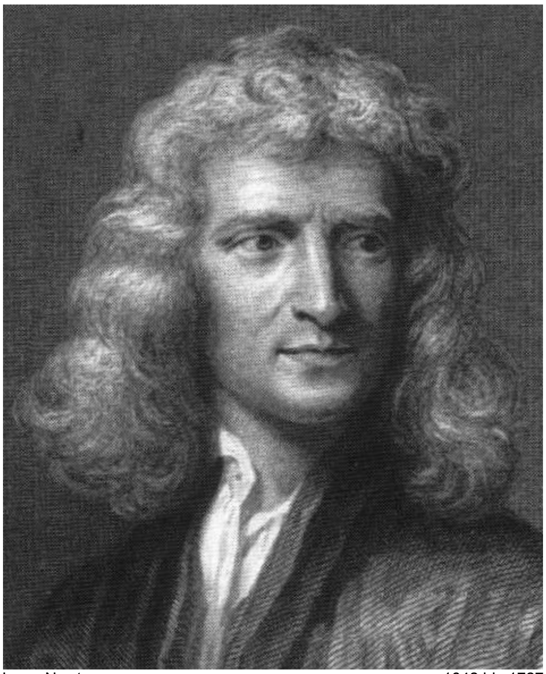
Berlin, den 15. Mai 2000

Versuchsprotokoll
PL-I

Bestimmung der Newtonschen Gravitationskonstante mit Hilfe der Gravitationswaage



Isaac Newton 1642 bis 1727

Der Versuch wurde aufgebaut und durchgeführt in Zusammenarbeit von
Fabian Fleischer, **Inkje Döring**, **Daniel Guyot**, **René Könnecke**, **Ramin Torabi**,
Heinrich Südmeyer und **Diana Bednarczyk**,
der Gruppe **268**
mit **Cornelia Sing** als Tutorin.

Protokollanten waren: **Fabian Fleischer** & **Diana Bednarczyk**

INHALTSVERZEICHNIS

ABSTRACT

Ziel dieses Versuchs ist die Bestimmung der Gravitationskonstanten $G = 6.6726\cdot10^{-11}\frac{m^3}{kgs^2}$ mit Hilfe einer Gravitations- bzw. Torsionswaage. Hier wird die Gravitationskraft zwischen zwei Massen der Torsionskraft eines Fadens im Inneren der Waage gegenübergestellt. Eine daraus resultierende Drehung im Gerät wird über einen an einem Spiegel abgelenkten Laserstrahl gemessen.
Das Resultat der Messung waren zwei Werte, aufgrund zweier verschiedener Auswertungen: einmal ein Mittelwert von $G = 7,1\cdot10^{-11}\frac{m^3}{kgs^2}$ und zum anderen das Ergebnis von $G = 5,6\cdot10^{-11}\frac{m^3}{kgs^2}$.

EINLEITUNG

Der britische Physiker Isaac Newton (1642 bis 1727) veröffentlichte in seinem Hauptwerk „Philosophiae naturalis principia mathematica„ (1687) u.a. sein Gravitationsgesetz mit der universellen Naturkonstante G. Der ebenfalls britische Physiker Henry Cavendish (1731 bis 1810) maß als erster im Jahre 1798 die Gravitationskonstante G von Newton direkt im Experiment mittels einer von ihm selbst konstruierten Torsionswaage.

Die Gruppe 268 entschied sich spontan für diesen Versuch. Nach Bestimmung der Erdbeschleunigung g schien es uns naheliegend, auch diese mit der Gravitation verbundene Konstante zu messen.

