

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 3

Rückblick und Perspektive

ISBN 3 - 7896 - 0513 - 1

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1993

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Die elektronische Waage - eine Bereicherung für den Physikunterricht

1. Einleitung

Moderne elektronische Waagen zeichnen sich durch Eigenschaften aus, die für den Einsatz im Physikunterricht sprechen:

- Eine Wägung läßt sich rasch abwickeln. Deshalb bewegt sich der zeitliche Aufwand auch für Meßreihen in einem sinnvollen Rahmen.
- Typenbedingt kann eine Auflösung bis zu 1 mg erreicht werden.
- Interessiert nur die Änderung der aufgelegten Masse, ermöglicht es die Tara-Funktion, die Anzeige der belasteten Waage zurückzusetzen.
- Wirkt eine Kraft \vec{F} senkrecht zur Waagschale, analog zur Gewichtskraft eines Wägestücks, zeigt die Waage das zugehörige Massenäquivalent $m = \frac{F}{g}$ an (g : Erdbeschleunigung). Elektronische Waagen eignen sich daher auch als Kraftmeßgeräte.
- Die eingebaute Elektronik gibt die Meßwerte wahlweise an ein Display für einen OH-Projektor aus oder übermittelt sie an einen PC. Einmal eingebunden in die Peripherie eines Computers, eröffnen sich vielfältige Möglichkeiten, die Meßwerte in-line weiter zu bearbeiten.

Dieser Beitrag geht zunächst auf die Betriebsbedingungen einer elektronischen Waage ein, beschreibt dann ausgewählte Experimente, bei denen die Messung von Massen und Kräften im Mittelpunkt steht und beleuchtet Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung im Unterricht.

2. Die Waage

Die Körper der neueren elektronischen Waagen besitzen handliche Formate (z.B. LC 2200 P, Fa. Sartorius, Göttingen; s. Abb. 1); eine runde Schale trägt das Wägegut. Im integrierten Tasten- und Zahlenfeld werden die Meßwerte digital angezeigt und die auf den Maximalwert bezogene Belastung als Balken dargestellt. Im Programmiermodus lassen sich die Parameter für verschiedene Betriebsmodi einstellen. Wenn es eine Messung erfordert, gibt die Waage den Netto-, Brutto, Tara- und Prozentwert an oder ermittelt Stückzahlen. Bei Bedarf erfolgt auch ein Kurzkomentar.

Eine V 24-Schnittstelle übermittelt die Meßwerte entweder an ein Display, das auf einen OH-Projektor gelegt, eine objektive Beobachtung erlaubt oder über die häufig ungenutzte RS-232C-Schnittstelle an einen PC. Der Datenaustausch mit dem Computer findet im handshake-Betrieb statt. Die z.B. in Basic geschriebene Software verwaltet die Meßwerte, stellt die Parameter für die Kommunikation ein und wählt den Betriebsmodus.

3. Bestimmung der Dichte von Luft

Naiv erlebte Erfahrungen und von der Umgangssprache zugewiesene Bedeutungen

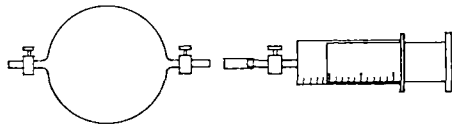
erschweren bei der Erstbegegnung im Unterricht der S I die exakte Begründung physikalischer Begriffe. Das damit verbundene Umlernen schon als 'verstanden' geglaubter Sachverhalte trübt vielfach die Freude an dem 'neuen' Fach. Es besteht die Gefahr, es deshalb als 'schwierig' zu empfinden. Dies trifft für den Begriff der Masse zu. Um ihn mit dem Vorwissen zu verbinden, verknüpft man ihn mit dem Begriff 'Volumen der Stoffmenge'. Das wird auch der einfachen funktionalen Abhängigkeit der Masse m vom Volumen V eines homogenen Körpers

$$m = \rho \cdot V \quad (1)$$

gerecht. Die Proportionalitätskonstante ρ wird als Dichte bezeichnet. Sie ist materialspezifisch und erlaubt darüber hinaus auch die Zuordnung zu den verschiedenen Aggregatzuständen. Stoffe unterscheiden sich durch ihre Packungsdichte. Die Überlegungen im Umfeld des Begriffs Dichte führen zu einer einfachen, modellhaften Vorstellung vom Aufbau der Materie aus elementaren Bausteinen.

