FACHBEREICH PHYSIK DER UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN

Physikalisches Praktikum für Anfänger

Teil A

Teilnehmer:

____

Ausgabe: Frühjahr 2001

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.

Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. 1, Kap. IV, 38
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 4
3. Feynman: 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
7. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap 10

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 in die Differentialgleichung. 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?

Beschreibung des Versuchsaufbaus

Das vorliegende Programm wurde für die Untersuchung von Drehschwingungen an einem modifizierten Pohlschen Drehpendel mit einem eigens entwickelten Steuergerät konzipiert.

Als Erregermotor für erzwungene Schwingungen dient ein vom Computer gesteuerter Schrittmotor. Die Dämpfung des Drehpendels erfolgt über eine Wirbelstrombremse, die von einem separaten Netzteil gespeist wird. Die Messung der momentanen Position des Pendels erfolgt über eine am Umfang des Pendelrades angebrachte Zahnscheibe. Zwei Lichtschranken, deren Zustand am Steuergerät angezeigt wird, registrieren bei einer Bewegung des Pendels phasenverschobene Rechtecksignale, aus denen die Winkelgeschwindigkeit und die Drehrichtung bestimmt werden.

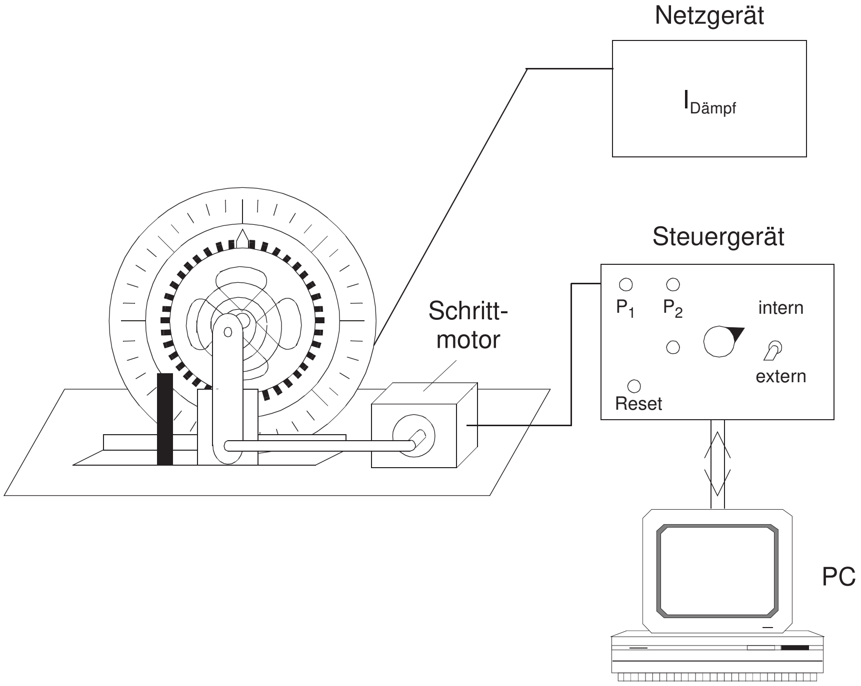


Abb. 1: Skizze des Versuchsaufbaus

Um den störenden Einfluss der diskreten Drehschritte zu vermindern, empfiehlt es sich, eine Schwungmasse auf der Achse des Schrittmotors anzubringen. Es kann vorkommen, dass bei Verwendung einer Schwungmasse der Motor bei großen Änderungen der Drehfrequenz stehen bleibt. Man bekommt ihn wieder zum Laufen, indem man zunächst eine kleine Frequenz wählt ($T \approx 3\,s$) und diese schrittweise erhöht oder aber den Motor per Hand andreht.

Programm-Beschreibung

Allgemeine Vorbemerkungen zur Software

Der Computer dient in dem Experiment zur Positionsmessung, zum Steuern des Erregermotors und zur Auswertung.

Im Programm wird statt des Winkels Φ die Bogenlänge s am Umfang des Drehpendels bestimmt. Entsprechend wird statt der Winkelgeschwindigkeit die Geschwindigkeit $v = ds/dt$ angegeben.

Als Auslenkung s wird der Stand des Zählers im Steuergerät angegeben. Die Einheit der Auslenkung (1 Zählimpuls) entspricht einer Bogenlänge von einer halben Zahnbreite.

Das Programm ist in einzelne Menüpunkte gegliedert, die jedoch nicht identisch sein müssen mit den Teilaufgaben des Praktikumsversuches. Aus Untermenüpunkten gelangt man mit der ESC-Taste zu dem übergeordneten Menü zurück.

Nach Start des Programms (entweder automatisch nach Einschalten des Rechners bei eingelegter Startdiskette oder durch Eingabe von `SWING`) erscheint das Programmtitelbild und nach Betätigen einer beliebigen Taste das Hauptmenü mit den Unterpunkten:

- INFORMATION
- s(t)-DIAGRAMM
- PHASENDIAGRAMM
- KOMBIDARSTELLUNG
- SINFIT
- AMPLITUDEN
- DREHZAHLVORWAHL
- NULLPOSITION
- INTERFACETEST

Der Aufruf des gewünschten Menüpunktes erfolgt durch Anwahl mit der Maus oder mit den Pfeiltasten und RETURN. Aus Untermenüpunkten gelangt man mit der ESC-Taste zu dem übergeordneten Menü zurück.

Menüpunkt INFORMATIONEN

Hier können während des Programmlaufes die wesentlichen Teile der vorliegenden Programmbeschreibung eingesehen werden. Mit Hilfe der Pfeiltasten sowie PGUP und PGDN kann geblättert werden, mit HOME bzw. END gelangt man zum Anfang bzw. Ende der Informationen.

Menüpunkt s(t)-DIAGRAMM

Dieser Menüpunkt dient zur Aufnahme und gleichzeitigen graphischen Darstellung des s(t)-Diagramms. In dem Programmteil wird eine vorwählbare Anzahl von Messpunkten (bis zu maximal 500 Auslenkungen) in äquidistanten Zeitschritten aufgenommen und im Hauptspeicher gespeichert. Die Messwertaufnehmer läuft, bis die gewählte Anzahl erreicht ist oder aber die ESC-Taste gedrückt wird. Der voreingestellte y-Maßstab $\pm$ 300 entspricht der maximalen Pendelauslenkung. Sollen nur kleine Auslenkungen untersucht werden, kann der Maßstab verkleinert werden.

Der Start des Messung erfolgt durch Aufruf von STARTEN. Der Start kann auf das Auslenkungssignal getriggert werden. Wird beispielsweise als Triggermodus „>“ und als Triggerlevel „20“ gewählt, so beginnt die Messung, wenn die Auslenkung erstmals den Wert 20 überschreitet. Durch Tastendruck kann der Trigger übergangen werden. Wird als Triggermodus ein anderes Zeichen als „>“ oder „<“ eingegeben, erfolgt keine Triggerung.

Für manche Zwecke ist es wünschenswert, die Messung im Dauerbetrieb laufen zu lassen. In dieser Betriebsart ENDLOSMESSUNG springt die Anzeige beim Erreichen des rechten Bildschirmrands wieder zum linken Bildschirmrand zurück und überschreibt die alten

Daten, bis er durch die ESC-Taste unterbrochen wird. Es sind immer nur die aktuell auf dem Bildschirm angezeigten Messpunkte im Hauptspeicher gespeichert.

Nach Beendigung der Messwertaufnahme werden auf dem Bildschirm die registrierten Messpunkte und das Zeitintervall zwischen den Einzelmessungen angegeben. Nach Aufruf von KOORDINATEN können mit Hilfe der Maus oder der Cursortasten die Koordinaten einzelner Punkte bestimmt werden. Mit der Tabulator-Taste wird die Schrittweite zwischen GROB und FEIN umgeschaltet. Mit HARDCOPY wird der aktuelle Bildschirm auf dem Matrixdrucker ausgedruckt.

Weiterhin kann ein Intervall der Messung auf Datei gespeichert und mit anderen Programmen (z. B. TABULA, GP) ausgewertet werden. Dazu ist zunächst der Ausschnitt auf den Bildschirm zu holen, in dem der Anfangspunkt des zu speichernden Intervalls liegt. Nach Betätigen der Taste A kann mit der Maus oder mit den Pfeiltasten der genaue Anfangspunkt bestimmt werden. Entsprechend ist mit dem Endpunkt zu verfahren.

Phasendiagramm

Nach Aufruf des Menüpunktes kann das Phasendiagramm v(s) bzw. der Winkelgeschwindigkeit der Pendelbewegung dargestellt werden. Mit s_{max} und v_{max} wird der Maßstab der s- bzw. v-Achse festgelegt.

Zur Ermittlung von v wird (während der Messung) die zeitliche Ableitung von s gebildet. Die Genauigkeit wird dabei begrenzt durch die endliche Auflösung von s. Insbesondere bei sehr kurzer Wartezeit zwischen zwei Messpunkten macht sich dies stark bemerkbar. Um diesen störenden Effekt etwas zu mindern, wird die Ableitung nicht nur aus einem Punktepaar berechnet. Vielmehr werden jeweils 7 aufeinanderfolgende Messpunkte berücksichtigt. Es werden Differenzenquotienten aus dem 1. und 7. Meßpunkt, dem 2. und 6. sowie dem 3. und 5. Meßpunkt ermittelt und mit den Gewichtsfaktoren w1, w2 und w3 versehen. Dabei ist w1 der Gewichtsfaktor für das kürzeste, w3 für das längste Zeitintervall.

Wegen der notwendigen Wartezeit zwischen den Einzelmessungen erscheint in der Graphik keine zusammenhängende Kurve, sondern isolierte Punkte. In der Maske kann allerdings mit der Option KURVE bewirkt werden, dass die Messpunkte nach Abschluss der Messung mit einer glatten Kurve (Spline) verbunden werden.

Kombi-Darstellung

Die kombinierte Darstellung liefert gleichzeitig das s(t), das v(t) und das v(s)-Diagramm.

Sinfit

In diesem Menüpunkt kann die Theoriekurve einer freien harmonischen gedämpften Schwingung an 75 s(t)-Messpunkten angepasst werden:

$$s(t) = s_0 \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{t_0} + \varphi\right) \cdot e^{-dt}$$

Der Menüpunkt besitzt die beiden Unterpunkte MESSEN und AUSWERTEN.

Messen

Hier werden die 75 Messpunkte aufgenommen und gleichzeitig graphisch dargestellt. Die s-Achse reicht von -300 bis $+300$, was dem beidseitigen Vollausschlag des Pendels entspricht. Die Anzahl der gemessenen Schwingungsperioden wird durch die Wartezeit zwischen den Einzelmessungen festgelegt. Wie beim Menüpunkt s(t)-DIAGRAMM ist auch bei dieser Messung eine Triggerung, z. B. auf den Nulldurchgang möglich.

Auswertung

Durch Wahl der auf dem Bildschirm abgefragten Parameter kann die Theoriekurve an die Messwerte angepasst werden. Als Maß für die Güte des Fits wird in die Grafik die Standardabweichung (mittleres Abweichungsquadrat zwischen Messwert und Funktionswert) eingeblendet. Mit P können die voreingestellten Parameter in die Grafik eingeblendet werden, H erzeugt eine Hardcopy auf dem Matrixdrucker und ESC führt zurück zum Auswert-Menü.

Amplituden

Hier können für 6 verschiedene Dämpfungsstromstärken ($I = 0.0\,\mathrm{A}$ bis $I = 0.5\,\mathrm{A}$) die aufeinanderfolgenden Amplituden registriert werden. Jeweils nach dem ersten Nulldurchgang des Pendels wird bis zu 200 mal hintereinander die Amplitude der Schwingung gemessen, indem jeweils der Maximal- bzw. Minimalwert von s zwischen zwei Nulldurchgängen bestimmt wird. Mit der ESC-Taste kann jede Messreihe vorzeitig abgebrochen werden. Die vollständige Amplitudentabelle kann nach Abschluss der Messung auf Datei oder Drucker ausgegeben werden. Bei Ausgabe auf Datei kann diese z. B. mit `TABULA` gelesen werden.

Beim Verlassen des Menüpunktes gehen die bis dahin registrierten Amplitudenmessungen verloren!

Nullposition

Unmittelbar bei Aufruf dieses Menüpunktes wird die aktuelle Position des Pendels als neue Nullposition definiert. Der Aufruf dieses Menüpunktes hat die gleiche Wirkung wie das Drücken der Reset-Taste am Steuergerät.

Drehzahlvorwahl

Das einzige Eingabefeld dieser Maske ist die Sollzeit für die Periode des Motors. Die Aktualisierung erfolgt erst mit der Taste HOME. In der Maske werden die berechneten Teilungsfaktoren der beiden als Frequenzteiler arbeitenden Zähler sowie die resultierende tatsächliche Periodendauer und Drehfrequenz angezeigt.

Interfacetest

Zunächst wird die Nullposition des Pendels eingestellt. Anschließend wird fortwährend der aktuelle Zählerstand auf dem Bildschirm ausgegeben, bis die ESC-Taste betätigt wird.

Beispiele für Aufgabenstellungen

Eigenfrequenz

Bestimmen Sie die Eigenfrequenz $\omega_\mathrm{R} \approx \omega_0$ der schwach gedämpften Schwingung (Spulenstrom $\mathrm{I} = 0$).

Schalten Sie hierzu ggf. den Erregermotor aus (TAKT AUS am Steuergerät), schreiben Sie mit dem Programmteil s(t)-SCHREIBER ein $\Phi(\mathrm{t})$-Diagramm mit 10–12 Perioden und bestimmen Sie mit der Option KOORDINATEN die Dauer für 10 Schwingungen.

