F A C H A R B E I T

Leistungskurs Physik 12
(2005 / 06)

BESTIMMUNG DER GRAVITATIONSKONSTANTEN

Kevin Kaatz

Städt. Gymnasium Moltkestraße Gummersbach

Vorwort (Anmerkung zur Facharbeit)

Im Text sind Zitate und sinngemäße Übernahmen durch hochgestellte Nummern, z.B.:

„Ich bewundere die allgemeine Relativitätstheorie wie ein Kunstwerk“[3)]

verwiesen. Die Nummern geben die Quelle im Quellenverzeichnis an, also müsste im obigen Beispiel nach der 3. Quelle gesucht werden.

Leider war mir die tatsächliche Versuchsdurchführung nicht möglich, da die gegebenen Umstände es nicht zuließen (der Faden war nicht eingelegt, zu lang, etc.). Daher musste ich auf einen bereits durchgeführten Versuch zurückgreifen. Vielleicht ergibt sich doch irgendwann einmal die Möglichkeit, den Versuch durchzuführen, was ich dann doch gerne machen würde.

An dieser Stelle auch noch einen ganz herzlichen Dank an Herrn Jambor, der sich bereit erklärt hat, an einem Wochenende den Versuch durchzuführen, auch wenn dies leider nicht so geklappt hat, wie ich (und er vermutlich auch) es mir (sich) vorgestellt habe(n).

Inhaltsverzeichnis

(angepasst an das PDF-Format)

Einleitung

Noch immer ist das Universum für den Menschen voller Fragen, die Klärungsbedarf verspüren. Andere Fragen wiederum sind bereits geklärt. So stellte *Johannes Kepler* (1571 bis 1630) fest, dass sich alle Planeten nach bestimmten Vorgaben bzw. Regeln im Universum bewegen, anstatt chaotisch bzw. systemlos hin und her zu laufen.

Dafür musste es aber einen Grund geben, denn *Isaac Newton* (1643 bis 1727) stellte in seinen Axiomen fest, dass ein Körper so lange in Ruhe oder gleichförmiger Bewegung verharrt, bis auf ihn eine Kraft wirkt. Diese Kraft, die Planeten wie den Mond um die Erde kreisen lassen, ist die *Gewichtskraft*. Newton stellte fest, dass diese Kraft proportional zu den Massen und entgegengesetzt proportional zum Quadrat des Abstandes zweier Körper ist.

Allerdings gehört zu jeder Art der Proportionalität ein *Proportionalitätsfaktor*. Newton selbst wusste zwar, dass es ihn geben muss, allerdings ist es ihm nicht selbst gelungen, diesen experimentell zu ermitteln. Erst 1798, 71 Jahre nach Newtons Tod, gelang es *Henry Cavendish* (1731 bis 1810) mit seiner *Gravitations- bzw. Torsionsdrehwaage*.

In dieser Facharbeit will ich den oben genannten Proportionalitätsfaktor, mittlerweile bekannt als *Gravitationskonstante* γ, wie Cavendish mit der Gravitationsdrehwaage experimentell bestimmen und dabei sowohl Theorie als auch Praxis des Versuchs darlegen. Aufgrund der hohen Empfindlich des Versuchsgerätes wird es vermutlich nötig sein, eine ausführliche Fehlerbetrachtung anzustellen. Weiterhin werde ich versuchen, einen Teil der zur Bestimmung der Gravitationskonstanten benötigten Formeln herzuleiten und damit die Grundlage für deren Berechnung zu schaffen. (Quellen 2, 4, 6, 12)

Das Gravitationsgesetz

Unter Gravitation (lat. gravitas, die Schwere) versteht man diejenige Kraft, die einen Körper zu Boden fallen lässt.[1)] Aber das ist nicht ihre einzige Aufgabe. Die Gravitation ist auch dafür verantwortlich, dass Planeten auf ihren Umlaufbahnen um die Sonne bleiben. Newtons Theorie der *universellen Gravitation*, die auch heute noch (als Näherung) Anwendung findet, wurde 1915 durch Albert Einsteins *allgemeine Relativitätstheorie* abgelöst: „Gravitation als Manifestation der Geometrie von Raum und Zeit“[4)].

Was soll man sich nun unter der Theorie der universellen Gravitation vorstellen? Zunächst stellt Newton fest, dass sich im Universum je zwei Massen anziehen. Die dabei aufgewendete Kraft wirkt entlang der Verbindungslinie zwischen den Körpern. Newton stellte fest, dass die Kraft umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands ist.

