2. Wie sind folgende Begriffe definiert: Amplitude, Frequenz, Wellenlänge, Wellenvektor, Phase, Phasenverschiebung und wie hängen diese Größen untereinander zusammen?
3. Was versteht man unter linear, zirkular und elliptisch polarisierten Wellen und wie kann man diese mathematisch darstellen?
4. Wie kann man zirkular bzw. elliptisch polarisiertes Licht durch Überlagerung zweier linear polarisierter Lichtwellen darstellen?

5. Wie kann man umgekehrt aus zwei zirkular polarisierten Wellen eine linear polarisierte Welle darstellen?
6. Erklären Sie die Wirkungsweise eines $\lambda/4$-Plättchens bei Einstrahlen von linear bzw. die Wirkungsweise eines $\lambda/2$-Plättchens bei Einstrahlen von zirkular polarisiertem Licht.
7. Was versteht man unter dem Begriff Polarisationsgrad?
8. Welche Methode kennen Sie, um linear polarisiertes Licht herzustellen und nachzuweisen?
9. Informieren Sie sich über die Wirkungsweise eines Nicolschen Prismas und einer Polarisationsfolie.
10. Wie kann man mit Hilfe der Strahlungscharakteristik eines Dipols die Polarisation durch Reflexion bzw. Brechung anschaulich erklären? Wann ist der reflektierte Strahl vollständig polarisiert? (Lit. 1).
11. Wie kann man entscheiden, ob eine Welle eine Transversal- oder Longitudinalwelle ist?
12. Was versteht man unter Dispersion, was speziell unter Rotationsdispersion?
13. Welche Phänomene kennen Sie, bei denen die Polarisationsebene von linear polarisiertem Licht gedreht wird?
14. Wie kann man die Drehung der Polarisationsebene durch Zerlegung der linear polarisierten Lichtwelle in zwei geeignete zirkular polarisierte Wellen anschaulich erklären?

Versuchsdurchführung

Messprogramm

Inbetriebnahme der Versuchsanordnung

1. Justieren Sie den Laserstrahl und definieren Sie die optische Achse. Achten Sie darauf, dass beim Einjustieren des Lasers die Selenzelle abgedeckt ist.

2. Weiten Sie den Querschnitt des Laserstrahls mit Hilfe einer Mattscheibe und einer Linse auf. Wählen Sie die Anord-

nung so, dass der Lichtstrahl nach Verlassen der Linse parallel verläuft.

Erzeugung und Nachweis von linear und zirkular polarisiertem Licht

1. Prüfen Sie nach, ob das Licht des zur Verfügung stehendem Helium-Neon Lasers linear polarisiert ist.

2. Untersuchen Sie das durch ein $\lambda/4$-Plättchen hindurch tretende Laserlicht als Funktion der Winkeleinstellung des $\lambda/4$-Plättchens. Tragen Sie Ihre Messwerte in ein geeignetes Diagramm ein und überlegen Sie sich anhand eines Diagramms, für welche Stellungen des $\lambda/4$-Plättchens das Licht zirkular bzw. linear polarisiert ist.

3. Für beide Stellungen des $\lambda/4$-Plättchens (aus Aufgabenteil b) soll die Polarisation des Lichtes als Funktion der Winkeleinstellung des Analysators überprüft werden. Überlegen Sie sich jeweils eine geeignete Diagrammdarstellung, in der Sie die Messergebnisse direkt mit den theoretisch zu erwartenden Abhängigkeiten vergleichen können.

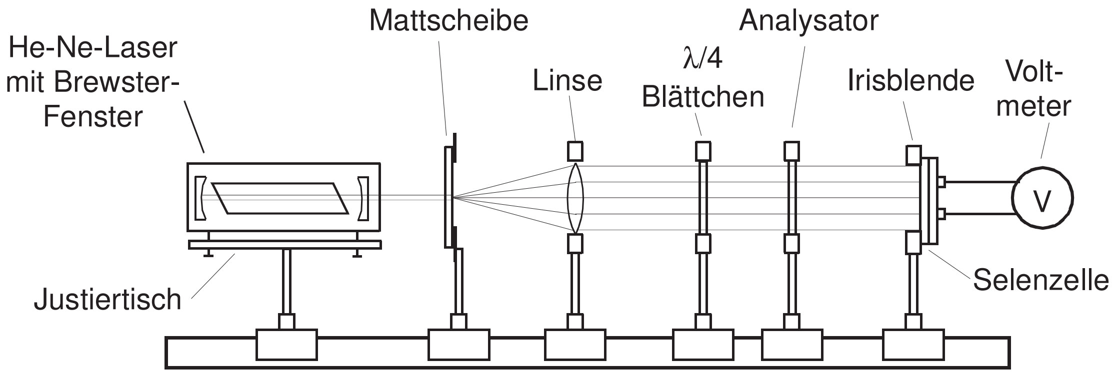


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau

Konzentrationsmessung einer Rohrzuckerlösung

1. Messen Sie die Drehung der Polarisationsebene des Laserlichts beim Durchlaufen einer Rohrzuckerlösung.

2. Bestimmen Sie aus der Drehung der Polarisationsebene die Konzentration des Rohrzuckers in der untersuchten Lösung. Für die Drehung gilt

$$\alpha = c \cdot l \cdot \alpha_{\mathrm{spez}},$$

   mit $\alpha_{\mathrm{spez}} = 5.681\,\frac{\mathrm{grad}\cdot\mathrm{cm}^3}{\mathrm{cm}\cdot\mathrm{g}}$, der Konzentration c[g/cm3] und der Länge l[cm] des Lichtweges durch die Lösung

   Zur Messung des Drehwinkels der Polarisationsebene des Laserlichtes beim Durchgang durch die Rohrzuckerlösung bieten sich zwei Einstellungen des Analysators zur ungedrehten Polarisationsebene des Laserlichtes an, minimale und maximale Intensität des durchkommenden Lichts.

   - Für welche entscheiden Sie sich?
   - Überlegen Sie sich, ob und wann es sinnvoll ist für die Bestimmung des Drehwinkels, diesen mehrmals (z. B. 10 mal) zu messen?

E 1b Gleichstromkreise

Aufgabenbeschreibung

In diesem Versuch werden Grundtatsachen der Elektrizitätslehre sowie Messmethoden und Messgeräte für Gleichströme und Spannungen behandelt. Der Praktikant soll außerdem einfache Schaltungen selbst aufbauen lernen und einfache Gleichstromkreise theoretisch berechnen.

