

FACHBEREICH PHYSIK DER UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN

Physikalisches Praktikum

für

**Elektrotechnik, Informationstechnik
und Technoinformatik**

Teilnehmer:

© 1999 Fachbereich Physik Universität Kaiserslautern
Ausgabe: Frühjahr 2001

Herausgeber: Dr. Kurt Jung

Grafiken: Ingeborg Wollscheid
Gestaltung und Satz: Matthias Jung

Inhaltsverzeichnis

Anleitung zum Physikalischen Praktikum für Anfänger	4
M 1a Freie und erzwungene Schwingungen	9
M 1c Ultraschall	18
M 5b Hookesches Gesetz: Dehnen und Biegen	22
W 2b Wärmeleitung in Metallen	30
W 3c c_p/c_v nach Rüchardt und Clément-Desormes	34
E 1c Elektrostatik	39
O 1a Linsensysteme	48
O 1b Prisma	55
O 2a Beugung am Spalt	58
O 2c Interferometrie	63
Fehlerrechnung	71

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 Praktikumssteilnehmern 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:

$$\Theta \ddot{\varphi} + D\varphi = 0 \quad (1)$$

mit $\Theta =$ Trägheitsmoment, $D =$ Direktionsmoment oder Winkelrichtgröße und $\varphi =$ 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:

$$\Theta \ddot{\varphi} + r\dot{\varphi} + D\varphi = 0 \quad (2)$$

Der Proportionalitätsfaktor r wird Reibungskonstante genannt.

Die allgemeine Lösung dieser Gleichung lautet:

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

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.

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

Schwingfall $\beta^2 < 0$

Wir setzen $\beta = i\omega_R$ und erhalten: $\varphi(t) = e^{-\delta t}(A \cdot e^{i\omega_R t} + B \cdot e^{-i\omega_R t})$. 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!):

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

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

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

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:

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

Das Drehpendel geht also nach der Auslenkung sofort, ohne Schwingungen auszuführen, in die Nulllage 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 ($t \rightarrow \infty$) 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.

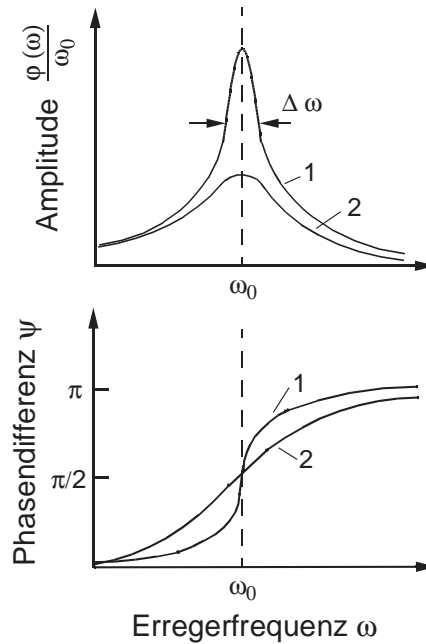


Abb. 1: Amplituden und Phasenlagen für erzwungene Schwingungen bei verschiedenen Dämpfungen

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 ge-

nannt. Es gilt

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

Im Fall verschwindender Dämpfung ($r \rightarrow 0$) 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.

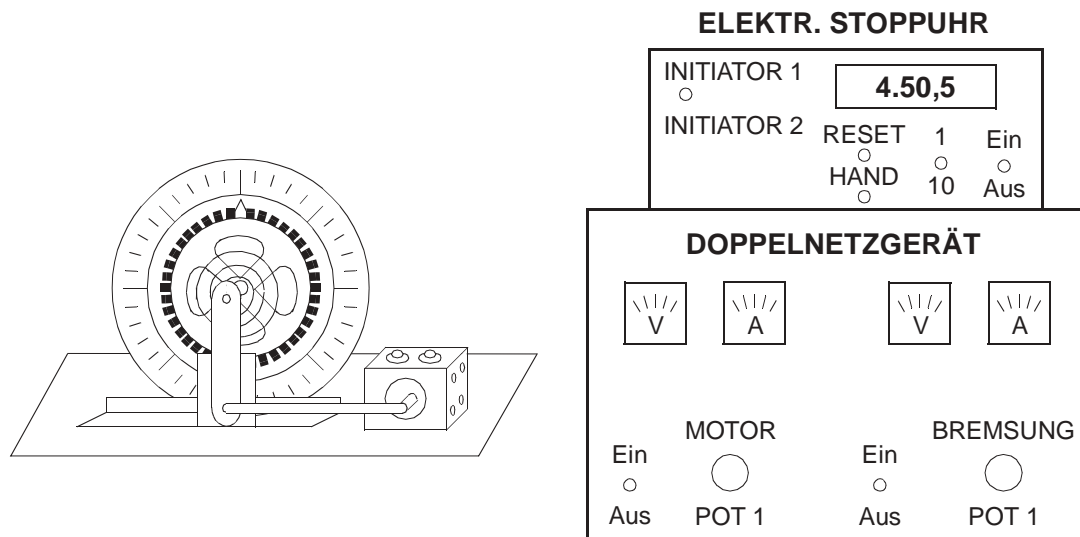


Abb. 2: Skizze des Versuchsaufbaus

Mit einer elektronischen Stoppuhr wird sowohl die Eigenfrequenz des Oszillators als auch die Erregerfrequenz gemessen. Der Initiator I ist hinter dem Zeiger des Drehscheibens festigt, 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 $J = 0$).
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 $J_1 = 0.2$ A, $J_2 = 0.4$ 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 1c Ultraschall

Aufgabenbeschreibung

Mit einem Ultraschall-Geber werden in einer Flüssigkeit bzw. in verschiedenen Probekörpern Ultraschallwellen erzeugt und diese durch einen Ultraschallempfänger nachgewiesen. Dabei werden sowohl kontinuierliche Ultraschallwellen als auch Ultraschallimpulse verwendet. Im ersten Fall sollen durch geeignete gleichzeitige Darstellung von Geber- und Empfängersignal auf dem Zweistrahl-Oszilloskop deren Phasenbeziehung untersucht und Lissajousfiguren erzeugt werden. Im zweiten Fall sollen Laufzeitmessungen durchgeführt werden.

Nach der Laufzeitmethode soll die Schallgeschwindigkeit in Wasser und in sechs Probekörpern bestimmt werden. Zum Vergleich soll die Schallgeschwindigkeit in Wasser zusätzlich durch Abtasten des Schallwellenzuges bestimmt werden.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. I, Kap. 9, Nr. 84
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 4.5
3. Alonso-Finn II: Kap. 18.5
4. Westphal: Physik, 26. Aufl., § 96
5. Kutzner: Grundlagen der Ultraschallphysik, Kap. 9, 10
6. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap. 10.9–10.12

Fragen zum Versuch

1. In welchem Frequenzbereich spricht man von Ultraschallwellen?
2. Auf welche Arten kann man Ultraschallwellen erzeugen?

3. Wie breiten sich Ultraschallwellen in homogenen Festkörpern aus?
4. Warum muß der Ultraschallgeber an einen Festkörper durch einen Flüssigkeitsfilm angekoppelt werden?
5. Was sind die Hauptanwendungsgebiete von Ultraschallwellen?
6. Warum werden hauptsächlich longitudinale Ultraschallwellen benutzt?
7. Wie kann man in einem Festkörper rein transversale Ultraschallwellen erzeugen?
8. Warum werden Ultraschallwellen in Festkörpern nicht oder nur wenig absorbiert?
9. Wie kommen Lissajousfiguren zustande?
10. Wie sieht die Spannung aus, welche am Oszilloskop die Zeitablenkung bewirkt?

Versuchsdurchführung

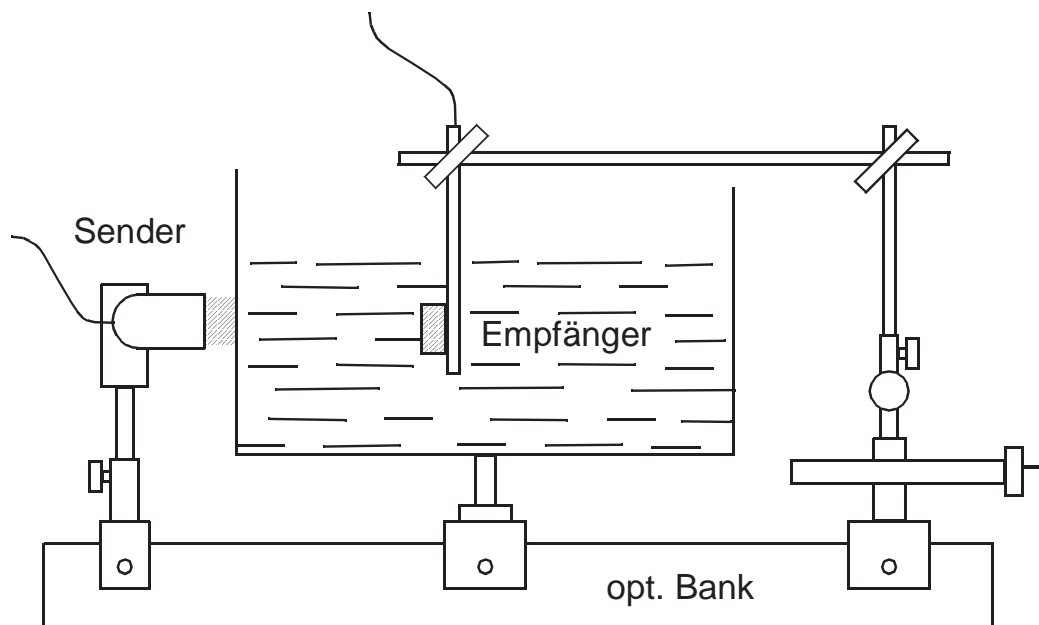


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten

1. Tasten Sie mit dem Ultraschallaufnehmer die vom Schallgeber an das Wasserbad kontinuierlich abgestrahlte Schallwelle ab und beobachten Sie die Phasenbeziehung zwischen Sender- und Empfängersignal auf einem Zweistrahloszilloskop, wie beide relativ zueinander verschoben werden. Ermitteln Sie aus Wellenlänge und Frequenz die Schallgeschwindigkeit im Wasser. Überzeugen Sie sich bei der Bestimmung der Frequenz davon, daß die Zeitbasis des Oszilloskops kalibriert ist!



2. Erzeugen Sie mit der gleichen Versuchsanordnung auf dem Oszilloskop Lissajousfiguren, indem Sie das Gebersignal (SYNCHRON) auf die externe X-Ablenkung (Eingang Y1, Einstellung HOR.EXT und MONO) und das Empfängersignal auf die Y-Ablenkung (Eingang Y2) geben. Stellen Sie durch geeignete Wahl der Verstärkungsfaktoren am Oszilloskop sowie geeigneten Geber-/Empfänger-Abstand einen Kreis dar. Wie ist hierbei die Phasenlage von Geber- und Empfänger-Signal? Bestimmen Sie die Ultraschall-Wellenlänge in Wasser durch Reproduzieren identischer Lissajousfiguren bei Verschieben des Ultraschall-Detektors und bestimmen Sie daraus und aus der Frequenz die Schallgeschwindigkeit. Welche Lissajousfigur ist hierfür am besten geeignet?



3. Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in Wasser mit der Laufzeitmethode. Benutzen Sie Ultraschall-Pulse und stellen Sie Geber- und Empfänger-Signal synchron auf dem Zweistrahloszilloskop dar, indem auf das Geber-Signal getriggert wird. Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit aus der zeitlichen Versetzung von Geber- und Empfänger-Signal bei Verschiebung des Empfängers um einen Betrag Δl . Überlegen Sie sich hierfür ein geeignetes Verfahren ($\Delta t(\Delta l)$ oder $\Delta l(\Delta t)$?) und ermitteln Sie mindestens 5 Wertepaare.



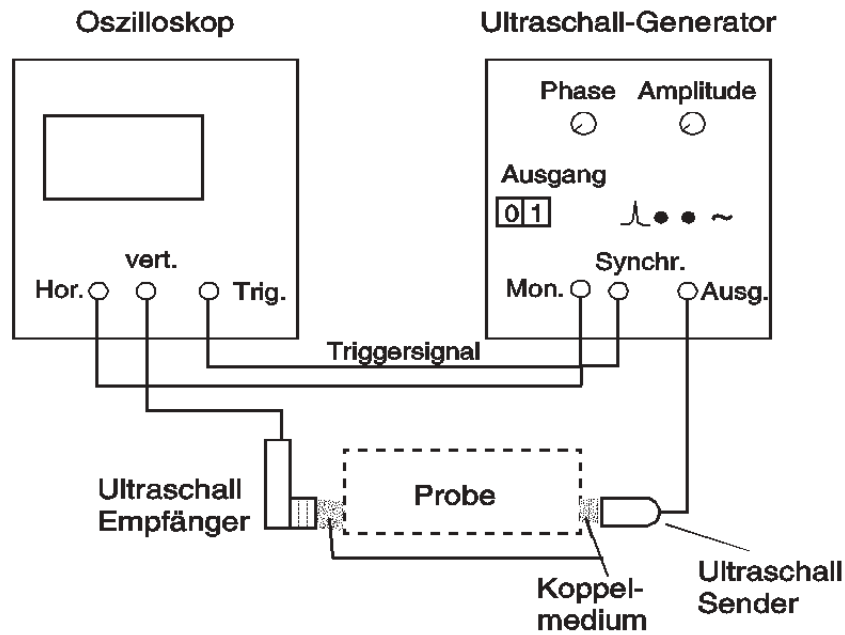


Abb. 2: Schaltung von Ultraschallgenerator, Sender, Empfänger und Oszilloskop

4. Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in 6 Probekörpern nach der Methode 3. Berücksichtigen Sie hierbei die Versetzung der Signale, wenn Geber und Empfänger in direktem Kontakt sind.

M 5b Hookesches Gesetz: Dehnen und Biegen

Aufgabenbeschreibung

Untersuchung des elastischen Verhaltens von deformierbaren festen Körpern.

Literatur

1. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 3.4
2. Bergmann-Schäfer: Bd. 1, Kap. V, Nr. 42–46
3. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap. 6.1, 6.2

Fragen zum Versuch

1. Was sagt das Hookesche Gesetz aus?
2. Klären Sie die Begriffe Volumenelastizität und Gestaltelastizität.
3. Was versteht man unter den Begriffen Elastizitätsmodul, Kompressionsmodul und Torsionsmodul?
4. Wieviel unabhängige Konstanten genügen, um das elastische Verhalten eines (isotropen) Körpers zu beschreiben?
5. Diskutieren Sie das Spannungs-Dehnungs-Diagramm.
6. Erklären Sie die Begriffe: Proportionalitätsgrenze, Fließgrenze, Zerreißspannung, elastische Nachwirkung.
7. Welche Kräfte halten den Festkörper zusammen?
8. Wie biegt sich ein Balken?
9. Was ist ein Nonius?

Versuchsdurchführung

Aufgabenstellung

1. Untersuchen Sie die elastischen Eigenschaften eines Metalldrahts durch Aufnahme eines Kraft-Verlängerungs-Diagramms entweder nur im Proportionalitätsbereich (Versuch 1a) oder bis zum Bruch (Versuch 1b). Bestimmen Sie im ersten Fall den Elastizitätsmodul. Im zweiten Fall sollten Sie anhand des Diagrammes die Eigenschaften der Dehnung diskutieren.
2. Untersuchen Sie die elastischen Eigenschaften verschiedener Stäbe im Biegeversuch entweder für verschiedene Rundmaterialien (Versuch 2a) oder verschiedene Alu-Profile (Versuch 2b).

Anleitung zu den einzelnen Aufgaben

zu Versuch 1a)

Versuchsaufbau Im vorliegenden Fall wird die kombinierte Dehn- und Biegeapparatur zur Dehnungsmessung verwendet. Die Funktionsweise dieses Gerätes kann mit Hilfe von Abb. 1 folgendermaßen beschrieben werden: Die Probe wird in zwei Probenfassungen eingespannt, von denen die untere mit der Grundplatte des Gerätes verschraubt ist. Die obere Probenfassung ist an einem Kraftmesser befestigt, der wiederum von einer Antriebsspindel getragen wird. Durch Verstellen der Antriebsspindel kann man auf die Probe verschiedene Zugbelastungen wirken lassen.

Klebt man auf die Probe (in der Nähe der Probenfassungen) Marken und beobachtet diese durch ein Mikroskop, dann lässt sich aus dem Wandern der Marken die durch die eingestellte Kraft verursachte Längenänderung der Probe ermitteln. Die Mikroskope sind zu diesem Zweck mit einer Skala ausgestattet, so dass nach entsprechender Eichung das Wandern der Marken in Millimetern bestimmt werden kann. Die Mikroskope können sowohl in ihrem Abstand zur Probe als auch in vertikaler Richtung verschoben werden. Geht die

Längenänderung der Probe über den Messbereich der Mikroskope hinaus, dann lassen sich diese mit einer Mikrometerschraube bzw. Antriebsspindel nachregulieren.

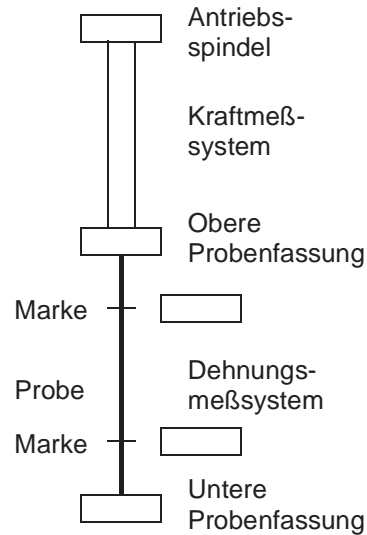


Abb. 1: Versuchsaufbauskizze zu 1a)

Durchführung

1. Die Auswahl des Kraftmessers wird durch den Belastungsbereich der Probe bestimmt. Für die Drähte ist der große Kraftmesser mit $F_{\max} = 10 \text{ kp}$ zu verwenden. Für die Stäbe sind die Angaben der Tabelle auf Seite 27 zu entnehmen.
2. Bestimmung des Gewichtes der vom Kraftmesser getragenen Teile.
3. Draht einspannen, Marken (selbstklebende Metallfolie) anbringen.
4. Mikroskopeinstellung variieren, bis die Marke klar sichtbar ist.
5. Mikroskopskalen eichen
 - a) Position der Markenkante ablesen

- b) Mikrometerschraube bzw. Spindel der Mikroskophalterung um 1 mm verstellen (bei der Spindel entspricht eine volle Umdrehung 1 mm, Reproduzierbarkeit der Einstellung mit Hilfe der Bohrung im Spindelkopf kontrollieren!), danach Skala erneut ablesen. Messung mehrfach wiederholen.
6. Bestimmung der relevanten Drahtdimensionen. Zur Ermittlung des Abstandes der beiden Marken stellt man zunächst beide Mikroskope auf die jeweilige Unterkante der Marke ein, reguliert durch die Höhenverstellung beide Positionen auf 0 Skt. ein und bestimmt dann den Abstand der beiden Mikroskophalter.
 7. Aufnahme je einer Messreihe bei Belastung und bei Entlastung.
 8. Zeichnen Sie das Kraft-Verlängerungs-Diagramm und bestimmen Sie den Elastizitätsmodul.

zu Versuch 1b)

Versuchsaufbau Bei dieser Aufgabe wird nur die obere Mikroskophalterung und ein Mikroskop benötigt. Bei Dehnung bis zum Bruch können Längenänderungen bis zu 50 % auftreten. Da die Mikroskopskala nur ca. 2.5 mm abdeckt, muss während des Experimentes die Mikroskophalterung ständig nachgeführt werden. Ist der Hookesche Bereich überschritten, können Sie folgendes vereinfachte Messverfahren anwenden: Das Mikroskop wird ständig so nachreguliert, dass die Markenkante im Nullpunkt liegt. Die Längenänderung wird an der Millimeterskala (mit Nonius) der Mikroskophalterung abgelesen.

Durchführung Nehmen Sie ähnlich wie unter Punkt 1a) die Messreihe mit geeignet gewählten, konstanten Belastungsschritten auf. Achten Sie auch darauf, dass der eingestellte Wert sich nicht

ändert. Lesen Sie die Längenänderung außerhalb des elastischen Bereiches jeweils nach ein, zwei und drei Minuten ab.

Zeichnen Sie das Kraft-Verlängerungs-Diagramm und diskutieren Sie den Kurvenverlauf. Geben Sie den Elastizitätsmodul, die Elastizitätsgrenze und die Bruchspannung an.

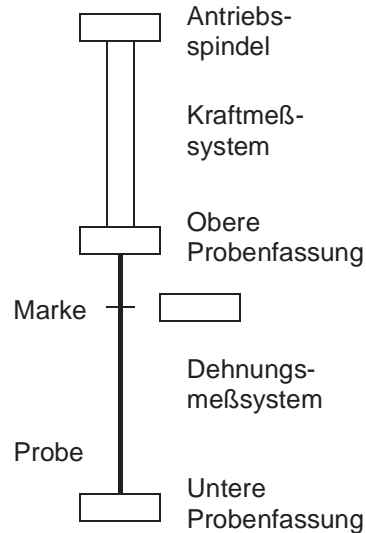


Abb. 2: Versuchsaufbauskizze zu 1b)

zu Versuch 2

Versuchsaufbau Die zu untersuchende stabförmige Probe wird symmetrisch über eine Haltevorrichtung mit keilförmigem Lager an einen Kraftmesser gehängt, der wiederum an der Antriebsspindel befestigt ist. Symmetrisch zur Angriffsrichtung der Kraft sind auf der Grundplatte des Gerätes zwei Gegenlager montiert. Erzeugt man mit der Antriebsspindel eine Kraft, die größer ist als diejenige durch das Gewicht der Probe, dann wird diese an die beiden Gegenlager gedrückt und in der Mitte um einen Betrag Δs durchgebogen. Die Durchbiegung kann mit Hilfe des Mikroskopes mit eingebauter Skala vermessen werden, wobei als Referenzpunkt die Markierung auf der

Probenhalterung dient.