THEORIE

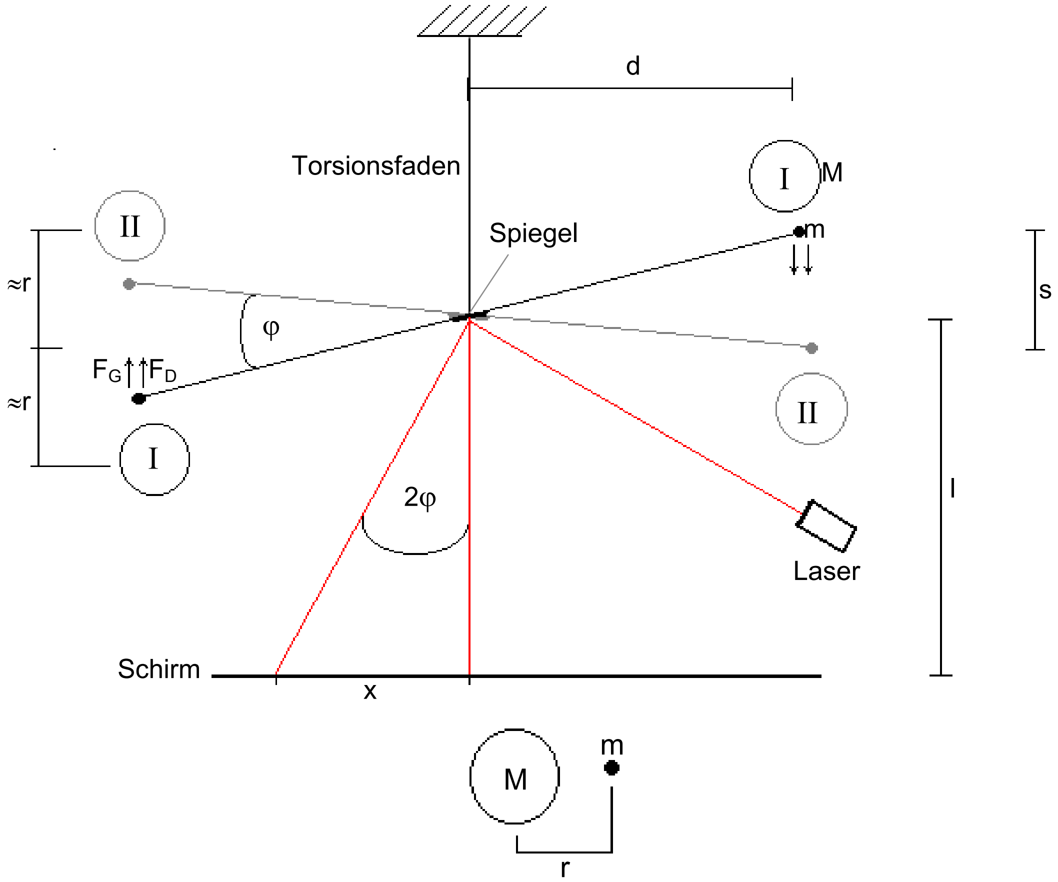
Betrachten wir das Gravitationsgesetz:

$$F = G\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

G dient als Proportionalitätskonstante, d.h. die Größe der Kraft zwischen zwei Einheitsmassen im Einheitsabstand. Sie kann experimentell erst bestimmt werden, wenn die Massen beider wechselwirkender Körper bekannt sind. Für astronomische Objekte einschließlich der Erde ist die Masse naturgemäß nicht direkt bestimmbar, wenn auch aus Volumen und vermutlicher Dichte Schätzungen abgeleitet werden können. Für eine befriedigend genaue Messung kann mal also astronomische Messungen nicht verwenden.
Wir gehen davon aus, daß keine Abschirmung für Gravitation existiert.
Strenggenommen gilt das Gravitationsgesetz nur für Massenpunkte, glücklicherweise verhält sich jede kugelsymmetrische Massenverteilung so, als sei ihre Masse in ihrem Mittelpunkt konzentriert.

Bei unserem Versuch werden zwei kleine Massen m von zwei großen Massen M angezogen. Bei der Bewegung zu den großen Massen M hin verdrehen die kleinen Massen m einen Torsionsfaden. Die kleinen Massen m beginnen, um einen Ruhepunkt zu schwingen, der durch die Stelle gekennzeichnet ist, an der Gravitationskraft und Torsionskraft gleich sind. Durch Reibungseffekte wird diese Schwingung gedämpft. Ist die Waage ausgeschwungen, werden die großen Massen M in Pos.II (siehe Aufbau) gebracht. Nun wirken Gravitations- und Torsionskraft in die gleiche Richtung und beschleunigen die kleinen Massen m zu den großen Massen M. Anhand der gemessenen Beschleunigung läßt sich G bestimmen.

Abb.1 :



Die Kräfte, die hier wirken, sind die Anziehungskraft F_G zwischen den massereichen Kugeln M und den massearmen Kugeln m und die Torsions- oder Drillkraft F_D, die durch die Verdrehung des Torsionsfadens entsteht. In Position I herrscht Gleichgewicht zwischen den beiden Kräften, die an den jeweiligen Kugelpaaren wirken :

$$\textbf{[1]}\quad F_G + F_D = 0 \quad\Leftrightarrow\quad F_G = - F_D$$

Nach Umlegen von M in Position II wirkt F_G entgegengesetzt zu seiner vorigen Richtung, also mit F_D, die ihre Richtung nicht ändert :

$$\textbf{[2]}\quad F_G = F_D$$

Damit wirkt auf jede m die Kraft :

$$\textbf{[3]}\quad F_D + F_G = 2\,F_G$$

Hierbei sind Position I die Ruhelage nach dem Ausschwingen und Position II der maximale Ausschlag von m nach Drehen von M.