Literatur

1. Winkler, Elektrische Messkunde
2. Walcher, Praktikum der Physik
3. Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik
4. Ameling, Grundlagen der Elektrodynamik I
5. Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik II

Einführende Fragen

Strom- bzw. Spannungsmessgeräte

1. Auf welchen physikalischen Erscheinungen beruht der Bau von Strom bzw. Spannungsmessgeräten?
2. Nennen Sie einige Strom- bzw. Spannungsmessgeräte.

Das gebräuchlichste Instrument zur Messung von Strömen und Spannungen ist das Drehspulinstrument.

1. Erklären Sie die Wirkungsweise und den Aufbau dieses Messinstrumentes
    - als Strommessgerät

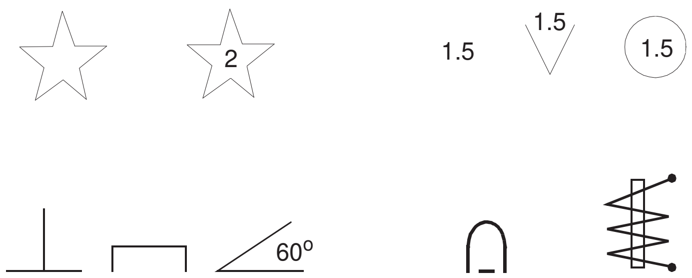
- als Spannungsmessgerät

2. Wie wird ein Strom- bzw. Spannungsmessgerät in den Stromkreis geschaltet, wenn man Ströme bzw. Spannungen messen will?
3. Welche Forderungen werden an den Innenwiderstand eines Drehspulinstrumentes gestellt, wenn man es

   - als Strommessgerät
   - als Spannungsmessgerät

   benutzen will?
4. Nennen Sie weitere Fehlerquellen beim Messen.
5. Wie kann man den Messbereich eines Strom- bzw. Spannungsmessgerätes erweitern?
6. Ist es möglich, ein Strommessgerät als Spannungsmessgerät (bzw. umgekehrt) zu benutzen?

Welche Bedeutung haben folgende Symbole auf elektrischen Messgeräten?



Widerstände

1. Geben Sie einige Methoden zur Bestimmung von elektrischen Widerständen an.
2. Was können Sie über die Genauigkeit der einzelnen Methoden aussagen?
3. Was versteht man unter der Toleranz von Widerständen?
4. Wie berechnet sich der Gesamtwiderstand bei Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen?
5. Wie lauten die beiden Kirchhoffschen Sätze? (Lit. 3).

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

Reihenschaltung von Widerständen

Werden elektrische Geräte, z. B. Widerstände oder Glühlampen so angeordnet, dass der Strom sie alle nacheinander durchfließen muss, dann spricht man von Reihenschaltung.

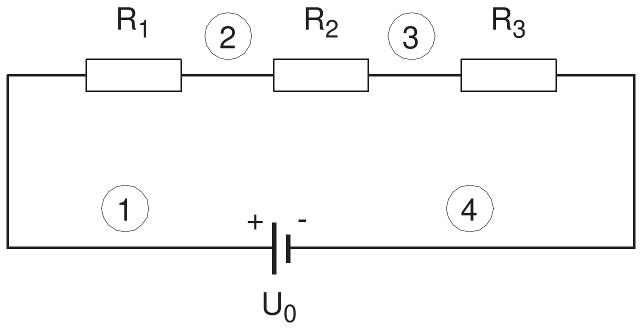


Abb. 1: Reihenschaltung

1. Messen Sie bei konstanter Spannung U_0 die Stromstärke an den mit 1 bis 4 bezeichneten Stellen des Stromkreises in Abb. 1. Was können Sie über die Stromstärke aussagen?

2. Messen Sie den Spannungsabfall an den Widerständen R_1, R_2, R_3, $R_1 + R_2$, $R_1 + R_2 + R_3$.

3. Bestimmen Sie den Gesamtwiderstand

   - aus der Messung von U_1, I (Innenwiderstand des Messinstrumentes berücksichtigen, falls notwendig).
   - Rechnung (lt. Angaben).

4. Vergleichen Sie das Verhältnis von Spannungen und Widerständen

$$\frac{U_1}{U_2},\ \frac{U_2}{U_3},\ \frac{U_{ges}}{U_1}\ :\ \frac{R_1}{R_2},\ \frac{R_2}{R_3},\ \frac{R_{ges}}{R_1}.$$

Parallelschaltung von Widerständen

Werden elektrische Widerstände oder Verbraucher so angeordnet, dass der elektrische Strom sich verzweigen und sie „parallel“ durchlaufen muss, dann spricht man von Parallelschaltung, oder man sagt, die Verbraucher sind parallel geschaltet.

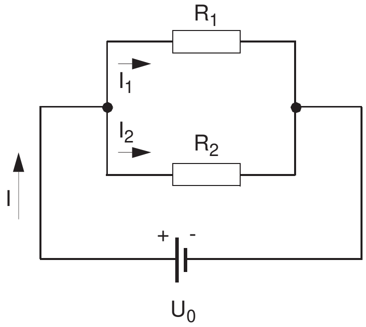


Abb. 2: Parallelschaltung; $U_0 = 5$–$8\,V$, $R_1 \neq R_2$, R_1, $R_2 = 100$–$1000\,\Omega$

1. Messen Sie den Gesamtstrom I sowie die Teilströme I_1 und I_2 bei konstanter Spannung U_0. Wie groß ist der Spannungsabfall über dem Amperemeter?
2. Berechnen Sie den Gesamtstrom sowie die Teilströme bei konstanter Spannung U_0
   - allgemein
   - für die spezielle Wahl der Widerstände.
   - Berücksichtigen Sie den systematischen Fehler durch Einschalten der Messgeräte
3. Berechnen und bestimmen Sie den Gesamtwiderstand aus den Größen U und I.

Vorschaltwiderstand

Sie sollen eine Glühbirne 6 V/0.05 A mit einer Gleichspannung von 15 V betreiben. Was müssen Sie tun, damit die Glühbirne nicht durchbrennt?

1. Schaltbild
2. Rechnung (Bestimmen Sie die Größe der erforderlichen Widerstände)
3. Schaltung aufbauen und überprüfen.

Innenwiderstand R_i einer Spannungsquelle

Jede Spannungsquelle besitzt einen Innenwiderstand R_i, der zur Folge hat, dass bei zunehmender Stromentnahme die Spannung U an den Ausgangsbuchsen abnimmt.