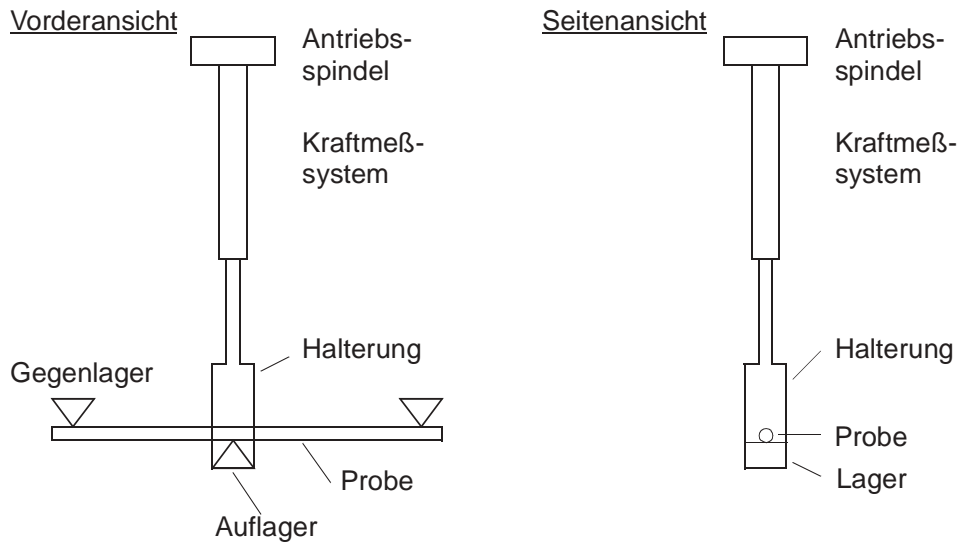


Abb. 3: Versuchsaufbauskitze zu 2

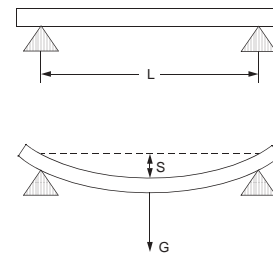
Durchführung

1. Aufnahme einer Messreihe bei verschiedenen Proben ähnlich wie unter Punkt 1a)
2. Ermitteln Sie die Probendimensionen
3. Auswahl der Kraftmesser siehe Tabelle auf Seite 27
4. Zeichnen Sie bei Versuch 2a) die Kraft-Verlängerungs-Diagramme und bestimmen Sie bei Versuch 2a) die Elastizitätsmodule bzw. untersuchen Sie bei Versuch 2b) die Abhängigkeit der Elastizität der Stäbe vom Flächenträgheitsmoment.

Material	max. Belastung [N]
Holz	10
Nylon	2.5
Plexiglas	2.5
Stahl	25
PVC	2.5
Messing	25
Alu	25

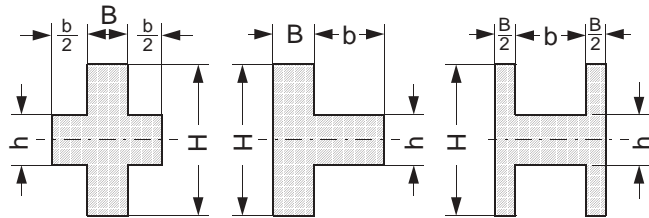
Theoretische Grundlagen

Bezeichnet man entsprechend der Skizze die in Probenmitte angreifende Kraft mit G , den Abstand mit L , das Flächenträgheitsmoment mit I und die maximale Durchbiegung mit s , dann lässt sich für den Elastizitätsmodul die folgende Beziehung angeben:



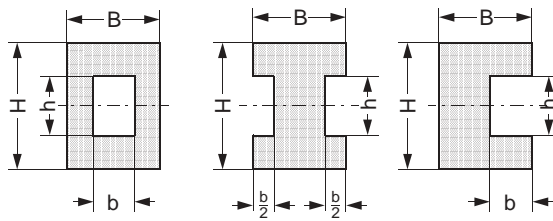
$$E = \frac{G \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot s}$$

Zur Berechnung der jeweiligen Flächenträgheitsmomente können die geeigneten Formeln aus Abb. 4 entnommen werden (aus A. Böge, Mechanik und Festigkeitslehre).



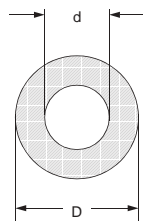
$$I = \frac{BH^3 + bh^3}{12}$$

$$W = \frac{BH^3 + bh^3}{6H}$$



$$I = \frac{BH^3 - bh^3}{12}$$

$$W = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$$



$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$$

$$W = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D}$$

$$i = 0.25\sqrt{D^2 + d^2}$$

Abb. 4: Axiale Trägheitsmomente I , Widerstandsmomente W und Trägheitsradius für Biegung und Knickung

W 2b Wärmeleitung in Metallen

Aufgabenbeschreibung

Es ist die Wärmeleitfähigkeit eines festen Werkstoffes zu bestimmen.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. 1, Kap. X, Nr. 95, 96, 98
2. Alonso-Finn II: Kap. 24.3
3. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 5.4, 14.3.4
4. Kneubühl: Repetitorium der Physik, Kap. 8.3
5. Kittel: Einführung in die Festkörperphysik, Kap. 7
6. Kopitzki: Einführung in die Festkörperphysik, Kap. 3.1
7. Kohlrausch: Prakt. Physik I, Kap. 4.6.4; Prakt. Physik III, Tab. 67

Fragen zum Versuch

1. Definition von Wärmemenge und Temperatur
2. Wie kann man die Größen in 1) messen?
3. Welche Wärmetransportarten gibt es und wo treten diese auf?
4. Wie ist die Wärmeleitfähigkeit definiert?
5. Durch welche Differentialgleichung wird die stationäre Wärmeströmung beschrieben, durch welche die nichtstationäre Wärmeströmung?
6. Wie ist die Temperaturleitfähigkeit definiert?
7. Was sagt die Wiedemann-Franz'sche Regel aus?
8. Welche Analogien bestehen zwischen der Wärmeleitung und der Leitung von elektrischen Strömen?
9. Erklären Sie den Aufbau und die Funktion der Messapparatur (siehe Abb. 1).

10. Erklären Sie die Wirkungsweise eines Thermoelementes.
11. Erläutern Sie das Kalibrierungsverfahren für das Thermoelement.

Versuchsdurchführung

1. Zunächst ist die Empfindlichkeit („Thermokraft“) des Thermoelements zu bestimmen, indem eine Messstelle in ein Eis-Wasser-Gemisch, die andere in Leitungswasser (ca. 15°C) eingetaucht wird. Da das in der Messung verwendete Thermoelement fest in das Kalorimeter eingebaut ist, wird hierfür ein zweites, baugleiches Thermoelement verwendet. Überlegen Sie, wie groß das zu erwartende Messsignal ist. Verwenden Sie zur Messung der Thermospannung zuerst das vorhandene Vielfachmessinstrument. Im Experiment muss die vom Thermoelement abgegebene Spannung zusätzlich verstärkt werden, da die auftretenden Temperaturdifferenzen von ca. 1 K mit dem vorhandenen Messgerät nicht hinreichend genau gemessen werden können. Führen Sie zur Bestimmung des Verstärkungsfaktors des beiliegenden batteriebetriebenen Verstärkers die gleiche Messung mit zwischengeschaltetem Verstärker nochmals durch. Beachten Sie, dass die Anzeige bei einer Temperaturdifferenz von 0 K im allgemeinen nicht mit der Nulllage des Vielfachmessinstruments zusammenfallen wird. Schließen Sie nach der Eichung des Verstärkers das im Kalorimeter eingebaute Thermoelement an.
2. Zur Bestimmung einzelner Größen in der stationären Wärmeleitung wird ein ganzer Messzyklus von ca. einer Stunde durchgeführt. Während dieser Messung sollen ständig Thermospannung und Wassertemperatur abgelesen und notiert werden. Stellen Sie die Messwerte sogleich als Funktion der Zeit graphisch dar. Denken Sie daran, wichtige Zeitpunkte im Diagramm kenntlich zu machen. Füllen Sie z. B. 400 g Leitungswasser in das Kalorimeter und beobachten Sie einige Minuten

lang Thermospannung und Wassertemperatur, dann schalten Sie den Kocher ein.



Achtung, der Kocher wird in Stellung 2 betrieben und muss unbedingt über den Vorschalttrafo (Einstellung 50 V) angeschlossen sein! Registrieren Sie Thermospannung und Wassertemperatur, bis sich eine stationäre Wärmeströmung durch das Probestück eingestellt hat (Woran erkennt man das?) und hier-nach weitere ca. 10 Minuten.

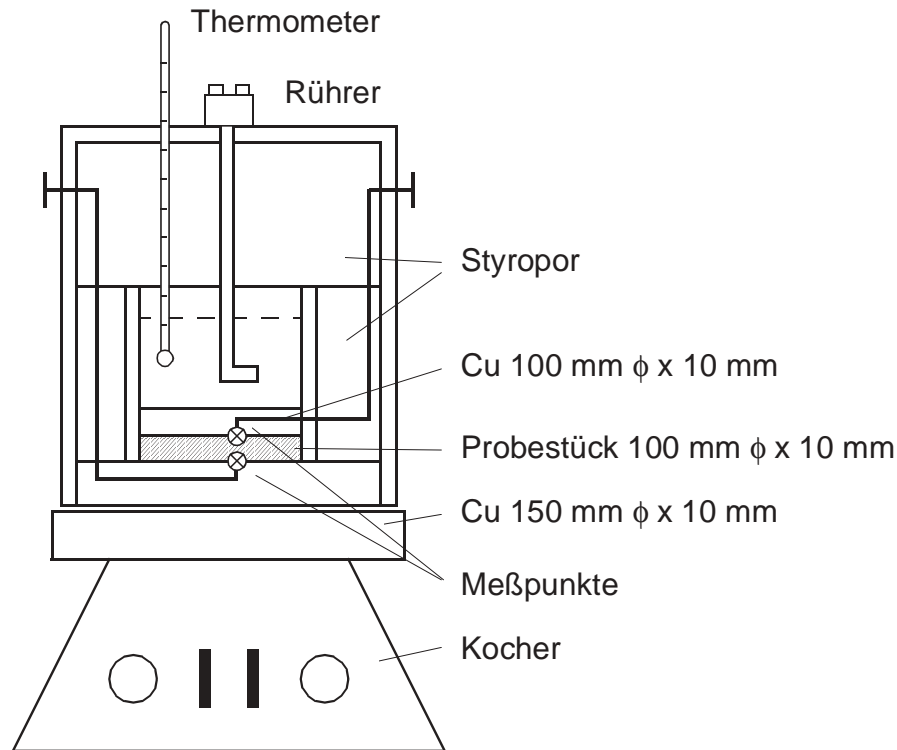


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau

Es ist geschickt, jetzt die Bestimmung der Wärmekapazität des Kalorimeters gleich anzuschließen. Dazu wird der Kocher abgestellt (Warum?) und Temperaturlausgleich abgewartet (Wovon?). Entnehmen Sie das warme Wasser und füllen Sie die gleiche Menge Leitungswasser nach. Wassertemperatur und Thermospannung werden weiter registriert wie zuvor.