Der experimentelle Nachweis von (1) bei Luft erfordert die Wägung definiert vorgegebener Volumina. Dazu wird zunächst ein verschließbarer Glasballon (Fassungsvermögen ca. 1.5 dm^3) auf die Waage gelegt und die Anzeige auf 0.00 g zurückgesetzt. Dann führt man mit einem geeichten Kolbenprober schrittweise Luftvolumina (je ca. 60 cm^3) zu oder entzieht sie ihm (s. Abb. 2). Das zu- oder abgepumpte Volumen ist auf etwa 300 cm^3 begrenzt, weil trotz des Schiffs bei zu hohen Druckunterschieden Luft am bewegten Glaskolben vorbeiströmt.

Abb. 2: Versuchsanordnung zur Messung der Dichte von Luft. Der geeichte Kolbenprober führt dem Glasballon (mit zwei Verschlüssen) definierte Luftvolumina zu oder entnimmt sie.



Das installierte Computerprogramm erfragt zunächst das zugeführte bzw. abgezogene Luftvolumen, stellt den zugehörigen Meßwert der Waage fest und drückt mit dem Vorzeichen die Richtung des Luftumsatzes aus. Das Menü bietet an

- eine Meßreihe durchzuführen,
- die Werte zu speichern oder früher gemessene Werte zu laden,
- die Meßpunkte in ein m - V -Diagramm einzutragen und/oder
- eine Ausgleichs- und Fehlerrechnung durchzuführen.

Sind Druck p und Temperatur T bekannt, erlaubt es die Zustandsgleichung

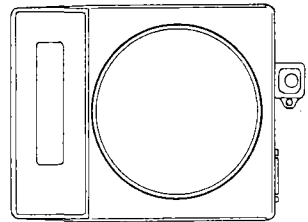
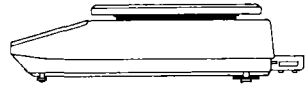


Abb. 1: Die benutzte elektronische Waage in Grund- und Aufriß. (Länge 23 cm , Breite 22 cm , Höhe 8 cm)

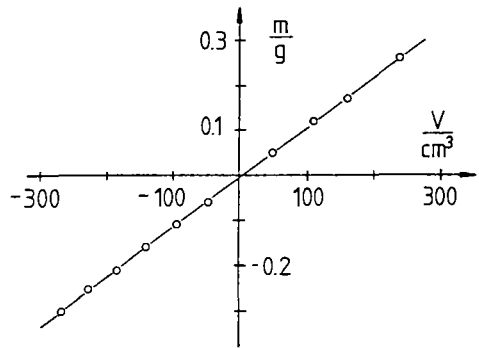
$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} ,$$

die Volumina und die Dichte auf Normalbedingungen ($p_0 = 1013 \text{ hPa}$, $T_0 = 293 \text{ K}$) umzurechnen unter der Annahme, es würde sich um ein ideales Gas handeln.

In einem Versuch ergab sich die Dichte der Luft zu $(1.109 \pm 0.022) \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Der Vergleich mit dem Literaturwert liefert eine Übereinstimmung innerhalb des statistischen Fehlers. Die Restluft in der Verbindung Kolbenprober-Glasballon verursacht einen systematischen Fehler. Er wird klein, wenn man zunächst schrittweise Luft absaugt und nach dem Druckausgleich in analoger Weise zuführt (s. Abb. 3).

Die Daten lassen sich, sofern sie in geeigneter Weise gespeichert sind, auch mit einem Tabellen-Kalkulations-Programm (z.B. Vivitab) auswerten.

Abb. 3: Die Abhängigkeit der Masse vom Volumen bei Luft (s. Versuchsanordnung in Abb. 2). Negatives Volumen deutet Luftentnahme an, positives einen Überdruck im Glasballon.