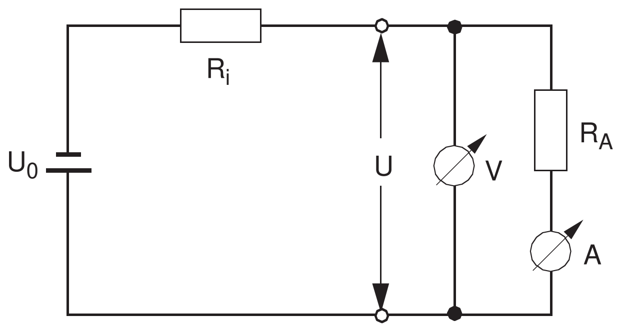


Abb. 3: Schaltung zum Messen des Innenwiderstandes einer Spannungsquelle

1. Bestimmen Sie R_i, indem Sie an die Ausgangsbuchsen des Netzgerätes einen Widerstand $R_A = 5\,\Omega$ legt und Strom und Spannung messen. Aus I, U, U_0 kann R_i berechnet werden. Der Innenwiderstand der Instrumente kann vernachlässigt werden. Warum?
2. Überlegen Sie sich, für welchen Widerstand R_A das Netzgerät die maximale Leistung liefert.

Aufladen eines Kondensators

1. Die in Abb. 4 angegebene Schaltung ist aufzubauen.

Durch Betätigen des Schalters wird der Kondensator aufgeladen oder entladen. Welche Beobachtungen machen Sie? Wann und warum leuchtet die Glühlampe auf?

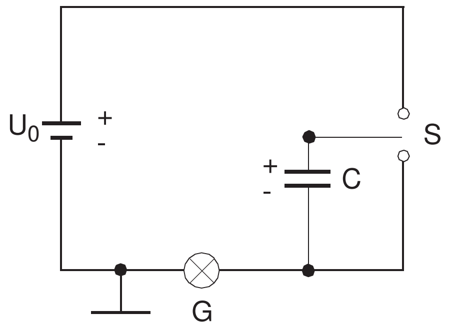


Abb. 4: Schaltung zum Auf- und Entladen eines Kondensators; G = Glühlampe 6 V/0.05 A, C = Kondensator 3000 μF, S = Schalter, $U_0 = 5\,V$

2. Ersetzen Sie die Glühlampe durch einen Widerstand von R = 10 Ω und sehen sich mit dem Oszilloskop den zeitlichen Verlauf der Spannung am Widerstand beim Einschalten an. Bestimmen Sie daraus den zeitlichen Verlauf der Spannung am Kondensator.

   Skizzieren Sie den Zeitverlauf mit Zeit- und Spannungsangaben.

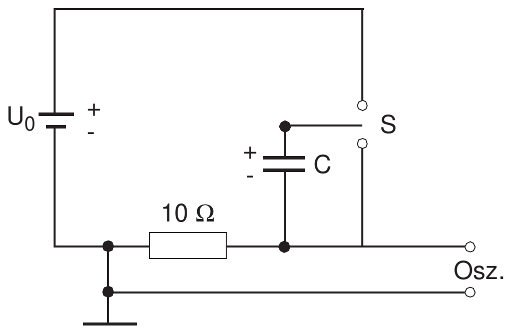


Abb. 5: Schaltung zur Messung des zeitlichen Verlaufs der Spannung am Kondensator

3. Überlegen Sie sich den zeitlichen Verlauf der Spannung am Widerstand, wenn die Kapazität durch eine Induktivität ersetzt wird. Da beim Ausschalten an der Induktivität eine erhebliche Gegenspannung entsteht, darf diese Spannung nicht auf das Oszilloskop gegeben werden. Es könnte der Eingangstransistor zerstört werden.

Hinweise zur Versuchsdurchführung

Das hier zur Verfügung stehende stabilisierte Netzgerät kann mittels der drei Spannungsklemmen (schwarze, rote, gelbe Anschlussbuchsen) „erdfrei“ oder „geerdet“ betrieben werden. „Geerdet“ heißt dabei, dass eine der drei Spannungsklemmen – die gelbe Anschlussbuchse – mit der Erde leitend verbunden ist, d. h. auf dem festen Erdpotential $V_E = 0$ gehalten wird, während die anderen Spannungsklemmen ihr gegenüber „hoch“ bzw. „tief“, d. h. auf positiver – roter Buchse – bzw. negativer – schwarzer Buchse – Spannung liegen.

Benutzt man die gelbe Buchse zusammen mit einer der beiden anderen, so ist die Schaltung „geerdet“. Benutzt man dagegen nur die rote und die schwarze Buchse, so arbeitet man „erdfrei“, d. h. definiert ist in diesem Fall nur die Spannungsdifferenz zwischen diesen beiden Spannungsklemmen, nicht aber der Wert bezüglich des festen Erdpotentials. Zur Stromversorgung wird bei diesem Versuch das Netzgerät „erdfrei“ betrieben.

Da die im Netzgerät eingebauten Strom- und Spannungsmessgeräte nur eine sehr grobe Anzeige besitzen, sollen bei *allen* Versuchen die vorhandenen Vielfachmessgeräte zur Strom- und Spannungsmessung eingesetzt werden.

A 1d Röntgenröhre

Aufgabenbeschreibung

In diesem Versuch sollen mit Hilfe einer Ionisationskammer Röntgenstrahlen nachgewiesen und deren Absorptionsverhalten in Materie untersucht werden.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. IV, Kap. 2 (Röntgenstrahlung)
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 12.5, 8.3.1 und 13.3.2
3. Hellwege: Einführung in die Physik der Atome, Kap. L, 42 und 43

Fragen zum Versuch

1. Mit welchen Methoden kann man Röntgenstrahlen erzeugen und welche Prozesse treten dabei auf?
2. Wie lassen sich Röntgenstrahlen im elektromagnetischen Spektrum einordnen und wie unterscheiden sie sich von α-Strahlen? Wie bestimmt man die Wellenlänge von Röntgenstrahlen?
3. Was versteht man unter weichen, harten, ultra-harten Röntgenstrahlen?
4. Was versteht man unter dem Begriff Röntgenspektrum und welche verschiedenen Arten von Spektren unterscheidet man?
5. Wie ändert sich ein Röntgen-Emissionsspektrum, wenn man die Röhrenspannung erhöht, wie, wenn man den Röhrenstrom erhöht?
6. Wie lassen sich Röntgenspektren theoretisch verstehen und was kann man aus ihnen über den Aufbau der Atome lernen?