Anmerkung zur Auswertung

Beachten Sie, dass nicht die gesamte Wärmekapazität des Kalorimeters in die Berechnung der Wärmeleitung eingeht, sondern dass (zumindest) die Wärmekapazität der unter dem Probestück liegenden Kupferplatte abzuziehen ist. Diese ist rechnerisch aus den Abmessungen zu ermitteln.

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 Clément 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 anderes 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 Abspumpen 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.

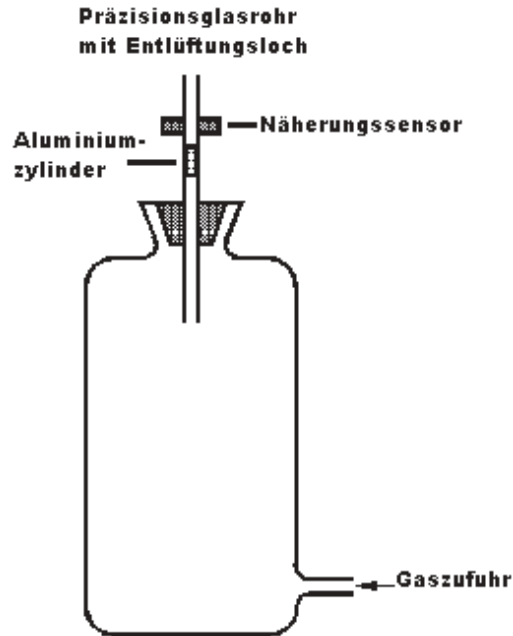


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau nach Rüchardt



zu 3: Der Näherungssinitiator 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 Temperaturengleich 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 s). Hängt das Ergebnis von der Öffnungszeit ab? Falls noch genügend Zeit ist, führen Sie Kontrollversuche mit sehr langer Öffnungszeit (> 10 s) durch. Wie könnte man etwaige Änderungen erklären? Gibt es systematische Fehlerquellen?

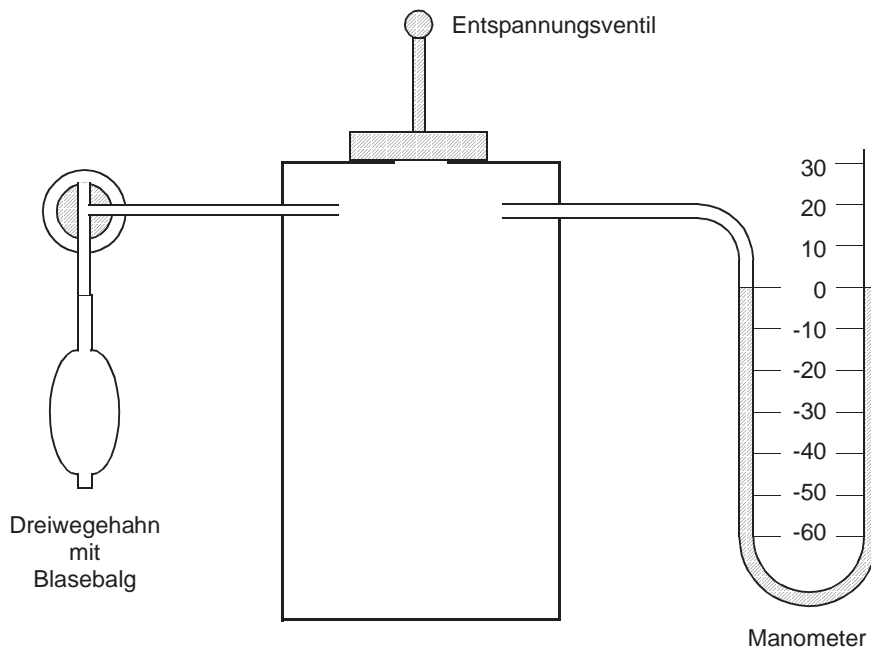


Abb. 2: Schematischer Versuchsaufbau nach Clément-Desormes

Bemerkungen zur Auswertung

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

E 1c Elektrostatik

Aufgabenbeschreibung

Auf Leitfähigkeitspapier sind verschiedene Elektrodenformen (Plattenkondensator, Zylinderkondensator, usw.) mit Hilfe von Leitsilber aufgebracht. Durch Anlegen niedriger Spannungen sollen statische elektrische Felder erzeugt und ausgemessen werden. Die Potentialverteilung $U(x, y)$ wird mit einem xy-Schreiber abgetastet. Anstelle eines Zeichenstifts ist eine Meßspitze eingebaut, deren Potential über einen A/D-Wandler von einem Personalcomputer erfaßt wird. Die x- und y-Koordinaten werden über zwei D/A-Wandler vom Rechner gesteuert.

Literatur

1. Alonso-Finn: Kap. 16.1–16.9
2. Bergmann-Schäfer: Bd. II, Kap. I
3. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 6.1, 6.2
4. Grimsehl: Lehrbuch der Physik II, Kap. 1, § 1–13
5. Feynmann: Vorlesungen über Physik, Bd. II, Kap. 4
6. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 1.2, 1.3, 1.7

Fragen zum Versuch

1. Was versteht man unter einem Feld? Wann nennen wir ein Feld homogen?
2. Wie definiert man die elektrische Feldstärke? Was verdeutlichen die Kraftlinien des elektrostatischen Feldes?
3. Was ist die Spannung und was das Potential eines elektrostatischen Feldes?

4. Wie sehen die Kraftlinien des elektrostatischen Feldes an einer Leiteroberfläche und wie im Inneren eines Leiters aus?
5. Wie hängt die Spannung im elektrostatischen Feld vom Weg ab?
6. Warum können im statischen Feld keine geschlossenen Feldlinien auftreten?
7. Können sich Äquipotentialflächen oder Feldlinien schneiden?
8. Warum verändert sich das Feld in einem Plattenkondensator, wenn wir ein Dielektrikum zwischen seine Platten bringen?
9. Was ist die elektrische Verschiebung, elektrische Polarisierung?
10. Was sind Orientierungspolarisation, Verschiebungspolarisation?
11. Was ist Elektrostriktion?
12. Was ist die Nahwirkungs- und was die Fernwirkungstheorie?
13. Machen Sie sich das Prinzip einer elektrostatischen Linse klar.
14. Wie sieht ein Dipolfeld aus?
15. Was heißt elektrischer Fluß und wie lautet der Satz von Gauß?
16. Wie definiert man die Dielektrizitätskonstante eines nichtleitenden Stoffes?
17. Wie verhalten sich die Normal- und Tangentialkomponente der elektrischen Verschiebung und der Feldstärke bei Trennungsflächen zwischen zwei Medien mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten?

Theoretische Grundlagen

Bei einer vorgegeben Ladungsdichteverteilung $\rho(r)$ im Raum, ergibt sich die Potentialverteilung $U(r)$ aus der Poisson-Gleichung

$$\Delta U = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (1)$$

mit der relativen Dielektrizitätskonstante ε des Materials und der Dielektrizitätskonstante des Vakuums $\varepsilon_0 = 8.859 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$.

Die Differentialgleichung (1) muß unter den folgenden Randbedingungen gelöst werden:

- Leiteroberflächen sind Äquipotentialflächen im Falle unendlich guter Leitfähigkeit.
- Im Unendlichen geht das Potential gegen einen konstanten Wert, der i. a. gleich Null gesetzt wird.

Einfache, analytische Lösungen der Differentialgleichung lassen sich nur für Sonderfälle angeben (z. B. Punktladungen, Kondensator mit unendlich ausgedehnten Platten, Dipol). Im elektrolytischen Trog bzw. mit Hilfe von Leitfähigkeitspapier lassen sich dagegen beliebige Feldverteilungen nachbilden und ausmessen. Man kann jedoch nur zweidimensionale Probleme darstellen.

Spezielle Lösungen von Gleichung (1)

Punktladung Q im Vakuum.

$$U(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Homogener Plattenkondensator mit unendlich ausgedehnten Platten in der x,y-Ebene.

$$U(x) = U_0 \cdot \frac{x}{D}$$

U_0 : Plattenspannung; D : Plattenabstand

Inhomogener Plattenkondensator mit unendlich ausgedehnten Platten in der x,y-Ebene und einem Dielektrikum der Dicke d und der relativen Dielektrizitätskonstante ϵ . $\epsilon = \epsilon_1/\epsilon_2$

$$U(x) = \frac{U_0}{D + d(\epsilon - 1)} \cdot \begin{cases} x & : 0 \leq x \leq \frac{D-d}{2} \\ (\epsilon x - (\epsilon - 1) \cdot \frac{D-d}{2}) & : \frac{D-d}{2} \leq x \leq \frac{D+d}{2} \\ (x + (\epsilon - 1) \cdot d) & : \frac{D+d}{2} \leq x \leq D \end{cases}$$

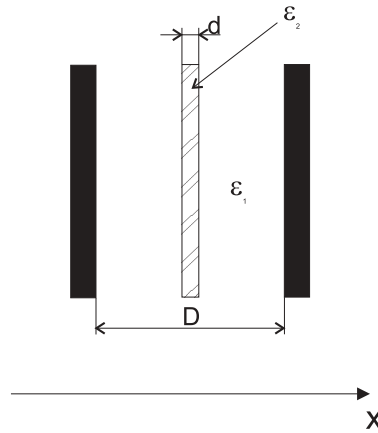


Abb. 1: Skizze eines inhomogenen Plattenkondensators

Kugelkondensator mit zwei konzentrischen Kugelschalen mit den Radien R , r_0 .

$$U(r) = U_0 \cdot \frac{1 - \frac{r_0}{r}}{1 - \frac{r_0}{R}} \quad (2)$$

Die **Spitzenkathode** für Feldemission kann man angenähert durch Formel (2) mit $r_0 \ll R$ beschreiben.

$$U(r) = U_0 \cdot \left(1 - \frac{r_0}{r}\right)$$

Die Radialkomponente der Feldstärke am Ort der Spitze, $r = r_0$, ist dann gegeben durch:

$$E_r(r_0) = -\frac{U_0}{r_0}$$

Ein kleiner Krümmungsradius der Spitze führt somit zu großen Feldstärken.

Zylinderkondensator mit zwei konzentrischen Zylindern mit den Radien R , r_0 .

$$U(r) = U_0 \cdot \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(R/r_0)}$$

Die Radialkomponente der Feldstärke am inneren Zylinder wird jetzt beschrieben durch die Gleichung:

$$E_r(r_0) = -\frac{U_0}{r_0} \cdot \frac{1}{\ln(R/r_0)}$$

Versuchsdurchführung

1. Homogener Plattenkondensator

Zwei ebene Elektroden der Länge 10 cm stehen einander parallel im Abstand von ca. 10 cm gegenüber. Es sind Äquipotentiallinien für diese Anordnung auszumessen.

