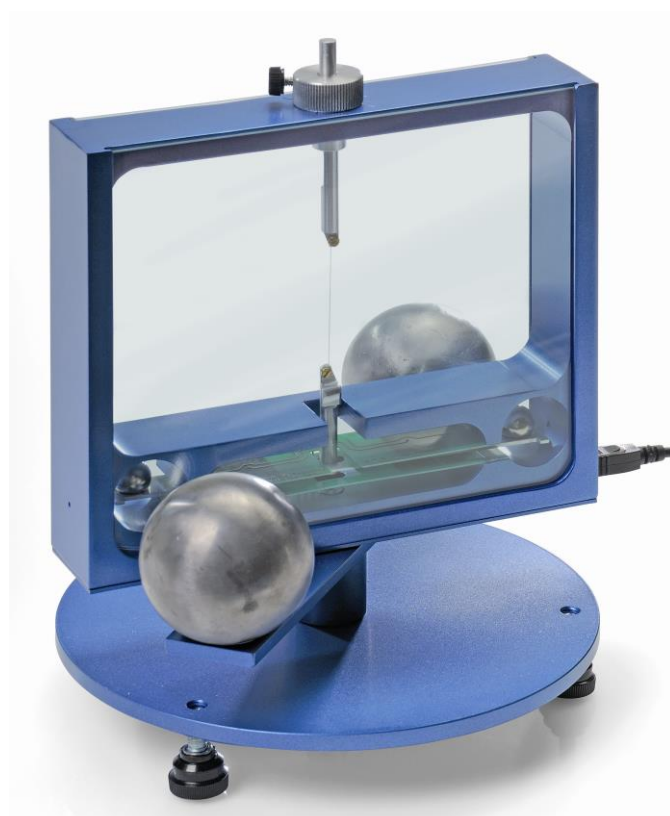


Balanza de torsión de Cavendish 1003337

Instrucciones de uso

06/18 ALF



1. Descripción

La balanza de torsión de Cavendish sirve para la comprobación de la fuerza gravitacional entre dos masas y para medir la constante gravitacional G .

La unidad central de la balanza es un péndulo de torsión compuesto de un travesaño soporte con dos esferas de plomo pequeñas el cual está colgando horizontalmente de un hilo delgado de tungsteno. La posición de reposo del péndulo está influida por las fuerzas de atracción de dos esferas de plomo grandes sobre las dos pequeñas. Después de girar las esferas grandes a una nueva posición, el péndulo de torsión oscila alrededor de una nueva posición de reposo. El movimiento de torsión se mide por

medio de un sensor diferencial capacitivo, el cual atenúa casi totalmente las componentes parásitas de vibración y ruido sobre la señal y se registra luego en un computador. Para una evaluación adicional, los datos se pueden exportar hacia un programa de cálculo. Alternativamente también es posible demostrar el movimiento oscilatorio del péndulo por medio de un índice óptico sobre una pared.

Gracias al período tan corto de 2 a 4 minutos (dependiendo de la posición del hilo de tungsteno) es posible determinar la constante gravitacional G dentro de marco de una hora de clase, con un margen de error menor que 10%.