7. Was versteht man unter dem Begriff „Grenzfrequenz“ des Röntgenemissionsspektrums, und welche Naturkonstante lässt sich daraus bestimmen?
8. Veranschaulichen Sie sich Aufbau und Funktionsweise einer Ionisationskammer.
9. Wie sieht die Strom-Spannungscharakteristik einer Ionisationskammer aus?
10. Welche Prozesse tragen zur Abschwächung von Röntgenstrahlen beim Durchstrahlen von Materie bei?
11. Was versteht man unter folgenden Begriffen:
    - Schwächungskoeffizient: μ
    - Streukoeffizient: σ
    - Absorptionskoeffizient: τ
    - Massenschwächungskoeffizient: μ/ϖ
12. Ist der Abschwächungskoeffizient μ für ein bestimmtes Material eine Konstante, oder, wenn nicht, wovon hängt er ab?
13. Begründen Sie, warum man zur Abschirmung von Röntgenstrahlen Bleimaterial bevorzugt.
14. Was versteht man unter dem Begriff Eindringtiefe einer Strahlung und wie hängt diese für Röntgenstrahlen mit dem Schwächungskoeffizienten μ zusammen?
15. In welchem Maßstabpapier würden Sie die Messwerte einer Absorptionsmessung eintragen? (Exponentialgesetz!)
16. Wie lässt sich aus dieser Darstellung graphisch die Eindringtiefe ermitteln?
17. Was versteht man unter dem Begriff Ionendosis und Ionendosisleistung, und welche anderen Einheiten zur Messung der Intensität von Röntgenstrahlen kennen Sie sonst noch?
18. Welche physiologischen Wirkungen üben Röntgenstrahlen auf menschliches Gewebe aus und welche Konsequenzen ergeben sich daraus für deren Handhabung?
19. Erläutern Sie die Braggsche Reflexionsbedingung.
20. Wie sind die Millerschen Indizes definiert (z. B. (100)-Spaltfläche)?

21. Wie hängt der Absorptionskoeffizient τ von der Wellenlänge und der Ordnungszahl des Absorbers ab?
22. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Wellenlänge der K_α-Linie eines Elementes und seiner Ordnungszahl (Moseleysches Gesetz)?

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

1. Nachweis von Röntgenstrahlen

- Inbetriebnahme der Röntgenstrahlapparatur.
- Überprüfen Sie bei strahlender Röntgenröhre mit einem Röntgenstrahldosismeter die aus dem Bleischutzkasten austretende Röntgenreststrahlung.
- Messen und deuten Sie die Abhängigkeit des Ionisationsstroms von der an den Kondensatorplatten anliegenden Spannung bei fester Röntgenröhrenspannung U_{Roe} für mindestens 3 verschiedene Röntgenröhrenströme I_{Roe}.

bei Apparatur 1:			bei Apparatur 2:		
U_{Roe}	=	50 kV	U_{Roe}	=	60 kV
I_{Roe}	=	2 mA, 3 mA, 4 mA	I_{Roe}	=	1 mA, 2 mA, 3 mA

2. Absorption von Röntgenstrahlen in Materie

- Messen Sie die Abschwächung von Röntgenstrahlen durch Kupfer-Bleche in Abhängigkeit von der Blechdicke für einen festen Röhrenstrom I_{Roe}, aber für 5 verschiedene Röntgenröhrenspannungen U_{Roe}.

bei Apparatur 1:			bei Apparatur 2:		
I_{Roe}	=	2 mA	I_{Roe}	=	2 mA
U_{Roe}	=	50 kV, 60 kV, 70 kV, 80 kV, 90 kV	U_{Roe}	=	40 kV, 50 kV, 60 kV, 90 kV

- Tragen Sie die Messergebnisse der verschiedenen Absorptionsmessreihen in ein geeignetes Maßstabpapier ein und diskutieren Sie die sich ergebenden Messkurven.
- Bestimmen Sie, jeweils für den „harten" Anteil der Röntgenstrahlung, für jede einzelne Messreihe graphisch die zugehörige Eindringtiefe in dem verwendeten Kupfermaterial und bestimmen Sie daraus den jeweiligen Abschwächungskoeffizienten für den harten Anteil der untersuchten Röntgenstrahlung.

3. Aufnahme eines Röntgenbildes (freiwillige Zusatzaufgabe)

Sie können z. B. von einer Armbanduhr eine Röntgenaufnahme anfertigen. Dazu wird die Uhr in der Halterung befestigt und der Film direkt dahinter. Die Belichtung erfolgt mit einer Spannung von 78/80 kV und einem Strom von 2 mA. Die Belichtungszeit ist abhängig vom Objekt und von der Filmempfindlichkeit. Hierzu liegt eine gesonderte Anleitung bei der Aufgabe.