2. Inhomogener Plattenkondensator

Zwei ebene Elektroden der Länge 30 cm stehen einander parallel im Abstand von ca. 18 cm gegenüber. In der Mitte zwischen ihnen ist parallel zu den Elektroden auf einer Fläche von 6 cm Breite und 30 cm Länge die Leitfähigkeit durch das Übereinanderlegen zweier Lagen des Leitfähigkeitspapiers doppelt so hoch wie außerhalb. Bestimmen Sie längs der Symmetrieachse der Anordnung das Potential als Funktion des Ortes und berechnen Sie die Feldstärke in den drei Bereichen unter der Annahme, daß die Feldstärke jeweils konstant ist. Ermitteln Sie das Verhältnis der Leitfähigkeiten, das bei einem Kondensator dem Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten entsprechen würde.

3. Zwei ebene Elektroden der Länge 30 cm stehen einander parallel im Abstand von 18 cm gegenüber. Zwischen den beiden Elektroden ist eine Kreisfläche aus nichtleitendem Material symmetrisch zu den Elektroden angeordnet. Bestimmen Sie die Äquipotentiallinien dieser Anordnung und zeichnen Sie die Feldlinien ein.

4. Wie Aufgabe 3, aber anstelle des nichtleitenden Materials ist die Kreisfläche metallisiert.

5. Bestimmen Sie den Potentialverlauf $U(\varrho)$ für zwei konzentrische Ringe. Verifizieren Sie den für diese Anordnung erwarteten Potentialverlauf $U(\varrho) = U_0 \frac{\ln(\varrho/r)}{\ln(R/r)}$.
6. Zeigen Sie, daß vor einer Spitze die Feldstärke stark ansteigt (Spitzenentladung, Feldemission). Verwenden Sie dazu die Schablone mit der entsprechenden Elektrodenkonfiguration. Ermitteln Sie längs der Mittellinie das Potential als Funktion des Abstandes von der Spitze und bestimmen Sie durch graphische Differentiation den Feldstärkeverlauf.

Bei symmetrischen Elektrodenanordnungen genügt die Ausmessung eines Teils des Feldes.

Hinweise zur Rechnersteuerung

Das Programm FLAP (**F**eldlinien im **A**nfänger**p**raktikum) wurde im Rahmen des CIP-PPP-Vorhabens entwickelt. Die Programmiersprache ist TURBO PASCAL 5.0, die Textmasken werden von MASK.TPU, die Menüauswahl von GEMINI.TPU unterstützt.

Nach Einlegen der Programmdiskette und Start des Rechners (Schalter an der Rückseite des Bildschirms) erscheint das Hauptmenü mit den Wahlmöglichkeiten:

1. HILFE
2. DATEI
3. BEARBEITUNG
4. MESSUNG
5. 3D-BILD

Hilfe bietet Informationen über den Versuchsaufbau und das Programm.

Datei umfaßt die Optionen:

Speichern: Die aktuellen Daten (automatische Messung, 13×13 Datenpunkte) werden nach Drücken von N(EW) in eine neue Datei geschrieben, deren Namen in der Form *.DTA eingetippt werden muß.

Laden: Die bereits gespeicherten Dateien (automatische Messung) können in einer Auswahlbox ausgewählt und geladen werden.

Druck A: Bis zu vier Dateien können ausgewählt und (verkleinert) auf eine DIN A4-Seite ausgedruckt werden.

Druck B: Dies ist der Hardcopy-Befehl für den Bildschirm (und die einzige Möglichkeit, manuelle Messungen und X-, Y-Schnitte auszugeben).

Mit ESC können die jeweiligen Programmpunkte abgebrochen werden.

Bearbeitung der aktuellen Daten mit den Unterprogrammpunkten:

X/Y-Schnitt: Durch die dreidimensionale Darstellung $U(x, y)$ kann ein Schnitt parallel zur X- bzw. Y-Achse gelegt werden. Eine Ausgabe ist nur mit DRUCK B möglich.

Drehen: Zur besseren Übersicht kann die aktuelle, dreidimensionale Darstellung einer automatischen Messung jeweils um 90° um die Z-Achse gedreht werden. Eine Ausgabe ist nur mit DRUCK B möglich.

Messung umfaßt die auch in dieser Reihenfolge abzuarbeitenden Menüpunkte:

Eichung: Der Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) liefert für Spannungen von 0 bis 8,5 Volt Werte zwischen 0 und 16 383 (was einer Auflösung von 14 Bit entspricht). Zu Versuchsbeginn muß der A/D-Wandler kalibriert („geeicht“) werden. Dazu wird an zehn verschiedenen Punkten der Elektroden/Leitfähigkeitspapier-Anordnung der A/D-Wert abgerufen (Meßspitze von Hand an die gewünschte Stelle bewegen und $3 \times$ RETURN

drücken) und der mit dem Digital-Voltmeter gemessene Spannungswert eingegeben (Abschluß mit RETURN). Die Meßpunkte sollten möglichst die minimalen und maximalen Spannungswerte enthalten. Die intern ermittelte EICKURVE kann zur Kontrolle dargestellt werden.

Justage: Dieser Menüpunkt muß vor Durchführung einer automatischen Messung abgehandelt werden. Für den XY-Schreiber wird mit Hilfe seiner Nullpunkts- und Bereichsschalter der gewünschte Fahrbereich festgelegt. Dabei werden die durch den DA-Wandler erzeugten Auslenkungen in einem Balkendiagramm dargestellt. Außerdem sollen per Hand die Orte minimalen und maximalen Potentials angefahren und diese Werte abgespeichert werden.

Automatische Messung: Ist das System kalibriert und justiert, so kann eine automatische Messung gestartet werden. Dabei rastert der XY-Schreiber das eingestellte Feld in 13 x 13 Punkten ab und stellt die Meßwerte sofort als dreidimensionales Potentialgebirge dar. Nach der Aufnahme kann das Bild abgespeichert, ausgedruckt und bearbeitet werden.

Manuelle Messung: Mit diesem Menüpunkt können Äquipotentiallinien von Hand abgefahren und auf dem Bildschirm dargestellt werden. Ein Kreuz kann mit den Cursortasten auf dem Bildschirm bewegt werden, gleichzeitig bewegt sich die Meßspitze auf der Elektroden/Leitfähigkeitspapier-Anordnung. Die Schrittweite wird durch die Tabulatortaste geregelt.

Mit PGUP kann ein Punkt gesetzt und der zugehörige Meßwert eingetragen werden. Mit PGDN wird eine Linie zwischen der neuen und der alten (zuvor mit PGUP oder PGDN definierten Position eingezeichnet. DEL löscht den letzten Punkt bzw. Strich.

Eine Äquipotentiallinie wird schrittweise abgefahren, indem man das aktuelle Potential kontrolliert, das in der Kopfzeile des Monitors angezeigt wird.

3D-Bild erlaubt z. B. nach dem Bearbeiten einer Messung die 3-dimensionale Darstellung wiederherzustellen.

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 mehrbefindet? 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 Lichtbündes,
 - 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 spärische 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 kurz- brennweitige 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

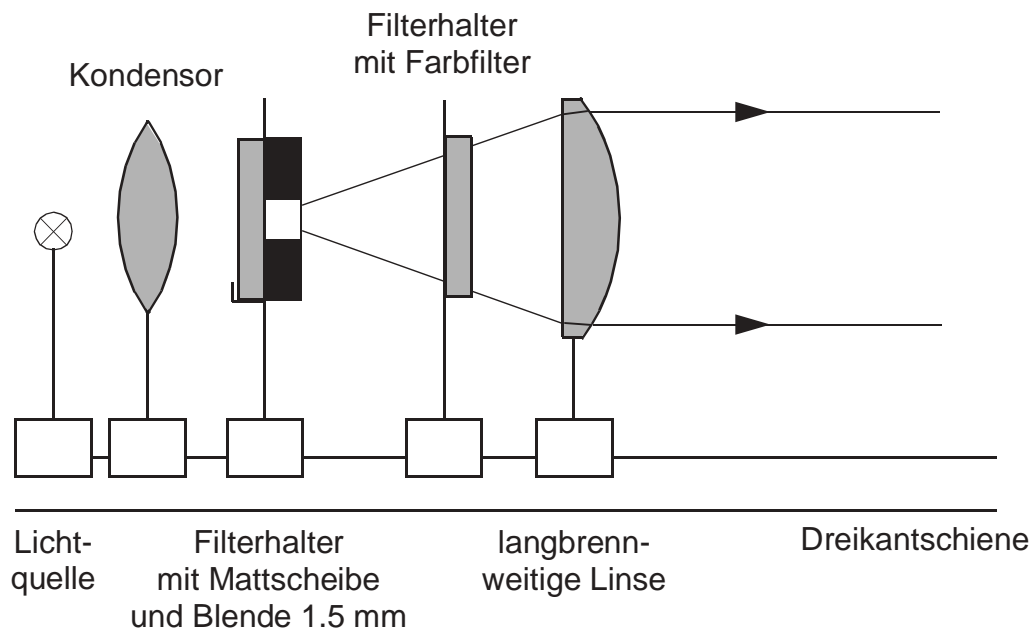


Abb. 1: Versuchsaufbauskizze

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 ($f = 50 \text{ mm}$). 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 $f = 50 \text{ mm}$ benutzt werden. Wählen Sie für die Bestimmung des Brennpunktes für achsennahe Strahlen die Blendenöffnung nicht zu klein ($8 - 10 \text{ mm}$). Warum?



zu 3b)

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

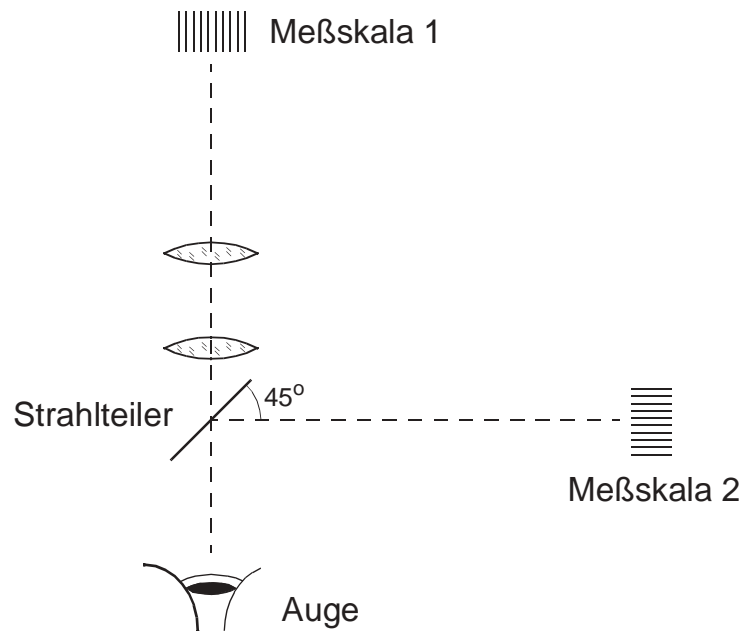


Abb. 2: Versuchsaufbauskitze zu Aufgabe 3b)

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 1b Prisma

Aufgabenbeschreibung

Ein Prisma soll als dispergierendes Element zur Spektralanalyse benutzt werden. Als Lichtquellen werden Metalldampf-Spektrallampen benutzt.

Literatur

1. Alonso-Finn II: Kap. 21.6
2. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. 2.3, 2.10, 3.1, 3.9
3. Born: Optik, Kap. IV § 53
4. Kohlrausch: Praktische Physik, Kap. 5.1.2.6
5. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 9.1.5
6. Hellwege: Einführung in die Physik der Atome, Kap. F
7. Finkelnburg: Einführung in die Atomphysik, Kap. III
8. Knaubühl: Repetitorium der Physik, Kap. 6.13.2
9. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 9.4

Fragen zum Versuch

1. Wie heißt das Snelliussche Brechungsgesetz?
2. Was besagt das Prinzip von Fermat?
3. Was versteht man bei einem Prisma unter den Begriffen brechende Kante, Ablenkwinkel, Hauptschnitt und Basis?
4. Wie lautet die Fraunhofersche Ablenkbedingung?
5. Was versteht man unter der optischen Dispersion und welche Abhängigkeit wird in einer Dispersionskurve dargestellt? Was bedeutet normale bzw. anormale Dispersion?
6. Nennen Sie Beispiele, wo die Dispersion störend ist und wo sie erwünscht ist.

7. Worin unterscheiden sich Gitter und Prismenspektrometer?
8. Wie definiert man das Auflösungsvermögen eines Spektrometers?
9. Wodurch ist das Auflösungsvermögen eines Prismas gegeben?
10. Wie erklärt man sich die Entstehung von Licht?
11. Wodurch entsteht ein Emissionsspektrum?
12. Worin unterscheidet sich das Spektrum eines glühenden Festkörpers vom Spektrum freier Atome oder Moleküle?
13. Was versteht man unter der natürlichen Linienbreite einer Spektrallinie?
14. Nennen Sie bekannte kontinuierliche Lichtquellen.
15. Wie funktioniert eine Gasentladungslampe?

Versuchsdurchführung

1. Bestimmen Sie den Winkel ε der brechenden Kante.
2. Messen Sie für die in dem in Abb.1 dargestellten Spektrum unterstrichenen Spektrallinien des Quecksilbers die zugehörigen minimalen Ablenkwinkel δ_{min} . Verwenden Sie dabei die Differenzmethode.

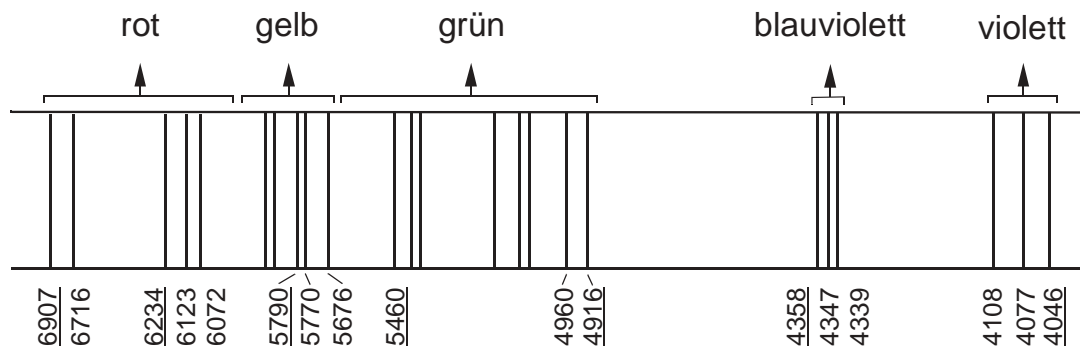


Abb. 1: Schematische Darstellung des Linienpektrums von Quecksilber (Ausschnitt)

3. Berechnen Sie aus den minimalen Ablenkwinkeln δ_{min} dieser sieben Spektrallinien den jeweiligen Brechungsindex $n(\lambda)$ und zeichnen Sie damit die Dispersionskurve des Prismenmaterials. Versehen Sie die Messpunkte mit Fehlerbalken, die unter Berücksichtigung der Fehlerfortpflanzung gewonnen werden sollten.
4. Lesen Sie für die fünf intensivsten Linien einer Cd-Lampe die zugehörigen Ablenkwinkel ab und bestimmen Sie durch Vergleich mit den Ergebnissen in 2. deren Wellenlängen.
5. Wählen Sie aus dem Hg-Spektrum zwei geeignete (identifizierbare) Linienpaare zur Abschätzung des Auflösungsvermögens des Spektralapparates aus und vergleichen Sie mit dem theoretisch zu erwartenden Wert.

O 2a Beugung am Spalt

Aufgabenbeschreibung

Die Beugung an verschiedenen Einzelspalten wird in einer Fraunhoferschen Beugungsanordnung beobachtet. Aus dem Beugungsbild eines Spalts bekannter Breite soll die Wellenlänge des benutzten Laserlichtes bestimmt werden.

Literatur

1. Alonso-Finn II: Kap. 23
2. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. 38
3. Born: Optik, Kap. 4, § 48
4. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 10.1
5. Kneubühl: Repetitorium der Physik, § 6.15.1–3
6. Tietze-Schenk: Halbleiterschaltungstechnik, Kap. 22.2

Fragen zum Versuch

Natur des Lichtes

1. Welche verschiedenen Vorstellungen von der Natur des Lichtes hat man sich im Laufe der Zeit gemacht?
2. Welche Erscheinungen sprechen für die Wellennatur des Lichtes?
3. Was versteht man unter monochromatischem, was unter kohärentem Licht?

Wellenoptik

1. Welches sind die wichtigsten Prinzipien der Wellenoptik?

2. Was sagt das Huygenssche Wellenprinzip aus? Ist seine Anwendung auf Lichtwellen begrenzt?
3. Was versteht man unter dem Begriff Interferenz von Wellen?
4. Welche Eigenschaften muss Licht haben, damit man stehende Interferenzerscheinungen beobachten kann?
5. Was versteht man unter dem Begriff Beugung von Licht? Ist das Phänomen Beugung auf Lichtwellen beschränkt?
6. Welche Bedingungen müssen zwischen der Wellenlänge der gebeugten Welle und der Ausdehnung des Beugungshindernisses (z.B. der Breite eines Spaltes) erfüllt sein, damit man Beugungserscheinungen beobachten kann?
7. Wie unterscheiden sich die Fraunhofersche von der Fresnel'schen Beugungsanordnung, und welche der beiden findet bei diesem Versuchsaufbau Anwendung?

Beugung am Einzelspalt

1. Wie sieht die Intensitätsverteilung des Beugungsbildes eines Einzelspaltes aus?
2. Wie kann man die Lage der Intensitätsminima und -maxima mit Hilfe geometrischer Überlegungen anschaulich erklären?
3. Was versteht man unter Zweistrahl-, was unter Vielstrahl-Interferenz?
4. Leiten Sie die Intensitätsverteilung des Beugungsbildes eines Einzelspaltes durch Vielstrahl-Interferenz her.
5. Diskutieren Sie anhand dieser Gleichung die Lage der Intensitätsextrema und vergleichen Sie die Ergebnisse mit den geometrisch ermittelten Lagen.

Beugung am Doppelspalt

1. Wie ändert sich die Intensitätsverteilung des Beugungsbildes, wenn man statt eines Einzelspaltes der Breite b einen Doppelspalt mit Einzelspaltbreiten b und Mittenabstand $2b$ benutzt?
2. Erklären Sie mittels geometrischer Überlegungen die Lage und Zahl der zusätzlich auftretenden Intensitäts-Nebenminima in den einzelnen Beugungsordnungen.

3. Was versteht man hierbei unter Hauptmaximum und Hauptminimum, was unter Nebenmaximum und Nebenminimum?

Messtechnische Anwendungen von Beugungserscheinungen

1. Machen Sie sich klar, wie bei der Fraunhoferschen Beugungsanordnung aus dem Beugungsbild eines Einzelspaltes oder eines Doppelspaltes die Wellenlänge des gebeugten Lichtes bestimmt werden kann.
2. Wie lässt sich mittels Beugung die Spaltbreite eines unbekanntes Spaltes bestimmen?
3. Welche weiteren Anwendungen von Beugungserscheinungen kennen Sie?
4. Welche Bedeutung hat die Beugung bei der Abbildung durch optische Geräte, z. B. Linse, Fernrohr, Mikroskop?

Apparativer Aufbau

1. Wodurch zeichnet sich bei Beugungsexperimenten Laserlicht besonders aus?
2. Machen Sie sich den Strahlengang der zur Verfügung stehenden Versuchsanordnung klar (diese Anleitung).
3. Welche Möglichkeiten kennen Sie, einen parallelen Laserstrahl aufzuweiten?
4. Informieren Sie sich über die Funktionsweise eines Photomultipliers.

Theoretische Grundlagen

Die für das Verständnis des Versuches benötigten theoretischen Kenntnisse können sich mit den im Abschnitt „Literatur“ angegebenen Büchern angeeignet werden.

Versuchsdurchführung

Vorsicht, blicken Sie auf keinen Fall in den Laserstrahl und vermeiden Sie auch mit spiegelnden Gegenständen (z. B. Armbanduhr) im Strahlengang zu hantieren, da diese einen beträchtlichen Teil der Laserintensität ins Auge lenken können. Beachten Sie die aushängenden Laserschutzbestimmungen.



Aufgabenstellung

1. Bauen Sie ein Teleskop (Fernrohr), mit dem der Laserstrahl so aufgeweitet wird, dass er wieder parallel wird. Bei der Justierung des Systems gehen Sie so vor: Justieren Sie zunächst den Laser so, dass der Strahl horizontal über der Mitte der optischen Bank verläuft. Markieren Sie den Auftreffpunkt auf einen Schirm. Setzen Sie die Linsen nacheinander in den Strahlengang und schieben Sie so zurecht, dass die Mitte des Strahls möglichst nahe an der markierten Stelle bleibt. Da die Justiermöglichkeiten der Linse quer zur optischen Bank sehr beschränkt sind, erreichen Sie möglicherweise nur die richtige Höhe des aufgeweiteten Strahls. Korrigieren Sie die Abweichung durch geringfügiges Drehen des Lasers.

Überzeugen Sie sich, dass der aufgeweitete Laserstrahl parallel ist.

Überprüfen Sie die Linearität des Fototransistors und des zugehörigen Verstärkers durch Einbringen von Graufiltern in den Strahlengang. Zeichnen Sie eine Eichkurve.

Stellen Sie nun den festen Spalt (0.15 mm) in den Strahl und betrachten Sie das Beugungsbild in der Ebene des Photodetektors. (Bei dem z. Z. verwendeten Detektor handelt es sich um eine Photozelle, deren Ausgangsspannung von einem Operationsverstärker verstärkt wird). Hiernach verbessern Sie das Bild mit Hilfe der langbrennweitigen Linse ($f = 1000$ mm).