Allgemein gilt :

$$F = m \cdot a$$

Durch die Beschleunigung der Kugeln greift dieses Gesetz auch hier.

Da die Kräfte F_G und F_D in diesem Versuch jeweils an beiden m wirken, gilt hier :

$$\textbf{[4]}\quad 2\,(\,F_D + F_G\,) \underset{\substack{\Uparrow \\ \text{(nach [2])}}}{=} 4\,F_G = 2\,m \cdot a \quad\Rightarrow\quad F_G = \frac{m \cdot a}{2}$$

Hier gilt für die Gravitationskraft :

$$\textbf{[5]}\ F_G = \frac{G \cdot m \cdot M}{r^2},$$

wobei G die gesuchte Gravitationskonstante, m die Masse von einer Kugel geringer Masse, M die Masse von einer Kugel großer Masse und r der Abstand der Kugelmitte von M bis zur Kugelmitte von m ist. Hier wurde als Annäherung zu r der Abstand der Kugelmitte von M bis zur Mitte des Weges s von der Ruhelage bis zur maximalen Auslenkung von m gemessen.

Nach G umgestellt :

$$\textbf{[6]}\ G = \frac{F_G \cdot r^2}{m \cdot M}$$

[4] in **[6]** :

$$\textbf{[7]}\ G = \frac{m \cdot a \cdot r^2}{2m \cdot M} = \frac{a \cdot r^2}{2M}$$

Berechnung der Beschleunigung a mit Hilfe meßbarer Werte :

$$\textbf{[8]}\ s = \frac{a \cdot t^2}{2}$$

$$\Rightarrow a = \frac{2s}{t^2}$$

Berechnung von s mit Hilfe meßbarer Werte :

$$\textbf{[9]}\ 2\tan\varphi = {}^{x}\!/_{l} \quad \Rightarrow \quad \tan\varphi = {}^{x}\!/_{2l}$$

Da zwischen der Ruhelage und dem Maximalausschlag am Schirm 2φ liegen, wobei l senkrecht auf x steht.

Aus der Anschauung in ***Abb.1*** ergit sich außerdem :

$$\textbf{[10]}\ \tan\varphi \approx {}^{s}\!/_{d} = {}^{x}\!/_{2l}$$

$$\Uparrow$$

(da zwischen s und d kein rechter Winkelφ)

wobei φ der Winkel zwischen Ausgangsstellung (Ruhelage) und Endposition (Maximalausschlag) von m, d der Abstand des Mittelpunktes von m zur Aufhängung (Mitte der k-Konstruktion), l die Strecke zwischen Schirm und Spiegel (= Torsionsfaden) und x die Länge des Ausschlages, der Abstand zwischen den Laserpunkten bei Ausgangsstellung und Endposition auf dem Schirm ist.

[10] nach s aufgelöst :

$$\textbf{[11]}\ {}^{s}\!/_{d} = {}^{x}\!/_{2l} \Rightarrow s = \frac{x \cdot d}{2l}$$

[11] in **[8]** :

$$\textbf{[12]}\ a = \frac{2x \cdot d}{2l \cdot t^2} = \frac{x \cdot d}{l \cdot t^2}$$

[12] in **[7]** :

$$\boxed{\mathbf{G = \frac{x \cdot d \cdot r^2}{2M \cdot l \cdot t^2}}}$$

THEORIEERGÄNZUNG

Aufgrund eines falschen Meßwertes für r ($r = 25\cdot10^{-3}$ statt $r = 46\cdot10^{-3}$m), war die Auswertung dieses Versuches lediglich im Rahmen der Größenordnung möglich (da r in beiden Endformeln quadratisch eingeht bestimmt es die Genauigkeit von G maßgeblich), so daß ein Denkfehler in der Theorie gemutmaßt wurde. Nach Einsetzen des korrekten Wertes für r konnte sich diese These allerdings nicht erhärten. Trotzdem soll die entwickelte Ergänzung zu Theorie und Auswertung hier nicht vernachlässigt werden.
Es ist zu beachten, daß die vorangegangene Theorie nicht falsch ist, sondern daß sie hier für diese Art der Auswertung noch einige weitere Aspekte beinhaltet.

Herleitungsergänzung:
In der Ruhelage der Waage ist der Torsionsfaden entspannt, das heißt, daß das aus der Gravitationskraft resultierende Drehmoment M_G und das Richtmoment des Tosionsfadens M_D gleich sind :

$$[\mathbf{1}]\ M_D = M_G$$

$M_D = D\varphi$, wobei D die Federkonstante und φ der in der Theorie beschriebene Winkel $\varphi \approx x/2l$ ist.