Versuchsaufbauskizzen

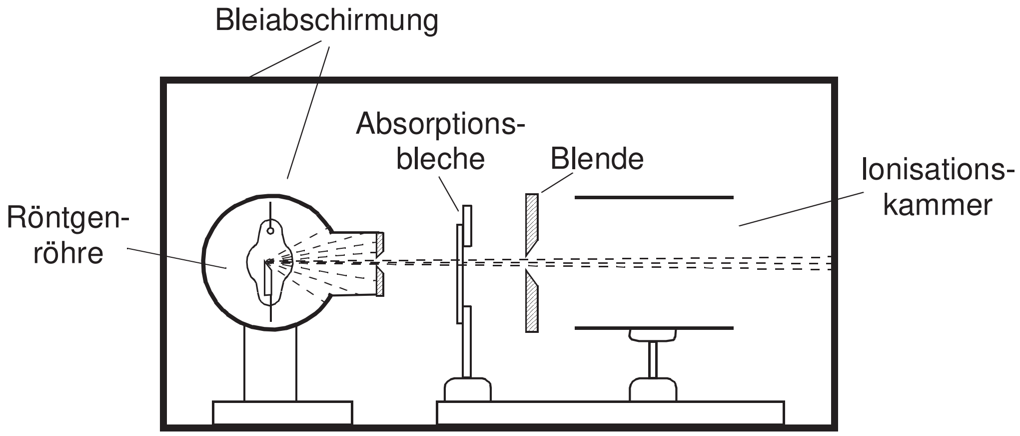


Abb. 1: Röntgen-Experimentierkammer

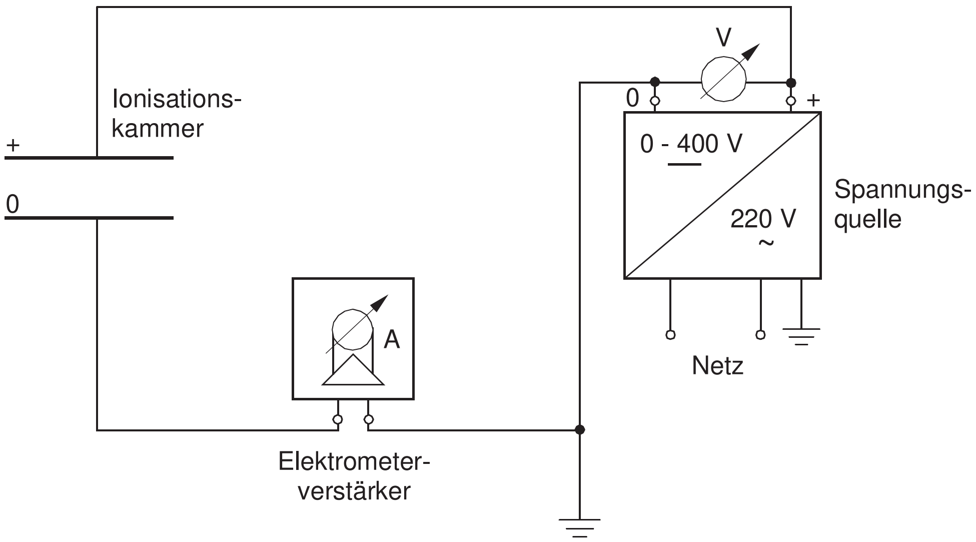


Abb. 2: Elektrische Verschaltung des Röntgenstrahlnachweises

Vorsicht, an den Kondensatorplatten der Ionisationskammer liegen bis zu 500 V Spannung an. Vor Öffnen des Abschirmkastens ist unbedingt die Spannungsversorgung auszuschalten und die Spannungsfreiheit am Vielfachmessgerät zu kontrollieren!

Anleitung

Die Röntgenstrahlapparatur besteht aus folgenden 3 Einheiten:

- Dem Röntgengenerator
- Der Spannungs- und Stromversorgungseinheit
- Dem Röntgenstrahlnachweis

Der Röntgengenerator (Röntgenstrahlerzeuger) besteht aus einem Hochspannungs- und einem Heiztransformator und der eigentlichen Röntgenröhre. Eine Schnittzeichnung und eine kurze Beschreibung des zur Verfügung stehenden Röntgengenerators liegt am Versuchsplatz aus.

Die Spannungs- und Stromversorgung ist bei Apparatur 1 und 2 *unterschiedlich*!

Bei Apparatur 1 besteht sie aus zwei Einheiten: Der Schalteinheit Pleodor 4 und einem Hochspannnungsregler. Die eigentliche Strom- und Spannungsversorgung bewerkstelligt die Schalteinheit Pleodor 4. Sie ist ausgestattet mit einem Netzschalter, einem Regler für den Röntgenröhrenstrom I_{Roe} und einem zugehörigen Amperemeter.

Der Hochspannungsregler ermöglicht es, die für die Röntgenröhre notwendige Hochspannung stufenlos zu regeln. Bei Apparatur 1 hat der Spannungsvorwahlschalter der Schalteinheit Pleodor 4 *keine Bedeutung* (bleibt auf Stellung „100 keV“)!

Bei Apparatur 2 wird die für die Röntgenröhre gebrauchte Hochspannung nur über den Spannungsvorwahlschalter geregelt. Hierbei ist zu beachten, dass der Schalter nur auf die angegebenen *diskreten* Werte eingestellt wird, eine stufenlose Regelung ist nicht möglich. Werden Zwischenwerte eingestellt, so besteht die Gefahr, dass in der Schalteinheit Pleodor 4 einige Widerstände überlastet werden. Es ist hier also immer darauf zu achten, dass der Spannungsvorwahlschalter beim gewählten Wert *einrastet*. Außerdem muss hier *vor* jeder Änderung der Hochspannung der Netzschalter auf 0 zurückgestellt werden und darf erst nach der Änderung wieder eingeschaltet werden.

K 2a Radioaktiver Zerfall

Aufgabenbeschreibung

Von den mehr als 1250 bekannten Atomkernen sind etwa ein Drittel stabil, die übrigen sind instabil. Im vorliegenden Versuch wird $^{103}_{45}Rh$ mittels einer Neutronenquelle in $^{104}_{45}Rh$ umgewandelt, das dann unter β^--Emission in $^{104}_{46}Pd$ zerfällt. Gemessen wird die Halbwertszeit des radioaktiven Rhodiumisotops.

Der Arbeitspunkt des verwendeten Geiger-Müller-Zählrohrs wird aus dessen Charakteristik entnommen, die mit einem $^{22}_{11}Na$- oder einem $^{137}_{55}Cs$-Präparat gemessen wird. Zudem wird die Häufigkeitsverteilung zufälliger Prozesse untersucht.

Literatur

1. Alonso-Finn III: Kap. 7
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 13.2–3
3. Marmier: Kernphysik I
4. Braunbeck: Grundbegriffe der Kernphysik
5. Kohlrausch: Praktische Physik 1, 2, 3
6. Piraux: Radioisotope und ihre Anwendung in der Industrie, Kap. 1, 2
7. Schpolski: Atomphysik II
8. Mayer-Kuckuck: Kernphysik

Fragen zum Versuch

1. Erläutern Sie qualitativ den Aufbau der Atomkerne.
2. Was ist ein instabiler Kern? Auf welche Arten kann er zerfallen? Wie sieht die Gesetzmäßigkeit des Zerfalls aus?

3. Erläutern Sie den Begriff der radioaktiven Zerfallsreihe. Geben Sie die Zerfallsreihe für $^{210}_{82}$Pb an.
4. Diskutieren Sie die Umwandlungsspinne von $^{9}_{4}$Be.
5. Was versteht man unter den Begriffen „Halbwertszeit“ und „mittlere Lebensdauer“? Informieren Sie sich über die Halbwertszeiten der im Versuch auftretenden Substanzen $^{210}_{82}$Pb, $^{9}_{4}$Be, $^{104}_{45}$Rh, $^{22}_{11}$Na, $^{137}_{55}$Cs, u.a.!
6. Erklären Sie die Wirkungsweise der Neutronenquelle. Warum geht man dabei von $^{210}_{82}$Pb aus? (Anmerkung: Auch ein Po-Be-Präparat könnte als Neutronenquelle verwendet werden, vgl. auch Frage 5.)
7. Wie sind die Begriffe Energiedosis, Ionendosis, Dosisäquivalent und Qualitätsfaktor definiert?
8. Informieren Sie sich über die biologischen Wirkungen der Radioaktivität (Toleranzdosis u. dgl.).
9. Was ist ein Neutron, wie kann man es erzeugen und nachweisen?
10. Was versteht man unter künstlicher Radioaktivität?
11. Erklären Sie das Geiger-Müller-Zählrohr!
12. Welche weiteren Nachweisgeräte für radioaktive Substanzen kennen Sie?
13. Was ist ein Multi-Channel-Analyser (MCA)?
14. Wo nutzt man die Radioaktivität in der Praxis aus?
15. Welche ungefähre Genauigkeit erwarten Sie bei Ihren Messungen? (Vor Versuchsbeginn abschätzen!)
16. Was versteht man unter Poisson-Verteilung und Gauß-Verteilung? Was versteht man unter dem Begriff statistischer $\sqrt{\mathrm{N}}$-Fehler?
17. Was ist die „Stirlingsche Näherungsformel“?
18. Was versteht man unter Höhenstrahlung?