Φ(t)-Diagramm der gedämpften Schwingung

Nehmen Sie mit dem Programmteil SINFIT für 5–10 Perioden das $\Phi(\mathrm{t})$-Diagramm einer gedämpften Schwingung ($\mathrm{I} = 0.3\,\mathrm{A}$) auf (Untermenüpunkt MESSEN) und passen Sie durch geeignete Wahl der Parameter die Theoriekurve an das Messergebnis an (Untermenüpunkt AUSWERTEN). Es ist für die Auswertung am einfachsten, bei der Messwertaufnahme auf den Nulldurchgang von Φ zu triggern. Warum?

Nehmen Sie anschließend noch qualitativ ein Phasendiagramm der gedämpften Schwingung auf.

Kriechfall

Realisieren Sie den Kriechfall und beobachten Sie mit dem Programmteil s(t)-SCHREIBER.

Wichtig: Bei der Realisierung des Kriechfalles darf die Spule nur kurzzeitig belastet werden, um eine Überhitzung zu vermeiden.

Gedämpfte Schwingung

Für die Stromstärken I = 0; 0,1; 0,3; 0,4 A soll die Abklingzeit τ der freien Schwingung bestimmt werden. Es soll nachgewiesen werden, dass die Dämpfungskonstante $\delta = 1/\tau$ proportional zu I^2 ist. (Warum ist das so?)

Verwenden Sie für diese Aufgabe den Programmteil AMPLITUDEN. Wenn Sie für alle Stromstärken die Folge der Amplituden gemessen haben, geben Sie diese auf dem Drucker aus.

Zur Auswertung stellen Sie die Amplituden graphisch über der Zeit dar. Die Periodendauer kann hierfür als konstant angenommen werden: $\mathrm{T} = 2\pi/\omega_0$. Die Abhängigkeit liefert in halblogarithmischer Darstellung eine Gerade, aus deren Steigung die Dämpfungskonstante bestimmt werden kann. Die ermittelten Dämpfungskonstanten werden dann graphisch gegen I^2 aufgetragen.

Erzwungene Schwingung und Resonanz

Messen Sie die Resonanzkurve für die beiden Dämpfungsstromstärken I = 0.2 und 0.4 A. Warten Sie jeweils die Einschwingzeit ab, bevor Sie die Amplitude notieren.

M 2a Trägheitsmomente

Aufgabenbeschreibung

Die Trägheitsmomente verschiedener Körper sind zu ermitteln. Für einen Zylinder ist das Trägheitsellipsoid zu bestimmen. Bei dieser Aufgabe soll man sich mit der physikalischen Bedeutung des Tensor-Begriffes vertraut machen.

Literatur

1. Kneubühl: Repetitorium der Physik, Kap. 2.3
2. Alsonso-Finn I: Kap. 10 (insbes. 10.2, 10.3)
3. Joos: Lehrbuch der theoretischen Physik, Bd. 2, Kap. III, § 3
4. Kuypers: Klass. Mechanik, § 2.3.1 – 2.3.2
5. Scheck: Mechanik, Kap. 3
6. Demtröder: Experimentalphysik, Kap 5

Einführende Fragen

1. Allgemeine Definition des Trägheitsmomentes
2. Satz von Steiner
3. Ansatz für die Berechnung des Trägheitsmomentes einer Kugel
4. Erläuterung des Trägheitsmomentes am Hantelmodell
5. Drehimpuls
6. Rotationsenergie
7. Winkelgeschwindigkeit
8. Winkelrichtgröße
9. Drehschwingungen
10. Schwingungsgleichung (allgemein)
11. Wann führt ein mechanisches System harmonische Schwingungen aus?

12. Analogie zwischen Translations- und Rotationsbewegung
13. Was ist der Trägheitstensor?
14. Hauptträgheitsachsen, Trägheitsellipsoid
15. Welcher Bezug besteht zwischen der Symmetrie des Körpers und der Art des Trägheitsellipsoides?
16. Wie sieht das Trägheitsellipsoid von Kugel, Würfel, Säule, Quader aus?

Versuchsdurchführung

1. Bestimmen Sie mit Hilfe der Holzkugel, deren Trägheitsmoment Sie aus Masse und Radius der Kugel berechnen können, die Winkelrichtgröße D der Feder. Messen Sie dazu mehrmals jeweils die Zeit für 10 Schwingungen und bilden Sie den Mittelwert.

2. Bestimmen Sie mit dem jetzt bekannten Wert von D das Trägheitsmoment Θ_z der flachen Holzscheibe und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem theoretischen Wert.

3. Prüfen Sie den Steinerschen Satz nach. Dazu wird der Bügel mit dem Trägheitsmoment Θ_B auf die Achse gesetzt, die Zusatzgewichte mit dem Trägheitsmoment Θ_M und der Masse m_M an dem Bügel befestigt und die Schwingungsdauer T als Funktion des Abstandes a (Schwerpunkt Messinggewicht-Drehachse) bestimmt. Es gilt

   $$T = 2\pi\sqrt{\frac{\Theta_B + \Theta_M + m_M a^2}{D}}$$

   Bestimmen Sie $T(a)$ für etwa 10 Werte von a. Es ist zweckmäßig die Größe $\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$ über $m_M a^2$ aufzutragen. Es ergibt sich dann eine Gerade, deren Steigung die Winkelrichtgröße D liefert und deren Schnittpunkt mit der $m_M a^2$-Achse gleich dem Trägheitsmoment des Bügels mit dem Zusatzgewicht auf der Achse ist. Um die Lagerreibung zu vermindern, ist es zweckmäßig, mit zwei symmetrisch angebrachten Zusatzgewichten zu arbeiten.

4. Bestimmen Sie aus der Schwingungsdauer T das Trägheitsmoment des Messingquaders bezüglich der drei Hauptachsen und für die Raumdiagonale. Vergleichen Sie das Trägheitsmoment bezüglich der Raumdiagonale mit dem Wert, der sich aus den Hauptträgheitsmomenten für diese Richtung der Drehachse berechnen lässt.

5. Bestimmen Sie das Trägheitsmoment $\Theta_n(\alpha)$ für den Zylinder in Abhängigkeit von α (dem Winkel zwischen Rotationsachse und Symmetrieachse). Stellen Sie $\Theta_n(\alpha)$ und $1/\sqrt{\Theta_n(\alpha)}$ in Polarkoordinaten dar. Vergleichen Sie mit den entsprechenden theoretischen Werten.

M 2b Kreisel

Aufgabenbeschreibung

Die dynamischen Eigenschaften wie Präzession und Nutation eines symmetrischen und eines unsymmetrischen Kreisels sollen untersucht werden.

Literatur

1. Gerthsen-Kneser-Vogel, 16. Aufl., Kap. 2.3, 2.4
2. Bergmann-Schäfer-Pohl: Bd. 1, Kap. IV, 39
3. Pohl: Einführung in die Physik, Bd. 1, § 54–56
4. Alonso-Finn I: Kap. 10.6
5. Feynmann: Vorl. über Physik, Bd. 1, Kap. 20–23
6. Kuypers: Klass. Mechanik, § 2.3 (sehr ausführlich)
7. Sommerfeld: Vorl. über theoretische Physik: Mechanik, Kap. IV
8. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap. 5.7, 5.8

Fragen zum Versuch

1. Was ist ein Kreisel und welche Unterschiede bestehen zwischen einem symmetrischen und einem unsymmetrischen Kreisel?
2. Wie sind folgende Begriffe definiert?

    - Winkelgeschwindigkeit
    - Drehimpuls
    - Trägheitsmoment
    - Rotationsenergie

Überlegen Sie sich jeweils den analogen Begriff für die geradlinige Bewegung.

3. Was versteht man unter einem kräftefreien Kreisel und welche Erhaltungssätze gelten für die kräftefreie Kreiselbewegung?
4. Was versteht man unter den Hauptträgheitsachsen eines starren Körpers?
5. Was versteht man unter der Figuren-, der Drehimpuls- und der momentanen Drehachse eines Kreisels und welche Bedeutung haben diese Begriffe bei der Beschreibung der Kreiselbewegung?
6. Was versteht man unter Präzession und was unter Nutation eines Kreisels?
7. Wie reagiert ein rotierender Kreisel auf ein *permanent* angreifendes Drehmoment, wie auf ein *kurzzeitig* angreifendes Drehmoment? Betrachten Sie dazu einen symmetrischen Kreisel, der nicht im Schwerpunkt unterstützt wird und an dem einmal *permanent* eine Kraft F angreift und auf den einmal nur *kurzzeitig* ein Kraftstoß einwirkt.
8. Was versteht man unter dem Begriff Corioliskraft, unter welchen Bedingungen treten Corioliskräfte auf und wie lautet die Formel für die Corioliskraft?
9. Welche Wirkungen der Corioliskraft zeigen sich auf der Erde?
10. Wie hängen das Drehmoment und die zeitliche Änderung des Drehimpulses zusammen und wie lässt sich damit die Präzession eines Kreisels erklären?
11. Leiten Sie die Beziehung zwischen der Präzessionsfrequenz, der Kreiselfrequenz, dem Trägheitsmoment des Kreisels und dem am Kreisel angreifenden Drehmoment her.
12. Welche Besonderheit ergibt sich, wenn das an einem Kreisel angreifende Drehmoment von der Schwerkraft verursacht wird?
13. Wie lässt sich mit einem Stroboskop die Frequenz eines rotierenden Körpers *eindeutig* bestimmen?
14. Informieren Sie sich ganz grob über das Prinzip eines Synchron-Motors.
15. Wie läßt sich eine magnetisierte Stahlkugel sehr genau auf eine Rotationsfrequenz von 50 Hz stabilisieren?

16. Machen Sie sich das Prinzip eines Kreiselkompasses klar. An welchen Stellen auf der Erde versagt der Kreiselkompass und warum?
17. Kennen Sie eine Anwendung der Kreiseltheorie aus der Atomphysik (Lamorfrequenz)?

Versuchsdurchführung

Aufgaben

1. **Qualitative Beobachtung von Kreiselbewegungen**
   Beobachten Sie qualitativ die Nutation und Präzession

   a) eines symmetrischen Kreisels.

   b) eines unsymmetrischen Kreisels

   c) Machen Sie beim unsymmetrischen Kreisel die momentane Drehachse sichtbar.

2. **Präzession eines symmetrischen Kreisels**
   Messen Sie die Präzessionsfrequenz ν_{P} eines symmetrischen Kreisels in Abhängigkeit

   a) vom Neigungswinkel α der Figurenachse gegen die Vertikale.

   b) vom angreifenden Drehmoment D.

   c) von der Rotationsfrequenz ν_{K} des Kreisels.

   Tragen Sie die Messergebnisse mit Fehlerangaben in entsprechende Diagramme auf. Achten Sie dabei auf eine zweckmäßige Darstellung der Messergebnisse, um diese direkt mit der Theorie vergleichen zu können.

3. **Bestimmung der Erdbeschleunigung mittels eines auf 50 Hz stabilisierten symmetrischen Kreisels**

   a) Messen Sie die Präzessionsfrequenz eines mittels eines Synchron-Motors auf 50 Hz stabilisierten symmetrischen Kreisels.

   b) Berechnen Sie aus dem Trägheitsmoment Θ, dem Abstand r zwischen Schwerpunkt und Mittelpunkt der als Kreisel dienenden abgeflachten Stahlkugel und den gemessenen Werten für die Masse M der Stahlkugel und ihre Präzessionsfrequenz ν_{P} die Erdbeschleunigung g. (Ausführliche Fehlerfortpflanzungsrechnung!)

Beschreibung der Geräte

Die Kreisel

Die benutzten Kreisel sind Metallkugeln, die auf einem Luftkissen reibungsarm in einer Lagerschale laufen. Das Luftkissen wird von einer Düse in der Mitte des Lagers erzeugt, die von einem Kompressor gespeist wird.

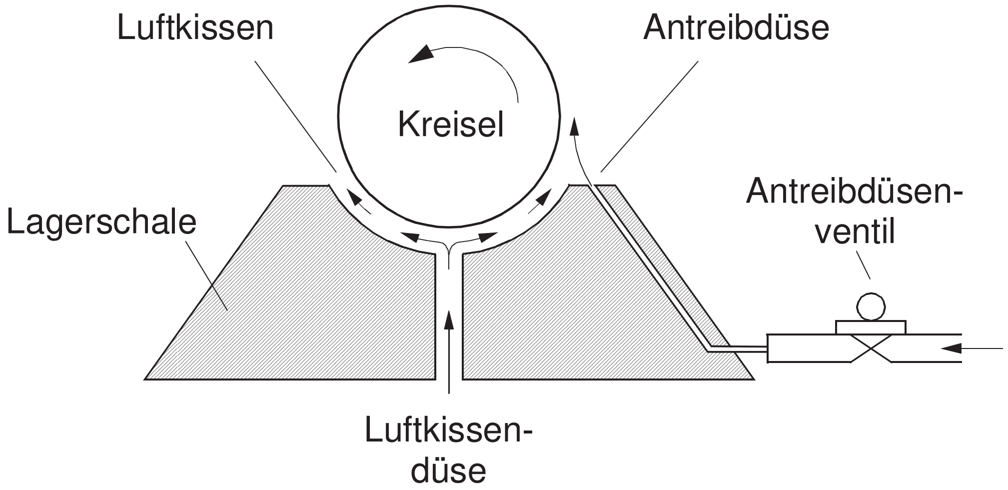


Abb. 1: Schnittzeichnung durch die Lagerschale

Achten Sie, um die Lagerschale nicht zu beschädigen, auf folgendes:

Den Kreisel nicht ohne Luftkissen in die Lagerschale setzen und nicht durch Hineindrücken oder Festhalten der Figurenachse abbremsen!

Abbremsen kann man den Kreisel durch vorsichtiges seitliches Berühren mit einem weichen Gegenstand oder durch sehr vorsichtiges seitliches Berühren mit Daumen und Zeigefinger.