Für die wechselseitige Kraft zwischen zwei Körpern gilt (*Gravitationsgesetz*):

$$(1)\ F_G = \gamma \frac{mM}{r^2} \text{ mit } \gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \text{ (Literaturwert)}$$

Newton soll auf die Vermutungen zur Gravitation gekommen sein, weil ein Apfel immer wieder zu Boden fällt, wenn man ihn los lässt (à „Physik in Märchen"). In seiner berühmten *Mondrechnung* wies er nach, dass auf Apfel und Mond die gleiche Beschleunigung in Richtung Erde gelten muss.

Nach dem 2. newtonschen Axiom gilt:

$$(2)\ F=ma$$

Christiaan Huygens (1629 bis 1695) stellte die Formel für die Zentrifugalkraft auf:

$$(3)\ F = \frac{mv^2}{r}$$

Setzt man nun für F nach dem 2. newtonschen Axiom *ma* ein, so ergibt sich, nach a umgestellt:

$$(4)\ a = \frac{v^2}{r}$$

Die Kräfte kann man deshalb gleichsetzen, weil man davon ausgeht, dass sich der Körper gerade auf seiner Flugbahn halten kann, also Kräftegleichgewicht vorliegt. Wichtig dabei ist: die Massen kann man nur deshalb wegkürzen, weil träge und schwere Masse gleich sind. Für Newtons 2. Axiom gilt nur die träge Masse, für die Zentrifugalkraft nur die Schwere.

Newton wollte nun zeigen, dass der Mond wie der Apfel von der Erde angezogen wird. Dazu setzte er sein 2. Axiom gleich mit der Gravitationskraft und erhielt:

$$m \cdot a = \gamma \frac{Mm}{r^2}$$
$$\Leftrightarrow a = \gamma \frac{M}{r^2}$$

Setzt man nun die Beschleunigung des Mondes in Verhältnis zu der des Apfels, ergibt sich nach Umformung:

$$\frac{a_{Apfel}}{a_{Mond}} = \left(\frac{r_{Mond}}{r_{Apfel}} \right)^2$$

Nach (4) gilt für den Mond, der sich auf einer (stark vereinfacht) Kreisbahn um die Erde bewegt, dass $a_{Mond} = \frac{(v_{Mond})^2}{r_{Mond}} = \frac{(2\pi r_{Mond})^2}{r_{Mond} \cdot T_{Mond}} = \frac{4\pi^2 (r_{Mond})^2}{(T_{Mond})^2}$ ist. Der Abstand zwischen Erde und Mond, das war Newton bekannt, lag beim etwa 60-fachen des Erdradius (also somit näherungsweise dem 60-fachen der Entfernung des Apfels zum Mittelpunkt der Erde). Dann gilt insgesamt:

$$\frac{9{,}81\frac{m}{s^2}\cdot\left(T_{Mond}\right)^2}{4\pi^2\cdot 60\cdot r_{Erde}}=\left(\frac{60\cdot r_{Erde}}{r_{Erde}}\right)^2$$

Der Erdradius beträgt etwa 6.378km und die Umlaufzeit des Mondes um die Erde rund 27,3 Tage. Somit gilt:

$$\frac{9{,}81\frac{m}{s^2}\cdot\left(27{,}3d\right)^2}{4\pi^2\cdot 60\cdot 6378km}=\left(60\right)^2$$

Berechnet man nun die Formel links, kommt man auf etwa 3.600, somit ist erwiesen, dass die Beschleunigung zwischen Erde, Apfel und Mond gleich ist. Mit anderen Worten: Die Kraft, die einen Apfel zu Boden fallen lässt, ist der Kraft, die den Mond auf seiner Umlaufbahn hält, so gut wie gleich. Die leichten Ungenauigkeiten lassen sich durch die stark gerundeten Werte erklären. Außerdem wirkt im Universum jeder Körper auf den anderen eine Kraft aus, sodass weitere Ungenauigkeiten aufgetreten sein können. Weiterhin ist man bei dieser Annäherung davon ausgegangen, dass sich der Mond auf einer annähernd kreisförmigen Bahn um die Erde befand. Tatsächlich hat er eine eher ellipsenförmige Umlaufbahn.