Aufgabenstellung

1. Nehmen Sie die Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs auf.

2. Bestimmen Sie die Nullrate.

3. Messen Sie die Aktivität des $^{22}_{11}$Na- bzw. des $^{137}_{55}$Cs-Präparats und bestimmen Sie die Häufigkeitsverteilung der Zerfälle. Diese ist mit der Poisson- bzw. Gauß-Verteilung zu vergleichen.

4. Bestimmen Sie die Halbwertszeit des aktivierten Rhodiums (Literaturwert: 42 s).

Allgemeine Hinweise:

Wenn in der Anleitung auf das $^{22}_{11}$Na-Präparat Bezug genommen wird, kann alternativ auch ein $^{137}_{55}$Cs-Präparat im Versuch benutzt werden.

Machen Sie sich mit der Handhabung von APLab©vertraut. Sollten Sie Fragen haben, wenden Sie sich an Ihren Betreuer.

Zu Aufgabe 1:

Unter der Zählrohrcharakteristik versteht man den Zusammenhang zwischen der am Zählrohr angelegten Spannung U und der Impulsrate (bei gegebener Aktivität). Zur Aufnahme der Charakteristik wird ein $^{22}_{11}$Na- bzw. ein $^{137}_{55}$Cs-Präparat benutzt.

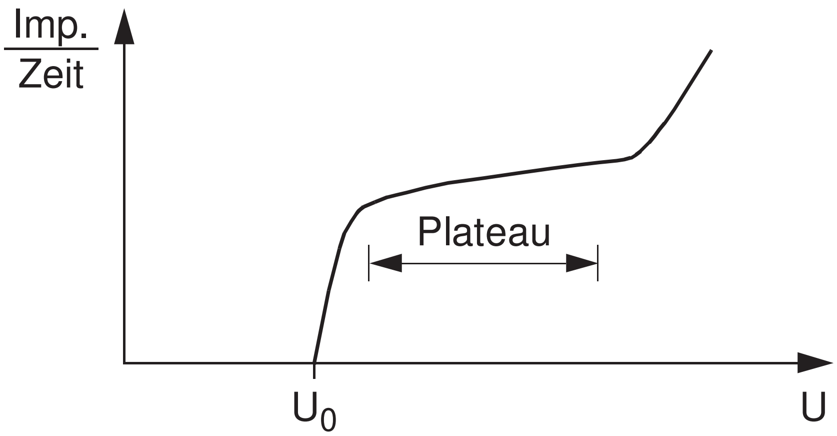


Abb. 1: Geiger-Müller-Zählrohrcharakteristik

Bei U_0 (Einsatzspannung) treten die ersten Entladungen des Zählrohrs auf, es folgt ein (hier sehr schmaler) Bereich proportionalen Anstiegs der Zählrate mit der Spannung und anschließend der Plateau-Bereich, das eigentliche Arbeitsgebiet des Zählrohrs, in dem die Zählrate relativ unabhängig von der Spannung ist.

1. Bestimmen Sie vor dem Start der eigentlichen Messung die Einsatzspannung U_0 (hörbar durch lautes Knacken des Lautsprechers in der Spannungsversorgung/Verstärker-Einheit) und überlegen Sie sich geeignete Spannungswerte bzw. Spannungsintervalle für die Aufnahme der Zählrohrcharakteristik.

2. Stellen Sie einen Spannungswert am Zählrohr ein und nehmen Sie die Zählrate über einen geeigneten Zeitraum mit Hilfe eines x-t-Schreibers auf. Übertragen sie die gemessenen Werte in eine Tabelle und bestimmen Sie die Zählrate (Imp/s).

3. Tragen Sie alle gemessenen Werte in ein Diagramm mit korrekter Beschriftung und Fehlern ein und drucken Sie dieses aus.

Es empfiehlt sich, zuerst eine Probemessung mit wenigen Spannungswerten (davon einige im vermuteten Plateau-Bereich) und kurzer Messdauer durchzuführen.

Wählen Sie für die weiteren Messungen einen geeigneten Arbeitspunkt für das Geiger-Müller-Zählrohr innerhalb des Plateau-Bereiches der Zählrohrcharakteristik. Es ist zu beachten, dass die Samplingrate bei allen Messungen auf eine Sekunde als Zeitabstand zwischen zwei Abtastvorgängen eingestellt ist (im allgemeinen entspricht dies der Default-Einstellung).

Vorsicht, die Einsatzspannung U_0 darf nicht um mehr als 200 V überschritten werden. Höhere Spannungen zerstören das Zählrohr.

zu Aufgabe 2:

Auch ohne Präparat kann man mit dem Geiger-Müller-Zählrohr in einem Zeitintervall von 5 s bis zu 10 Ereignisse zählen, die insbesondere durch die Höhenstrahlung und die Radioaktivität der Umgebung (z. B. Mauerwerk) verursacht werden.

Nehmen Sie die Nullrate über einen geeigneten Zeitraum mit Hilfe eines x-t-Schreibers auf (Summenfunktion findet man unter Statistik in der Tabellenauswertung). Bestimmen Sie den Mittelwert der gemessenen Zählraten und bestimmen Sie den Meßfehler.

zu Aufgabe 3:

Die Häufigkeitsverteilung der Aktivität des $^{22}_{11}$Na-Präparats soll gemessen werden. Hierfür sollten mehrere Zeitintervalle von kürzerer Dauer aufgenommen werden. Dafür eignet sich am besten der Viel-Kanal-Analysator (MCA). Dieser unterteilt die Eingangswerte in feste Intervalle, die sogenannten Kanäle. So steht jeder Kanal für ein Intervall von Eingangswerten. Wird jetzt ein Eingangswert gemessen, so wird der Zählerstand des dazu gehörigen Kanals um eins hochgezählt.

Bei der Messung ist darauf zu achten, dass eine geeignete Anzahl an Einzelmessungen vorgenommen wird. Dazu ist es notwendig, die Intervallgröße nicht zu klein zu wählen. Überlegen Sie sich anhand der Aktivität des zu untersuchenden Präparats die Anzahl der Kanäle und die notwendige Messzeit, um verwertbare Ergebnisse zu erlangen. Auch hier sollte die Zeit zwischen dem Abtasten zweier Zählerstõnde eine Sekunde betragen.