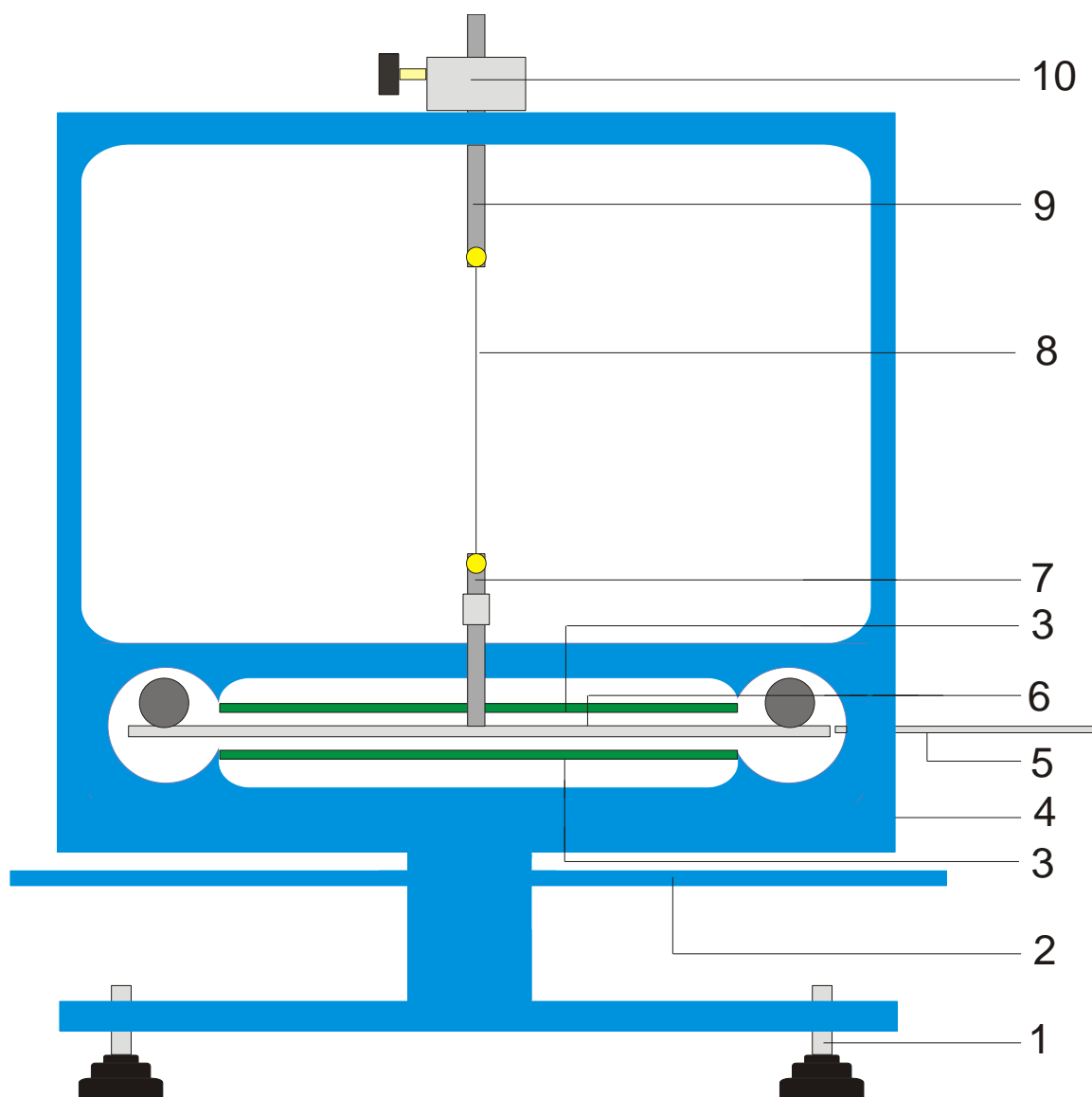


Fig. 1 Componentes de la balanza de torsión de Cavendish

1 Pedestal, 2 Travesaño externo para las esferas de plomo grandes, 3 Sensor diferencial capacitivo, 4 Conector USB, 5 Barra de centrado, 6 Travesaño interno con dos esferas de plomo pequeñas, 7 Suspensión inferior con espejo, 8 Hilo de tungsteno, 9 Suspensión superior, 10 Soporte giratorio con escala angular.

2. Volumen de suministro

- 1 Carcasa con lunas de vidrio
- 1 Rollo de hilo de tungsteno
- 1 Suspensión inferior con espejo
- 1 Suspensión superior
- 1 Travesaño interno
- 1 Barra de centrado
- 1 Barra de aluminio con rosca
- 2 Esferas de plomo pequeñas
- 2 Esferas de plomo grandes
- 1 Software de medición
- 1 Cable USB

3. Datos técnicos

- Masa de las esferas grandes: c/u aprox. 1 kg
- Masa de las esferas pequeñas: c/u aprox. 15 g
- Fuerza gravitacional: $< 10^{-9}$ N
- Hilo de torsión: Tungsteno, 25 μ m
- Período: 2 – 4 min
- Resolución angular: 25 μ rad
- Velocidad de muestreo: 0,5, 1, 2, 5, 10 Muestras/s
- Dimensiones: aprox. 190x180x200 mm
- Masa: aprox. 5 kg

4. Manejo

4.1 Advertencias de seguridad

El diodo láser (1003201) cumple las exigencias técnicas de seguridad referentes a los láseres de la clase II. La experimentación con el diodo láser no trae ningún peligro siempre y cuando se utilice éste apropiadamente según su uso específico.

- Siga las advertencias en las instrucciones de uso del láser.
- Nunca mire directamente en el rayo láser ni en sus reflexiones.
- Evite sobrepasar el límite de deslumbramiento o encandilamiento, es decir, ningún observador debe sentirse deslumbrado por el rayo láser.

4.2 Advertencia sobre el lugar de experimentación

El sensor diferencial capacitivo suprime casi totalmente componentes parásitas de ruido y vibración en la señal. Sin embargo es necesario buscar un puesto de trabajo libre de choques o sacudidas. Sacudidas fuertes (p.ej. el golpe de cierre fuerte de una puerta) no se pueden suprimir y falsifican la señal.

4.3 Instalación del Software, conexión con el computador

Antes de que el aparato esté listo a funcionar, es necesario instalar el software y se debe conectar el aparato a un PC o a un Notebook.

- El CD del software se inserta en la unidad para CDs del PC.
- Se abre el Explorador de Windows y se navega hacia la unidad de CDs. Para iniciar el programa de instalación se hace un clic doble sobre "setup.exe". Se siguen ahora las instrucciones el asistente de instalación.
- Se enlaza la balanza de torsión con el computador por medio del cable USB.
- Se inicia el programa.

Si la instalación ha sido realizada correctamente, aparece un valor en mrad en la esquina superior izquierda de la ventana.

Una descripción detallada del software se encuentra bajo el punto 5.

4.4 Ajuste del alcance de medida

- Se retiran las lunas de vidrio de la carcasa.
- Se atornilla la barra de aluminio con rosca centralmente en el travesaño interno. Luego se introduce en la carcasa de la balanza de torsión y se orienta de tal forma que el travesaño se encuentre en el centro entre las dos platinas del sensor.

- Se colocan nuevamente las lunas de vidrio en su sitio. Se enlaza la balanza de torsión con el computador y se inicia el software. En el software se pulsa el botón "Setup".
- Por medio del soporte se gira el travesaño en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta que toque la luna de vidrio.
- Se pulsa el botón "Adjust left border", se confirma con "OK" y así se define el límite inferior del alcance de medida.
- Ahora se gira el travesaño en sentido de las manecillas del reloj hasta que vuelva a tocar la luna de vidrio. Ahora se pulsa el botón "Adjust right border", se confirma con "OK" y así se define el límite superior del alcance de medida.

El travesaño se ha diseñado con topes en los extremos, así que siempre oscile en la zona lineal de las placas del condensador.

El software de medida capta todos los valores de medida entre +60 y -60 mrad, pero sin embargo, durante el experimento, en caso normal, el travesaño oscila sólo unos pocos mrad.

La Fig. 2 muestra las dimensiones del travesaño interno. A partir de estas dimensiones se puede calcular fácilmente el ángulo máximo.

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

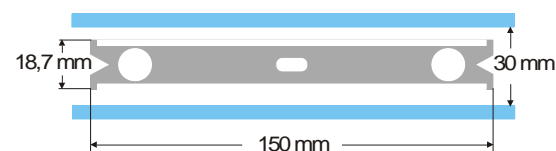


Fig.

Fig. 2 Dimensiones del travesaño interno

4.5 Ensamblaje del péndulo de torsión

Advertencia: El ensamblaje del péndulo de torsión es una operación de cuidado, que exige una mano tranquila y un buen ojo. El hilo de tungsteno es muy delgado y muy sensible a romperse y por lo tanto debe ser tratado con sumo cuidado. Para que el hilo se pueda ver bien, se aconseja realizar el ensamblaje del péndulo de torsión sobre una hoja de papel blanco.

- Se coloca la balanza de torsión sobre una mesa de trabajo libre de sacudidas y se orienta horizontalmente.
- La suspensión inferior se atornilla en el centro del travesaño, teniendo en cuenta que la superficie del espejo quede paralela al travesaño (ver Fig. 3).
- Con un destornillador pequeño se aflojan los tornillos de fijación de ambas suspensiones.
- Se fija la suspensión superior sobre una hoja de papel blanco, utilizando un pedazo de cinta adhesiva, para que no se pueda rodar.

- Se desenrollan de 8 a 10 cm de hilo de tungsteno del rollo, pero todavía no se corta.
- Se fija sobre el papel el extremo del hilo junto a la suspensión superior, utilizando un pedazo de cinta adhesiva. Ahora se coloca el hilo alrededor de los tornillos de fijación y se atornillan los tornillos, teniendo en cuenta que el hilo no se doble. El hilo debe, en lo posible, quedar centrado entre las dos suspensiones (ver Fig. 3).
- Ahora se coloca sobre el papel la suspensión inferior, a unos 4 a 5 cm por debajo de la suspensión superior. Se tira del hilo levemente alrededor de los tornillos de fijación y luego se aprietan los mismos.
- Ahora se corta el hilo del rollo.
- Con mucho cuidado se cuelga el péndulo de torsión en un soporte tomándolo de la suspensión superior y se comprueba la orientación horizontal del travesaño.
- Para orientar horizontalmente el péndulo de torsión, se toma nuevamente del soporte y se coloca con cuidado sobre la mesa. Se afloja el tornillo en la suspensión inferior, se sujeta con una mano y se desplaza el travesaño correspondientemente. Se vuelve a apretar el tornillo y se comprueba la horizontalidad.
- El péndulo de torsión bien orientado se introduce en la carcasa. Para ello se pone el travesaño sobre la platina verde inferior del sensor y se introduce la suspensión superior en la carcasa a través del orificio.
- La altura se ajusta por medio del tornillo de fijación de tal forma que el travesaño pueda oscilar libremente en el centro entre las platinas del sensor, dejando que el tornillo de fijación presione sobre el lado plano de la suspensión.
- Cuando el péndulo no oscila libremente, se repite el procedimiento descrito arriba para el posicionamiento de la suspensión. Es también posible una corrección por medio del pedestal.
- Se colocan las esferas de plomo pequeñas sobre el travesaño y se colocan las lunas de vidrio en su sitio.

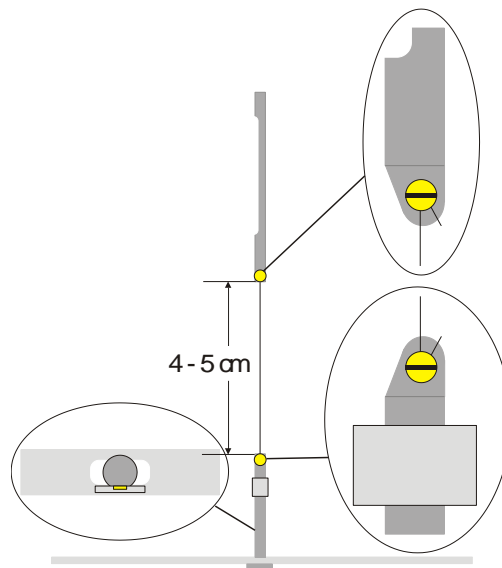


Fig. 3 Representación esquemática del péndulo de torsión (Detalle a la izquierda: Travesaño con la suspensión inferior, visto por encima)

4.6 Ajuste del punto cero

Para el ajuste del punto cero se recomienda el siguiente láser como índice óptico:

Diodo láser, rojo 650nm 1003201

- Se monta la balanza de torsión sobre una mesa de trabajo libre de sacudidas a unos 2 ó 3 m de una pared plana y se enlaza con el computador (ver Fig. 5).
- El láser se monta de tal forma que el rayo quede a la misma altura del espejo en la suspensión inferior.
- Se observa el índice óptico sobre la pared.
- Se espera hasta que las oscilaciones del péndulo de torsión lleguen al reposo.
- Girando el soporte para la suspensión superior se desvía el travesaño en pequeños pasos angulares hasta que el travesaño entre en

contacto con la luna de vidrio. Como medio auxiliar sirve la escala con graduaciones de 45°, la cual se encuentra impresa en la carcasa alrededor del soporte (ver Fig. 4).

- Se observa el movimiento del índice óptico y se marcan las desviaciones máximas hacia la derecha y la izquierda con un trozo de papel sobre la pared.
- Partiendo de las máximas desviaciones hacia la izquierda y la derecha se marca también la posición media en la pared.
- Girando el soporte se lleva el travesaño a esta posición media y se espera hasta que el péndulo allí entre en reposo. Alternativamente se fija el travesaño en esa posición media utilizando la barra de centrado.

- Esta posición se define en el software como posición cero.
- Para proseguir con la realización del montaje experimental se mantiene esta posición.

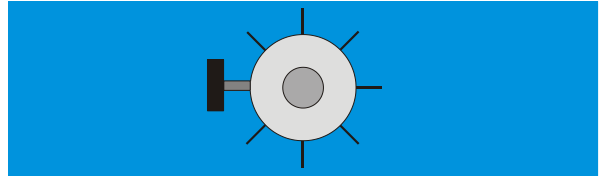


Fig. 4 Soporte del péndulo de torsión con la graduación, visto por encima

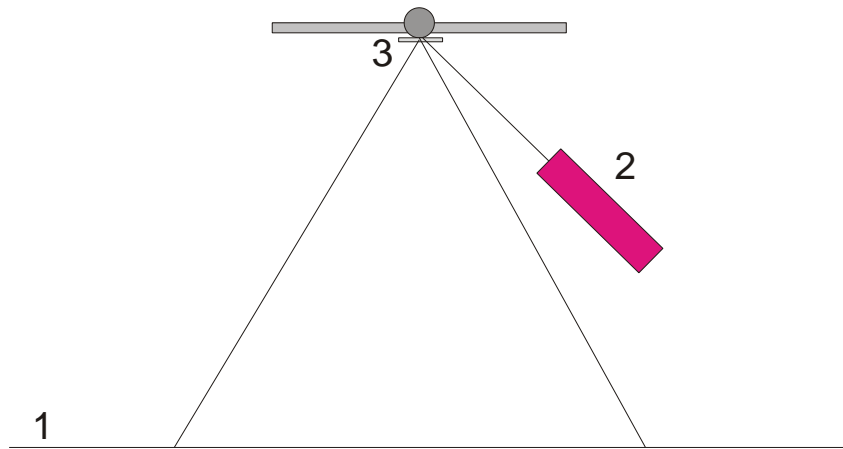


Fig. 5 Montaje del índice óptico para el ajuste de la posición cero (1 Pared, 2 Láser, 3 Espejo)

4.7 Realización del experimento

- Se colocan las esferas de plomo grandes en el travesaño externo, estando en la posición 1 (ver Fig. 6) y se espera hasta que las oscilaciones hayan llegado al reposo (Observación del índice óptico) Si es necesario se calibra el punto cero.
- Se gira el travesaño externo a la posición 2 y se inicia la medición.

- Cuando las esferas pequeñas hayan casi llegado a su posición de equilibrio se gira el travesaño externo a la posición 3.
- Cuando las esferas pequeñas hayan llegado a la nueva posición de equilibrio se detiene la medición.
- Se guarda en memoria la curva de medida.

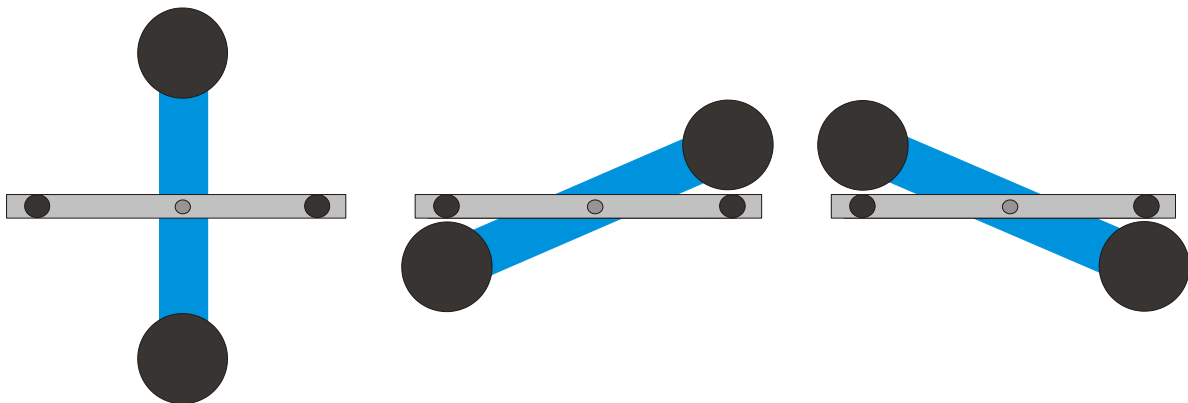


Fig. 6 Posiciones del travesaño externo (visto por encima), Izquierda: Posición 1, Centro: Posición 2, Derecha: Posición 3

4.8 Evaluación

4.8.1 Determinación de la posición de equilibrio

- De las primeras cinco desviaciones extremas del travesaño externo después del giro hasta la posición 3 se puede calcular de posición de equilibrio α_1 de acuerdo con

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

- Para ello, se coloca el cursor en los máximos y los mínimos de la curva y los valores se leen en el campo "Data" de la barra de información (ver Fig. 7).

Alternativamente se pueden tomar los valores de una lista de Excel, cuando los datos han sido guardados en un Spreadsheet.

- Análogicamente se procede al cálculo de la nueva posición de equilibrio α_2 después de haber girado a la posición 3.

4.8.2 Determinación de la constante gravitacional G

m = Masa de las esferas pequeñas

r = Distancia de las esferas al eje de rotación

M = Masa de las esferas grandes

M_B = Masa del travesaño interior

L_B = Longitud del travesaño interior

W_B = Ancho del travesaño interno

b = Distancia entre la esfera pequeña y la grande

T = Período del péndulo de torsión

k = Constante de proporcionalidad elástica

$\Delta\alpha$ = Diferencia entre las posiciones de equilibrio

$\alpha_1 - \alpha_2$

El momento de inercia del péndulo de torsión J_{ot} se obtiene de la suma de los momentos de inercia de las esferas pequeñas J y del travesaño interno J_B .

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

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

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

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

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

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

Sustituyendo y despejando en la ecuación se obtiene la magnitud G buscada.

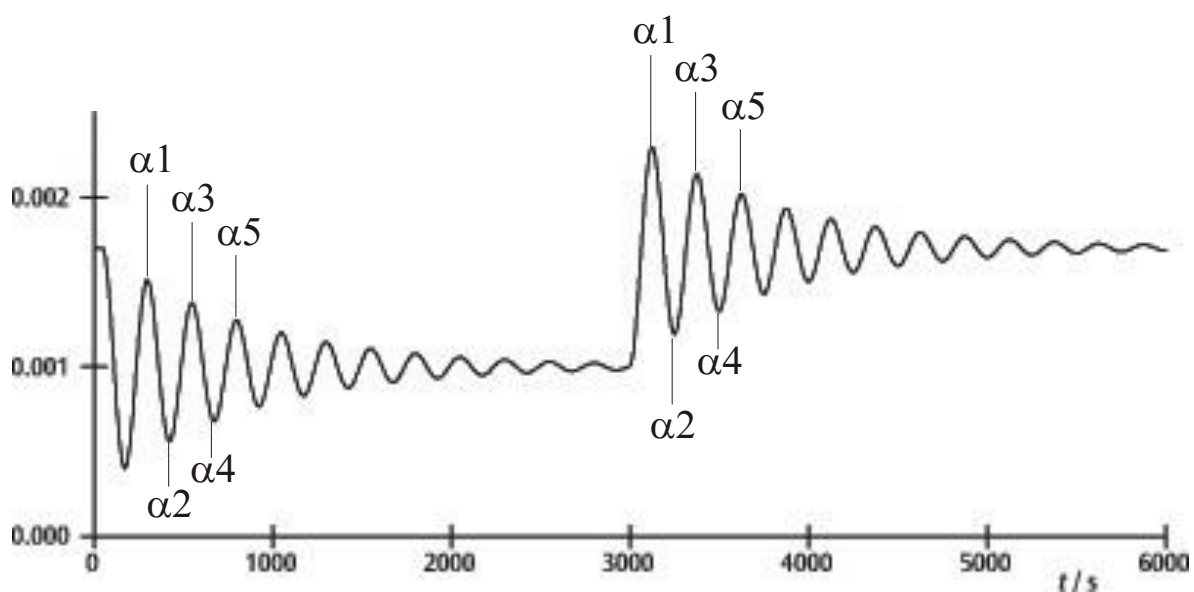


Fig. 7 Determinación de las posiciones de equilibrio

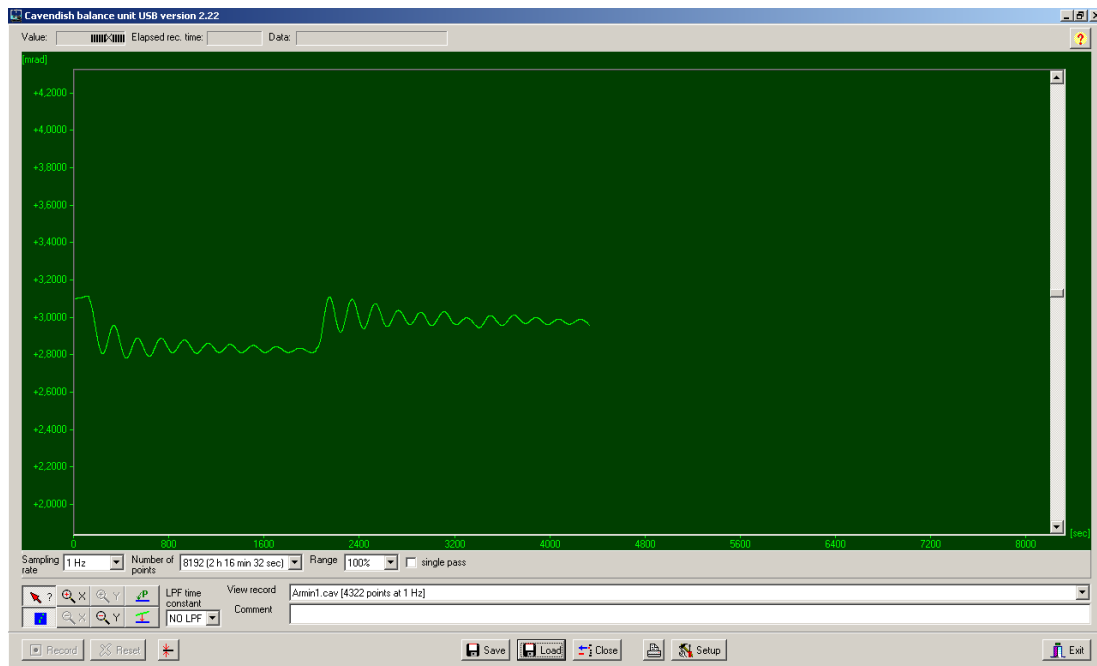


Fig. 8 Ejemplo de una curva de medida

5. Descripción del software

5.1 Barra de información

La barra de información en el borde superior de la ventana lleva tres campos. El campo "Value" indica el valor de medida actual de la balanza de torsión. En el campo "Elapsed Time" se indica el tiempo ya transcurrido en el experimento y en el campo "Data" se indican los datos de cada punto de la curva de medida, cuando el cursor se mueve sobre la gráfica.

5.2 Barra "View Record"

A la derecha debajo de la ventana del diagrama se encuentra la barra "View Record", en la cual se tiene la siguiente información: La frecuencia de muestreo, el modo de medición "Single pass" (Medición individual) o el "Continuous" (Medición permanente) y si la medición se hace en tiempo real o se carga un juego de datos ya grabado.

5.3 Barra comentario

La barra comentario se encuentra directamente debajo de la barra "View Record". En ella se pueden escribir comentarios sobre el experimento.

5.4 Barra de herramientas

La barra de herramientas a la izquierda debajo de la ventana de diagramas hace posible la selección de los parámetros de la captación de los valores de medida. En el campo "Sampling Rate" se pueden elegir 5 diferentes velocidades de muestreo. "Number of Points" pone a

disposición 7 anchos de datos de 512 hasta 32768 puntos con hasta 19 horas de tiempo de registro. El campo "Range" da la posibilidad de seleccionar entre 6 diferentes escalas del eje-y. Al activar la opción "Single Pass" se detiene la "toma de datos" después de un ciclo o recorrido. Si esta opción no se activa se tiene una captación de datos continua.

A la izquierda debajo de la barra de herramientas se tienen 8 botones ordenados en 2 filas. En la fila de arriba a la izquierda se encuentra el botón "Examine Data". Seleccionando este botón se hace visible un ángulo y el tiempo en la barra de información. En caso de que el retículo desaparezca se puede volver a hacer visible haciendo un clic sobre este botón.

Tanto el eje-x como el eje-y se pueden ampliar activando el botón +Zoom y con un clic con la tecla izquierda del ratón se puede ampliar en la ventana activa. Al activar el botón -Zoom y con un clic con la tecla izquierda se retorna al tamaño original en la ventana activa. El aumento máximo es de 512 puntos y en el tiempo por aprox. 1,5 mrad.

Activando el botón "Connect Data" se conectan entre sí con una línea los puntos de medida individuales.

A la derecha, uno debajo del otro, se encuentran los botones "Select Points" y "Apply Corrections". Con el botón "Select Points" se pueden seleccionar 1, 2 ó 3 puntos en la gráfica para, definir una desviación con respecto al cero (offset), o una función lineal o una curva cuadrática. Estos se pueden utilizar para realizar una corrección de arrastre de los datos en mediciones de larga

duración. Cambios en la humedad relativa del ambiente se han mostrado como causa principal del arrastre de los datos de medida. Para seleccionar puntos se pulsa el botón "Select Points" y se hace un clic en la ventana del diagrama y activar P1 del menú abatible. Después se elige el primer punto para realizar la corrección de arrastre. El procedimiento se repite con los dos puntos siguientes P2 y P3.

Para realizar la corrección se pulsa el botón "Apply Corrections". Si no se está satisfecho con la corrección, se tienen listos otros dos métodos para la adaptación. En el primer método se vuelve a pulsar el botón "Apply Corrections" para desactivarlo. Luego se vuelven a seleccionar puntos y se repite nuevamente todo el proceso. El segundo método para la adaptación de la corrección lleva una variación directa de los coeficientes funcionales. Para ello se hace un clic en la ventana del diagrama y se selecciona "set coef." en el menú abatible. Ahora se pueden entrar nuevos valores para A, B y C. Se pulsa sobre "OK" y se vuelve a hacer un clic sobre la ventana del diagrama. Luego se hace un clic sobre "Manual Coefficients OFF" para iniciar la función "Manual Coefficients On" y poder observar la corrección con los datos entrados. Los coeficientes se pueden cambiar a voluntad hasta estar satisfecho con la adaptación.

5.5 Filtro Low Pass

El campo "LPF Time Constant" le permite al usuario elegir entre 12 diferentes filtros de pasa bajos o ninguno. Esta función se usa sólo en casos especiales. Todos los experimentos se deben iniciar con la opción "No LPF". Cuando el travesañ interno realiza movimientos diferentes a los de torsión, la supresión simultaneidad o de fases iguales, evita que estos movimientos se registren. Si no es caso, es conveniente la aplicación de un filtro de pasa bajos.

5.6 Botón "Reset"

Después de haber realizado una serie de medidas se pueden cambiar los parámetros de captación de datos, la frecuencia de muestreo, el número de puntos de medida, el modo de medición etc. Haciendo un clic sobre el botón "Reset" se activan estos cambios.

5.7 Botón "Record"

Pulsando el botón "Record" se inicia una nueva serie de medida. El botón se convierte en botón de "Stop" con el cual se puede detener manualmente la serie de medida. Al finalizar una serie de medida, ya sea manual o automáticamente, aparece un mensaje preguntado si los datos de deben guardar en memoria.

5.8 Guardar y cargar

Los datos se guardan en memoria haciendo un clic sobre el botón "Save". El formato estándar es *.cav. Se tienen a disposición dos formatos adicionales (*.txt y *.xls) para un análisis adicional de los datos en un Spreadsheet.

Con el botón "Load" es posible cargar datos de registros o mediciones anteriores.

Después de 2 minutos de captación de datos el programa instala un archivo temp.cav. Después, la medición se guarda en una carpeta temporal, para que en el caso de una interrupción del suministro energético los datos no se pierdan y se puedan rescatar hasta en el momento de la interrupción. Este archivo se sobrescribe en cada nueva iniciación de una serie de medida.

5.9 Impresión

Al seleccionar el botón "Print" se imprimen los datos. Junto a la gráfica se imprimen la frecuencia de captación, el número de puntos de medida y el nombre del archivo. Comentarios se pueden imprimir adicionalmente si se ha elegido esta opción.

5.10 Botón "Setup"

Con este botón se fijan los límites del alcance de medida Min./Max. de la balanza de torsión.

"Y minimum" e "Y maximum" definen el alcance total de la balanza de torsión. Cambiando estos valores se puede adaptar la lectura de la balanza de torsión. Los botones "Adjust left border" y "Adjust right border" adaptan la indicación en pantalla así que la posición del travesañ concuerda con el borde superior (adjust right border) resp. con el borde inferior (adjust left border) de la ventana de la gráfica.

5.11 Calibración del punto cero

El botón directamente al lado del botón "Reset" fija el punto cero del travesañ. El punto cero de la oscilación se encuentra en el punto en el cual se presiona el botón. Para fijar el punto cero se lleva el travesañ a la posición media en el centro por debajo de las platinas del sensor y se fija por un tiempo con la barra de centrado y se pulsa el botón. En esta forma el centro geométrico de las platinas está definido como punto cero y las desviaciones a partir de esa línea a hacia ambos lados se indican en mrad.

5.12 Botón "Exit"

El programa se cierra pulsando el botón "Exit".