4. Beispiele für die Messung von Kräften

In der S I ordnet man einem Körper die Masse m zu und kurze Zeit später auch die Gewichtskraft G . Bedürfnisse des Alltags erfordern das nicht. Aus fachlicher Sicht jedoch liegt ein fundamentaler Unterschied zwischen beiden Größen vor. Um Fehlvorstellungen zu vermeiden, muß sich der Unterricht um eine klare Begriffsbildung bemühen. Es ist sorgfältig zu unterscheiden, ob die elektronische Waage als Massen- oder als Kraftmeßgerät verwendet wird. Möglich wird dies durch die Einbindung der Messung in eine Fragestellung, deren Lösung keine Zweifel über die untersuchte Meßgröße und die verwendete Maßeinheit aufkommen läßt. Eine zusätzliche Messung mit der Federwaage könnte die unterschiedliche Meßmethodik verdeutlichen und den Einsatz der elektronischen Waage begründen helfen. An dieser Stelle ist der Hinweis angebracht, daß häufig unterschiedliche Größen mit dem gleichen Gerät gemessen werden und z.B. Drehspulmeßwerke sowohl in Amperemeter, als auch in Voltmeter eingebaut sind. Den Meßbereich der Waage definieren ihre maximale Belastbarkeit (i.a. $20 \text{ N} - 50 \text{ N}$) und die Auflösung (i.a. $0.01 \text{ mN} - 0.1 \text{ mN}$). Die folgenden Abschnitte behandeln vier Beispiele, in denen eine elektronische Waage Kräfte mißt.

4.1. Experimente zum hydrostatischen Auftrieb

Betrachtet man einen homogenen Quader (Querschnittsfläche A ; Höhe h_0 ; Dichte ρ_1), der um die Strecke h in eine Flüssigkeit (Dichte ρ_2) getaucht wird, so gilt für die Auftriebskraft F , der Differenz aus der Gewichtskraft F_1 und der

$$\text{Haltekraft } F_2 \text{ für } 0 \leq h \leq h_0: \quad F(h) = F_1 - F_2 = gA\rho_2 h \quad (\text{II})$$

$$\text{und für den von der Waage angezeigten Wert: } m(h) = \frac{F(h)}{g} = A\rho_2 h .$$

Während die Gewichtskraft G im Schwerpunkt S_G des eingetauchten Körpers angreift, setzt die entgegengerichtete Auftriebskraft F_A im Schwerpunkt S_F des verdrängten Flüssigkeitsvolumens an. Bei jeder Eintauchtiefe gilt das Gesetz von Archimedes: Das Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge und die Auftriebskraft besitzen den gleichen Betrag. Die Angriffspunkte dieser Kräfte sind jedoch nicht identisch. Es können daher Stabilitätsprobleme auftreten, wenn der Körperschwerpunkt oberhalb des Flüssigkeitsschwerpunktes angeordnet ist. Die Gleichgewichtslage ist dann labil und es treten Drehmomente auf, sobald sie verlassen wird.

Die beiden folgenden Versuche sollen das Phänomen Auftrieb klären helfen. Im ersten Experiment trägt die Waage eine Haltevorrichtung mit einem Aluminiumquader und ein Becherglas. Nachdem die Anzeige zurückgestellt ist, wird der Quader schrittweise in ein bis zum Rand gefülltes Überlaufgefäß eingetaucht. Das auf der Waagschale stehende Becherglas fängt die verdrängte Flüssigkeitsmenge auf. Man mißt so die Differenz aus der Gewichtskraft des verdrängten Wassers und der Auftriebskraft in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe h (s. Abb. 4). Es zeigt sich, daß die beiden Kräfte bis auf 1.5 mN übereinstimmen (s. Abb. 5). Die Abweichungen sind statistisch verteilt und insbesondere von h un-

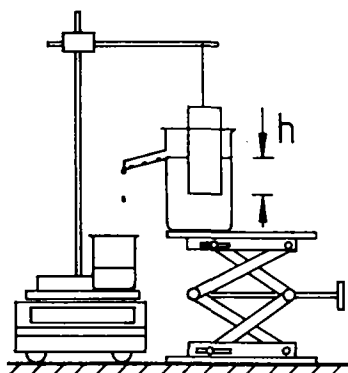


Abb. 4: Versuch zum Nachweis des Gesetzes von Archimedes. Es wird die Differenz aus der Auftriebs- und der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit gemessen (h : Eintauchtiefe des Aluminiumquaders)