Übertragen Sie die Messdaten in eine Tabelle und rechnen Sie die Spannungswerte in (Imp/s) um. Bestimmen Sie die Fehler und tragen Sie die Daten in einem Histogramm auf. Tragen Sie die Poisson- und die Gauß-Verteilung in das Histogramm ein und erläutern Sie den qualitativen Unterschied zwischen den beiden Verteilungen.

Poisson-Verteilung:

$$w(n_i) = \frac{(\overline{n})^{n_i}}{n_i!} \cdot e^{-\overline{n}} \tag{1}$$

Gauß-Verteilung:

$$w(n_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{n_i - \overline{n}}{\sigma}\right)^2} \tag{2}$$

Hierbei bedeuten:

n_i	:	Impulszahl
$\overline{n} = \frac{1}{Z}\sum_i Z_i n_i$	:	Mittelwert
Z_i	:	Häufigkeit
Z	:	Anzahl der Messungen
$\sigma = \sqrt{\frac{1}{Z-1}\sum_i Z_i(n_i - \overline{n})^2}$	:	Standardabweichung

Beide Verteilungen sind gemäß $\sum_{n_i} w(n_i) = 1$ normiert.

Viele Rechner können die Fakultätsfunktion $n!$ nicht für beliebige große n mit ausreichender Genauigkeit berechnen. Eine Methode dieses Problem zu lösen ist die „Stirlingsche Näherungsformel“, die $n!$ für große Zahlen n sehr gut nähert. Zeigen Sie, dass durch Anwenden der „Stirlingschen Näherungsformel“ die Poisson-Verteilung durch

$$w(n_i) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi n_i}} \left(\frac{\overline{n}}{n_i}\right)^{n_i} \cdot e^{(n_i - \overline{n})} \tag{3}$$

dargestellt werden kann.

zu Aufgabe 4:

Aus der Neutronenquelle (s. a. Beschreibung) treten pro Sekunde und Quadratzentimeter etwa 150 langsame Neutronen aus (vgl. Frage 4). Bei der Aktivierung geschieht folgendes:

$${}^{103}_{45}\mathrm{Rh} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{104}_{45}\mathrm{Rh}$$

Die Stärke der Aktivierung hängt u. a. von der Anzahl der pro Zeiteinheit austretenden Neutronen, dem von der Neutronenenergie abhängigen Wirkungsquerschnitt für die Absorption eines Neutrons und von der Dauer der Aktivierung ab.

Das bei der Aktivierung entstandene Isotop ${}^{104}_{45}\mathrm{Rh}$ zerfällt wie folgt:

$${}^{104}_{45}\mathrm{Rh} \longrightarrow {}^{104}_{46}\mathrm{Pd} + \mathrm{e}^-$$

Die Anzahl der ausgesandten β^--Teilchen, die vom Geiger-Müller-Zählrohr registriert werden, ist proportional zur Anzahl der zerfallenden Teilchen. Aus der Zeitabnahme dieser Zerfallsrate lässt sich die Halbwertszeit von $^{104}_{45}$Rh bestimmen.

Hinweise zur Messung:

Durch Einschieben von zwei auf Plastikträgern befestigten Rhodiumplättchen in die Neutronenquelle für die Dauer von mindestens 5 Minuten werden diese Rhodiumplättchen aktiviert und dann nahe an das Zählrohr gebracht. Während der Messung können zwei weitere Plättchen aktiviert werden, um den Zeitaufwand für die Messung zu verkürzen. Bei den Versuchsteilen 3 und 4 sollten sich die beiden Parallelgruppen miteinander absprechen. Eine Gruppe sollte mit Teil 3, die andere mit Teil 4 beginnen. Für den Versuchsteil 4 stehen dann jeweils vier Rhodiumplättchen zur Verfügung, von denen jeweils zwei aktiviert werden können, während bei den beiden anderen die Abklingzeit gemessen wird.

Vorsicht, Zählrohr nicht berühren, da es leicht zerbrechlich ist!

Die Halbwertszeit $^{104}_{45}$Rh beträgt nur 42 Sekunden, daher muss die Messung sofort nach Entnahme des Präparats aus der Neutronenquelle gestartet werden. Zur Messung soll ein x-t-Schreiber verwendet werden.

Wegen der geringen Aktivität des $^{104}_{45}$Rh-Präparats ist dieser Messzyklus mindestens viermal zu wiederholen. Beachten Sie, dass die Messintervallänge und die Samplingrate jeweils übereinstimmt. Nach dem Übertragen der Messwerte in eine Tabelle, addieren Sie die verschiedenen Zerfallskurven mit Hilfe der BERECHNEN-Funktion.

Um die Nettoimpulsrate zu bestimmen, muss noch die Nullrate abgezogen werden. Drucken Sie die Tabelle aus.

Anhand dieser Tabelle ist eine halblogarithmische Zerfallskurve zu erstellen, mit deren Hilfe die Halbwertszeit bestimmt werden kann. Schätzen Sie den Fehler ab und vergleichen Sie Ihr Endergebnis mit dem Literaturwert. Wie sind die Fehlerbalken der Summenkurve definiert?

Allgemeiner Hinweis

Die benutzten radioaktiven Präparate liegen bezüglich ihrer Aktivität alle unter der Freigrenze. Da beim Umgang mit diesen Präparaten keine Gefährdung zu erwarten ist, sind keine Strahlungsschutzüberwachungsmaßnahmen notwendig.

Fehlerrechnung

Systematische Fehler

Auch wenn ein Messwert reproduzierbar ist, kann er vom wahren Wert erheblich abweichen. Solche systematischen Fehler können durch das angewendete Messverfahren hervorgerufen werden (z. B. Vernachlässigung des Auftriebs bei einer Wägung, Vernachlässigung des Temperaturkoeffizienten bei der Messung von elektrischen Widerständen, die sich aufgrund der bei der Messung anfallenden Jouleschen Wärme aufheizen). Zur Begrenzung solcher systematischer Fehler ist eine kritische Analyse des Messverfahrens notwendig. Systematische Fehler können auch darauf beruhen, daß das Messinstrument nicht richtig kalibriert („geeicht") oder gar defekt ist (z. B. falscher Nullpunkt, falsche Betriebsspannung/Batterie „leer ").