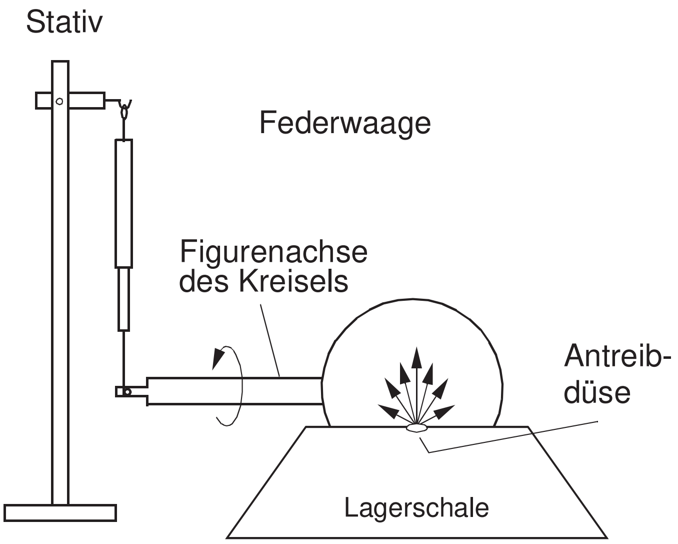


Abb. 2: Kreisel mit Federwaage

Die Kreisel werden in Umdrehung gesetzt, indem man sie tangential mit einer zweiten Pressluftdüse antreibt. Die Bronzekugel lässt sich beim Antreiben möglichst reibungsarm in dem Haken einer Federwaage führen. Hat der Kreisel die gewünschte Frequenz erreicht, wird die Kreiselachse durch Absenken der Federwaage aus dem Haken ausgeklinkt.

Das Stroboskop

Die Rotationsfrequenz der Kreisel kann mit einem Stroboskop (Blitzlampe mit einstellbarer Blitzfrequenz) bestimmt werden. Um die Blitzlampe zu schonen, sollte sie, wenn unbenutzt, abgestellt werden.

Überlegen Sie sich, wie man Bruchteile oder Vielfache der Rotationsfrequenz eines Kreisels eindeutig bestimmen kann.

Durch gleichzeitiges Drücken der beiden Tasten IMPULS und CONTACT werden die Blitze genau mit Netzfrequenz, das heißt mit $\nu = 50\,\mathrm{Hz}$ ausgelöst. Man sagt, die Blitzlampe wird mit Netzfrequenz „getriggert“.

Der Synchron-Motor

In dem schwarzen Zusatzring ist eine Spule aus mehreren Windungen eingelegt, in der durch Anlegen einer Wechselspannung (mit Hilfe des Zusatzgerätes „precession add - on“) ein zur Spulenachse rotationssymmetrisches magnetisches Wechselfeld erzeugt wird. Die abgeflachte Stahlkugel ist in der Ebene der Abflachung permanent magnetisiert, so dass sie als Rotor in einem Synchron-Motor verwendet werden kann.

Überlegen Sie sich, wie die magnetisierte Stahlkugel mit Hilfe des magnetischen Wechselfeldes der Spule auf eine Rotationsfrequenz von 50 Hz stabilisiert werden kann.

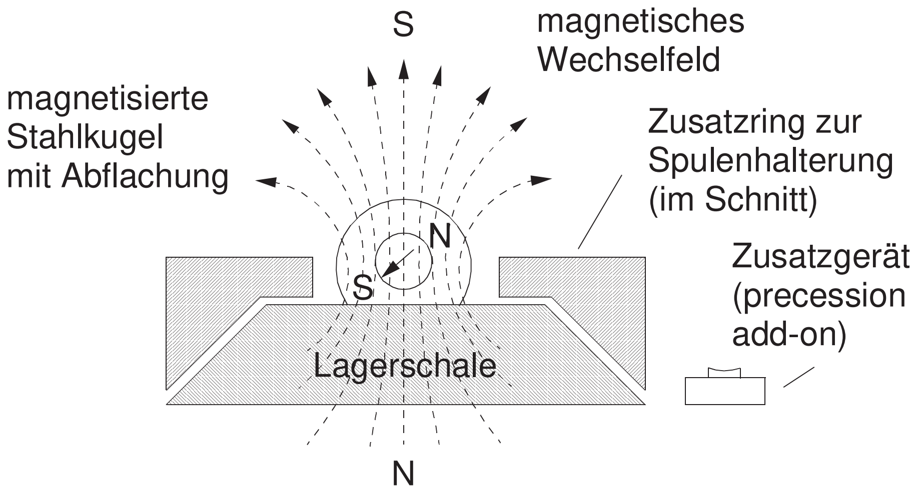


Abb. 3: Magnetische Stahlkugel im Zusatzring

Anleitung zu den einzelnen Aufgaben

zu 1a) Nutation und Präzession eines symmetrischen Kreisels

Als symmetrischer Kreisel dient eine Bronzekugel, an der eine Achse angeschraubt wird. Treiben Sie nach Abb. refkrei2 den mit der Figurenachse in die Federwaage eingehängten Kreisel auf ca. 40 Hz an und klinken Sie ihn dann aus der Federwaage aus. Was passiert?

Versuchen Sie die Präzessionsbewegung des Kreisels durch leichten seitlichen Druck mit einem Bleistift gegen die Figurenachse zu beschleunigen oder abzubremsen. Was passiert?

Drücken Sie leicht von oben oder unten gegen die Figurenachse. Was passiert?

Versetzen Sie dem präzedierenden Kreisel einen leichten Schlag gegen die Figurenachse. Was passiert?

Beobachten Sie das Abklingen der Nutationsbewegung des Kreisels.

Was ist die Ursache für das Abklingen der Nutation? Wie kann man das Abklingen der Nutation bei Bedarf beschleunigen?

zu 1b) Nutation und Präzession eines unsymmetrischen Kreisels

Um aus dem symmetrischen Kreisel einen unsymmetrischen zu machen, tauscht man die lange Achse gegen eine kurze Aluminium-Achse aus, an der, wie in Abb. 4, eine abgewinkelte Aluminium-Scheibe befestigt ist.

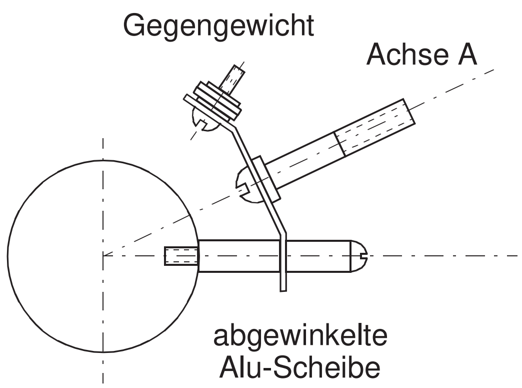


Abb. 4: Bronzekreisel mit Aluminiumanbauteilen

Dreht man diesen unsymmetrischen Kreisel (diesmal mit Daumen und Zeigefinger) um die Achse A an, so beginnt er ebenfalls zu präzedieren. Diese Präzessionsbewegung ist jedoch i. a. von starker Nutation begleitet, die im Gegensatz zum symmetrischen Kreisel im Laufe der Zeit nicht abklingt.

Experimentell besonders interessant ist der Fall, bei dem die neue Hauptträgheitsachse genau durch das Zentrum der Alumiumscheibe geht. Dies erreicht man durch ein geeignetes Gewicht (Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben) auf der entgegengesetzten Seite der Alu-Scheibe. Dreht man den Kreisel diesmal um die Achse A an, so sollte bei richtiger Dimensionierung der Gewichte keine Nutation auftreten. Ist die Achse A gegen die Vertikale geneigt, so beobachtet man reine Präzession.

zu 1c) Sichtbarmachung der momentanen Drehachse

Beobachten Sie mit Hilfe des auf der abgewinkelten Alu-Scheibe aufgeklebten bedruckten Papiers die momentane Drehachse.

Woran ist diese zu erkennen?

zu 2a) Messung von ν_{P} in Abhängigkeit von α

Treiben Sie den symmetrischen Kreisel mit waagerechter Figurenachse nach der in Abb. 2 beschriebenen Methode auf 40 Hz an. Nach Abhängen aus dem Haken der Federwaage beginnt er zu präzedieren. Bestimmen Sie mit einer Stoppuhr die Periodendauer $\mathrm{T_P}$ der Präzessionsbewegung.

Überlegen Sie sich, wie Sie für $\mathrm{T_P}$ durch Mittelung einen möglichst zuverlässigen Messwert erhalten. Wie lassen sich verschiedene Winkel α der Figurenachse zur Vertikalen einstellen? Ist es wichtig, diese Winkel genau zu kennen?

Um ein reibungsbedingtes Abnehmen der Kreiselfrequenz ν_{K} weitgehend zu verhindern, treibe man den Kreisel während der einzelnen Messungen mit der seitlichen Pressluftdüse immer wieder auf 40 Hz an.

Wie gut läßt sich damit die Kreiselfrequenz während eines Umlaufes konstant halten?

Untersuchen Sie dazu zunächst, um wieviel Hz die Rotationsfrequenz des Kreisels bei einem Präzessionsumlauf abnimmt, wenn man ihn während des Umlaufes nicht nachbeschleunigt.

zu 2b) Messung von ν_P in Abhängigkeit von D

Stellen Sie durch Verschieben eines Gewichtes auf der Figurenachse des symmetrischen Kreisels verschiedene Drehmomente D ein und messen Sie wieder bei möglichst stabil gehaltener Rotationsfrequenz $\nu_\mathrm{K} = 40\,\mathrm{Hz}$ die Präzessionsfrequenz $\nu_\mathrm{P}(\mathrm{D})$ des Kreisels.

Wie bestimmen Sie das jeweilige Drehmoment? Wo treten hierbei Messfehler auf?

zu 2c) Messung von ν_P in Abhängigkeit von ν_K

Stellen Sie für ein festes Drehmoment und waagerechter Figurenachse mit Hilfe eines Stroboskops verschiedene Kreiselfrequenzen ν_K ein und messen Sie die zugehörige Präzessionsfrequenz ν_P.

Kennen Sie eine geeignete Diagrammdarstellung, in der die Messergebnisse auf einer waagerechten Geraden liegen sollten?

zu 3a) Messung von νP der abgeflachten Stahlkugel

Als Kreisel wird bei dieser Messung eine abgeflachte Stahlkugel verwendet, die in Richtung der Abplattung permanent magnetisiert ist. Dadurch kann die Kugel zusammen mit einer Spule als Rotor eines Synchron-Motors sehr genau auf eine Frequenz von 50 Hz stabilisiert werden.

Zunächst wird die Magnetspulenhalterung auf das Kreisellager aufgesetzt und das Stroboskop mit Netzfrequenz getriggert. (Gleichzeitiges Drücken der Tasten IMPULS und KONTAKT.) Zur besseren Beobachtung markiere man die flache Seite des Kreisels mit einem Filzstift oder Füller-Strich. Der Kreisel wird dann, indem man mit einer Bleistiftspitze gegen das Zentrum der Abplattung drückt, so gehalten, dass seine Figurenachse horizontal liegt und die seitlich an der Lagerschale angebrachte Pressluftdüse in Richtung des Kugeläquators bläst.

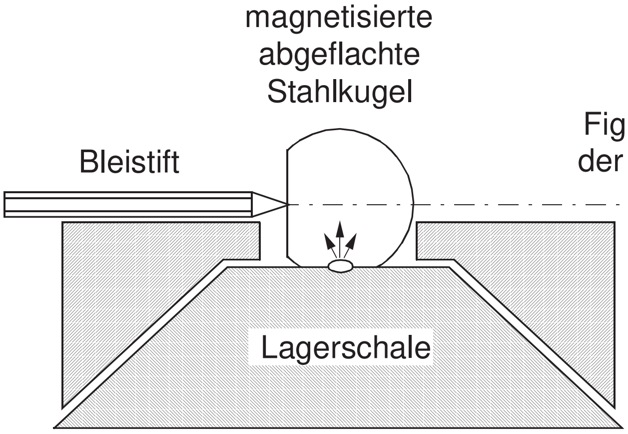


Abb. 5: Skizze zum Antreiben des Stahlkugelkreisels

Auf keinen Fall sollten die beim Antreiben auftretenden Nutationsbewegungen so stark werden, dass die abgeplattete Fläche des Kreisels unter den Rand der Lagerschale gerät, da diese dadurch beschädigt wird. Gegebenenfalls muß man die Führung des Kreisels mit der Bleistiftspitze aufgeben und ihn ohne Führung weiter antreiben oder bei zu großen Nutationen den ganzen Vorgang nach vorsichtigem Abbremsen des Kreisels von vorne beginnen.

Wenn der Kreisel genau mit 50 Hz rotiert, was daran zu erkennen ist, dass die Strichmarke im Stroboskoplicht zu stehen scheint, wird die Pressluft abgestellt und das Zusatzgerät (precession add - on) auf MAX PHASE geschaltet. Das Einrasten des Kreisels in die Netzfrequenz erkennt man im Stroboskoplicht an einer Pendelbewegung der Strichmarke auf dem Kreisel. Hat sich der Kreisel auf die richtige Frequenz eingependelt d. h. scheint er im Stroboskop zu stehen, kann mit der Messung begonnen werden.

Messung

Die Präzessionsfrequenz der abgeflachten Kugel wird bestimmt, indem wiederum die Periodendauer eines Präzessionsumlaufes T_P gemessen wird. Durch eine Linse wird über die Kreiselfläche ein Lichtfleck auf die Wand projiziert, wo sein Bild einmal pro Präzessionsumlauf eine von Ihnen festgelegte Marke passiert. Es sollten mindestens vier Periodendauern einzeln gemessen werden, wobei Sie durch Verwendung von zwei Stoppuhren die Gesamtmesszeit auf die Hälfte reduzieren können. Wie?