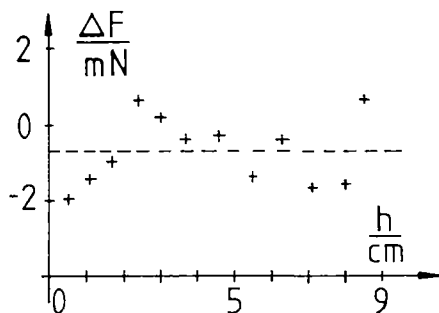


Abb. 5: Ergebnis des Versuchs aus Abb. 4. Die von der Waage gemessenen Abweichungen ΔF von Auftriebskraft und Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeitsmenge schwanken um den durch die gestrichelte Linie gekennzeichneten Mittelwert.

abhängig. Eine bessere Übereinstimmung ist wegen der Auflösungs Grenze nicht nachzuweisen. Außerdem gibt das Überlaufgefäß nur Vielfache eines Tropfens (Gewicht ca. 0.2 mN) ab und die Tropfgeschwindigkeit sinkt spürbar mit der Annäherung an den Gleichgewichtszustand.

Um die Abhängigkeit der Auftriebskraft von der Eintauchtiefe h zu untersuchen, setzt man ein mit Wasser gefülltes Becherglas auf die Waagschale. Eine Absenkvorrichtung taucht einen Aluminiumquader schrittweise ein (s. Abb. 6). Die mit der Erdbeschleunigung multiplizierte Anzeige ergibt das Gewicht der verdrängten Flüssigkeitsmenge, die gleich der Auftriebskraft ist. Die Lage des Quaders ist stabil, da sich sein Schwerpunkt stets oberhalb des Schwerpunkts der verdrängten Flüssigkeitsmenge befindet. Es zeigt sich innerhalb der Meßgenauigkeit, daß die Auftriebskraft F_A zur Eintauchtiefe h proportional ist (s. Abb. 7). Die Abweichung des Meßwertes $\rho_2 A = (8.79 \pm 0.04) \frac{\text{g}}{\text{cm}}$ von dem aus Tabellen abgeleiteten Wert zu $8.95 \frac{\text{g}}{\text{cm}}$ läßt sich durch das Gewicht des Hakens und Oberflächenspannungseffekte erklären.

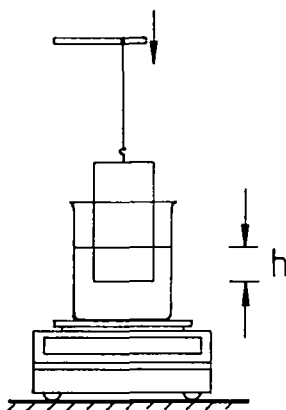


Abb. 6: Ein Aluminiumquader taucht in ein mit Wasser gefülltes Becherglas (h : Eintauchtiefe). Gemessen wird die Auftriebskraft F_A in Abhängigkeit von von der Eintauchtiefe h .

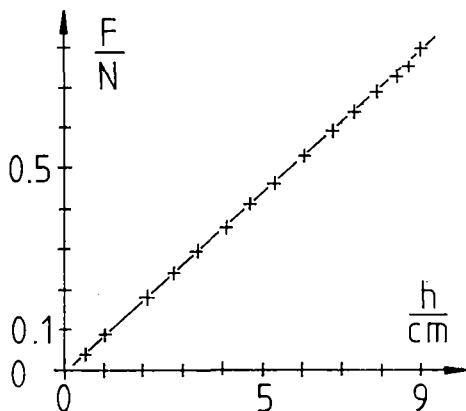


Abb. 7: Die Auftriebskraft ist proportional zur Eintauchtiefe. Das Gesetz von Archimedes gilt für den gesamten Eintauchvorgang.

4.2. Der einseitige Hebel

Einen drehbar gelagerten, starren Körper bezeichnet man als Hebel. Für den Schulalltag typische Beispiele sind homogene Stäbe aus Holz oder Metall mit rechteckigem Querschnitt (Länge l). Wird der Drehpunkt D in das eine Stabende gelegt, erhält man einen einseitigen Hebel. Im Folgenden sei der Stab waagrecht angeordnet und die Kräfte mögen senkrecht zu seiner Längsachse wirken.

Da sich der Schwerpunkt des Stabes im Mittelpunkt befindet, der vom Drehpunkt $\frac{1}{2}$ entfernt ist, erzeugt die Gewichtskraft \vec{G} das Drehmoment $G \frac{l}{2}$. Wirkt eine wei-

tere Kraft \vec{F}_1 in der Entfernung x_1 vom Drehpunkt D und parallel zu \vec{G} , addieren sich beide Drehmomente zu $M = G \frac{l}{2} + F_1 x_1$. Um die Bewegung des Hebels um D zu vermeiden, muß eine weitere Kraft \vec{F}_2 im Abstand x_2 antiparallel zu \vec{F}_1 bzw. \vec{G} gerichtet sein (s. Abb. 8). Für die Beträge gilt

$$F_2 x_2 = G \frac{l}{2} + F_1 x_1 \quad (\text{III})$$

Diese Gleichung stellt das Hebelgesetz für den einseitigen Hebel in einfacher Form dar. Zum Nachweis im Experiment wäre es nötig, die Abhängigkeit von jeweils zwei der enthaltenen Größen zu untersuchen. Zwei Beispiele verdeutlichen dies exemplarisch: Es wird überprüft, wie

- beim unbelasteten Hebel die Haltekraft F_2 vom Hebelarm x_2 abhängt und
- F_2 vom Abstand x_1 der Kraft F_1 , die eine auf den Hebel gelegte Masse m_1 erzeugt.

Bei den Versuchen ist auf einen möglichst kleinen Abstand des Drehpunktes D vom Stabende zu achten und das Gleitlager der Achse gut zu fetten.

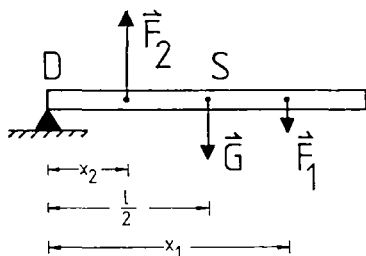


Abb. 8: Ein im Punkt D gelagerter, einseitiger Hebel. Es wirken die Gewichtskraft G und die Kraft F_1 . F_2 hält den Hebel im Gleichgewicht, wenn das Hebelgesetz (III) erfüllt ist.

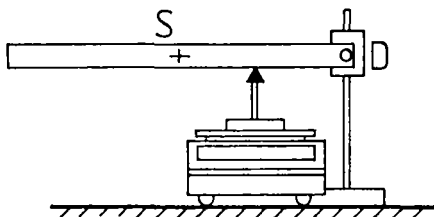


Abb. 9: Versuchsaufbau zur Messung des Drehmoments, das die Gewichtskraft am einseitigen Hebel erzeugt. Die Waage mißt F_2 .

Im ersten Experiment unterstützt eine Schneide den Hebel im Abstand x_2 vom Drehpunkt und hält ihn waagrecht. Das auf der Waagschale ruhende Stativmaterial trägt die Schneide und übermittelt so die Kraft F_2 der Waage (s. Abb. 9). In einem Versuch ergaben sich die Werte:

x_2 in m	0.15	0.30	0.45
m_2 in g	249.	125.	83.0
$F_2 x_2$ in mN·m	366.4	367.9	366.9

Der Vergleich $F_2 \cdot x_2 = Mg \frac{l}{2} = 367.9 \text{ mN}\cdot\text{m}$ (Masse des Hebels $M = 125.1 \text{ g}$) erbringt eine gute Übereinstimmung; (III) wird insofern bestätigt.