Da die Gravitationskraft an beiden Kugeln wirkt ist :

$$[\mathbf{2}]\ M_G = 2F_G \cdot d = D\varphi$$

Wie bereits bekannt gilt :

$$[\mathbf{3}]\ F_G = \frac{G\cdot m\cdot M}{r^2}$$

[**3**] in [**2**] :

$$[\mathbf{4}]\ D\cdot x/2l = 2d\cdot\frac{G\cdot m\cdot M}{r^2}$$

Aus der Formel für die Kreisfrequenz ω :

$$\omega^2 = D/J = \frac{4\pi^2}{T^2}\ ,$$

wobei J das Trägheitsmoment und T die Periodendauer ist.

Die allgemeine Formel für J lautet :

$$[\mathbf{5}]\ J = \tfrac{1}{2}\, m\cdot r^2$$

Hier gilt :

$$r = 2d$$

$$\Rightarrow\ [\mathbf{6}]\ J = 2m\cdot d^2$$

Also ist :

$$D/2\cdot m\cdot d^2 = \frac{4\pi^2}{T^2}$$

$$\Rightarrow\ [\mathbf{7}]\ D = \frac{8\pi^2\cdot d^2\cdot m}{T^2}$$

[**7**] in [**4**] :

$$\frac{4\pi^2 \cdot d^2 \cdot m \cdot x}{T^2 \cdot l} = 2d \cdot \frac{G \cdot m \cdot M}{r^2}$$

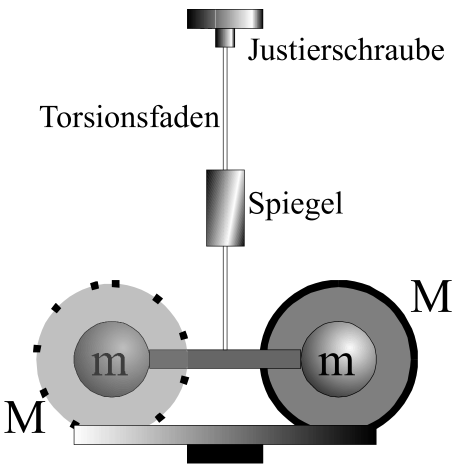
$$\Rightarrow \boxed{G = \frac{2\pi^2 \cdot d \cdot x \cdot r^2}{M \cdot T^2 \cdot l}}$$

VERSUCHSAUFBAU

Hierzu wurde folgende Ausrüstung benötigt:

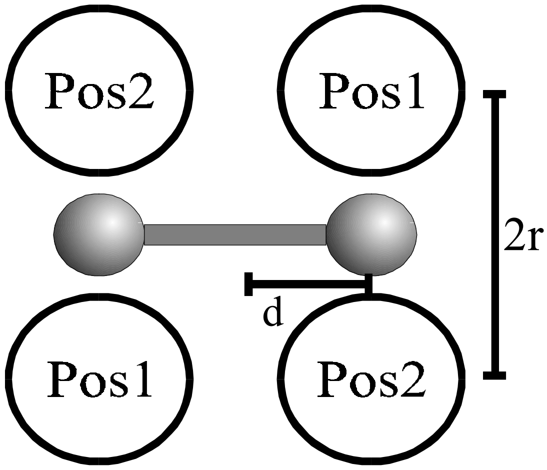
Gravitationswaage	**(830a)**,
2 Metallkugeln (Masse M = 1,5kg),	
Laser	**(731b)**,
x-t-Schreiber	**(25b)**,
Nachführelektronik	**(737b)**,
Trafo	**(14b)**,
Styroporplatte,	
Stativ für Laser	

Abb.2 : Die Gravitationswaage



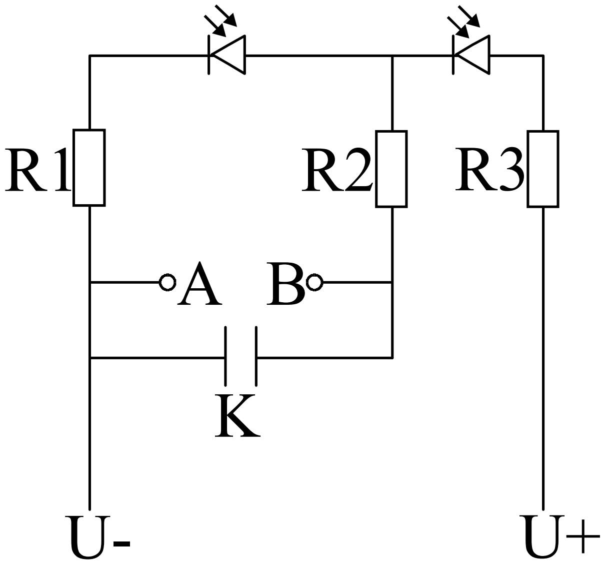
Die Gravitationswaage (***Abb.2***) ist ein ausgesprochen empfindliches Gerät. Es handelt sich hierbei um eine kleine „Hantel“, die an einem dünnen Metallband, dem Torsionsfaden, hängt. An den Enden dieser „Hantel“ sind die beiden kleinen Massen m befestigt. Über der „Hantel“ ist der Spiegel fest mit der selbigen verbunden. Eine Justierschraube am oberen Ende des Fadens läßt eine manuelle Verdrehung des Fadens zu, die nötig wird, um die kleinen Massen in eine passable Ausgangsposition (d.h.: in eine zentrale Stellung innerhalb des hier nicht abgebildeten Gehäuses) zu bringen. Hier ist Vorsicht angeraten, da die Waage auf kleinste Veränderungen sehr empfindlich reagiert und eine halbe Drehung der Schraube schon zum Reißen des Fadens führen kann. Außerhalb des Gehäuses befindet sich ein Steg mit zwei ringförmigen Halterungen für die großen Massen M. Dieser Steg ist drehbar und ermöglicht es, die Massen M in die zwei für den Versuch notwendigen Positionen [***Abb.3***] zu bringen.

Abb.3 :



In Abbildung zwei sind noch zwei der relevanten Größen eingetragen:
Entfernung von Hantelaufhängung zu Masse m = d
Entfernung von Schwerpunkt Masse M zu Schwerpunkt Masse m = r

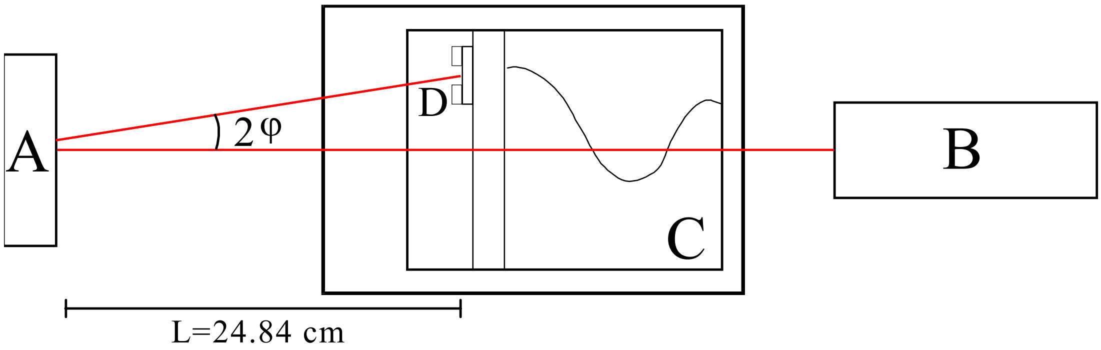
Abb.4: Die Nachführelektronik



R1: 47kΩ
R2: 10kΩ
R3: 47kΩ
K : 10μF
U : 5V

Die Nachführelektronik (PL 737b) ist nach obenstehender Schaltung aufgebaut. Während des Versuchs dient sie gleichzeitig als Stift im x-t-Schreiber. Die anliegende Spannung U erhielten wir von einem Trafo (PL 14b). Werden beide Photodioden gleich stark beleuchtet, ist die Spannung am Kondensator stabil. Wird eine der beiden jedoch stärker beleuchtet, steigt bzw. sinkt die Spannung. Diese Spannung wird zwischen A und B abgenommen und direkt an den x-t-Schreiber übergeben.

Abb.5 : Der komplette Aufbau



A: Gravitationswaage
B: Laser
C: x-t-Schreiber
D: Nachführelektronik mit den zwei Photodioden
l : Entfernung: Spiegel – Nachführelektronik

In obiger Abbildung 5 ist der Winkel 2φ eingezeichnet. Der Winkel entspricht wegen dem Refexionsgesetz gerade dem Doppelten der Drehung des Spiegels im Inneren der Gravitationswaage.
Beim Aufbau sollte man darauf achten, daß der Laserstrahl möglichst parallel zum Tisch auf den Spiegel fällt, da sonst beim Umdrehen der großen Massen diese in den Strahlengang ragen und damit die Nachführelektronik stören könnten. Um dies zu erreichen, stellten wir unseren x, t-Schreiber auf eine Styroporplatte auf fast gleiche Höhe mit dem Laserstrahl un dem Spiegel. Die ganze Apparatur stellten wir auf den Steintisch im Optikraum, da dieser für Erschütterungen sehr unempfindlich ist.

DURCHFÜHRUNG

1. Versuchstermin:

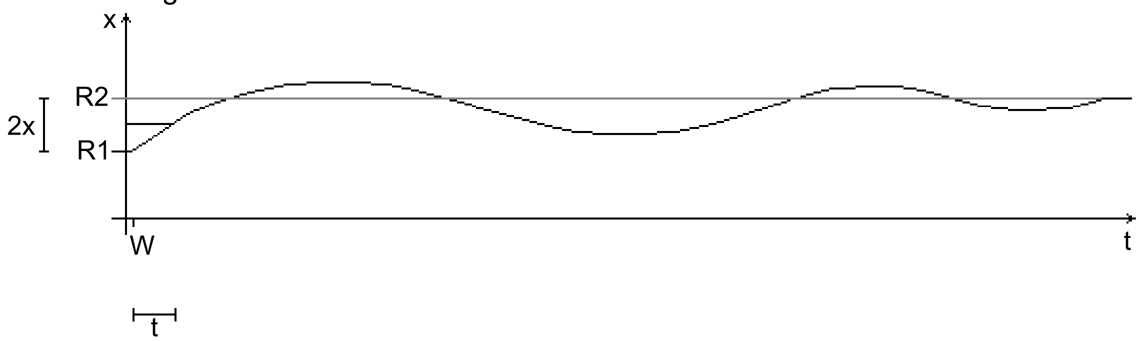
Nachdem der Aufbau wie oben beschrieben beendet war, regten sich erste Zweifel an der Funktionstüchtigkeit der Nachführelektronik, da scheinbar nur eine der Photodioden, nämlich die rechte, auf eine Lichtintensitätsänderung ansprach. Wir testeten sie mit einem kleinen Handlaser. Wir sahen dann aber, daß der abgelenkte Laserstrahl die rechte Diode quasi „vor sich hertreiben„ könne, was den gleichen Zweck erfüllen würde.
Wir ließen den gesamten Aufbau für etwa eine Stunde ruhen, damit die Waage auspendeln konnte. Da später immer wieder Justierungen der Apparatur nötig wurden, z.B. weil wir feststellten, daß der Maximalausschlag des Spiegels die Maximalauslenkung des Schreibers überschreiten könnte, wurde die Waage immer wieder erschüttert und die Wartezeit damit verlängert.
In der Annahme, die Waage sei endlich zur Ruhe gekommen, legten wir die großen Metallkugeln auf und brachten sie in Pos1 (s.Abb.2). Nach weiterer Wartezeit, die Waage mußte ja wieder aufhören zu schwingen, wagten wir eine erste Messung:
Die großen Massen wurden in Pos2 gebracht, unterbrachen dabei aber den Laser und die Nachführelektronik entwich dem Laserpunkt und bewegte sich zurück auf die Nullinie.
Nach neuer Justierung, also der Einstellung eines flacheren Laserwinkels, und weiterer Wartezeit, wagten wir einen zweiten Versuch:
Nach dem Umlegen der großen Massen trieb der Laser die Nachführelektronik vor sich her, doch etwa in der Mitte des maximalen Ausschlages wurde sie plötzlich langsamer und der Laserpunkt überholte sie, wobei sie ihm wieder entwich. Den

gesamten restlichen Termin verbrachten wir mit der Suche nach dem Fehler in der Nachführelektronik, konnten ihn aber nicht ausmachen.

2. Versuchstermin:
Wir entdeckten gleich zwei schwerwiegende Fehler in unserem Aufbau:
den Bruch einer Lötstelle in der Nachführelektronik und daß der Torsionsfaden im Inneren des Gehäuses bereits um über eine halbe Drehung verdrillt war, was eine Messung natürlich unmöglich machte. Die Lötstelle war schnell repariert, aber die Verdrillung des Fadens konnte erst behoben werden, indem wir die Glasplatten vom Gehäuse lösten und die Waage frei schwingen ließen. Die Nachführelektronik funktionierte jetzt wie erwartet und war auch nicht mehr so anfällig gegenüber kurzen Unterbrechungen des Lasers. Die Gravitationswaage war jetzt erst in der Lage ernstzunehmende Werte zu liefern. Nach den mittlerweile gewohnten langen Wartezeiten machten wir drei Messungen. Wir ließen das Papier im Schreiber jetzt ununterbrochen den gesamten Versuchstermin lang mit 2cm/min im Schreiber laufen, um jede Schwingung der Waage, beabsichtigt oder nicht, aufzuzeichnen.
Am Schluß wurden noch die restlichen Längen an der Apparatur gemessen (d, r, l)

AUSWERTUNG

Abb6 : Ergebnis des Schreibers



Das Ergebnis auf dem x-t-Schreiber ist eine Sinuskurve, deren Amplitude stetig abnimmt (siehe Anhang). Sie beschreibt das Wenden der M im Wendepunkt W nach der ersten Ruhelage R1 und das Ausschwingen der Waage bis zur zweiten Ruhelage R2.
Der Höhenunterschied zwischen R1 und R2 entspricht 2x, das heißt also, daß x gleich dem halben Höhenunterschied R1-R2 ist :

$$x = \frac{|R1 - R2|}{2}$$

Zu erklären ist das mit F_D, denn maximal nur bis $\frac{|R1 - R2|}{2}$ wirkt F_D in Richtung F_G, genau in diesem Punkt ist sie gleich Null und darüber hinaus kehrt sie sich wieder um und wirkt F_G entgegen, bis sich beide Kräfte wieder die Waage halten.

Die für x benötigte Zeit ergibt sich durch das Abtragen von x auf der Kurve.
Die Strecke von W bis zum Kurvenverlauf entspricht der Zeit der Beschleunigung von m. ist nun, wie im Anhang zu sehen, eine Zeitspanne abgetragen worden, kann das Verhältnis von der Größeneinheit der Strecke und der der Zeit durch messen und einfache Rechnung bestimmt werden.
Hier entsprechen 2cm rund 60s.

Meßreihe:
Einmalige Messungen:

M = 1,5kg
d = $5 \cdot 10^{-2}$m
r = $46 \cdot 10^{-3}$m

Die Länge l wurde fünf Mal gemessen und dann der Mittelwert gebildet :

$\mathbf{l_1} = 24{,}3 \cdot 10^{-2}$ m
$\mathbf{l_2} = 24{,}4 \cdot 10^{-2}$ m
$\mathbf{l_3} = 24{,}5 \cdot 10^{-2}$ m
$\mathbf{l_4} = 25{,}2 \cdot 10^{-2}$ m
$\mathbf{l_5} = 25{,}8 \cdot 10^{-2}$ m

$\mathbf{l_{mittel}} = 24.84 \cdot 10^{-2}$ m

	x [m]	**t [s]**	**G** $\left[\frac{m^3}{kgs^2}\right]$	ΔG_{syst} $\left[\frac{m^3}{kgs^2}\right]$	ΔG $\left[\frac{m^3}{kgs^2}\right]$	**ΔG [%]**
1	$4 \cdot 10^{-3}$	105	$5{,}2 \cdot 10^{-11}$	$0{,}9 \cdot 10^{-11}$	$2{,}4 \cdot 10^{-11}$	46
2	$4 \cdot 10^{-3}$	75	$10{,}1 \cdot 10^{-11}$	$1{,}2 \cdot 10^{-11}$	$2{,}5 \cdot 10^{-11}$	25
3	$4 \cdot 10^{-3}$	90	$7{,}1 \cdot 10^{-11}$	$0{,}6 \cdot 10^{-11}$	$2{,}3 \cdot 10^{-11}$	32
Mittelw.	$4 \cdot 10^{-3}$	90	$7{,}1 \cdot 10^{-11}$	$0{,}9 \cdot 10^{-11}$	$2{,}4 \cdot 10^{-11}$	34

Insgesamt ist der Mittelwert von G = $7{,}1 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kgs^2}$ zwar etwas zu groß, aber durchaus innerhalb der Fehlergrenzen mit dem Literaturwert von G = $6.6726 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kgs^2}$ vergleichbar.

Die Standardabweichung s = $0{,}74 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kgs^2}$, also von 10% und ein mittlerer systematischer Fehler von $\Delta G_{syst} = 0.9 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kgs^2}$, bilden zusammen einen mittleren Fehler von $\Delta G = 2{,}4 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kgs^2}$, also von 34%. Das ist zwar ein guter Puffer für die meisten gemessenen Werte, kann jedoch den zweiten Wert in der Tabelle nicht annähernd auf den Literaturwert drücken. Aber ein Ausreißer kann ja in den besten Messungen vorkommen und ist halb so schlimm, solange der Mittelwert stimmt ☺.

FEHLERBETRACHTUNG

Leider wurden die Markierungen für W auf dem auszuwertenden Papier zweimal direkt vor der Schreibsonde und bei der dritten Messung relativ genau auf Höhe derselben mit unterschiedlichen Stiften vorgenommen, so daß sich für die ersten zwei Messungen ein sehr großer systematischer Fehler von ca. 45s (30-38%) für die Zeit ergab, der für die ersten zwei Messungen pauschal abgezogen wurde.

Diese 45s resultieren aus dem Verhältnis, daß 2cm gleich 60s entsprechen.

Der Fehler, der beim Abtragen von W entstand, wurde nach Stiftdurchmesser, Abstand des Markierungsstiftes zur Sonde und dem Abstand des Sondenstiftes zu den Photodioden auf 1,5cm geschätzt, das entspricht 45s.

Dafür lag hier der relative Fehler der Zeit nur bei 0,2cm = 6s, also 7%, da ein Stift mit geringer Breite gebraucht wurde.