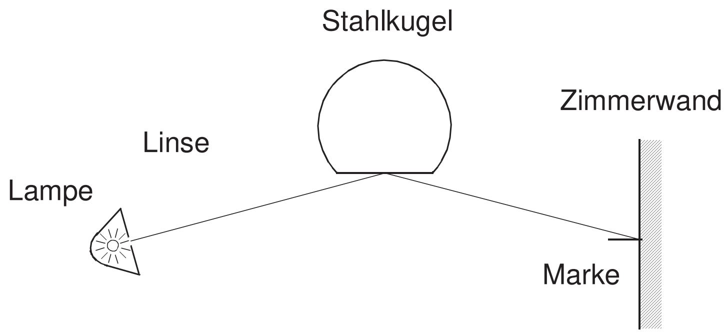


Abb. 6: Schematischer Versuchsaufbau zu Aufgabe 3a)

M 3a Stoßversuche

Aufgabenbeschreibung

Auf einem Lufttisch werden mechanische Stoßvorgänge untersucht. Dabei werden der Impulserhaltungssatz, der Erhaltungssatz für die kinetische Energie und der Drehimpulserhaltungssatz für elastische und unelastische Stöße überprüft.

Literatur

1. Gerthsen-Kneser-Vogel, 16. Aufl., Kap. 1.5
2. Berkeley: Physikkurs 1, Mechanik, Kap. 5, 6
3. Alonso-Finn I: Kap. 9.7
4. Flügge: Lehrbuch der theoretischen Physik, Bd. 1, Kap. IV, § 15
5. Landau-Lifschitz: Lehrbuch der theoretischen Physik, Bd. 1, Kap. IV
6. Demtröder, Experimentalphysik 1, Kap. 4

Fragen zum Versuch

1. Wie sind folgende mechanischen Größen definiert? Geschwindigkeit, Beschleunigung, Impuls, Drehimpuls, Translationsenergie, Rotationsenergie, Schwerpunkt und Schwerpunktgeschwindigkeit.
2. Wie kann man die unter 1. genannten Größen messen? Im Versuch wird die Bewegung eines Körpers bei stroboskopischer Belichtung fotografiert. Man erhält dann auf einem Bild die Aufenthaltsorte des Körpers zu verschiedenen Zeiten. Wie gewinnt man aus diesen Aufnahmen die unter 1. genannten Größen?

3. Welche Erhaltungssätze aus der Mechanik kennen Sie? Wie kann man den Impulssatz graphisch darstellen?
4. Diskutieren Sie die Begriffe: Superelastischer, elastischer, unelastischer und realer Stoß.
5. Was versteht man unter Anregungsenergie?
6. Wie sind das Laborsystem und das Schwerpunktsystem definiert? Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Systemen? Wodurch ist das Schwerpunktsystem ausgezeichnet?
7. Was versteht man unter einem Newton-Diagramm? Wie sieht das Newton-Diagramm für den Stoß zwischen zwei gleichen Massen aus, wenn eine der Massen vor dem Stoß ruht?
8. Wie hängt der Verlust an Translationsenergie vom Massenverhältnis der Stoßpartner für die verschiedenen Stoßarten ab?
9. Wovon hängt der maximale Ablenkwinkel im Laborsystem ab?
10. Wie hängt der maximale Übertrag an Translationsenergie vom Massenverhältnis der Stoßpartner ab?
11. Wann ist dieser Übertrag am größten? Wo z. B. wird dieses Verhalten in der Technik ausgenutzt? Was passiert beim Stoß eines Teilchens gegen eine feste Wand? Wie viel Prozent seiner Translationsenergie kann ein α-Teilchen beim Stoß mit einem Elektron an dieses maximal abgeben?
12. Wie ist der Stoßparameter definiert? Was ist ein zentraler Stoß?
13. Aus welchen Beiträgen setzen sich die kinetische Energie und der Gesamtdrehimpuls beider Stoßpartner vor und nach dem Stoß im Laborsystem und im Schwerpunktsystem zusammen?
14. Wie ist der Stoß- oder Wirkungsquerschnitt für den Stoß zwischen zwei „harten“ Kugeln mit den Radien r_1 und r_2 definiert? Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Absorptionskoeffizient und dem Wirkungsquerschnitt? Wie ist die mittlere Weglänge definiert und welcher Zusammenhang besteht zwischen ihr und dem Wirkungsquerschnitt?
15. Geben Sie Beispiele für Stoßprozesse aus der Physik an.

Versuchsdurchführung

Es sollen auf einem Lufttisch die verschiedenen mechanischen Stoßvorgänge nachvollzogen werden. Der elastische Stoß kann z. B. mit den magnetischen Pucks sehr gut dargestellt werden. Der unelastische Stoß wird mit Velerobändern ermöglicht. Reale Stöße ergeben sich durch Stöße der Kunststoffpucks untereinander. Jeder Stoßvorgang kann mit Hilfe der stroboskopischen Belichtungsmethode auf einem Bild festgehalten werden. Da man mit einem Film etwa 25 Aufnahmen zur Verfügung hat, könnte man z. B. folgendes Versuchsprogramm aufstellen:

- 5 Aufnahmen von elastischen Stößen zwischen den magnetischen Pucks bei verschiedenen Stoßparametern d.
- 5 Aufnahmen von unelastischen Stößen (zwei Pucks gleicher Masse mit Velerobändern) bei verschiedenen Stoßparametern d.
- 15 Aufnahmen von realen Stößen, davon 5 mit $m_1 > m_2$, 5 mit $m_1 = m_2$ und 5 mit $m_1 < m_2$, jeweils bei verschiedenen d.

Vor Beginn des Versuchs sollte überprüft werden, ob der Lufttisch gut justiert ist und die Laufflächen der Pucks sauber und ohne Kratzer sind. Überlegen Sie sich, wie viele Momentaufnahmen Sie zur Auswertung des Stoßes unbedingt brauchen. Beachten Sie weiterhin, dass mehr als 20 stroboskopische Momentaufnahmen pro Bild den Kontrast stark vermindern. Aus diesen beiden Grenzfällen sollten Sie sich eine sinnvolle Pulsfrequenz überlegen. Üben Sie einige Zeit, bevor Sie die Aufnahmen beginnen. Probieren Sie auch jeden Stoßtyp vor der Aufnahme.

Bemerkung zur Auswertung

Bei der Auswertung sollte die Qualität vor der Quantität stehen. Drei vollständig ausgewertete Stoßprobleme können voll ausreichen, wenn Sie damit unterschiedliche Stoßtypen erfassen und diese nach

Impuls- und Energieerhaltung betrachten. Eine ausführliche Drehimpulsbetrachtung kann auf ein Stoßproblem beschränkt werden (unelastischer Stoß). Mehr als fünf Stöße können Sie bei gründlicher Auswertung zeitlich kaum schaffen. Vereinfachen Sie sich die Auswertung durch günstige Wahl eines Koordinatensystems. Diskutieren Sie Energieverluste ausführlich, d. h. vergleichen Sie Ihre Ergebnisse z. B. mit dem maximalen Energieverlust, der für das Massenverhältnis möglich ist. Betrachten Sie auch einmal den Energie- bzw. Impulsübertrag in Abhängigkeit vom Stoßparameter d und vom Massenverhältnis.

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?

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 $\mathrm{Re}_{\mathrm{krit}}$ 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.

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 entprechender 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.

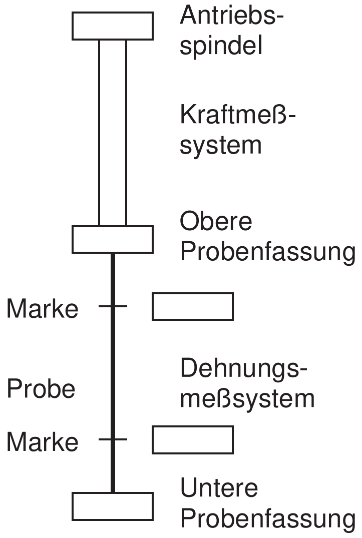


Abb. 1: Versuchsaufbauskizze zu 1a)

Durchführung

1. Die Auswahl des Kraftmessers wird durch den Belastungsbereich der Probe bestimmt. Für die Drähte ist der große Kraftmesser mit $F_{max} = 10\,kp$ zu verwenden. Für die Stäbe sind die Angaben der Tabelle auf Seite 46 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.

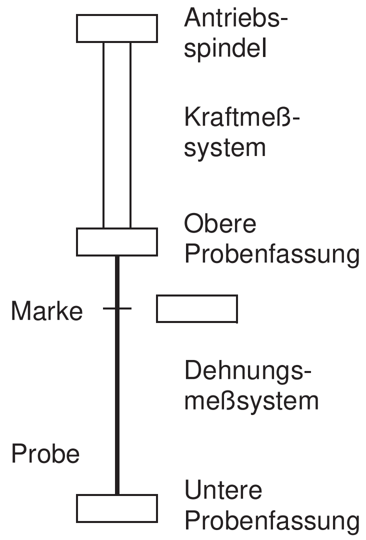


Abb. 2: Versuchsaufbauskizze zu 1b)

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.

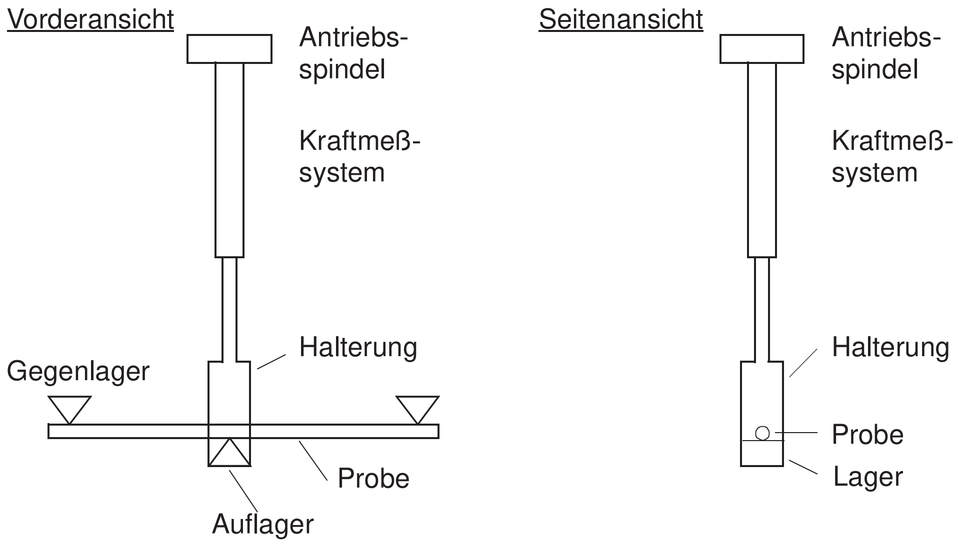


Abb. 3: Versuchsaufbauskizze zu 2

Durchführung

1. Aufnahme einer Messreihe bei verschiedenen Proben ähnlich wie unter Punkt 1a)

2. Ermitteln Sie die Probendimensionen

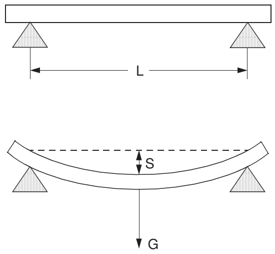
3. Auswahl der Kraftmesser siehe Tabelle auf Seite 46

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

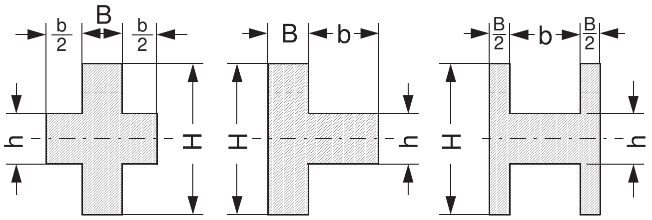
Theoretische Grundlagen

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:



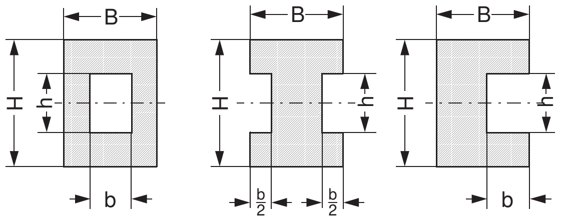
$$E = \frac{G \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot s}$$

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



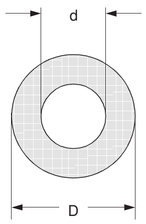
$$I = \frac{BH^3 + bh^3}{12}$$

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



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

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



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

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

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

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

M 6a Gravitation; Reversionspendel

Aufgabenbeschreibung

Im ersten Teil dieser Aufgabe soll die Gravitationskonstante bestimmt werden. Dazu wird eine Gravitations-Drehwaage benutzt.

Im zweiten Teil wird mit Hilfe eines Reversionspendels die Erdbeschleunigung gemessen.

Literatur

1. Alonso-Finn I, Kap. 13
2. Bergmann-Schäfer: Bd. 1, Kap. III, Nr. 30, 36
3. Gerthsen-Kneser-Vogel, 16. Aufl., Kap. 1.7, 2.3.3
4. Pohl: Einführung in die Physik, Bd. 1, Kap. IV, 30
5. Leybold: Phys. Handblätter DK 531.51 b
6. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap. 2.9, 10.2

Fragen zum Versuch

1. Wie heißt das Newtonsche Gravitationsgesetz?
2. Wie sieht das Gravitationsfeld eines Doppelsterns aus?
3. Welche Felder aus anderen Gebieten der Physik sind Ihnen bekannt?
4. Welche Analogien zwischen dem Gravitationsgesetz und dem Coulombschen Gesetz können Sie angeben? Welches sind die prinzipiellen Unterschiede?
5. Wie ergibt sich die Erdbeschleunigung aus dem Gravitationsgesetz?
6. Wie lautet die Grundgleichung der Mechanik?
7. Welche Kräfte beschreiben die Bahn eines Planeten?