Messungen der Gravitationskonstanten

Wie bereits weiter oben gesagt ist es Newton selbst nicht gelungen, die Gravitationskonstante experimentell zu bestimmen. Im Jahre 1798 gelang es dann Henry Cavendish, diese wichtige, „universelle Naturkonstante“[4)] mit Hilfe einer Gravitationsdrehwaage annähernd zu bestimmen. Er kam auf einen Wert von rund $6{,}754\cdot 10^{-11}\frac{Nm^2}{kg^2}$. Verglichen mit dem heute verwendeten Wert von $6{,}6726\cdot 10^{-11}\frac{Nm^2}{kg^2}$ kann man einen Unterschied von rund 1,2% feststellen. 1896 wurde dann eine erneute, wesentlich genauere Messung vom ungarischen Physiker Loránd Eötvös durchgeführt, der - verglichen mit dem heutigen Literaturwert - einen Messfehler von nur 0,34% gemacht hatte. Der heutige Wert geht auf einen Physiker namens *Luther* zurück, der 1982 den oben aufgeführten Wert sehr genau bestimmte.

Trotz aller Genauigkeit ergeben sich immer kleine Messfehler, sodass jede weitere, experimentell bewiesene Nachkommastelle schon einen Nobelpreis in Physik bedeuten kann.

Wie nun aber soll die Gravitationsdrehwaage funktionieren? Wie ist sie aufgebaut, was ist das Prinzip hinter der Messung? Genau diesen Fragen werde ich im Folgenden nachgehen.

Die Gravitationsdrehwaage nach Cavendish

Abbildung 1 (siehe Materialanhang) zeigt die Gravitationsdrehwaage. Im Inneren des Gehäuses befinden sich zwei kleine Kugeln, die durch eine Stange miteinander verbunden sind. Die Stange hängt an einem sehr dünnen Torsionsfaden aus Kupfer, an dem weiterhin ein Spiegel befestigt ist. Außerhalb des Gehäuses befinden sich zwei große Kugeln, die drehbar auf einer Stange sind.

Abbildung 2 verdeutlicht, was passiert, wenn man die beiden großen Massen aus Stellung I in Stellung II bringt: da das Gravitationsgesetz gilt, schwingen die beiden kleinen, verbundenen Massen langsam zu den Größeren. Dadurch wird der am Torsionsfaden hängende Spiegel mitgedreht, sodass der auf ihn einfallende Lichtstrahl seinen Winkel ändert (Einfallswinkel=Ausfallswinkel). Es zeigt sich also auf einer in der Nähe angebrachten Skala, dass sich der Lichtpunkt bewegt. Alternativ dazu kann man auch den im folgenden Abschnitt erklärten InfraRot Positions-Detektor (IRPD) verwenden.

Der InfraRot Positions-Detektor (IRPD)

Der InfraRot Positions-Detektor (im Folgenden nur noch „IRPD“ genannt) ist in der Lage, die gedämpften Schwingungen des Torsionsfadens zu messen. Wie der Name schon vermuten lässt, benutzt er dazu Infrarot-Licht, welches er selbst emittiert. Dieses Licht fällt auf den Konkavspiegel im Inneren der Gravitationsdrehwaage, wird dort reflektiert und fällt dann auf eine Fototransistorzeile mit 32 Fototransistoren (Abbildung 3, 1.3), die direkt über den Infrarot-Licht-aussendenden Dioden (Abbildung 3,1.1) platziert ist.

Wenn der reflektierte Lichtstrahl auf diese Zeile fällt, gibt der IRPD das empfangene Signal an ein externes Anschlussgerät (z.B. Computer oder y-t-Schreiber) weiter, wodurch ein zeitlicher Verlauf aufgezeichnet werden kann.

Der deutliche Vorteil bei der Verwendung des IRPD ist, dass dem Menschen so sehr viel Arbeit erspart wird: die Messung an sich dauert sehr lange, und ohne IRPD wäre es nötig, in bestimmten Zeitintervallen die Position des reflektierten Lichtstrahls selbst auf der Millimeter-Skala einzutragen. Weiterhin ist der IRPD vermutlich etwas genauer als der Mensch, der ja gerne zu Messungenauigkeiten neigt.

Gravitationsfelder im Bezug auf die Gravitationsdrehwaage

„Unter einem Gravitationsfeld versteht man den besonderen Zustand des Raumes um einen massebehafteten Körper. In ihm werden auf andere Körper Gravitationskräfte ausgeübt“[6)].

Das bedeutet also, dass jeder Körper Kräfte auf einen anderen auswirken kann und umgekehrt, wobei der Körper mit der größeren Masse als der *felderzeugende Körper* bezeichnet wird.
Abbildung 4 verdeutlicht, dass um die beiden großen Massen ein Gravitationsfeld vorherrscht, welches Ursache für die Anziehung der beiden kleinen Massen ist. Die Feldlinien finden ihren Ursprung im Massenmittelpunkt, ihre Richtungen sind zum Mittelpunkt hin.
Natürlich haben auch die beiden kleinen Massen ein Gravitationsfeld, aber dieses ist bei weitem nicht so intensiv wie das der großen Massen.
Abbildung 5 erklärt, warum die beiden kleinen Massen nicht bis zum Gehäuse schwenken, wenn z.B. Stellung I (blau) der großen Kugeln eingenommen wurde: die Verdrillung des Fadens hindert die Kugeln, weiter zu schwenken. Es herrscht Kräftegleichgewicht zwischen Drill- und Gravitationskräften.
Verändert man nun das Gravitationsfeld, indem man die beiden großen Kugeln in Stellung II (rot) bringt, so wirken Drill- und Gravitationskraft zunächst zusammen, wobei aber die Drillkräfte zunächst geringer werden, dann ihre Richtung ändern und vom Betrage her wieder wachsen, bis sich wieder Drill- und Gravitationskräfte ausgleichen. Allgemein wird zu Prüfen sein, inwieweit der Faden und die dadurch entstehenden Drill-Kräfte auf das Versuchsergebnis Einfluss nehmen können. Da davon auszugehen ist, dass die Gravitationskraft sehr gering sein wird, kann jede noch so geringe störende Größe von Bedeutung sein.

Herleitung einer Formel zur Bestimmung der Gravitationskonstanten

Nachdem das allgemeine Messprinzip klar ist, muss eine Gleichung gefunden werden, mit der man mittels der gegebenen bzw. messbaren Werte die Gravitationskonstante berechnen kann. Zunächst aber eine allgemeine Erklärung:
Das innere der Gravitationsdrehwaage besteht - wie oben schon erläutert - aus zwei Kugeln auf einer drehbar gelagerten Stange. Die Mitte dieser Stange fungiert hierbei als Drehachse. Man kann also mit dem *Drehmoment* arbeiten, da gilt: „Das Drehmoment gibt an, wie stark eine Kraft [hier: die Gravitationskraft] auf einen drehbar gelagerten Körper wirkt“[6)]. Insgesamt sind also alle für die Verwendung des Drehmoments nötigen Bedingungen erfüllt. Das Drehmoment M ist definiert durch die Gleichung

$$M = F \cdot r$$

mit der wirkenden Kraft F und dem Abstand r der Wirkungslinie der Kraft von der Drehachse. Dabei ist wiederum zu beachten, dass die wirkende Kraft F auf beiden Seiten der Drehachse angelegt wird: es gibt zwei kleine Massen, die beide von großen Massen angezogen werden. Insgesamt ergibt sich aus dieser Überlegung:

$$(5)\ M_{Dreh} = 2 \cdot F \cdot r$$

Die wirkende Kraft ist uns bekannt: es handelt sich um die Gravitationskraft (Formel (1)). Setzt man nun (1) in (5) ein, ergibt sich:

$$(6)\ M_{Dreh} = 2 \cdot \gamma \frac{mM}{b^2} \cdot d$$

An dieser Stelle musste nun eine Bezeichnungsveränderung vorgenommen werden, da das r aus dem Gravitationsgesetz sich auf den Abstand der Massen, das r aus der Gleichung für das Drehmoment sich auf den Abstand zwischen den kleinen Massen und der Drehachse bezieht, man sie also insgesamt nicht gegeneinander kürzen darf! Der Einfachheit halber übernehme ich die in Abbildung 2 genutzten Bezeichnungen von Leybold.

Bei der Gravitationsdrehwaage gibt es zwei (Kräfte-)Gleichgewichtslagen, an denen die Drehmomente vom Betrage her gleich, aber von der Richtung her genau entgegengesetzt wirken. Es gilt somit der Zusammenhang

$$(7)\ M_1 = -M_2$$

Da immer noch ein M_{Dreh} in der Gleichung (6) ist, was nicht mit einfachen Mitteln zu messen ist, muss es ersetzt werden. Dazu benötigt man die so genannte *Winkelrichtgröße*, die bei der Verwendung des Drehmoments Anwendung findet. Es gilt:

$$(8)\ M = -D \cdot \varphi$$

Dabei ist D die Richtgröße, die sich zunächst folgendermaßen zusammensetzt:

$$(9)\ D = J \cdot \frac{4\pi^2}{T^2}$$

J ist das Trägheitsmoment des Torsionspendels, T die Schwingungsdauer. Auch hier muss erst wieder geklärt werden, wie groß J ist: für das Trägheitsmoment gilt der Zusammenhang:

$$(10)\ J = \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i \cdot r_i^2 = 2m \cdot d^2$$

Setzt man nun (10) in (9) ein, ergibt sich:

$$(11)\ D = m \cdot d^2 \cdot \frac{8\pi^2}{T^2}$$

Jetzt hätten wir schon mal die erste Größe der Formel (8) geklärt, fehlt nun noch die andere: der Winkel φ ist der Winkel, der sich zwischen der Extremlage der Drehachse und der mittleren Drehachsenlage befindet. Da dieser Winkel halb so groß ist, wie der zwischen den beiden Extremlagen, nenne ich ihn an dieser Stelle $\frac{\alpha}{2}$. Es ergibt sich somit nach Einsetzen von (11) und diesem Winkel in (8):

$$\text{(12)}\quad M = -\left(m \cdot d^2 \cdot \frac{8\pi^2}{T^2} \cdot \frac{\alpha}{2}\right) = -\frac{4md^2\pi^2}{T^2} \cdot \alpha$$

Was jetzt definitiv noch stört ist der Winkel α, den man aber relativ elegant aus dieser Gleichung entfernen kann: da er sehr klein ist, gilt $\tan\alpha \approx \alpha$, und $\tan\alpha$ kann man auch so ausdrücken:

$$\text{(13)}\quad \alpha \approx \tan\alpha = \frac{s}{d} = \frac{S}{2 \cdot L}$$

mit der zurückgelegten Wegstrecke S des Lichtzeigers und der Entfernung L zwischen Spiegel und der Fototransistorzeile des IRPD. Der Zusammenhang von s, d, S und L mag auf den ersten Blick nicht ersichtlich sein, aber man kann hier argumentieren, dass es sich wegen der Interdependenz, also der gegenseitigen Abhängigkeit der Größen, schlicht um eine Anwendung der Strahlensätze handelt: ändert sich s, so ändert sich auch S. L und d sind konstant. man kann insgesamt also von einer proportionalitätsnahen Abhängigkeit sprechen.
Setzt man nun (13) in (12) ein, ergibt sich:

$$\text{(14)}\quad M = -\frac{2md^2\pi^2 S}{L \cdot T^2}$$

Gleichung (6) kann man nun mit (14) gleichsetzen, wodurch M wegfällt und sich ergibt:

$$-\frac{2md^2\pi^2 S}{L \cdot T^2} = 2 \cdot \gamma \frac{mM}{b^2} \cdot d$$
$$\Leftrightarrow -\frac{d\pi^2 Sb^2}{LT^2 M} = \gamma$$
$$\Leftrightarrow \gamma = -\frac{\pi^2 \cdot b^2 \cdot d \cdot S}{M \cdot L \cdot T^2}$$

Das Vorzeichen

Wie in der Endgleichung zu erkennen ist, besteht die Gefahr, dass γ negativ wird: π^2 ist in jedem Falle positiv, b^2 und S auch. d könnte man - je nach Betrachtungsweise - negativ werden lassen. M ist nicht negativ, L ebenso wenig und T^2 kann auch nicht negativ werden.
An dieser Stelle ist es schlicht empfehlenswert, entweder den Betrag von γ zu nehmen oder die eigene Betrachtungsweise so anzupassen, dass d negativ wird.

Versuch (Durchführung und Auswertung)

Nachdem meine Versuche, Versuche durchzuführen, kläglich gescheitert sind (trotz der Bemühungen Herrn Jambors), benutze ich das Versuchsergebnis eines anderen Versuches. Die graphische Darstellung, wie sie mir vorlag, ist in Abbildung 6 zu sehen. Zunächst eine Auflistung der gegebenen Größen:

M=1,487kg; L=1,185m; b=0,047m; d=0,05m;

Zu ermitteln bleiben also noch die Größen S und T. Für T liest man einfach an mehreren Stellen ab, wann eine Periode vergangen ist und zieht aus den gewonnenen Werten den Mittelwert. Das ist insofern angewandte Physik, als dass man sich hier die Tatsache zu Nutze macht, dass sich T bei einer gedämpften Schwingung nicht verändert.