Die dritte Messung allerdings wurde genauer an der Schreibsonde, dafür aber mit einem wesentlich breiteren Stift markiert, daraus ergab sich ein statistischer Fehler von 0,5cm = 15s, also 17%.

Dagegen war die Messung von x an sich relativ genau, da keine Abweichungen abgelesen wurden, allerdings kann das Ergebnis jedoch durch die Breite des Stiftes um $1 \cdot 10^{-3}$ m variieren, wird also um 25% verfälscht.

Durch die fünf Längenmessungen ergab sich für l ein systematischer Fehler von l = $4.3 \cdot 10^{-3}$ m, das heißt also ein relativer Fehler von 2% zum Mittelwert.

Die Masse von M, der Abstand d, sowie r wurden so genau bestimmt oder abgelesen, daß die hier auftretenden Fehler vernachlässigbar klein gegenüber den oben genannten sind.

AUSWERTUNGSERGÄNZUNG

Nach der Formel der Theorieergänzung, mit einer Periodendauer von T = 630s, ist

$$G = 5{,}6 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kgs^2} .$$

Auch ein ziemlich genauer Wert, wenn die winzige Größe der Gravitationskonstante bedacht wird.
Auf eine Fehlerbetrachtung wird hier allerdings aufgrund einer bereits erfolgten und genauen Auswertung verzichtet.

RESÜMEE

Fabian:
Der Aufwand dieses Versuchs sprengte unsere Erwartungen bei weitem. Sehr groß war die Anspannung unter denen, die direkt am Versuch arbeiteten. Die unglaubliche Empfindlichkeit des Versuchs forderte äußerste Geduld. Eine ruckartige Bewegung eines Kollegen im Versuchsraum, ließ einen kurz zusammenzucken, später waren aus eben diesem Grund selten mehr als zwei Personen im Versuchsraum. Daß die Gruppe am zweiten Versuchstermin an zwei getrennten Versuchen arbeitete, sorgte für eine wesentlich entspanntere Atmosphäre – sieben Personen sind für diesen Versuch definitiv zu viele. Besonders bedrückend war die Tatsache, daß man immer wieder vor Augen geführt bekam, wie wenig die Bemühungen der letzten Stunde wert waren, wenn der Aufbau aus irgendeinem Grund wieder erschüttert wurde. Schnell verflogen die Hoffnungen auf einen überhaupt annehmbaren Meßwert.
Umso größer war die Freude, als der Schreiber doch das erste Mal etwas annähernd sinus-Kurven-förmiges auf das Papier schrieb.

Diana:
Nachdem mit diesem Experiment zwei PL-Termine gefüllt wurden, war es schon ein riesen Erfolg überhaupt auf die richtige Größenordnung zu kommen. Das lag nicht zuletzt an der hierfür benötigten, äußerst empfindlichen Torsionswaage, die sehr viel Zeit für das Ausschwingen benötigt (siehe Anhang).
Da die Wirkung von G sehr klein ist und somit die Empfindlichkeit des Gerätes bestimmt, muß mit höherem Zeitaufwand einfach gerechnet werden.
Leider war auch die Schreibsonde nicht in Takt, was erst nach dem ersten Termin auffiel, so daß dies eine weiter extreme Zeitverzögerung war. Durch heldenhaften Einsatz jedoch wurde dieses Problem behoben (ha!).
Im Nachhinein ist eigentlich zu sagen, daß die Koppelung des Aufbaus an den x-y-Schreiber nicht zu empfehlen ist, da die Justierung des Lasers, die Unterbrechung des Strahlenganges durch M und die komplizierte Auswertung durch schlecht gewählte Amplitude nur einige der Schwierigkeiten waren die es zu bewältigen galt. Deshalb wäre der Vorschlag zu machen, den Ausschlag x einfach herkömmlich an einem Schirm abzulesen und t manuell zu messen, auch wenn das bedeutet, daß Einer länger auf die Zeit achten müßte.
Leider wurden keine Vergleichsmessungen mit der oben genannten Methode vorgenommen, so daß keine Aussagen über deren Genauigkeit getroffen werden können, obwohl ich persönlich denke, daß diese unwahrscheinlich noch einen größeren Fehler bergen kann als das in diesem Versuch der Fall ist.

TIPS:

Es gibt hierzu eigentlich nur zwei hilfreiche Dinge zu sagen:
es wäre zu empfehlen einen Nebenversuch laufen zu lassen, der mehr als zwei Personen benötigt und möglichst in einem anderen Raum stattfindet und es sollte während dieses Versuches gutes häppchenweise portioniertes Essen geben, wie z.B. an einem Grillabend ☺, das hebt die Stimmung.