8. Welche Bahnen für Körper im Gravitationsfeld der Sonne sind Ihnen bekannt?
9. Wie kann man die Erdbeschleunigung messen?
10. Was ist der Unterschied zwischen einem mathematischen und einem physikalischen Pendel?
11. Wie lauten die Differentialgleichungen für das Schwere- bzw. Drehpendel?
12. Wie ist der Zusammenhang zwischen Kraft, Arbeit, Potential?
13. Was ist ein Reversionspendel?
14. Was versteht man unter der reduzierten Pendellänge?
15. Wann ist die Arbeit unabhängig vom Verlauf des Weges?
16. Was besagt der Steinersche Satz?

Versuchsdurchführung

Gravitations-Drehwaage

Versuchsbeschreibung

Es ist möglich, die Gravitationskonstante an der Gravitations-Drehwaage mit Hilfe einer dynamischen Messmethode zu bestimmen. Dieses Verfahren hat den Vorteil der Übersichtlichkeit und der kurzen Beobachtungszeit, liefert aber nicht sehr genaue Werte.

Bei diesem Versuch wird die Drehwaage zur genaueren Bestimmung der Gravitationskonstante nach dem Verfahren der Endausschläge benutzt werden. Dazu sind einige weitere Kenntnisse, insbesondere über Drehschwingungen, nötig. Die Winkelrichtgröße des Torsionsbandes kann nämlich nicht direkt, sondern nur über die Schwingungsgleichung bestimmt werden. Zur Ermittlung der Gravitationskonstante wird sowohl die Ausgangs- und End-Gleichgewichtslage des Messsystems der Waage wie auch die gedämpfte Schwingungsbewegung dazwischen beobachtet (Beobachtungszeit etwa 60 Minuten).

Der Versuch beginnt von einer sorgfältig kontrollierten Ruhelage der Waage aus mit dem Umlegen der großen Kugeln in die entgegengesetzte Stellung. Dabei geht das Messsystem von der als Ruhelage bezeichneten einen Endlage nach einigen Schwingungen in die neue Endlage über. Der Winkel zwischen diesen beiden Endlagen sei α. Aus dem Lichtzeigerausschlag wird α mit Hilfe der Angaben in Abb. 2 über die Abmessungen der Messanordnung bestimmt.

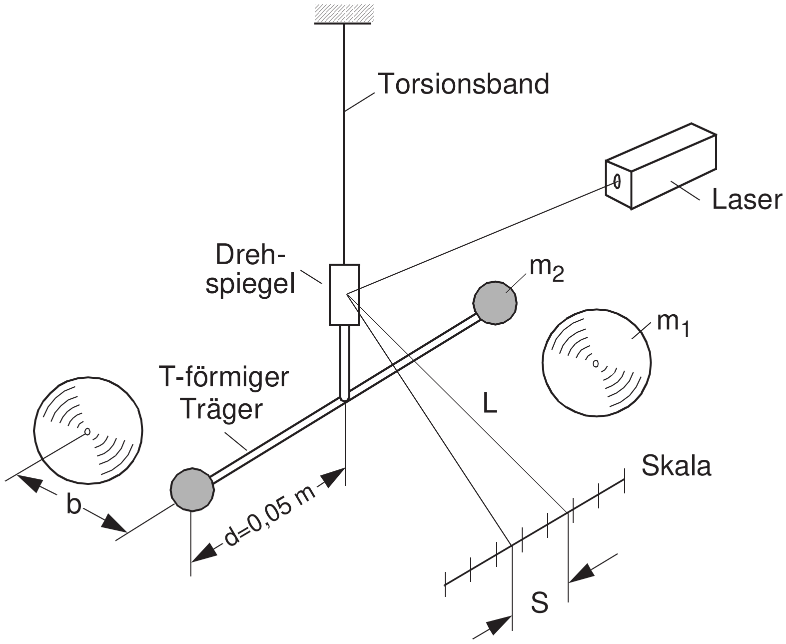


Abb. 1: Versuchsaufbau Gravitations-Drehwaage

Das auf das Messsystem in einer Endlage infolge der Massenanziehung wirkende Drehmoment M ist $M = 2Fd$, wenn F die Anziehungskraft zwischen je einem Paar Kugeln und d den Achsenabstand der kleinen Kugeln in der Waage vom Torsionsband bedeuten. Diesem Drehmoment wird durch die Verdrillung des Torsionsbandes um den Winkel $\alpha/2$ das Gleichgewicht gehalten. Bezeichnet man die Winkelrichtgröße des Torsionsbandes mit D, so ist dieses Drehmoment $M = D \cdot \alpha/2$.

Wegen der Winkelverdopplung bei der Reflexion gilt:

$$\frac{s}{d} = \frac{S}{2L} = \tan\alpha \approx \alpha$$

Die Winkelrichtgröße D kann aus der Schwingungszeit T der

Drehschwingung des Messsystems entnommen werden:

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{\Theta}{D} \qquad \text{oder} \qquad D = \frac{4\pi^2\Theta}{T^2}$$

Das hierin vorkommende Trägheitsmoment Θ kann man mit dem Trägheitsmoment der beiden kleinen Kugeln $\Theta = 2m_2d^2$ gleichsetzen (Schätzen Sie ab, ob diese Näherung für eine Präzisionsmessung zulässig ist), weil Gestänge und Spiegel praktisch zum Trägheitsmoment nichts beitragen, also

$$D = \frac{8\pi^2 m_2 d^2}{T^2}.$$

Setzt man in die Gleichung $M = D \cdot \alpha/2$ die Größe $M = 2Fd = 2G\frac{m_1m_2d}{b^2}$ und die oben gewonnenen Größen für D und α ein, so folgt mit $2M = D\alpha$

$$4G\frac{m_1m_2}{b^2} = \frac{8\pi^2 dm_2}{T^2} \cdot \frac{S}{2L}$$

wobei b der Abstand zwischen der kleinen Kugel und der großen Kugel ist.

$$b = r_{\text{gr. Kugel}} + \frac{1}{2}\text{Gehäusebreite} - \frac{Sd}{4L}$$

Daraus berechnet man

$$G = \frac{\pi^2 b^2 dS}{m_1 T^2 L}$$

Diese Formel für die Gravitationskonstante enthält nur messbare Größen. Die Masse der kleinen Kugel fällt aus der Rechnung heraus, so dass deren Kenntnis unnötig ist.

Der ermittelte Wert unterliegt folgendem systematischen Fehler: Die kleine Kugel wird mit einer sehr viel kleineren Kraft auch von der entfernten zweiten großen Kugel angezogen (siehe Abb. 3).

Diese Kraft ist nach dem Gravitationsgesetz

$$F_0' = 2G\frac{m_1m_2}{b^2 + 4d^2}$$

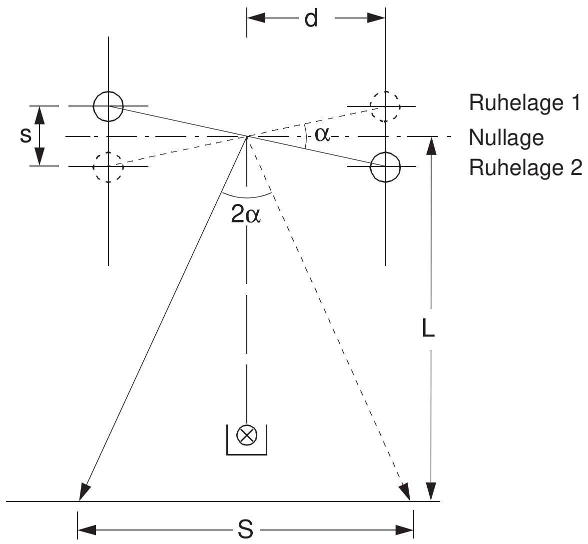


Abb. 2: Größenverhältnisse im Versuchsaufbau. Es bedeuten: s: Weg der kleinen Kugeln von Ruhelage 1 zu Ruhelage 2; d: Abstand der kleinen Kugeln von der Achse; S: Weg des Lichtzeigers auf der Wand; L: Abstand der Wand vom Spiegel der Waage; m_1: Masse der großen Kugel; m_2: Masse der kleinen Kugel

und hat eine Komponente f entgegengesetzt zu der zu messenden Kraft F_0.

$$f = 2G\frac{m_1 m_2}{b^2 + 4d^2}\frac{b}{\sqrt{b^2 + 4d^2}} = \beta F_0,$$

wenn β den Bruchteil bedeutet, um den die Kraft F_0 zu klein beobachtet wird.

$$\beta = \frac{b^3}{(b^2 + 4d^2)\sqrt{b^2 + 4d^2}}$$

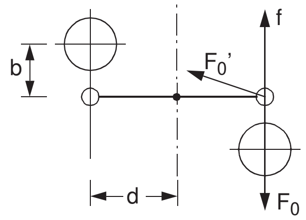


Abb. 3: Kräfteverhältnisse in der Drehwaage

Messprogramm

1. Nehmen Sie den Schwingungsverlauf einer Gravitationswaage auf und stellen Sie ihn graphisch dar.

2. Errechnen Sie aus der gemittelten Schwingungsdauer T und den Endausschlägen die Gravitationskonstante G.

   Der erhaltene Wert für G soll bezüglich des Einflusses der kreuzweisen Anziehung der Kugeln korrigiert werden. Dazu muss die Größe β gewonnen werden. Vergleichen Sie das Endergebnis mit dem Literaturwert.

Hinweise zur Versuchsdurchführung

1. Der T-förmige Träger mit den kleinen Kugeln der Masse m_2 befindet sich in einem Gehäuse mit Glasscheiben an der Vorder- und Rückseite. Der Träger soll so justiert sein, dass er in der Ruhelage möglichst parallel zu den Glaswänden verläuft (Bleikugeln m_1 dabei entfernt).

   Eine Korrektur der Justierung darf nur bei Anwesenheit eines Praktikumsbetreuers vorgenommen werden.

   Nun werden die Bleikugeln m_1 auf den Drehteller gelegt und möglichst dicht an das Gehäuse gebracht. Die kleinen Kugeln m_1 werden dadurch zu den großen Kugeln hingezogen, und nach etwa 1 Stunde stellt sich die Ausgangslage für das Experiment ein (während dieser Zeit werden die Messungen am Reversionspendel durchgeführt).

   Diese Ausgangslage ist auf einer Skala an der Wand zu markieren. Das Experiment wird nun fortgesetzt, indem die großen Kugeln mit Hilfe des Drehtellers *vorsichtig* in die entgegengesetzte Stellung gebracht werden. Der T-förmige Träger wird in eine neue Lage einschwingen. Diese gedämpfte Schwingung ist auf der Skala an der Wand zu verfolgen und graphisch darzustellen. Lesen Sie dabei am Anfang die Stellung des Lichtzeigers auf der Skala alle 30 s, nach 2 Minuten jede volle Minute ab, bis nach etwa 60 Minuten die Endgleichgewichtslage erreicht ist.

2. Sowohl vor Beginn wie auch nach Beendigung des Versuches beobachtet man die Konstanz der Endausschläge einige Minuten. Ein ggf. vorliegender Gang des Nullpunktes der Waage kann so berücksichtigt werden.

Reversionspendel

Messaufgabe

Bestimmen Sie mit Hilfe eines Reversionspendels die Erdbeschleunigung.

Hinweise zur Versuchsdurchführung

An der Pendelstange (1250 g) befinden sich zwei Schneiden im Abstand von 99.4 cm (siehe Abb. 4). An diesen beiden Schneiden kann die Pendelstange am Stativ aufgehängt werden. Weiterhin sind an der Pendelstange zwei Gewichte von 1000 g bzw. 1400 g angebracht. Das 1400 g Gewicht dient während der Messungen als Laufgewicht. Es sollen insgesamt drei Messreihen aufgenommen werden. Bei der ersten Messreihe soll der Abstand von der Schneide zur Mitte des 1000 g Gewichtes etwa 15 cm betragen. Für die zweite und dritte Messreihe soll dieser Abstand jeweils um 5 cm vergrößert werden.

Für jede Messreihe wird das Laufgewicht, anfangend bei Schneide 1, um 5 cm verschoben. Für jede dieser Positionen wird die Schwingungsdauer für die Aufhängung an beiden Schneiden bestimmt.

Tragen Sie während der Messungen die beiden Schwingungsdauern des Pendels in Abhängigkeit von der Lage des 1400 g Gewichtes in ein Diagramm ein.

Für die Schwingungsdauer T_r im Schnittpunkt beider Kurven gilt:

$$T_r = 2\pi\sqrt{\frac{l_r}{g}}$$

mit l_r = reduzierte Pendellänge und g = Erdbeschleunigung. Hieraus ergibt sich g.

Die Messung der Schwingungsdauer T erfolgt automatisch mit Laser und Photodiode. Dazu wird zunächst die Zeitangabe am Steuergerät (gleichzeitig Anzeigegerät) gelöscht (Knopf: RESET). Der Laserstrahl wird möglichst nahe am Stativ des Reversionspendels vorbeigeführt und genau auf die Photodiode justiert. Der Auslenkwinkel des Reversionspendels muss so gewählt werden, dass der Laserstrahl bei jeder Schwingung des Pendels zweimal unterbrochen wird. Nun wird die Uhr gestartet (Knopf: START). Die Uhr stoppt die Zeit dann automatisch nach 10 Schwingungsdauern des Pendels.

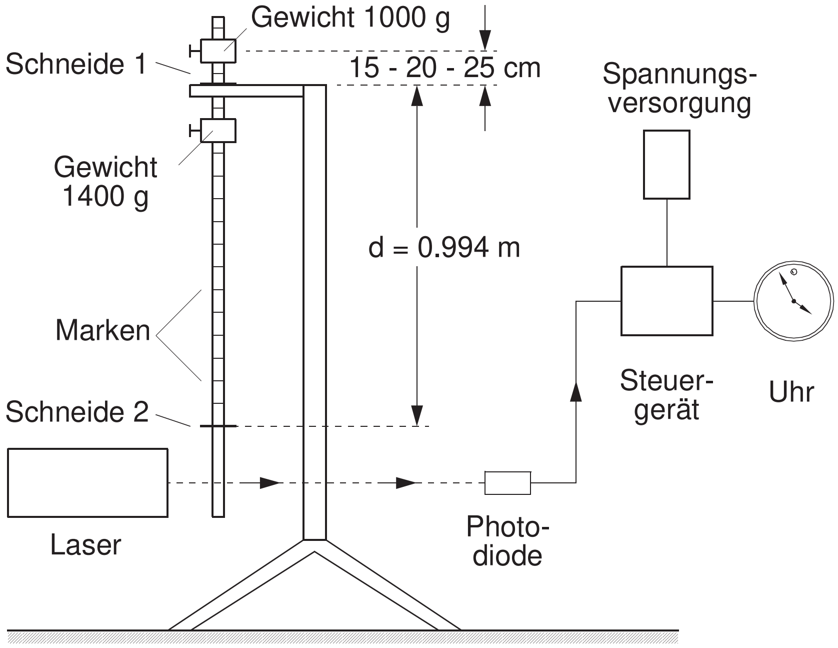


Abb. 4: Versuchsaufbau Reversionspendel

W 1a Spezifische Wärme

Aufgabenstellung

Bei diesem Versuch soll nach der Mischungsmethode die spezifische Wärmekapazität verschiedener Körper gemessen werden. Ferner wird die Schmelzwärme von Eis und die Verdampfungswärme von Wasser bestimmt.

Literatur

1. Alonso-Finn I: Kap. 9.8 – 9.13, Bd. III, Kap. 13.7
2. Bergmann-Schäfer: Bd. 1, Kap. 10, Nr. 95, 96, Kap. 11, Nr. 103
3. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 5.1, 5.6
4. Kohlrausch: Prakt. Physik I
5. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap. 11.1

Fragen zum Versuch

1. Erläutern Sie den Begriff „Temperatur“. Wie deutet man die Temperatur in der kinetischen Gastheorie? Was bedeutet „absolute Temperatur“? Wie kann man Temperaturen messen?
2. Erläutern Sie die Begriffe Wärmemenge, Molwärme, Schmelzwärme, Verdampfungswärme, spezifische Wärmekapazität, innere Energie, Enthalpie, etc.!
3. Wie ist die Kalorie heute definiert? Wie war sie früher? Welche Konsequenzen hat dies z. B. für die spezifische Wärmekapazität von Wasser?
4. Was ist ein Kalorimeter? Wodurch zeichnet sich ein gutes Kalorimeter hinsichtlich des Temperaturverlaufs aus?

5. Erläutern Sie die Mischungsmethode zur Bestimmung von Wärmekapazitäten, Schmelz- und Verdampfungswärme und das Verhalten der Extrapolation auf unendlich schnellen Temperaturausgleich.
6. Leiten Sie die Formeln für die Wärmekapazität C_K des Kalorimeters und die spezifische Wärmekapazität c_x eines Probekörpers her. Wie lauten die entsprechenden Formeln für die Schmelz- und Verdampfungswärme? Begründen Sie den Ansatz.
7. Wie kann man die spezifische Wärmekapazität von Flüssigkeiten bestimmen? Warum kann man sie nicht einfach mischen?
8. Was sagt das Dulong-Petitsche Gesetz aus?
9. Wie hängt die spezifische Wärmekapazität für feste und gasförmige Stoffe von der Temperatur ab?
10. Aus welchen Beiträgen besteht die hier zu bestimmende Verdampfungswärme?
11. Was besagt die Clausius-Clapeyronsche Gleichung?
12. Veranschaulichen Sie den Verdampfungs- bzw. Kondensationsprozeß mit Hilfe der Isothermen realer Gase im p-V-Diagramm.

Durchführung

Messprogramm

1. Wärmekapazität des Kalorimeters
2. spezifische Wärmekapazität von Festkörpern
3. Schmelzwärme von Eis
4. Verdampfungswärme von Wasser

Beschreibung des Messplatzes

Es stehen folgende Geräte zur Verfügung:

1 Elektro-Kocher mit Ständer und Stativmaterial

2 Kalorimeter zu je ca. 1 l

1 Messbecher aus Glas zu 1 l (200 ml-Teilung)

1 Messzylinder aus Glas zu 100 ml (1 ml-Teilung)

1 Thermometer 0–100° C mit 1/10-Grad-Teilung

1 Aluminiumkochtopf zu ca. 1 l

1 Rührer aus Glas

1 Stoppuhr

1 „Wasserverdampfungseinheit“, gebrauchsfertig für 4. Teilaufgabe

je 1 Probekörper aus Aluminium, Kupfer und Stahl sowie mehrere Eiswürfel

Ferner ist eine für alle Praktikanten zugängliche Waage vorhanden mit einer Genauigkeit von 0.1 g.

Allgemeine Hinweise

Notieren Sie vor und nach jedem Mischungsversuch etwa 5 Minuten lang die Temperatur im Kalorimeter (alle 30 Sekunden eine Ablesung). Tragen Sie die Temperatur gegen die Messzeit in einem Diagramm auf und extrapolieren Sie auf unendlich schnellen Temperaturausgleich. Achten Sie stets auf homogene Temperaturverteilung im Kalorimeter. Wie können Sie die zugesetzten Wasser-, Eis und Dampfmengen im Kalorimeter genau bestimmen?

Überlegen Sie sich vor dem Versuchstag, in welcher Reihenfolge Sie die einzelnen Aufgaben durchführen. Achten Sie insbesondere auf Zeiteinsparung: Bei geeigneter Temperatur des Wasserbades kann z. B. die Messung „5 min nach“ schon als „5 min vor“ (der nächsten Mischung) benutzt werden, oder es kann während der Messung zu einer Teilaufgabe schon das Wasser für eine andere gekocht werden, etc.

Bei sehr ungeschickter Abfolge der Arbeiten reicht die Praktikumszeit möglicherweise nicht für alle Teilaufgaben aus. Sprechen Sie daher Ihren Vorschlag mit den Betreuer vor Versuchsbeginn durch.

Es gibt mehrere sinnvolle Möglichkeiten. Die Nummerierung im Messprogramm ist willkürlich.

Skizzieren Sie den für Ihren Vorschlag zu erwartenden Temperaturverlauf, indem Sie für die Wärmekapazität des Kalorimeters 10 J/K und für die drei Probekörper je 5 J/K annehmen.

Spezielle Hinweise

allg.: beachten Sie, dass die Wärmekapazität des Kalorimeters (inklusive Thermometer und Styropordeckel) von der Füllmenge abhängt.

zu 1: Mischen Sie zwei etwa gleich große Mengen warmes und kaltes Wasser. Ist es günstiger, zuerst warmes oder zuerst kaltes Wasser ins Kalorimeter zu gießen? Welche Temperatur hat das Glas oberhalb des Wasserspiegels? Welche Temperatur hat das Wasser direkt beim Eingießen? Wie können Sie Abhilfe schaffen?

zu 2: Erhitzen Sie jeweils den Probekörper in siedendem Wasser. Der Probekörper darf dabei den Boden des Gefäßes nicht berühren (warum?). Bringen Sie den Probekörper schnell, aber vorsichtig ins Wasserbad. (Die Glaswand des Kalorimeters ist leicht zerbrechlich!)

zu 3: Werfen Sie einen oder mehrere trockene (warum?) Eiswürfel ins Wasserbad. Ein Eiswürfel wiegt etwa 20 g. Schätzen Sie vorher die zu erwartende Temperaturänderung ab (Literaturwert für die Schmelzwärme 334 J/g). Wiederholen Sie den Versuch noch einmal oder zweimal (abhängig von der Temperatur des Wasserbades).

zu 4.: Warten Sie zuerst die Ausbildung eines Dampfstrahls ab, bevor Sie das Röhrchen in das Wasserbad einbringen (warum?).

Achtung, Verbrühungsgefahr! Sämtliche dampfführende Leitungen sind ca. 100° C heiß !

Max. 600 ml einfüllen !!

Bei diesem Versuchsteil ist mit besonders inhomogener Temperaturverteilung im Wasserbad zu rechnen. Brechen Sie nach etwa 10–20 Minuten die Dampfüberleitung ab, indem Sie das Dampfzuleitungsröhrchen aus dem Wasser ziehen. Was passiert, wenn Sie einfach nur den Kocher abstellen?

Schätzen Sie vorher ab, welche Wassermenge Sie verkochen müssen. Rechnen Sie Verluste mit ein.

Wozu dient der Glaskolben in der Leitung?

(Literaturwert für die Verdampfungswärme: 2256 J/g)

Zusatz zu 1:

Falls Sie nach Durchführung aller Teilaufgaben noch etwas Zeit übrig haben, messen Sie die Wärmekapazität des Kalorimeters noch einmal. Diesmal jedoch mit anderer (höherer) Füllmenge, aber sonst auf die gleiche Weise. Damit können Sie die Wärmekapazität für die tatsächliche Füllmenge bei den einzelnen Teilaufgaben interpolieren.

Anmerkung zur Auswertung

Führen Sie zu jeder Teilaufgabe eine Fehlerfortpflanzungsrechnung durch.

Diskutieren Sie systematische Fehlerquellen. Führen diese zu einer Vergrößerung oder Verkleinerung des Ergebnisses?

Vergleichen Sie die Ergebnisse von Aufgabe 2 mit dem Dulong-Petitschen Gesetz. (Schätzen Sie die Werte von Stahl durch diejenigen von Eisen ab.)

W 2b Wärmeleitung in Metallen

Aufgabenbeschreibung

Die Wärmeleitung von Metallen soll bei stationärer und periodisch wechselnder Wärmeströmung untersucht werden.

Literatur

1. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, Kap. 5.4
2. Bergmann-Schäfer: Bd. 1, Kap. X
3. Kopitzki: Einführung in die Festkörperphysik, Kap. 3.1
4. Kohlrausch: Prakt. Physik I und III
5. Kuchling, Taschenbuch der Physik
6. Demtröder, Experimentalphysik 1, Kap. 11.2

Fragen zum Versuch

1. Wo finden in der Natur Wärmetransportvorgänge statt?
2. Klären Sie die Begriffe: stationärer Zustand, Wärme, Temperatur, Wärme- und Temperaturleitzahl, Wärmeübergang.
3. Welche Temperaturmessverfahren gibt es?
4. Welche Arten des Wärmetransports gibt es und wovon hängen sie ab?
5. Auf welchem Mechanismus basiert Wärmeisolierung?
6. Welche Zusammenhänge bestehen zwischen elektrischer Leitung und Wärmeleitung?
7. Welche Wärmetransportarten gibt es und wo treten sie auf?
8. Was ist ein Wärmeleitrohr (Heatpipe)?
9. Durch welche Differentialgleichung wird die stationäre und durch welche die nichtstationäre Wärmeströmung beschrieben?
10. Erklären Sie die Wirkungsweise eines Thermoelementes.

Versuchsaufbau

Ein Metallstab wird an einem Ende durch einen in den Stab eingelassenen Lötkolbeneinsatz erwärmt. Der Lötkolbeneinsatz ist an ein Netzgerät anzuschließen und mit einer *Spannung bis maximal 24 V* zu betreiben. Das verwendete Netzgerät ist von Hand oder vom Rechner über den D/A-Ausgang aus ansteuerbar. Bei Versuchsteil 3 kann damit eine sinusförmig wechselnde Heizleistung realisiert werden.

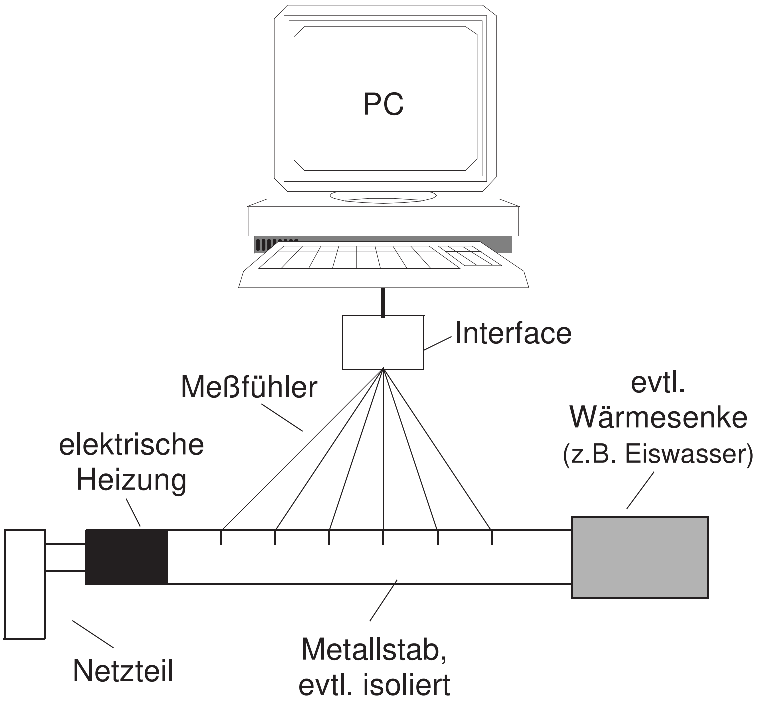


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau

Temperaturabhängige Messfühler, deren Widerstand sich im Bereich zwischen 0° C und 100° C linear mit der Temperatur ändert, nehmen die Temperatur auf. Die an ihnen abfallende Spannung wird über A/D-Wandler an den PC weitergegeben. Der A/D-Wandler wandelt das analoge Spannungssignal in ein digitales Signal um. Um die der jeweiligen Temperatur zugehörige Spannung zu ermitteln, ist eine Eichung notwendig. Zum Nullabgleich und für größere Stabilität wird eine Brückenschaltung und ein Differenzverstärker verwendet.