Deshalb sollten einfach durchzuführende Tests (Nullpunkt, Spannung u. ä.) immer wieder einmal durchgeführt werden. Bei Unstimmigkeiten ist das Messgerät umfangreicheren Kontrollen zu unterziehen. Bei vielen Messgeräten ist angegeben, innerhalb welcher Grenzen sie zuverlässig sind (z. B. Güteklassen elektrischer Messinstrumente). In jedem Fall ist zu überlegen, wie groß ein systematischer Fehler sein könnte. Das Messergebnis ist in der Form $x \pm \Delta x$ anzugeben. Systematische Fehler sind möglichst realistisch anzusetzen. Es ist nicht angebracht, sie „vorsichtshalber" maßlos zu überschätzen, da dadurch das Messergebnis entwertet wird.

Zufällige oder statistische Fehler

Auch bei Ausschaltung systematischer Fehler liefert die mehrmalige Messung einer Größe nicht genau übereinstimmende Ergebnisse: die Messwerte x_i sind statistischen Schwankungen unterworfen, d. h. sie sind um einen „wahren" Wert x_0 zufällig verteilt. Oft liegt eine sog. *Gauß-Verteilung* (Glockenkurve) vor. Die Aufgabe besteht darin, aus den Stichprobenwerten den besten Schätzwert für den wahren Wert x_0 und ein Maß für die Unsicherheit dieser Schätzung anzugeben. Für eine Stichprobe (Messreihe) von n Messwerten x_i kommt der *arithmetische Mittelwert*

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$$

dem „wahren“ Wert x_0 am nächsten. Das Maß für die Streuung der Messwerte (Breite der Glockenkurve) ist die so genannte *Standardabweichung*

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}$$

Für großes n beträgt die Wahrscheinlichkeit P, einen Einzelwert x_i zu messen, der innerhalb des Intervalls $\overline{x} \pm \sigma$ liegt, $P = 68.3\%$ ($\overline{x} \pm 2\sigma : P = 95.5\%$; $\overline{x} \pm 3\sigma : P = 99,7\%$).

Die Unsicherheit der Mittelwerte ist geringer als die Streuung der Einzelmessungen. Die *Standardabweichung des Mittelwerts* beträgt

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Da σ nicht von der Anzahl der Messungen abhängt, ist die Unsicherheit des Mittelwerts σ_m proportional zu $1/\sqrt{n}$.

Bei zufällig schwankenden Messwerten ist also folgendermaßen vorzugehen:

1. Messreihe mit hinreichend vielen Messwerten x_i $(i = 1, \ldots, n)$ durchführen

2. Mittelwert $\overline{x}$ und Standardabweichung σ berechnen

3. Angabe eines Konfidenzintervalls $\overline{x} \pm \Delta x$ $(\Delta x = \sigma, 2\sigma, 3\sigma)$ unter Berücksichtigung des systematischen Fehlers

Fehlerfortpflanzung

Die meisten physikalischen Experimente betreffen abgeleitete Größen A, zu deren Bestimmung mehrere direkt gemessene Teilgrößen $x,\ y,\ z,\ \ldots$ erforderlich sind:

$$A = \overline{r}(x, y, z, \ldots).$$

Sind die Teilgrößen voneinander unabhängig und sind ihre Konfidenzintervalle $\overline{x}\pm\Delta x,\ \overline{y}\pm\Delta y,\ \overline{z}\pm\Delta z,\ \ldots$, dann liefert das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz den *mittleren quadratischen Fehler*

$$\Delta A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2_{x=\overline{x}} \cdot \Delta x^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2_{y=\overline{y}} \cdot \Delta y^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)^2_{z=\overline{z}} \cdot \Delta z^2 + \cdots}$$

bzw. den *absoluten Größtfehler*

$$\Delta A_{\max} = \left|\frac{\partial A}{\partial x}\right|_{x=\overline{x}} \cdot \Delta x + \left|\frac{\partial A}{\partial y}\right|_{y=\overline{y}} \cdot \Delta y + \left|\frac{\partial A}{\partial z}\right|_{z=\overline{z}} \cdot \Delta z + \cdots,$$

dabei sind die partiellen Ableitungen $\frac{\partial A}{\partial x},\ \frac{\partial A}{\partial y},\ \frac{\partial A}{\partial z},\ \ldots$ an den Stellen $x = \overline{x},\ y = \overline{y},\ z = \overline{z},\ \ldots$ zu berechnen.

Sei A die Summe oder die Differenz von Messgrößen $x,\ y,\ z,\ \ldots$

$$A = \pm x \pm y \pm z \pm\ \cdots,$$

dann haben die partiellen Ableitungen den Wert ± 1 und es gilt

$$\begin{aligned} \Delta A &= \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + \cdots}, \text{ bzw.} \\ \Delta A_{\max} &= \Delta x + \Delta y + \Delta z + \cdots \end{aligned}$$

Sei A das Produkt oder der Quotient von Messgrößen $x,\ y,\ z,\ \ldots$

$$A = c \cdot x^k \cdot y^l \cdot z^m \cdot\ \cdots$$

($k,\ l,\ m$ positiv oder negativ), dann gilt für den *relativen Fehler*

$$\frac{\Delta A}{\overline{A}} = \sqrt{k^2\left(\frac{\Delta x}{\overline{x}}\right)^2 + l^2\left(\frac{\Delta y}{\overline{y}}\right)^2 + m^2\left(\frac{\Delta z}{\overline{z}}\right)^2 + \cdots}$$

bzw.

$$\frac{\Delta A_{\max}}{\overline{A}} = k \cdot \frac{\Delta x}{\overline{x}} + l \cdot \frac{\Delta y}{\overline{y}} + m \cdot \frac{\Delta z}{\overline{z}} + \cdots$$

Zählstatistik ($\sqrt{N}$-Fehler)

Statistisch eintretende Ereignisse (z. B. radioaktiver Zerfall, Streuung von Röntgenquanten) sind mit dem so genannten $\sqrt{N}$-Fehler behaftet, d. h. bei N gezählten Ergebnissen beträgt der Fehler $\Delta N = \sqrt{N}$, also ist das Konfidenzintervall $N \pm \sqrt{N}$.

Für die Differenz zweier Zählraten $D = N_2 - N_1$ (z. B. totale Zählrate mit radioaktivem Präparat minus Nullrate) gilt nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung

$$\Delta D = \sqrt{N_2 + N_1} \quad !$$

Fehlerbalken

Bei graphischer Darstellung von Messergebnissen werden die Messwerte (Mittelwerte) $\overline{x}$ durch ein (kleines) Symbol (z. B. $+$, $\times$, $\circ$, Δ) dargestellt. Das Konfidenzintervall wird (maßstabsgetreu) als so genannter „Fehlerbalken" eingezeichnet, z. B.: