3B SCIENTIFIC® PHYSICS

Cavendish-Drehwaage 1003337

Bedienungsanleitung

06/18 ALF

1. Beschreibung

Die Drehwaage nach Cavendish dient zum Nachweis der Gravitationskraft zwischen zwei Massen und zur Bestimmung der Gravitationskonstanten.

Kernstück der Drehwaage ist ein Torsionspendel bestehend aus einem Tragebalken mit zwei kleinen Bleikugeln, der waagerecht an einem dünnen Wolframdraht aufgehängt ist. Die Ruhelage wird durch die Anziehungskraft zweier großer Bleikugeln auf die kleinen Kugeln beeinflusst. Nach Umschwenken der großen Kugeln in eine neue Position schwingt das Torsionspendel um die geänderte Ruhelage. Die Drehbewegung wird mit einem kapazitiven Differentialsensor gemessen, der Rausch- und Vibrationsanteile im Signal weitgehend unterdrückt, und mit einem Computer aufgezeichnet. Zur weiteren Auswertung können die Daten in eine Tabellenkalkulation exportiert werden. Alternativ ist auch die Demonstration der Bewegung mit Hilfe eines Lichtzeigers möglich.

Dank der kurzen Schwingungsdauer von 2 – 4 min (abhängig von der Länge des Wolframdrahts) lässt sich die Gravitationskonstante innerhalb einer Unterrichtsstunde mit einer Genauigkeit besser als 10% bestimmen.