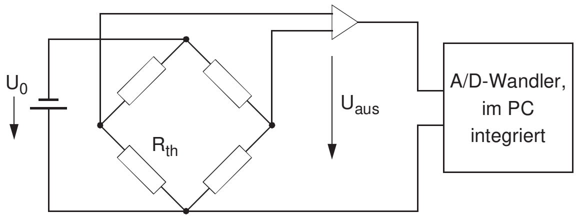


Abb. 2: Schaltskizze der Brückenschaltung

Die Widerstände sind einzeln nummeriert. Bei den Versuchsteilen 1, 4 und 5 sind verschiedene Messwiderstände umzustecken.

⚠ Die Messfühler sollten nicht oberhalb einer Temperatur von 100° C verwendet werden. **Deshalb lassen Sie die Temperatur nicht aus den Augen, wenn Sie hochheizen.**

Hinweise zum Programm

Das Programm wird nach Einschalten des Rechners durch den Befehl `WÄRME` gestartet. Es besteht im wesentlichen aus den drei Programmteilen KALIBRIERUNG, MESSUNG, und THEORIE. Zusätzlich sind verschiedene Menupunkte aufrufbar, die der besseren Bedienbarkeit dienen.

1. Durch Anklicken des Menupunktes KALIBRIERUNG lassen sich einzelne der temperaturabhängigen Widerstände kalibrieren.

2. Unter dem Menupunkt MESSUNG kann eine Messreihe aufgenommen und dargestellt werden, dabei kann die Messfühlertemperatur über der Zeit (ZEIT-TEMPERATUR-DIAGRAMM) oder der Ortskoordinate (Messfenster oder ZEITRAFFERFENSTER) abgetragen werden. Entsprechende Fenster können im Programm unter dem Menupunkt MESSUNG angewählt werden. Es kann sinnvoll sein, während der Messung nur das Messfenster zu öffnen, da sich das Temperatur-Zeit-Fenster bei langsamen Rechnern nur langsam aufbaut.

   Unter dem gleichen Menupunkt gibt es die Möglichkeit der Sicherung und des Ladens von Messdaten.

Bei den verschiedenen Darstellungsformen ist es auch möglich, die am Bildschirm angezeigte Grafik zu drucken. Dabei kann man über das Zeitrafferfenster die Temperatur über den Messwiderständen und mit dem Temperatur-Zeit-Diagramm den zeitlichen Verlauf der Temperatur an den angewählten Fühlern ausdrucken.

Zudem ist es möglich, im T-t-Fenster, durch Anklicken von bis zu 40 Punkten im Diagramm MARKEN zu setzen, deren genaue Werte mitausgedruckt werden. Sie können z. B. die Maxima und Minima markieren und so die Auswertung vereinfachen.

Um genauer die Punkte anwählen zu können, empfiehlt es sich, den gewünschten Ausschnitt durch SKALIEREN zu vergrößern. Bei den Temperatur-Orts-Darstellungsformen können Sie durch Anklicken eines Messpunktes in der Grafik den genauen Temperaturwert erhalten.

Vor jedem Versuchsteil ist unter dem Menupunkt MESSUNG der Punkt NEUE MESSUNG anzuklicken und dann der jeweilige Versuchsteil aufzurufen.

3. Der Menupunkt THEORIE ermöglicht es, während oder nach einer Messung bestimmte Temperaturverläufe zu simulieren.

4. Beenden lässt sich das Programm unter dem Punkt PROGRAMM.

5. Mit dem Menupunkt FENSTER lassen sich die auf dem Bildschirm dargestellten Fenster in ihrer Reihenfolge ordnen. Auch das Fenster mit dem die Heizleistung geregelt wird, kann unter diesem Menupunkt geöffnet werden. Das geöffnete Fenster erlaubt das Einstellen einer konstanten Heizleistung oder das Einstellen einer sinusförmigen Heizleistung. Die Heizleistung bleibt so lange aktiviert, bis sie auf 0 W gestellt wird. **Deshalb nach Beendigung einer Messung die Leistung auf 0 W herunterregeln.**

Die Größe der einzelnen Fenster lässt sich durch die „Knöpfe“ an den Ecken des Fensters variieren und durch Anklicken der Kopfzeile des Fensters in den Vordergrund ziehen und verschieben.

Versuchsdurchführung

1. Eichung eines temperaturabhängigen Widerstands.
2. Bestimmung von λ bei stationärer Wärmeleitung.
3. Bestimmung von λ mit Hilfe der Wärmewellenmethode.
4. Untersuchung des Temperaturverlaufs bei Verzicht auf thermische Isolierung.

Die Thermowiderstände sind bis maximal 110° C ausgelegt. Deshalb ist auf rechtzeitiges Herunterregeln der Heizleistung (ab ca. 85° C) zu achten. Die Zieltemperatur sollte für den heißesten Messwiderstand zwischen 70 und 90° C liegen.

Zu Versuchsteil 1: Eichung eines temperaturabhängigen Widerstands

Exemplarisch ist für einen Widerstand eine Eichkurve aufzunehmen. Aufruf des Programmteils EICHUNG und Eingabe des zu eichenden Thermowiderstands. Im Versuch soll Messfühler 16 geeicht werden. Dazu wird die Anfangs- und die Endtemperatur (sinnvollerweise ca. 0° C und 90° C) im Programm angegeben. Mittels eines Quecksilberthermometers wird für alle 5° C durch Drücken der Leertaste des PCs der interne, vom A/D-Wandler weitergegebene Wert gemessen und der jeweiligen Temperatur zugeordnet. Dazu wird Eiswasser auf einer Heizplatte erhitzt und bei Erreichen der jeweils vom PC angefragten Temperatur die Leertaste oder die linke Maustaste gedrückt. Der PC rechnet am Ende die Ausgleichsgerade aus. Zur Auswertung ist das Eichprotokoll auszudrucken und graphisch die Linearität zu zeigen.

Da aus Zeitgründen in diesem Versuchsteil nicht alle Messwiderstände geeicht werden können, ist für die anderen Widerstände eine solche Eichkurve bereits aufgenommen und im Programm integriert.

Veranschlagte Zeit: ca. 30 Minuten.

Zu Versuchsteil 2: Bestimmung von λ bei stationärer Wärmeleitung

Unter dem Menupunkt MESSUNG wird NEUE MESSUNG angewählt und anschließend VERSUCHSTEIL 2+3.

In diesem Versuchsteil wird der isolierte Stab verwendet, dessen Ende mit der Cu-Platte in der mit Eiswasser gefüllten Plastikwanne steht. Im anderen Ende des Stabes ist als Heizung ein Lötkolbeneinsatz mit einer Maximalleistung von 50 W montiert. Zum schnellen Hochheizen bis ca. 85° C (selbst beachten) werden 30–40 W benötigt, danach ist auf etwa 9–12 W herunterzuregeln. Auf dem Bildschirm warte man das Erreichen des stationären Zustandes ab (wie erkennbar?).

Die Heizleistung P lässt sich aus der elektrischen Leistung bestimmen, da diese vollständig in Heizleistung umgewandelt wird. (Wie beeinflussen Verluste das Ergebnis?)

Zeitvorstellung: ca. 20 Minuten

An das Erreichen des stationären Zustandes wird Versuchsteil 3 angeschlossen, d. h. Heizung nicht ausschalten.

Zu Versuchsteil 3: Bestimmung von λ mit Hilfe von Wärmewellen

Bei diesem Versuchsteil wird statt eines konstanten Wärmestroms ein möglichst sinusförmiges „Wärmesignal“ auf den Stab gegeben. Das Heizsignal kann mit dem Rechner in einem gesonderten Menupunkt gesteuert werden. Die Periodendauer τ sollte etwa 200–300 s betragen. Es sollte versucht werden, die Amplitude um die Temperatur herum oszillieren zu lassen, die im vorigen Versuchsteil erreicht wurde. Aufzunehmen sind Amplitude und Phasenverschiebung der verschiedenen Messpunkte, um daraus die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen. Man sollte vor Beginn der Messung ca. 5 Perioden abwarten.

Bei diesem Versuchsteil sollte man das Zeitintervall, das zwischen zwei Einzelmessungen liegt, zwischen 3 und 6 Sekunden wählen, um später die Auswertung zu erleichtern. Außerdem ist es sinnvoll, die Skalierung zu ändern und vor dem Ausdruck an den für die Auswertung wichtigen Punkten Marken zu setzen.

Die Dichte ϱ und die spezifische Wärmekapazität c erhält man z. B. aus Kuchling: „Taschenbuch der Physik“, die Amplituden S_n und die Phasenverschiebung $\Delta\phi$ aus der ausgedruckten Messung (T-t-Diagramm) oder durch Anklicken der Maxima und Minima bei der Messung.

Zeitvorstellung: 30 min

Zu Versuchsteil 4: Untersuchung des Temperaturverlaufs bei Verzicht auf thermische Isolierung

Dieser Versuchsteil wird nach dem Starten einer neuen Messung durch Anwählen von VERSUCHSTEIL 4 begonnen. Dabei sind die Messwiderstände Nr. 9–15 in den freiliegenden, nichtisolierten Stab einzusetzen. Der Messwiderstand Nr. 16 ist in das kleine freihängende Stabstück einzusetzen.

Der längere Stab wird auf der einen Seite erhitzt. Durch Verluste entlang der gesamten Stablänge wird ein Gleichgewichtszustand erreicht. Dabei ist ein annähernd exponentieller Temperaturabfall entlang des Stabes zu erkennen. Das kleine Stabsstück, in dem Messwiderstand 16 eingesetzt ist, wird auf etwa 90° C erhitzt. Bei der Abkühlung ergibt sich ein nahezu exponentieller Temperaturabfall.

Aus dem exponentiellen Abfall bezüglich des Orts und der Zeit kann man ersehen, dass die Wärmeableitung proportional zur Temperatur ist. Prüfen Sie in der halblogarithmischen Darstellung, wie groß die Abweichung vom Exponentialgesetz ist.

Zur Auswertung sind das Temperatur-Zeit-Diagramm von Widerstand 16 und das Temperatur-Orts-Diagramm der anderen Widerstände aufzunehmen.

Wenn man beide Teilversuche gleichzeitig beginnt, kann man den Versuch innerhalb von 30 min durchführen. Die Heizung des kurzen Stabstücks wird bei ca. 90° C vom Netzteil abgeklemmt. Beim längeren Stab wird die Heizleistung auf ca. 10 W heruntergeregelt, wenn der erste Messfühler eine Temperatur von 90° C erreicht hat. Anschließend wird das Erreichen des stationären Zustands abgewartet.

Bei der Auswertung ist darauf zu achten, dass bei diesem Versuchsteil nur die Temperaturdifferenzen zwischen Messfühler und Umgebung in die Rechnung einfließen. (Wie wirkt sich aus, dass für die Oberfläche des kleinen Stabes ein zu kleiner Wert angenommen wird?)

Hinweise zur Auswertung

Der Abstand der Messwiderstände beträgt 30 ± 1 mm. Der Stabdurchmesser hat den Wert 15 ± 0.1 mm.

Die Temperaturanzeige der Widerstände ist auf ±2° C genau.

Zum genauen Setzen von Marken empfiehlt es sich, bei dem Temperatur-Zeit-Diagramm die volle Bildschirmgröße auszunutzen und die Skalierung so zu wählen, dass nur der gewünschte Bereich zu sehen ist.

Bei der Auswertung sollten die drei angewandten Methoden bezüglich ihrer Genauigkeit und Fehlereinflüsse verglichen werden.

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!)

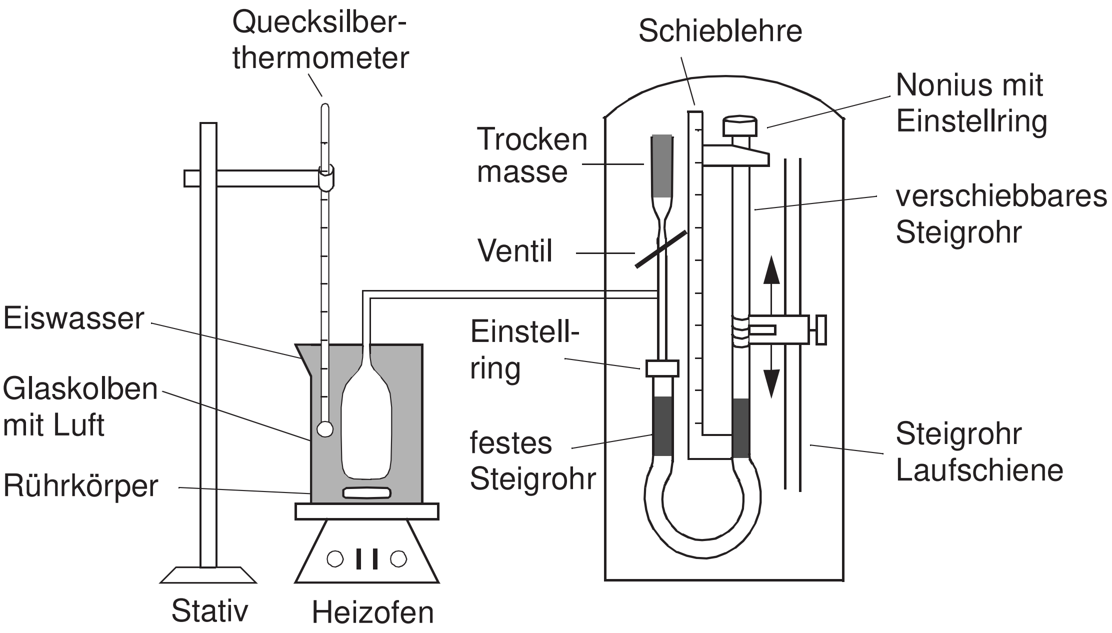


Abb. 1: Versuchsaufbauskizze

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.