In der Abbildung 6 erkennt man eine gedämpfte Schwingung, die offenbar beeinträchtigt wurde durch äußere Umstände. Als Werte nehme ich die Tiefpunkte der Kurve (nur sehr vage durch Augenmaß abgelesen):

0	600	1300	1900	2600	3250	3900	4500

Als Differenzen ergeben sich somit:

600	700	600	700	650	650	600

Als Mittelwert ergibt sich

$$T = \frac{1}{7} \cdot \sum_{i=1}^{7} T_i \approx 642{,}86s$$

Um S zu berechnen, ermittelt man den Mittelwert der ersten drei Maxima, dann den der ersten zwei Minima und ermittelt dann den Mittelwert aus den eben ermittelten Mittelwerten:

Maxima:

0,055	0,048	0,041

Mittelwert: 0,048

Minima:

0,02	0,029

Mittelwert: 0,0245

Insgesamt: $S = \frac{1}{2} \cdot (0{,}048 + 0{,}0245) = \frac{1}{2} \cdot 0{,}0725 \approx 0{,}036$

Nun kann man γ berechnen:

$$\Leftrightarrow |\gamma| = \frac{\pi^2 \cdot b^2 \cdot d \cdot S}{M \cdot L \cdot T^2} = \frac{\pi^2 \cdot (0{,}047m)^2 \cdot 0{,}05m \cdot 0{,}036m}{1{,}487kg \cdot (642{,}86s)^2 \cdot 1{,}185m} \approx 5{,}38 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$

Der Literaturwert liegt bei $6{,}673 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$, es liegt also ein Messfehler von rund 19,24% vor.

Fehlerbetrachtung

Der relativ große Fehler dieser Messung liegt zum einen wohl daran, dass ich aus der mir vorliegenden Graphik nur sehr vage ablesen konnte, wo ein Punkt lag. Dementsprechend ist das Ergebnis sogar noch relativ nah am Literaturwert. Weiterhin ist davon auszugehen, dass aufgrund der extrem hohen Empfindlichkeit der Gravitationsdrehwaage eine Ungenauigkeit an kleinen Erschütterungen gelegen haben kann.

Der Versuchsdurchführende selbst hat noch protokolliert, dass „durch die Streuung der Messwerte nach unten des defekten Interfaces und deren Korrektur die Messwerte verfälscht wurden“[7)].

Literatur- und Quellenverzeichnis

Bücher:

(1) Bergmann, Martin: *SCHÜLER DUDEN Physik - Ein Sachlexikon für die Schule - 3. Auflage*, Mannheim / Leipzig / Wien / Zürich, 1997, S. 360

(2) Grehn, Joachim / Krause, Joachim: *METZLER Physik, 3. Auflage*, Hannover, 2003, S. 84f.

(3) Hoffmann, Manfred / Gascha, Heinz / Schaschke, Horst / Gärtner, Harald: *GROSSES HANDBUCH Mathematik, Physik, Chemie*, Köln, 1999, S. 381ff.

(4) Kiefer, Claus: *Gravitation*, Frankfurt a.M., 2003, S. 3 - 24

(5) Meyer, Lothar / Schmidt, Gerd-Dietrich: *PAETEC Duden Basiswissen Schule Physik*, Berlin / Mannheim, 2001, S. 104

(6) Meyer, Lothar / Schmidt, Gerd-Dietrich: *PAETEC Duden Basiswissen Schule Physik ABITUR*, Berlin / Mannheim, 2003, S. 98, 99, 117ff.

Internet:

(7) http://www.fys-online.de/wissen/ph/gravitation/gravitationskonstante.htm

(8) http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/physik/383

(9) http://de.wikipedia.org/wiki/Allgemeine_Relativit%C3%A4tstheorie#Die_mathematische_Beschreibung_der_Gravitation

(10) http://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationskonstante

(11) http://www.leifiphysik.de/web_ph11/materialseiten/m10_gravitation.htm

(12) http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/grundl_d_tph/sm_ww/sm_ww_gra1.html

(13) http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph11/versuche/10_gravi_waage/historisch.htm

(14) http://pages.unibas.ch/phys-ap/vers75/Versuch75/Versuch75.pdf

(15) http://content.grin.com/binary/hade_download/15525.pdf

(16) http://www.leybold-didactic.de

Anmerkung: die im Text hochgestellten Nummern beziehen sich auf die Nummern der Quellen in diesem Quellenverzeichnis.

Materialanhang

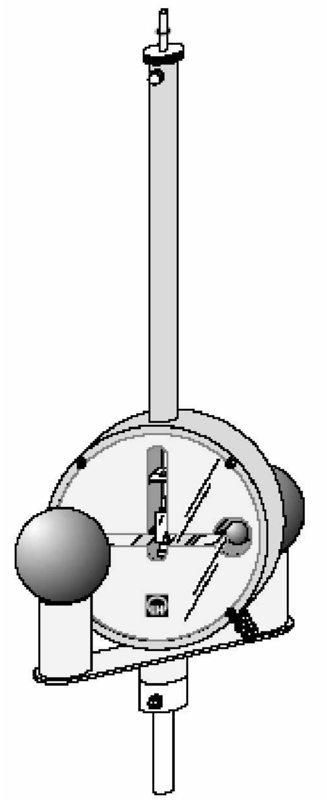

Abb. 1: die Gravitationsdrehwaage von der Leybold Didactic GmbH.

[http://www.leybold-didactic.de]

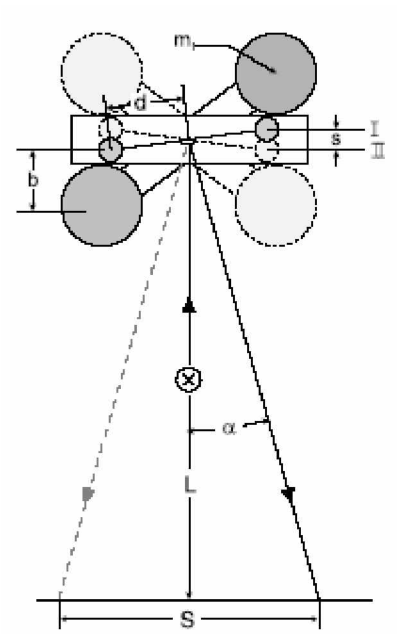

Abb. 2: die Stellung der großen Kugeln hat Einfluss auf die beiden kleinen Massen. Es kommt zu Schwingungen.

[http://www.leybold-didactic.de]

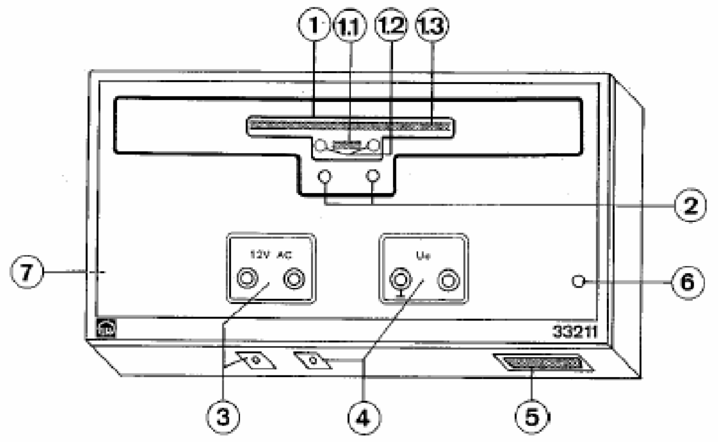

Abb. 3: der Aufbau des InfraRot Positions-Detektors.

[http://www.leybold-didactic.de]

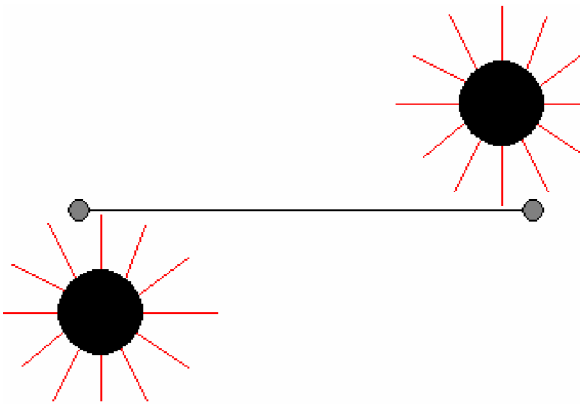

Abb. 4: die Gravitations(-radial-)felder der beiden felderzeugenden großen Massen. Natürlich erzeugen auch die beiden kleinen Massen ein Gravitationsfeld, aber das ist bei weitem nicht so stark wie das der beiden Großen.

[Selbst erstellte Skizze]

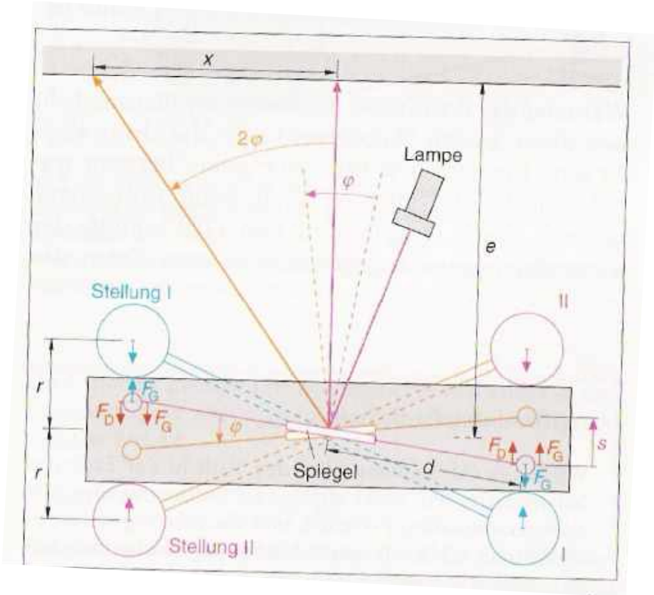

Abb. 5: die Kräfte im Inneren der Gravitationsdrehwaage

[METZLER Physik, 3. Auflage, S. 85]

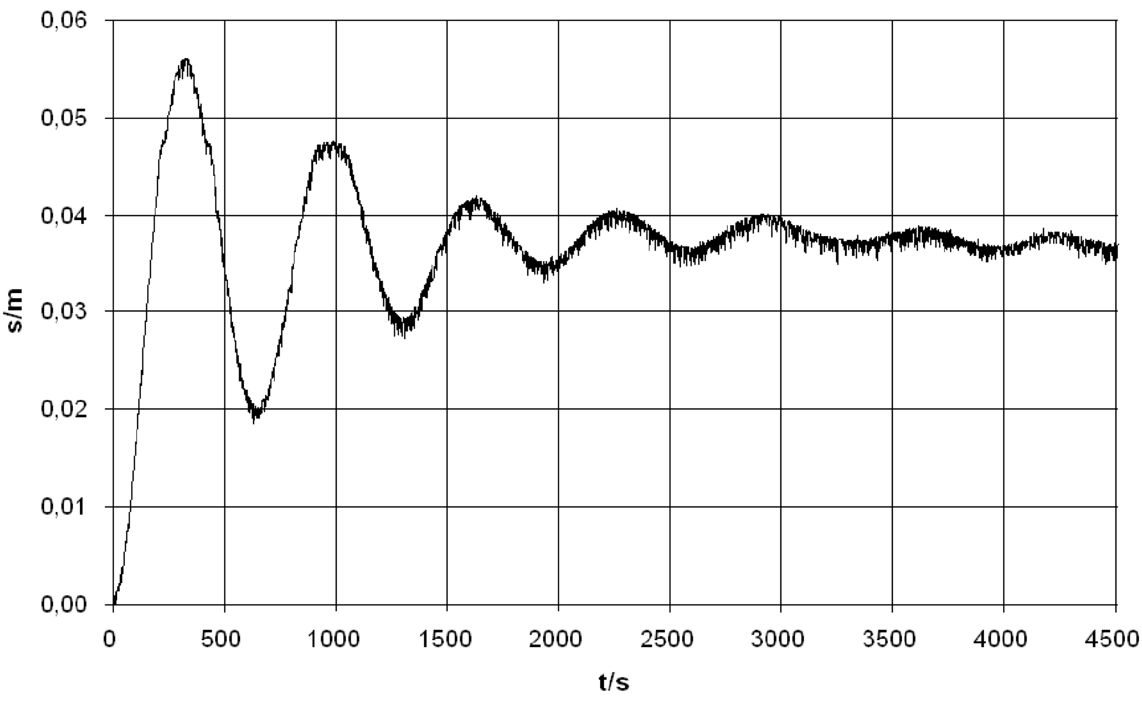

Abb. 6: graphische Versuchsauswertung

[http://www.fys-online.de/wissen/ph/gravitation/gravitationskonstante.htm]

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.
Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum Unterschrift

Bewertung und Anmerkungen zur Facharbeit:

* Fußnoten / Quellen
* Formelbezeichnung dahinter
* teilweise werden Begriffe nicht erläutert (J, D, ...) bzw. Formeln werden wie Axiome behandelt
* Fehlerbetrachtung sehr allgemein, analytische Bezüge fehlen

Insgesamt: gut plus (12 Punkte)