Aus dem Hebelgesetz (III) entsteht mit $x_2 = \frac{l}{4}$ und der Masse M des Hebels die Gleichung

$$F_2 = 2Mg + \frac{4m_1}{1} x_1 g \quad (\text{IV})$$

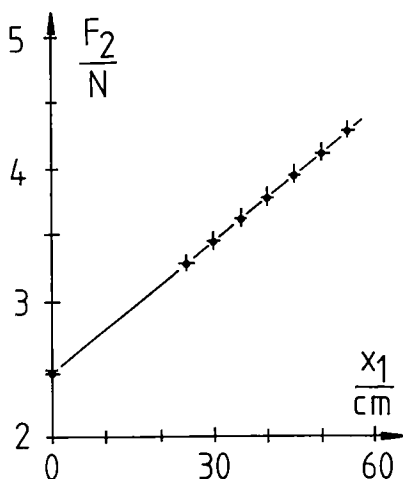
Die lineare Abhängigkeit von F_2 und x_1 gibt Anlaß zum zweiten Versuch. Es ist $x_2 = \frac{l}{4} = 0.15 \text{ m}$, $M = 125.1 \text{ g}$, $l = 0.60 \text{ m}$ und $m_1 = 50.2 \text{ g}$. Die im Experiment erhal-

tenen Meßpunkte liegen, in ein x_1 - F_2 -Diagramm eingetragen (s. Abb. 10), mit guter Näherung auf einer Geraden der Gleichung

$$F_2 = ax_1 + b.$$

Die Ausgleichsrechnung liefert die Werte für $a = 32.9 \frac{\text{mN}}{\text{cm}}$ und $b = 2.438 \text{ N}$. Die Steigung a und der Achsenabschnitt b stimmen gut mit den aus Gleichung (IV) bekannten Koeffizienten überein $b = 2M = 2.454 \text{ N}$ und $a = 4m_1g/l = 32.9 \frac{\text{mN}}{\text{cm}}$.

Abb. 10: Angetragen ist hier die von der Waage gemessene Kraft F_2 , wenn den einseitigen Hebel die Kraft F_1 im Abstand x_1 belastet.



4.3. Ein Versuch zum Fadenpendel

Wird die Masse m eines Fadenpendels ausgelenkt, bewegt sich der Schwerpunkt auf einer Kreislinie. Mit der Kreisfrequenz ω und der Amplitude x_0 beschreiben den momentanen Ort $x(t)$ und die Beschleunigung $a(t)$ zum Zeitpunkt t die Terme

$$x(t) = x_0 \sin(\omega t + \phi_0) \text{ bzw. } a(t) = -x_0 \omega^2 \sin(\omega t + \phi_0) \quad (\phi_0 : \text{Phase bei } t = 0 \text{ s}).$$

Für kleine Amplituden x_0 ist die Bewegung in guter Näherung harmonisch. Es gilt daher für die Beschleunigung mit der Pendellänge l und der Erdbeschleunigung g

$$a(t) = -x_0 \frac{g}{l} \sin(\omega t + \phi_0). \text{ Die Dauer einer Periode ist } T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Bei bekannter Periodendauer T und Pendellänge l läßt sich der Wert der Erdbeschleunigung g am Ort des Fadenpendels bestimmen. Im Experiment zeichnet eine elektronische Waage die Pendelbewegung auf (s. Abb. 11). Das ruhende Pendel wird auf die Waage gesetzt und die Anzeige zurückgestellt. Nach dem Auslenken der Masse gibt die Waage laufend Werte aus, ohne jeweils den Stillstand der Waagschale abzuwarten. Der PC speichert ca. 6 Werte pro Sekunde, mißt die Zeit 200 Werte und ordnet so jedem Meßwert einen mittleren Zeitpunkt zu. Die in ein Diagramm eintragenen Wertepaare zeigt Abb. 12.