2. Die Beugungsfigur ist auf beiden Seiten des Hauptmaximums auszumessen. Die Messwerte sind sobald als möglich graphisch

darzustellen. Zeichnen Sie im selben Bild die Kurve im Bereich kleiner Messwerte zusätzlich noch einmal mit 10-facher Vergrößerung.



- Variieren Sie die Breite des einstellbaren Einzelspaltes von 0.1 bis 0.3 mm und kontrollieren Sie die eingestellte Breite mit der Fühllehre. **Achtung, verändern Sie auf keinen Fall den 0.15 mm Spalt.** Er wird noch von Ihren Nachfolgern gebraucht! Tragen Sie den Abstand benachbarter Minima als Funktion des Kehrwerts der Spaltbreite so auf, dass sich für die theoretischen Werte eine Gerade ergeben würde.
- Berechnen Sie gemäß den Antworten auf Frage 3 den Abstand der Minima gleicher Ordnung voneinander und entnehmen Sie andererseits diese Abstände Ihrer Messkurve aus Aufgabe 2. Durch Vergleich erhalten Sie die Wellenlänge des Lasers. Werten Sie auf jeden Fall die 1. und 2., möglichst auch die 3. Minima aus.

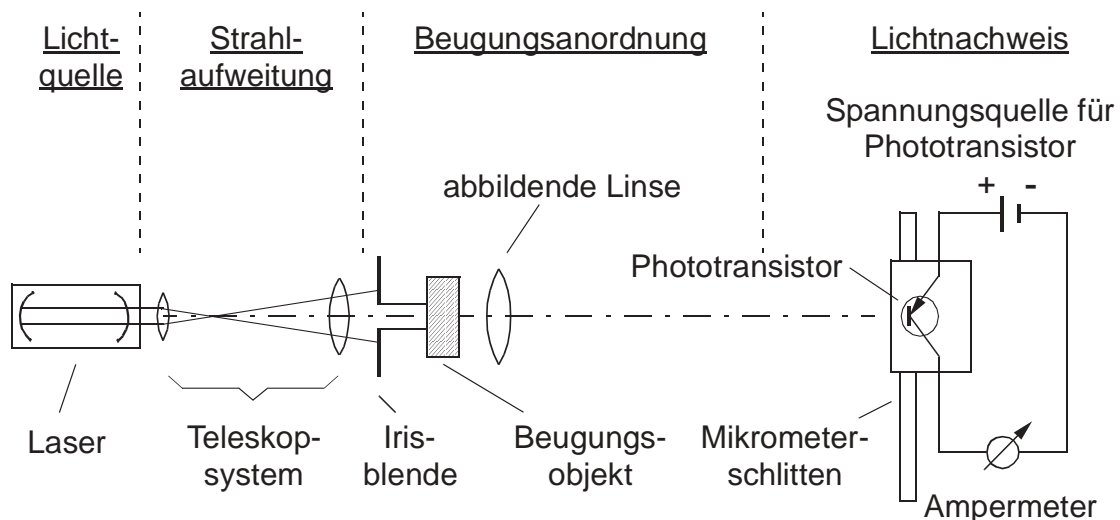


Abb. 1: Versuchsaufbauskizze

O 2c Interferometrie

Aufgabenbeschreibung

In diesem Versuch sollen verschiedene Interferometer untersucht und messtechnisch ausgenutzt werden. Mittels eines Jamin-Interferometers soll man den Brechungsindex von Luft als Funktion des Druckes bestimmen. Mit einem Michelson-Interferometer wird der Kontrast einer Interferenzfigur ausgemessen.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. 3.1-3.4
2. Born: Optik, Kap. 3, § 40, 41
3. Kohlrausch: Praktische Physik I, Kap. 5.3.3.5
4. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 10.1, 10.2, 10.3

Fragen zum Versuch

Wellennatur des Lichts

1. Durch welche Modellvorstellung von Licht kann man Interferenzerscheinungen erklären?
2. Welche Vorstellung macht man sich von einer elektromagnetischen Welle?
3. Wie sind folgende Begriffe definiert:
Amplitude, Intensität, Wellenlänge, Frequenz, Wellenvektor, Phase, Phasenverschiebung, Phasengeschwindigkeit, Gruppengeschwindigkeit? Wie hängen diese Größen untereinander zusammen?
4. Wie misst man Intensität, Wellenlänge, Frequenz und Lichtgeschwindigkeit?

Interferenz

1. Was ist Interferenz, was ist Beugung?
2. Was versteht man unter Zweistrahl-, was unter Vielstrahlinterferenz?
3. Nennen Sie einige Anwendungsbeispiele für beide Fälle?
4. Unter welchen Versuchsbedingungen erhält man stehende Interferenzbilder?
5. Was versteht man unter dem Begriff Kohärenz von Lichtwellen? Was sind örtliche und zeitliche Kohärenz?
6. Machen Sie sich die Interferenzerscheinungen an einer planparallelen und an einer keilförmigen Glasplatte klar!
7. Wie entstehen Newtonsche Ringe?

Interferometer

1. Machen Sie sich den Aufbau und Funktionsweise folgender Interferometer klar:
 - a) Michelson-Interferometer
 - b) Jamin-Interferometer
 - c) Fabry-Perot-Interferometer
 - d) Mach-Zehnder-Interferometer
2. Wie kann man mit Hilfe des Jamin-Interferometers den Brechungsindex eines Gases bestimmen?
3. Kennen Sie weitere Anwendungen der unter Punkt 1 genannten Interferometer?
4. Wodurch ist das Auflösungsvermögen eines Interferometers gegeben?

Versuchsdurchführung

Bestimmung des Brechungsindex von Luft

1. Justieren Sie das Jamin-Interferometer so, dass die zwei Teilstrahlen durch je einen der beiden Behälter verlaufen.

2. Bestimmen Sie den Brechungsindex n von Luft in Abhängigkeit vom jeweiligen Druck.
3. Ermitteln Sie aus der obigen Messung den Brechungsindex von Luft für Normaldruck.

Beobachtung von Interferenzerscheinungen

1. Justieren Sie das Michelson-Interferometer so, dass auf dem Schirm ein Streifensystem entsteht mit einem Streifenabstand von $\Delta x \approx 2$ mm.
2. Beobachten Sie, wie empfindlich die Interferenzfigur auf mechanische Störungen reagiert, z. B. Druck auf die Grundplatte oder Luftwirbel.
3. Messen Sie die Intensitätsverteilung $I(d_2)$ als Funktion von d_2 , indem Sie d_2 mittels des Piezoquarzes um mindestens $5 \lambda/2$ verändern. Führen Sie die Messung für $d_1 = d_2$ und $d_1 = d_2 + 10$ cm durch und ermitteln Sie daraus den Kontrast. Der Kontrast nimmt schnell ab, da der Laser auf zwei Frequenzen oszilliert (warum?).
4. Bestimmen Sie die Empfindlichkeit des Piezoquarzes (nm/V).
5. Nehmen Sie die langbrennweitige Linse f_2 heraus und beobachten Sie das konzentrische Ringsystem. Der Abstand zweier Ringe nimmt quadratisch ab.



Hinweise zur Versuchsdurchführung

Allgemeine Aspekte

Bei allen Interferometern wird eine möglichst ebene Lichtwelle in zwei Teilstrahlen E_1 , E_2 gleicher Amplitude aufgespalten. Anschließend werden die Teilstrahlen, die gegeneinander um eine Zeitdifferenz Δt verzögert sind, wieder vereinigt. Da die Justierung der

verschiedenen Elemente des Interferometers nicht ideal ist, treffen die beiden Teilstrahlen unter einem kleinen Winkel $2 \cdot \alpha$ auf dem Beobachtungsschirm auf. Die Interferenz der beiden Strahlen ergibt bei ebenen Wellen ein Streifensystem, bei Kugelwellen ein konzentrisches Ringsystem.

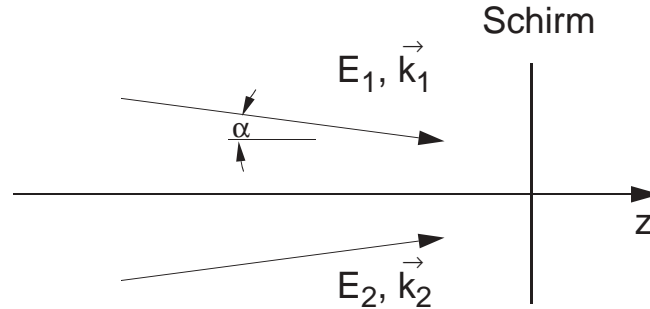


Abb. 1: Skizze zur Verdeutlichung der theoretischen Herleitung

Bei ebenen Wellen gilt für die Amplituden

$$E_{1,2}(\vec{r}, t) = E_0 \cdot e^{i\omega t_{1,2} - ik_{1,2}\vec{r}} \cdot e^{-t_{1,2}/\tau}$$

Es bedeuten:

$$\vec{k}_{1,2} = \frac{2\pi}{\lambda}(\pm \sin \alpha, 0, \cos \alpha) \cong \frac{2\pi}{\lambda}(\pm \alpha, 0, 1) = \text{Wellenvektor}$$

$$\vec{r} = (x, y, z) = \text{Ortsvektor}$$

$$\omega = \text{Frequenz}$$

Da die beiden Lichtwellen durch das Interferometer um die Zeit Δt gegeneinander verzögert wurden, gilt $t_2 - t_1 = \Delta t$. Es ist zweckmäßig, z. B. $t_1 = 0$ zu setzen (Festlegung des Zeitnullpunktes).

Der Faktor $e^{-t/\tau}$ berücksichtigt die endliche Länge aller Wellenzüge (auch beim Laser). Man bezeichnet τ als die Kohärenzzeit. Die resultierende Amplitude ist die Summe der Einzelamplituden $E_1 + E_2$ und die beobachtbare Intensität J ist proportional dem Betragsquadrat

$$J \sim |E_1 + E_2|^2$$

Das liefert

$$J = J_0 \cdot \left[1 - e^{-2\Delta t/\tau} + 2e^{-\Delta t/\tau} \cdot \cos \left(2\alpha x \frac{2\pi}{\lambda} - \omega \Delta t \right) \right] \quad (1)$$

Es ergibt sich auf dem Schirm eine in x-Richtung periodische Intensitätsverteilung, ein Streifensystem. Bei fester Zeitverzögerung Δt beträgt der Abstand zweier Streifen

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\alpha}$$

Für die maximale bzw. minimale Intensität folgt aus obiger Gleichung:

$$J_{max,min} = J_0 \left[1 + e^{-2\Delta t/\tau} \pm 2e^{-\Delta t/\tau} \right] \quad (2)$$

Man bezeichnet

$$K = \frac{J_{max} - J_{min}}{J_{max} + J_{min}} \quad (3)$$

als Kontrast der Interferenzfigur. Er ergibt sich aus Gl. (2), (3) zu

$$K = \frac{2e^{-\Delta t/\tau}}{1 + e^{-2\Delta t/\tau}} \quad (4)$$

Maximaler Kontrast tritt für $\Delta t = 0$ auf, d.h. wenn beide Lichtstrahlen die gleichen Weglängen im Interferometer durchlaufen. Mit zunehmender Differenz der optischen Weglängen wird der Kontrast schlechter und schließlich verschwindet die Interferenzfigur. Der Kontrast hängt wesentlich von der Kohärenzzeit τ ab, einer charakteristischen Größe der benutzten Lichtquelle.

Jamin-Interferometer

Abbildung 2 zeigt schematisch das Vakuumsystem zum Evakuieren der Behälter 1 und 2, die von den beiden Teilstrahlen des Lasers durchsetzt werden. Das Manometer zeigt die Druckdifferenz zwischen Behälter 2 und Außendruck an. Herrscht im Behälter 2 Atmosphärendruck, so zeigt das Manometer 0 Torr an. Ist der Behälter

weitgehend evakuiert, zeigt das Manometer Atmosphärendruck an. Sie sollten also vor Beginn der Aufgabe den Atmosphärendruck messen, um den Absolutdruck im Behälter 2 bestimmen zu können.

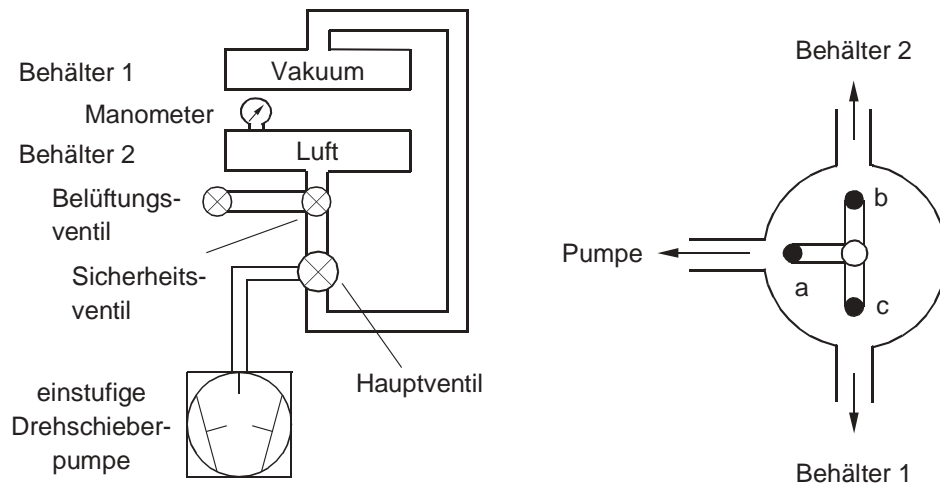


Abb. 2: Schematische Darstellung des Vakuumsystems

Das Hauptventil hat drei Einstellmöglichkeiten:

In Stellung a wird keiner der beiden Behälter ausgepumpt, da die Leitung von der Pumpe zu beiden Behältern gesperrt ist. In Stellung b ist die Verbindung zwischen Pumpe und Behälter 2 hergestellt. Behälter 1 wird nicht ausgepumpt. In Stellung c wird Behälter 1 ausgepumpt, Behälter 2 nicht.

Zunächst werden beide Behälter evakuiert. Während des Abpumpens justieren Sie das Interferometer folgendermaßen: Stellen Sie eine der beiden planparallelen Platten vor dem He-Ne-Laser auf und justieren Sie diese entsprechend Abbildung 3, allerdings vorerst noch ohne Zerstreulinse.

Dabei müssen Sie darauf achten, dass die zwei Lichtstrahlen, die aus der Platte austreten, durch je einen Behälter hindurchtreten. Auf der anderen Seite der beiden Behälter stellen Sie die zweite Platte so, dass sie die zwei Teilstrahlen zu einem Strahl vereinigt. Nun weiten Sie den Laserstrahl mit Hilfe der beiliegenden Zerstreulinse auf. Wenn Sie dies erreicht haben, bringen Sie das Hauptventil in Stel-

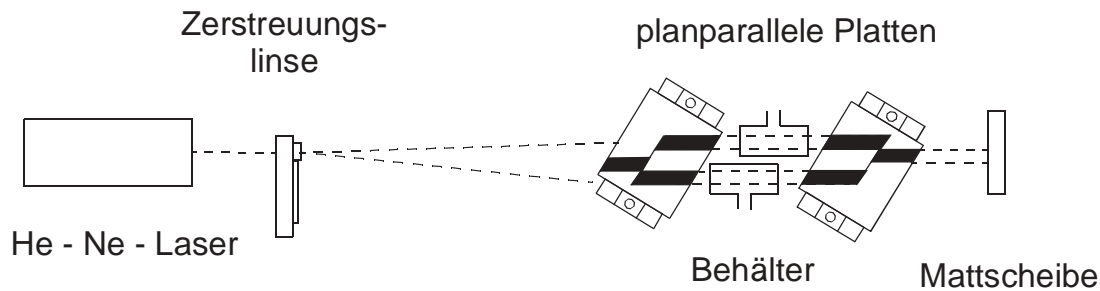


Abb. 3: Versuchsaufbau mit Jamin-Interferometer

lung c. Behälter 2 wird damit von der Pumpe abgetrennt, während Behälter 1 weiterhin evakuiert wird.

Durch vorsichtiges Öffnen des Belüftungsventils lassen Sie Luft in den Behälter 2 einströmen.

Messen Sie die Anzahl der verschobenen Streifen als Funktion des jeweiligen Druckes. Diese Verschiebung ist besonders gut auf der beiliegenden Mattscheibe mit Fadenkreuz zu beobachten.

Welche weiteren Größen müssen Sie messen, um n zu bestimmen?



Überlegen Sie sich, wie man aus den obigen Messungen den Brechungsindex von Luft bei Normaldruck bestimmen kann.

Zwischen den Glasplatten befinden sich zwei Behälter der Länge l . Der eine ist evakuiert, in dem anderen befindet sich ein Gas, dessen Brechungsindex n bestimmt werden soll. Strahl 1 durchdringt den evakuierten, Strahl 2 den gasgefüllten Behälter. Die Strahlen erleiden also einen Gangunterschied von $\Delta S = l \cdot n - l = l \cdot (n - 1)$ und haben daher nach Austreten aus den Behältern eine Phasendifferenz $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta S = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l \cdot (n - 1)$. Diese Phasendifferenz bewirkt eine Verschiebung der Interferenzstreifen gemäß:

$$\Delta m = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{l}{\lambda} \cdot (n - 1)$$

Der Brechungsindex eines Gases ist abhängig vom Gasdruck p . Bei konstanter Temperatur gilt

$$(n - 1) = k \cdot p$$

Aus den beiden Gleichungen folgt:

$$\Delta m = k \cdot \frac{l}{\lambda} \cdot p$$

Wenn Sie die Zahl Δm der durchlaufenden Interferenzstreifen als Funktion des Druckes p auftragen, ergibt sich eine Gerade mit der Steigung k .

Michelson-Interferometer

Abbildung 4 zeigt schematisch den Aufbau des Michelson-Interferometers. Justieren Sie zunächst das Interferometer ohne Linsen. Decken Sie jeweils einen Spiegel ab und justieren Sie den anderen derart, dass der Laserstrahl in sich zurückreflektiert wird. Wenn beide Spiegel richtig justiert sind, können Sie bereits auf dem Schirm ein undeutliches, stark fluktuierendes Interferenzmuster erkennen.

Jetzt setzen Sie die kurzbrennweitige Linse f_1 in den Strahlengang und justieren diese. Anschließend verfahren Sie ebenso mit der langbrennweitigen Linse f_2 . Beachten Sie, dass der Abstand der Linsen gleich der Summe der Brennweiten ist.

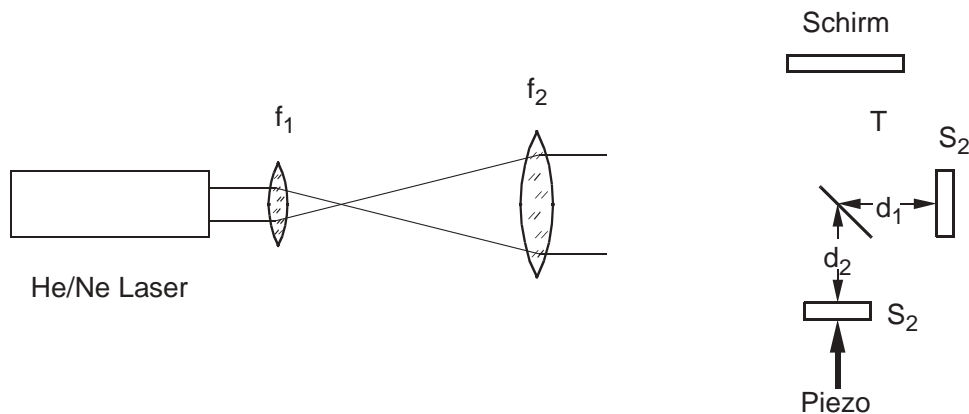


Abb. 4: Versuchsaufbau mit Michelson-Interferometer

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*

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

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

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

Für großes n beträgt die Wahrscheinlichkeit P , einen Einzelwert x_i zu messen, der innerhalb des Intervalls $\bar{x} \pm \sigma$ liegt, $P = 68.3\%$ ($\bar{x} \pm 2\sigma : P = 95.5\%$; $\bar{x} \pm 3\sigma : P = 99.7\%$).

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

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

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 ($i = 1, \dots, n$) durchführen
2. Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung σ berechnen
3. Angabe eines Konfidenzintervalls $\bar{x} \pm \Delta x$ ($\Delta x = \sigma, 2\sigma, 3\sigma$) unter Berücksichtigung des systematischen Fehlers

Fehlerfortpflanzung

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

$$A = \bar{r}(x, y, z, \dots).$$

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

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

bzw. den *absoluten Größtfehler*

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

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

Sei A die Summe oder die Differenz von Messgrößen x , y , z , ...

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

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

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

Sei A das Produkt oder der Quotient von Messgrößen x , y , z , ...

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

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

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

bzw.

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

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) \bar{x} durch ein (kleines) Symbol (z. B. +, ×, o, Δ) dargestellt. Das Konfidenzintervall wird (maßstabsgetreu) als so genannter „Fehlerbalken“ eingezeichnet, z. B.:

$$\begin{array}{c} \text{---} \bar{x} + \Delta x \\ | \\ \text{---} \bar{x} \\ | \\ \text{---} \bar{x} - \Delta x \end{array}$$

Versuch	Physikalische Fragestellung	Raum	Seite
	Anleitung zum Praktikum		4
M 1a	Freie und erzwungene Schwingungen	379	9
M 1c	Ultraschall	385, 386	18
M 5b	Hookesches Gesetz: Dehnen und Biegen	379	22
W 2b	Wärmeleitung in Metallen	379	30
W 3c	c_P/c_V nach Rüchardt und Clément-Desormes	379	34
E 1c	Elektrostatik	384	39
O 1a	Linsensysteme	389, 390	48
O 1b	Prisma	364, 366	55
O 2a	Beugung am Spalt	365, 367	58
O 2c	Interferometrie	376, 380	63
	Fehlerrechnung		71