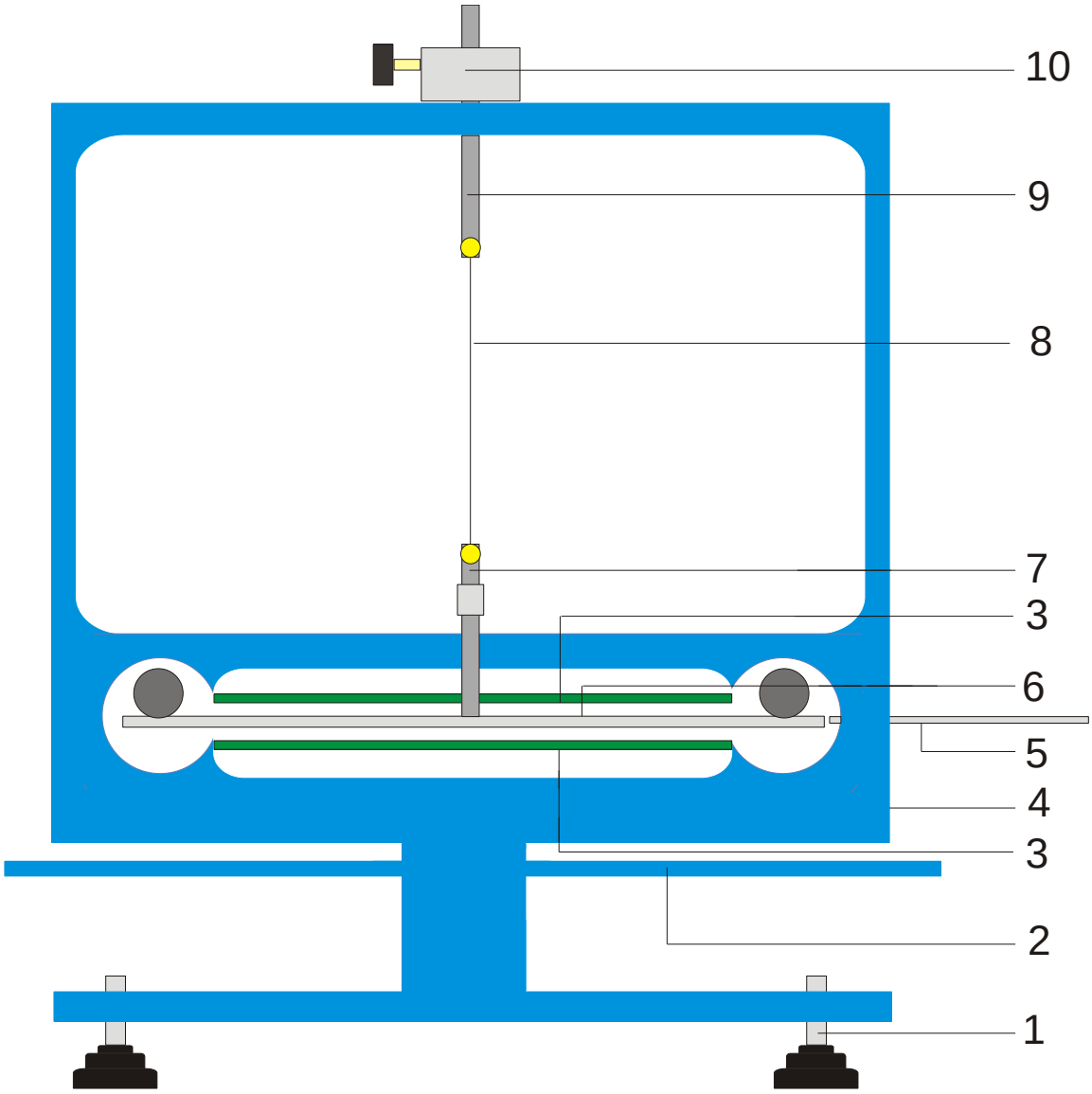

Fig. 1 Komponenten der Cavendish-Drehwaage

1 Stellfüße, 2 äußerer Tragebalken für große Bleikugeln, 3 kapazitiver Differentialsensor, 4 USB-Anschluss, 5 Zentrierstab, 6 innerer Tragebalken mit zwei kleinen Bleikugeln, 7 untere Aufhängung mit Spiegel, 8 Wolframfaden, 9 obere Aufhängung, 10 drehbare Halterung mit Winkelskala

2. Lieferumfang

1 Gehäuse mit Glasscheiben
1 Rolle mit Wolframdraht
1 untere Aufhängung mit Spiegel
1 obere Aufhängung
1 innerer Tragebalken
1 Zentrierstab
1 Aluminiumstab mit Gewinde
2 kleine Bleikugeln
2 große Bleikugeln
1 Messsoftware
1 USB-Kabel

3. Technische Daten

Masse große Bleikugeln:	je ca. 1 kg
Masse kleine Bleikugeln:	je ca. 15 g
Gravitationskraft:	$< 10^{-9}$ N
Torsionsdraht:	Wolfram, 25 µm
Schwingungsdauer:	2 – 4 min
Winkelauflösung:	25 µrad
Abtastrate:	0,5, 1, 2, 5, 10 Samples/s
Abmessungen:	ca. 190x180x200 mm³
Masse:	ca. 5 kg

4. Bedienung

4.1 Sicherheitshinweise

Der Diodenlaser (1003201) genügt den sicherheitstechnischen Anforderungen für Laser der Klasse II. Bei sachgemäßem Gebrauch ist das Experimentieren mit dem Diodenlaser ungefährlich.

- Hinweise in der Bedienungsanleitung des Lasers befolgen.
- Nicht in den direkten oder reflektierten Laserstrahl blicken.
- Überschreiten der Blendungsgrenze vermeiden, d.h. kein Beobachter darf sich geblendet fühlen.

4.2 Hinweis zum Experimentierort

Der kapazitive Differentialsensor unterdrückt Rausch- und Vibrationsanteile im Signal weitgehend. Dennoch ist es notwendig einen erschütterungsfreien Arbeitsplatz zu wählen. Starke Erschütterungen (z.B. Türeschlagen) können nicht unterdrückt werden und verfälschen das Signal.

4.3 Installation der Software und Anschluss an den Computer

Bevor das Gerät einsatzbereit ist, muss die Software installiert und das Gerät an einen PC oder ein Notebook angeschlossen werden.

- Software CD ins CD-Laufwerk des Computers einlegen.
- Windows Explorer öffnen und zum CD-Laufwerk navigieren. Zum Starten des Installationsprogramms auf „setup.exe“ doppelklicken. Den Anweisungen des Installationsassisten folgen.
- Drehwaage mit dem USB-Kabel an den Computer anschließen.
- Programm starten.

Wenn die Installation richtig durchgeführt wurde, erscheint ein Wert in mrad in der linken, oberen Ecke des Fensters.

Eine detaillierte Beschreibung der Software befindet sich unter Punkt 5.

4.4 Messbereichseinstellung

- Glasscheiben aus dem Gehäuse nehmen.
- Aluminiumstab mit Gewinde mittig auf den inneren Tragebalken schrauben. Dann in das Gehäuse der Drehwaage einbauen und so ausrichten, dass sich der Tragebalken mittig zwischen den beiden Sensorplatinen befindet.
- Glasscheiben einsetzen. Drehwaage an Computer anschließen und Software starten. In der Software „Setup“ Button anklicken.
- Tragebalken mittels der Halterung gegen den Uhrzeigersinn verdrehen, bis er die Glasscheibe berührt.
- Button „Adjust left border“ drücken, mit „OK“ bestätigen und so die untere Grenze des Messbereichs definieren.
- Tragebalken nun im Uhrzeigersinn drehen, bis er wieder die Glasscheibe berührt. Jetzt den Button „Adjust right border“ drücken, mit „OK“ bestätigen und so die obere Grenze des Messbereichs festlegen.

Der Tragebalken wurde mit Nasen an den Enden entworfen, so dass er immer in einem linearen Bereich der Kondensatorplatten schwingt.

Die Messsoftware erfasst alle Messwerte zwischen +60 und -60 mrad, der Tragebalken schwingt dagegen während des Experiments im Normalfall nur wenige mrad.

Figur 2 zeigt die Abmessungen des inneren Tragebalkens. Aus diesen Abmessungen lässt sich leicht der maximale Winkel berechnen.

$$\alpha = \frac{(30-18{,}7)}{2} \div \frac{150}{2} = 75 \text{ mrad}$$

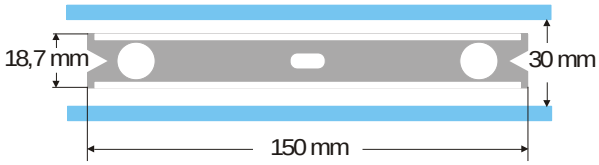

Fig. 2 Abmessungen des inneren Tragebalkens

4.5 Zusammenbau des Torsionspendels

Hinweis: Der Zusammenbau des Torsionspendels ist eine diffizile Angelegenheit, die eine ruhige Hand und gutes Sehvermögen erfordert. Der Wolframdraht ist sehr dünn und reißempfindlich und muss deshalb mit besonderer Vorsicht gehandhabt werden. Damit der Draht gut sichtbar ist, empfiehlt es sich, den Zusammenbau des Torsionspendels auf weißem Papier durchzuführen.

- Drehwaage auf einen erschütterungsfreien Arbeitstisch platzieren und waagrecht ausrichten.
- Untere Aufhängung mittig auf den inneren Tragebalken schrauben. Dabei darauf achten, dass die Spiegeloberfläche parallel zum Tragebalken ist (siehe Fig. 3).
- Mit einem kleinen Schraubendreher die Fixierschrauben an den beiden Aufhängungen lösen.
- Obere Aufhängung mit einem Stück Klebestreifen auf einem weißen Blatt Papier fixieren, so dass sie nicht weg rollen kann.
- Ca. 8 cm bis 10 cm Wolframdraht von der Rolle abwickeln, aber noch nicht abschneiden.

- Das Ende des Drahtes neben der oberen Aufhängung mit einem Stück Klebeband auf dem Papier fixieren. Nun den Draht um die Fixierschraube legen und die Schraube festdrehen. Dabei darauf achten, dass der Draht nicht geknickt wird. Der Draht sollte möglichst mittig zwischen den beiden Aufhängungen verlaufen (siehe Fig. 3).
- Dann die untere Aufhängung ca. 4 cm bis 5 cm unterhalb der oberen Aufhängung auf dem Papier platzieren. Den Draht unter leichtem Zug um die Fixierschraube führen und die Schraube festziehen.
- Jetzt den Draht an der Rolle abschneiden.
- Torsionspendel vorsichtig an der oberen Aufhängung an einem Stativ aufhängen und die waagrechte Ausrichtung des Tragebalkens überprüfen.
- Zum waagrechten Ausrichten des Tragebalkens das Torsionspendel wieder vom Stativ nehmen und vorsichtig auf den Tisch legen. Die Schraube an der unteren Aufhängung lösen, die Aufhängung mit einer Hand festhalten und den Tragebalken entsprechend verschieben. Schraube wieder festziehen und Ausrichtung überprüfen.
- Das ausgerichtete Torsionspendel vorsichtig in das Gehäuse einsetzen. Dazu Tragebalken auf die untere, grüne Sensorplatine aufsetzen und obere Aufhängung durch die Bohrung im Gehäuse führen.
- Höhe mittels der Feststellschraube so justieren, dass der Tragebalken frei zwischen den Sensorplatinen schwingen kann. Die Feststellschraube muss dabei auf die flache Seite der Aufhängung drücken.
- Wenn das Pendel nicht frei schwingt, oben beschriebene Prozedur zur Positionierung der Aufhängung auf dem Tragebalken wiederholen. Mittels der Stellfüße ist eine weitere Korrektur möglich.
- Kleine Bleikugel auf den inneren Tragebalken platzieren und Glasscheiben einsetzen.

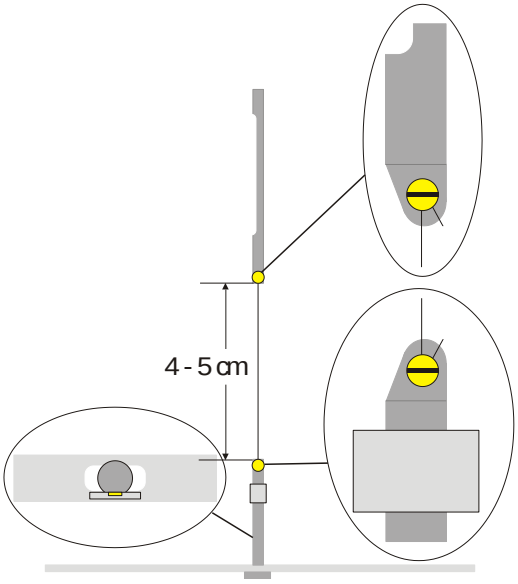

Fig. 3 Schematische Darstellung des Torsionspendels (Ausschnitt links: Tragebalken mit unterer Aufhängung von oben)

4.6 Nullpunkteinstellung

Zur Nullpunkteinstellung ist folgender Laser als Lichtzeiger empfehlenswert:

Diodenlaser, rot 650 nm 1003201

- Drehwaage auf einem erschütterungsfreien Arbeitstisch etwa 2 m bis 3 m gegenüber einer flachen Wand aufbauen und mit dem Computer verbinden (siehe Fig. 5).
- Laser so aufbauen, dass der Strahl auf der gleichen Höhe liegt wie der Spiegel an der unteren Aufhängung.
- Lichtzeiger auf der Wand beobachten.
- Abwarten, bis die Schwingungen des Torsionspendels zur Ruhe gekommen sind.
- Durch Drehen der Halterung für die obere Aufhängung den Tragebalken in kleinen Winkelschritten auslenken, bis der Tragebalken an die Glasscheiben stößt. Als Hilfsmittel dient eine Skala mit 45°

Graduierung, die auf dem Gehäuse um die Halterung angebracht ist (siehe Fig. 4).

- Die Bewegung des Lichtzeigers beobachten und auf einem Stück Papier an der Wand die maximalen Auslenkungen nach rechts und links markieren.
- Aus den Markierungen der maximalen Auslenkung die Mittellage bestimmen und ebenfalls an der Wand markieren.
- Tragebalken durch Drehen der Halterung in diese Mittelstellung bringen und abwarten bis das Pendel dort zur Ruhe gekommen ist. Alternativ den Tragebalken mit dem Zentrierstab in der Mittelstellung fixieren.
- Diese Position als Nulllage in der Software definieren.
- Für die weitere Durchführung experimentellen Aufbau so beibehalten.

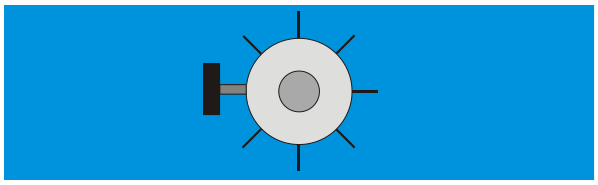

Fig. 4 Halterung des Torsionspendels mit Skalierung von oben betrachtet

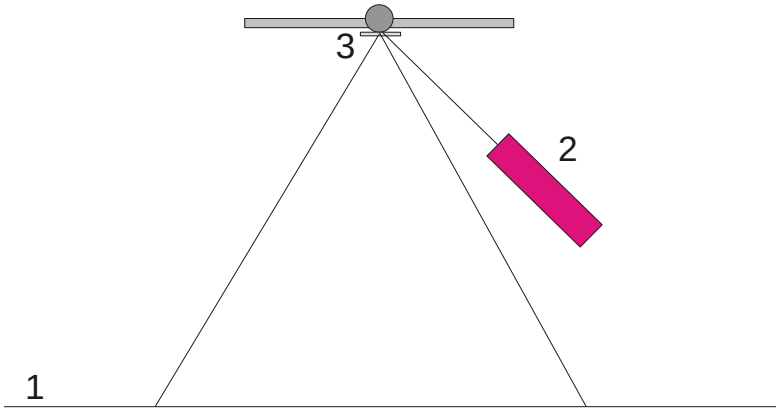

Fig. 5 Aufbau des Lichtzeigers zur Nullpunkteinstellung (1 Wand, 2 Laser, 3 Spiegel)

4.7 Durchführung des Experiments

- Große Bleikugeln auf den äußeren Tragebalken in Position 1 legen (sieh Fig. 6) und abwarten, bis die Schwingungen zur Ruhe gekommen sind (Beobachtung des Lichtzeigers). Gegebenenfalls Nullpunkt kalibrieren.
- Äußeren Tragebalken in Position 2 schwenken und Messung starten.
- Wenn die kleinen Kugeln ihre Gleichgewichtslage nahezu erreicht haben, äußeren Tragebalken in Position 3 schwenken.
- Haben die kleinen Kugeln ihre neue Gleichgewichtslage nahezu erreicht, Messung stoppen.
- Messkurve abspeichern.

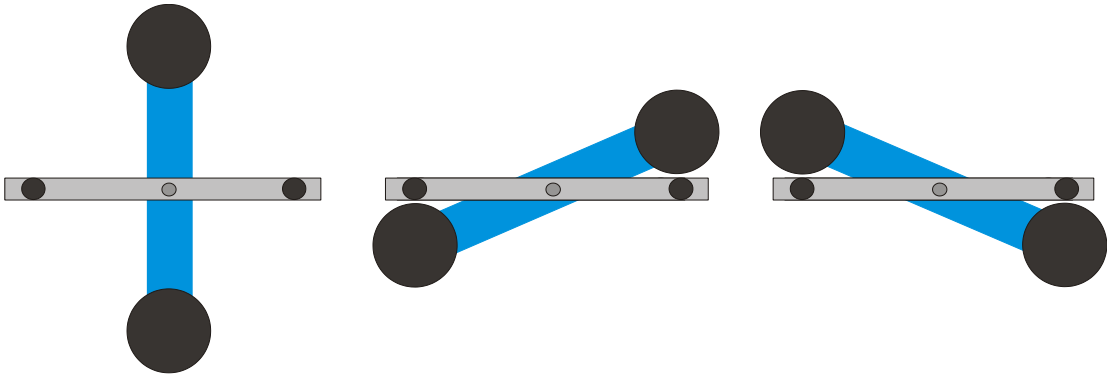

Fig. 6 Positionen des äußeren Tragebalkens (Ansicht von oben) links: Position 1, Mitte: Position 2, rechts: Position 3

4.8 Auswertung

4.8.1 Bestimmung der Gleichgewichtslage

- Aus den ersten fünf Endausschlägen nach dem Umschwenken des äußeren Tragebalkens in Position 2 lässt sich die Gleichgewichtslage α_1 gemäß

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\alpha^{(1)} + \alpha^{(3)} + \alpha^{(5)}}{3} + \frac{\alpha^{(2)} + \alpha^{(4)}}{2} \right)$$

  berechnen.
- Dazu mit dem Cursor auf die Maxima und Minima der Kurve gehen und die Werte im Feld „Data“ der Informationsleiste ablesen (siehe Fig. 7).

Alternativ können die Werte auch einer Excel-Liste entnommen werden, wenn die Daten in einem Spreadsheet gespeichert wurden.

- Analog die die neue Gleichgewichtslage α_2 nach dem erneuten Umschwenken in Position 3 berechnen.

4.8.2 Bestimmung der Gravitationskonstante *G*

m =Masse der kleinen Kugeln

r = Abstand der Kugeln zur Drehachse

M = Masse der großen Kugeln

M_B = Masse des innerenTragebalkens

L_B = Länge des innerenTragebalkens

W_B = Breite des innerenTragebalkens

b = Abstand zwischen kleiner und großer Kugel

T = Schwingungsdauer

k = Winkelrichtgröße

$\Delta\alpha$ = Differenz der Gleichgewichtslagen $\alpha 1 - \alpha 2$

Das Trägheitsmoment des Torsionspendels J_{tot} ergibt sich aus der Summe der Trägheitsmomente der kleinen Kugeln *J* und des inneren Tragebalkens J_B.

$$J = 2 \cdot m \cdot r^2$$

$$J_B = \frac{1}{12} \cdot M_B \cdot \left(L_B^2 + W_B^2 \right)$$

$$J_{tot} = J + J_B$$

$$\tau = k \cdot \Delta\alpha$$

$$k = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot J_{tot}$$

$$\tau = G \cdot 2 \frac{m \cdot M \cdot r}{b^2} \cdot \left(1 - \left(\frac{b}{\sqrt{b^2 + 4r^2}} \right)^3 \right)$$

Durch Einsetzen und Umformen der Gleichung ergibt sich die gesuchte Größe *G*.

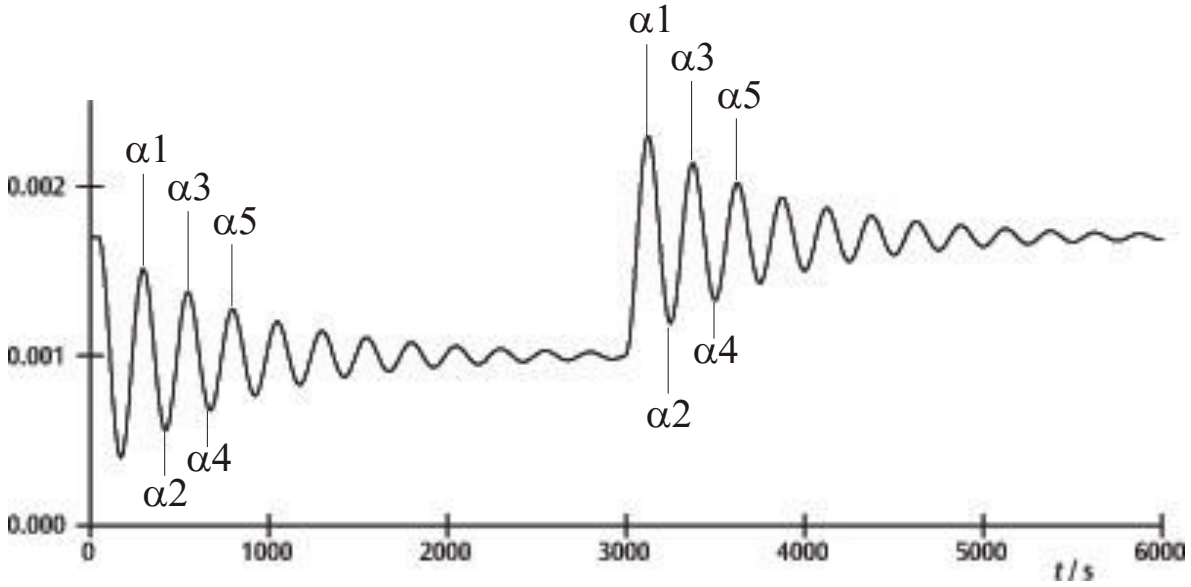

Fig. 7 Bestimmung der Gleichgewichtslagen

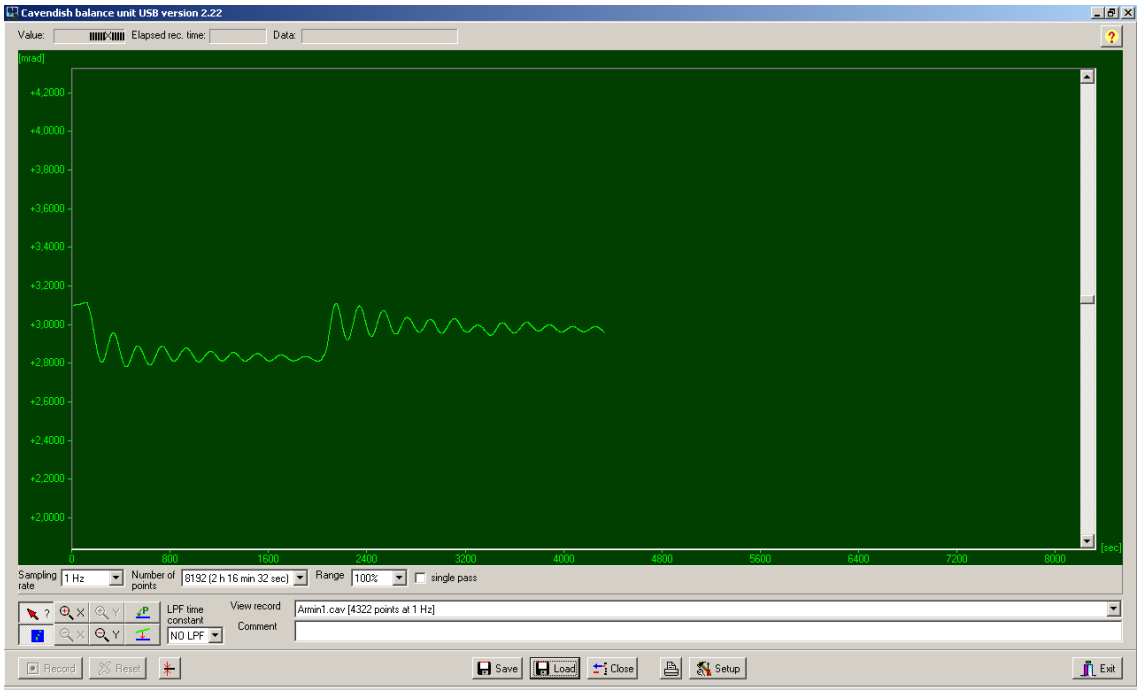

Fig. 8 Beispiel einer Messkurve

5. Beschreibung der Software

5.1 Informationsleiste

Die Informationsleiste am oberen Rand des Fensters enthält drei Felder. Das „Value“ Feld zeigt den aktuellen Messwert der Drehwaage an. Im „Elapsed Time“ Feld wird die Zeit angezeigt, die das Experiment schon läuft und im Feld „Data“ werden die Daten jeden Punktes der Messkurve angegeben, wenn der Cursor über den Graph bewegt wird.

5.2 „View Record“ Leiste

Rechts unter dem Diagrammfenster befindet sich die „View Record“ Leiste, in der folgende Informationen angezeigt werden: die Messrate, der Messmodus „Single pass“ (Einzelmessung) oder „Continuous“ (Dauermessung) und ob die Messung in Echtzeit erfolgt oder ein Datensatz geladen wurde.

5.3 Kommentar-Leiste

Die Kommentar-Leiste befindet sich direkt unter der „View Record“ Leiste. In ihr können Kommentare zum Experiment eingetragen werden.

5.4 Werkzeug-Leiste

Die Werkzeug-Leiste links unter dem Diagrammfenster ermöglicht die Auswahl der Messwerterfassungsparameter. Im „Sampling Rate” Feld sind 5 verschiedene Messraten wählbar. Das Feld „Number of Points” stellt 7 „Datenbreiten” von 512 bis 32768 Punkten mit bis zu über 19 Stunden Aufnahmezeit zur Verfügung. Das Feld „Range“ gibt die Auswahlmöglichkeit zwischen 6 verschiedenen Skalierungen der y-Achse. Bei Aktivierung der Option „Single Pass“ stoppt die „Datenaufnahme“ nach einem Durchlauf. Wird diese Option nicht aktiviert, so verläuft die Datenerfassung durchgehend.

Links unter der Werkzeug-Leiste sind 8 Buttons in 2 Reihen angeordnet. In der oberen Reihe links ist der „Examine Data“ Button. Durch Wahl diese Buttons wird ein Winkel und die Zeit in der Informations-Leiste sichtbar gemacht. Falls das Fadenkreuz verschwindet, kann es durch Klicken dieses Buttons wieder sichtbar gemacht werden.

Sowohl die x- als auch die y-Achse können durch Aktivierung des +Zoom-Buttons und linken Mausklick in das aktive Fenster vergrößert werden. Aktivierung des -Zoom-Buttons und linker Mausklick in das aktive Fenster stellt die ursprüngliche Größe wieder her. Die maximale Vergrößerung beträgt 512 Punkte in der Zeit mal ca. 1,5 mrad.

Durch Aktivieren des Buttons „Connect Data“ werden die einzelnen Messpunkte durch eine Linie miteinander verbunden.

Rechts untereinander befinden sich die beiden Buttons „Select Points“ und „Apply Corrections“. Mit dem Button „Select Points“ können 1, 2 oder 3 Punkte auf dem Graph ausgewählt werden, um einen Offset, eine lineare Funktion oder eine quadratische Kurve zu definieren. Diese können dann bei Langzeitmessungen zur Korrektur einer Drift benutzt werden. Änderungen in der Luftfeuchtigkeit haben sich als Hauptgrund für

solche Drifts erwiesen. Um Punkte auszuwählen den Button „Select Points“ drücken und dann in das Diagrammfenster klicken und aus dem Aufklappmenü P1 aktivieren. Dann den ersten Punkt für die Drift-Korrektur wählen. Die Prozedur für die nächsten beiden Punkte P2 und P3 wiederholen.

Zur Durchführung der Korrektur den Button „Apply Corrections“ drücken. Bei Unzufriedenheit mit der Korrektur stehen zwei Methoden zur Anpassung bereit. Bei der ersten Methode den Button „Apply Corrections“ durch erneutes Drücken deaktivieren. Dann erneut Punkte auswählen und den ganzen Vorgang wiederholen. Die zweite Methode die Korrektur anzupassen beinhaltet eine direkte Veränderung der Funktionskoeffizienten. Dazu in das Diagrammfenster klicken und „set coef.“ im Aufklappmenü wählen. Neue Werte für A, B und C können jetzt eingegeben werden. Auf „OK“ klicken und dann nochmals in das Diagrammfenster klicken. Dann auf „Manual Coefficients OFF“ klicken um die Funktion „Manual Coefficients On“ zu starten und die Korrektur mit den eingegebenen Werten zu sehen. Die Koeffizienten können beliebig oft geändert werden, bis die Anpassung zufriedenstellend ist.

5.5 Low Pass Filter

Das Feld „LPF Time Constant“ erlaubt dem Benutzer aus 12 verschiedenen Tiefpassfiltern oder keinem zu wählen. Nur in Ausnahmefällen wird diese Funktion gebraucht. Alle Experimente sollten mit der Option „No LPF“ gestartet werden. Wenn der innere Tragebalken signifikant andere Bewegungen als Drehbewegungen ausführt, verhindert die Gleichtaktunterdrückung, dass diese Bewegungen aufgezeichnet werden. Falls dies nicht der Fall sein sollte, kann der Einsatz des Low Pass Filters hilfreich sein.

5.6 „Reset“ Button

Nach erfolgter Messreihe können die Messwert-erfassungsparameter wie Messrate, Anzahl der Messpunkte, Messmodus etc. verändert werden. Durch Klicken des „Reset“ Buttons werden diese Veränderungen aktiviert.

5.7 „Record“ Button

Drücken des „Record“ Buttons startet eine Messreihe. Der Button wird nun zum „Stop“ Button mit dem die Messreihe manuell gestoppt werden kann. Bei Beendung einer Messreihe, sei es manuell oder automatisch, erscheint eine Meldung, die fragt, ob die Daten gespeichert werden sollen.

5.8 Speichern und Hochladen

Daten werden durch Anklicken des Buttons „Save“ gespeichert. Das Standard-Format ist *.cav. Zwei weitere Formate (*.txt und *.xls) stehen zur weiteren Analyse der Daten in einem Spreadsheet zur Verfügung.

Der „Load“ Button ermöglicht das Hochladen von früher aufgezeichneten Daten.

Das Programm legt nach 2 Minuten Datenerfassung eine Datei temp.cav an. Danach wird die Messung in diesem temporären Ordner abgespeichert, so dass z.B. bei einem Stromausfall die Daten nicht verloren gehen und bis zum Zeitpunkt des Stromausfalls wieder hergestellt können. Diese Datei wird bei jedem Neustart einer Messreihe überschrieben.

5.9 Drucken

Durch Wahl des Buttons „Print“ können die Daten ausgedruckt werden. Neben dem Graph werden die Erfassungsrate, die Anzahl der Messpunkte und der Dateiname gedruckt. Kommentare aus dem Kommentarfeld können dem Ausdruck hinzugefügt werden, wenn diese Option gewählt wird.

5.10„Setup“ Button

Mit diesem Button werden die Min./Max.-Grenzen des Messbereichs der Drehwaage festgelegt.

„Y minimum” und „Y maximum” definieren den gesamten Bereich der Drehwaage. Durch Veränderung dieser Werte kann die Auslesung der Drehwaage angepasst werden. Die Buttons „Adjust left border“ und „Adjust right border“ passen die Anzeige so an, dass die Position des Tragebalkens mit dem oberen (adjust right border) bzw. unteren Rand (adjust left border) des Diagrammfensters übereinstimmen.

5.11Nullpunktkalibrierung

Der Button direkt rechts neben dem „Reset“ Button legt den Nullpunkt des Tragebalkens fest. Der Nullpunkt der Schwingung des Tragebalkens liegt an dem Punkt, an dem der Button gedrückt wird. Um den Nullpunkt festzulegen, wird der Tragebalken in die Mitte unter den Sensorplatinen gebracht, dort temporär mit dem Zentrierstab fixiert und dann der Button gedrückt. Das geometrische Zentrum der Platinen ist damit als Nullpunkt definiert und die Abweichung von dieser Linie nach beiden Seiten wird in mrad angezeigt.

5.12„Exit“ Button

Das Programm wird durch Druck auf den Button „Exit“ geschlossen.

© Copyright 2018 3B Scientific GmbH