Die Meßpunkte oszillieren mit einer konstanten Periode um den Nullpunkt. Ursache dafür sind die Zentrifugalkraft F_z und die rücktreibende Kraft F_r , deren senkrechte Komponenten sich zur Gewichtskraft der Pendelmasse addieren bzw. bzw. subtrahieren. Beim Durchgang durch die Ruhelage ist die Zentrifugalkraft $F_z = m \frac{v^2}{l}$ maximal. Da die rücktreibende Kraft F_r gleichzeitig 0 ist, ergibt sich bei der Anzeige der Waage ein relatives Maximum. In den Umkehrpunkten dagegen ist die rücktreibende Kraft $F_r = ma(t)$ maximal und die Zentrifugalkraft 0. Da die senkrechte Komponente der rücktreibenden Kraft die Gewichtskraft mindert, erhält man bei den relativen Minima negative Werte.

Es ist sinnvoll, an die Meßpunkte eine Kurve vom Typ $F(t) = C \sin(2\pi At + B)$ anzupassen. In einem geeigneten Fitprogramm wird, von geeigneten Startwerten für die Frequenz A , die Phase B und die Amplitude C ausgehend, die Summe der Fehlerquadrate aus berechneten und gemessenen Werte sukzessive minimiert.

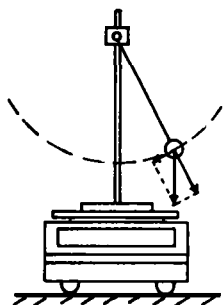


Abb. 11: Das Fadenpendel auf der Waage. Die Überlagerung der senkrechten Komponenten von Zentrifugalkraft und rücktreibender Kraft bewirken die angezeigten Werte.

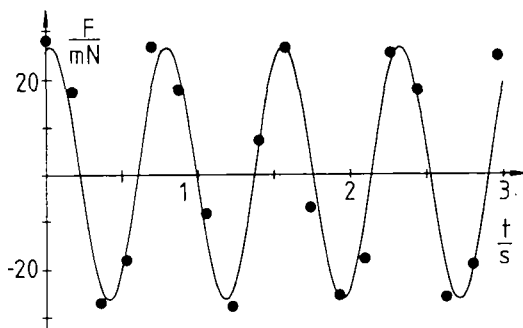


Abb. 12: Die Meßpunkte aus dem Fadenpendelversuch. Angetragen ist die von der Waage gemessene Kraft in Abhängigkeit von der Zeit t . An die Meßpunkte wurde der Graph zu $F(t) = C \sin(2\pi At + B)$ angepaßt (s. Text).

Ein Fit ergab für die Parameter $A = 1.306 \frac{1}{s}$, $B = 1.34$ rad und $C = 27.2 \frac{mN}{cm}$. Die Abb. 12 zeigt die angepaßte Kurve zusammen mit den Meßpunkten für $0 s \leq t \leq 3.0 s$. Aus der Frequenz $A = \frac{2}{T}$ und der Pendellänge $l = 63.2$ cm ergibt sich die Erdbeschleunigung zu $g = (10.6 \pm 0.3) \frac{m}{s^2}$.

Dieser Wert weicht vom Literaturwert um ca. 8 % ab. Am systematischen Fehler beteiligt ist der in sich nicht vollkommen starre Versuchsaufbau. Außerdem beschreibt die angegebene Sinusfunktion die Abhängigkeit der Meßwerte von der Zeit nur angenähert.

4.4. Das Magnetfeld eines Drahtes

Einen vom Gleichstrom i durchflossenen, gestreckten Draht umgibt ein rotationssymmetrisches Magnetfeld. Der Betrag der Flußdichte \vec{B} in der Entfernung r vom Drahtmittelpunkt ist

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (\mu_0: \text{absolute Permeabilität}).$$

Befindet sich im Magnetfeld ein zweiter, vom Gleichstrom I durchflossener Draht der Länge l , parallel zum ersten angeordnet, wirkt auf ihn die Kraft $F = lBI$. Es folgt insgesamt $F = \frac{\mu_0}{2\pi} i I \frac{l}{r}$. Gehören die beiden Drähte zu den Seiten von Rechteckspulen mit den Windungszahlen n bzw. N , so vervielfacht sich F entsprechend. Es gilt angenähert

$$F(I) = nN \frac{\mu_0}{2\pi} i I \frac{l}{r} \quad (V)$$

Im Experiment erzeugt die Seite der ersten Rechteckspule (Länge 7.0 cm; $n = 100$ Windungen) ein Magnetfeld, in dem die kürzere Seite (Länge $l = 5.0$ cm) ei-

ner weiteren Rechteckspule ($N = 100$) parallel angeordnet ist (s. Abb. 13). Während die erste Spule mit Stativmaterial fixiert ist, wird die zweite auf die nicht magnetisierbare Waagschale gesetzt. Die Spulen sind in Serie geschaltet ($I = i$). Nun wird I schrittweise bis zu 100 mA erhöht und die zugehör-

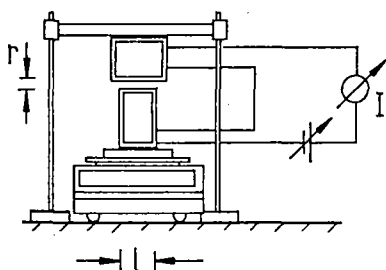


Abb. 13: Versuch zur Messung der magnetischen Flußdichte in der Umgebung eines stromdurchflossenen Drahtes. Die obere Spule erzeugt das Magnetfeld in der die untere eine stromstärkeabhängige Kraft erfährt. Die Waage mißt diese Kraft.

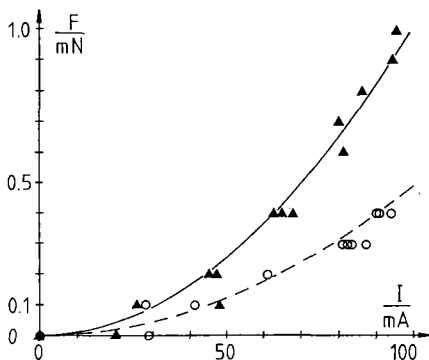


Abb. 14: Zwei Meßreihen zum Versuch aus Abb. 13 zu verschiedenen Leiterabständen r . An die Meßpunkte ist eine Parabel gepaßt.

zusätzliche Belastung der Waage registriert. Für die beiden Abstände $r_1 = 4.7$ mm und $r_2 = 8.8$ mm der parallelen Rechteckspulenseiten wird jeweils eine Meßreihe durchgeführt und in ein I - F Diagramm eingetragen (s. Abb. 14).

Da die quadratische Abhängigkeit der untersuchten Meßgrößen deutlich zu erkennen ist, wird an die Meßpunkte eine Parabel mit dem Funktionsterm $f(I) = KI^2$ angepaßt. Für die beiden Werte von r erhält man so jeweils $100 \frac{\text{mN}}{\text{A}^2}$ bzw. $48 \frac{\text{mN}}{\text{A}^2}$ als Parameter K . Mit Gleichung (V) lassen sich die entsprechenden Werte auch aus den Daten der Versuchsanordnung zu $106 \frac{\text{mN}}{\text{A}^2}$ und $57 \frac{\text{mN}}{\text{A}^2}$ berechnen.

Ein Vergleich der Werte für den Parameter K der angepaßten Parabeln ergibt im ersten Fall eine ausreichende Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert, während im zweiten Versuch eine Abweichung von 15 % auftritt. Hier macht sich die auf 0.1 mN begrenzte Auflösung der Waage bemerkbar, sodaß bei der Stromstärke $I = 100$ mA die 0.5 mN-Marke nicht erreicht wird (s. Abb. 14). Das Erdmagnetfeld beeinflußt die Meßwerte nicht; die auf gegenüberliegende Seiten der Rechteckspule wirkenden Kräfte heben sich auf.

5. Literatur

- [1] C.Gerthsen, H.Kneser, H.Vogel: Physik; Springer V., Berlin (1990)
- [2] H.Keune, W.Uhlenhaut: Bestimmung von Massenveränderungen mit Waage und Computer; MNU 5 (45), S. 276 (1992)
- [3] R.Schäfer, R.Schönhagen: PC-Meß-Fit; Dümler V., Bonn (1989)
- [4] Fa. Sartorius: Handbuch MC 1-Betriebsanleitung für elektronische Waagen;
- [5] F.Wörten: Versuche zum einseitigen Hebel; in Fa. Sartorius: Versuche zum naturwissenschaftlichen Unterricht; Göttingen (in Vorbereitung)