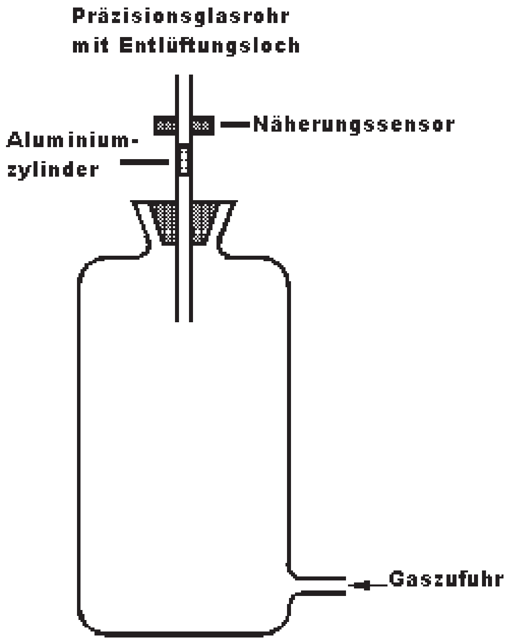


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau nach Rüchardt

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?

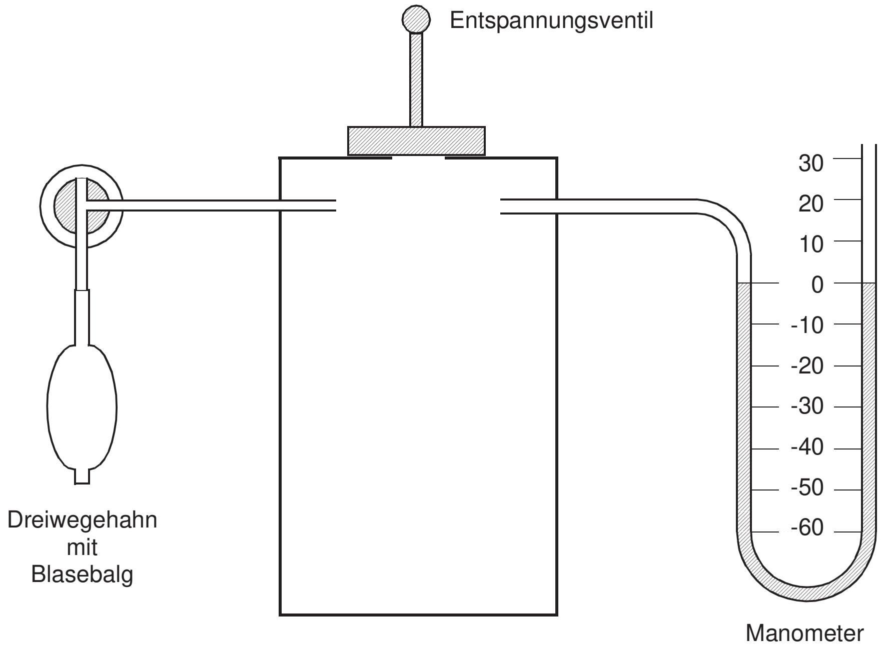


Abb. 2: Schematischer Versuchsaufbau nach Clément-Desormes

Bemerkungen zur Auswertung

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

W 3d Zustandsänderungen realer Gase

Aufgabenbeschreibung

Für ein reales Gas sollen der kritische Punkt und die Dampfdruckkurve aus der Messung verschiedener Isothermen bestimmt werden.

Literatur

1. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 5.6
2. Bergmann-Schäfer: Bd. I, Kap. 10, Nr. 94, Kap. 11, Nr. 110, 112
3. Alonso-Finn III: Kap. 12
4. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap. 11.4

Fragen zum Versuch

1. Was versteht man unter einen idealen Gas und worin bestehen die Unterschiede zu einem realen Gas?
2. Welche Zustandsgleichungen gelten für ideale bzw. reale Gase?
3. Unter welchen Bedingungen verhält sich ein reales Gas annähernd wie ein ideales?
4. Was versteht man unter den Begriffen kritische Temperatur, kritischer Druck und kritischer Punkt eines Gases?
5. Was versteht man unter „Binnendruck“ und „Kovolumen“ und wie hängen diese mit dem Eigenvolumen realer Gase zusammen?
6. Wodurch entsteht der Binnendruck?
7. Welche Unterschiede bestehen zwischen einem Gas und einem Dampf und was versteht man unter einem gesättigten Dampf?
8. Was versteht man unter „Dampfdruck“ und wie kann man seine Größe aus den Isothermen eines realen Gases entnehmen?
9. Wie lässt sich die Dampfdruckkurve analytisch darstellen?

Versuchsaufbau und Durchführung

Die Geräte zur Untersuchung des kritischen Punktes sind mit Schwefelhexafluorid (SF_6, $T_k = 45.5°$ C) gefüllt.

In einem stabilen Glasrohr (geprüfter Druck 75 bar, Berstdruck 100 bar), das mit einer Volumen-Skala versehen ist, wird das zu untersuchende Gas komprimiert. Dieses Glasrohr ist mit einer Druckkammer aus rostfreiem Stahl verbunden, welche Quecksilber enthält und deren Boden durch eine elastische Membran vollkommen abgedichtet ist. Ein Kolben, der von einem Handrad bewegt wird, drückt durch Verformung der Membran das Quecksilber in das Glasrohr und komprimiert dadurch das eingeschlossene Medium. Der Druck wird an einem Manometer abgelesen.

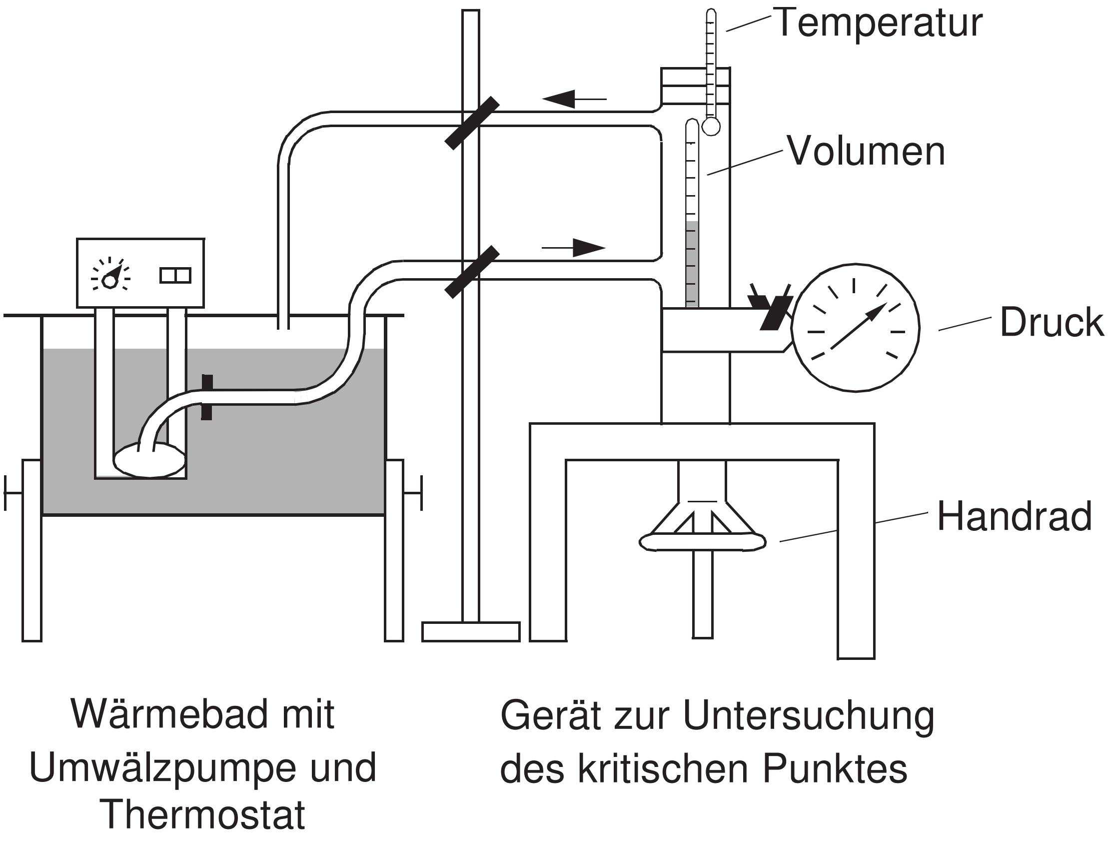


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau

Als Wärmebad für das Glasrohr dient ein durchsichtiger

Behälter, durch den das Wasser aus einem Thermostatbehälter gepumpt wird. Die Wassertemperatur wird durch einen Umwälzthermostaten geregelt, auf dessen Regler-Skala ein Skalenteil ungefähr 10° C entspricht. Die Temperatur des Wasserbades wird mit einem möglichst empfindlichen Thermometer in der Nähe des komprimierten Gasvolumens gemessen. Bei Temperaturen unter Zimmertemperatur muss das Wasserbad gekühlt werden. Dazu stellt man ein mit Eis und Wasser gefülltes Becherglas als Wärmesenke in den Thermostatbehälter.

Sobald die Temperatur des Wasserbades einen konstanten Wert erreicht hat, kann der Druck als Funktion des Volumens gemessen werden, wobei die Schrittweite geeignet zu wählen ist.

Volumen	Schrittweite
$V = 4 - 2\,cm^3$	$V \approx 0.2\,cm^3$
$V = 2 - 1\,cm^3$	$V \approx 0.1\,cm^3$
$V < 1\ cm^3$	$V \approx 0.05\ cm^3$

Die Messwerte sollte man erst ablesen, wenn sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat (besonders wichtig in der Koexistenzphase).

Aufgabe

Messung von mindestens fünf Isothermen

1. bei mindestens drei Temperaturen unterhalb der kritischen Temperatur (Dampfdruckkurve!)

2. bei der kritischen Temperatur

3. bei mindestens einer Temperatur deutlich oberhalb der kritischen Temperatur ($T > T_k + 20°$ C)

Sämtliche Isothermen trage man umgehend in ein p-V-Diagramm ein.

Theoretische Grundlagen

Die für die Auswertung des Versuches benötigten Formeln sind im folgenden aufgeführt.

Die Van der Waals-Gleichung für n Mole lautet:

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \tag{1}$$

mit $R = 8.3143\ \mathrm{JK^{-1}Mol^{-1}}$.

Diese Gleichung ist ein Spezialfall der allgemeineren, so genannten Virialgleichung:

$$p \cdot V = nRT \cdot \left(1 + \frac{B(T)}{V} + \frac{C(T)}{V^2} + \frac{D(T)}{V^3} + \cdots\right) \tag{2}$$

wobei $B(T)$, $C(T)$, $D(T)$,... die so genannten Virialkoeffizienten sind.

Als kritischen Punkt eines realen Gases definiert man den Wendepunkt der Isotherme für die kritische Temperatur T_k, d. h. insbesondere

$$\left.\frac{\partial p}{\partial V}\right|_{T=T_k} = 0 \qquad \text{(waagerechteTangente)} \tag{3}$$

$$\left.\frac{\partial^2 p}{\partial V^2}\right|_{T=T_k} = 0 \qquad \text{(Wendepunkt)} \tag{4}$$

Damit lassen sich mit den kritischen Daten p_k, T_k und V_k (Druck, Temperatur und Volumen am kritischen Punkt) aus den drei Gleichungen (1), (3) und (4) die Größen a, b und n der Van der Waals-Gleichung bestimmen:

$$a = \frac{27}{64}\frac{(R \cdot T_k)^2}{p_k} \tag{5}$$

$$b = \frac{1}{8}\frac{R \cdot T_k}{p_k} \tag{6}$$

$$n = \frac{8}{3}\frac{p_k \cdot V_k}{R \cdot T_k} \tag{7}$$

Leiten Sie diese Formeln her!

Auswertung

1. Bestimmen Sie aus der Isotherme der kritischen Temperatur den kritischen Druck und das kritische Volumen (Fehlerabschätzung!) und berechnen Sie nach Gln. (5), (6) und (7) die Konstanten der Van der Waals-Gleichung (Fehlerabschätzung und Vergleich mit den Literaturwerten!).

   Berechnen Sie außerdem das Van der Waalsche Kovolumen $n \cdot b$ und den Binnendruck $\frac{n^2 a}{V^2}$ für $V_1 = 4\,\mathrm{cm}^3$ und $V_2 = 0.4\,\mathrm{cm}^3$.

2. Konstruieren Sie die Dampfdruckkurven aus den gemessenen Sättigungsdampfdrücken der Isothermen (wo endet die Dampfdruckkurve?) und vergleichen Sie sie mit dem theoretisch erwarteten Verlauf, der näherungsweise mit

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = -\frac{\Lambda}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

   beschrieben werden kann, wobei Λ die molare Verdampfungswärme angibt. Wählen Sie dazu eine geeignete Darstellung der Dampfdruckkurve.

   Tragen Sie für eine Isotherme mit $T > T_k$ $p \cdot V = f\left(\frac{1}{V}\right)$ auf und bestimmen Sie die Anzahl der Mole n durch Extrapolation für $\frac{1}{V} \to 0$ aus der Virialgleichung (2). (Welchen Kurvenverlauf erwartet man für ein ideales Gas?) Vergleichen Sie das Ergebnis mit der nach 1. bestimmten Anzahl der Mole.

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.: