

1 de Marzo de 2019

La redefinición de la unidad "kilogramo": ¿qué significa para los usuarios de tecnología de pesaje?

Dr. Julian Haller^{1*}, Karlheinz Banholzer¹, Thomas Fehling¹, Tony Kowalski²

1. Sartorius Lab Instruments GmbH Et Co. KG, Otto-Brenner-Strasse 20, 37079 Goettingen, Germany

2. Sartorius UK Ltd., Blenheim Road, KT19 9 QQ Epsom, Surrey, United Kingdom

*Correspondence:

E-Mail: julian.haller@sartorius.com

Introducción

El 20 de mayo de 2019 entra en vigor una nueva definición de la unidad "kilogramo". A medida que nos acercamos a esta fecha, más y más noticias se publican al respecto en los diferentes medios. Este documento tiene como objetivo informar a los clientes de Sartorius sobre los motivos de la redefinición y las consecuencias previstas. Está especialmente dirigido a áreas altamente reguladas, como empresas y laboratorios certificados y/o acreditados, donde los usuarios se deben enfrentar a la tarea de evaluar el impacto de la redefinición en su trabajo habitual, como parte de una evaluación de riesgos o como una revisión de los procesos vigentes. Este documento intenta ofrecer soporte para este propósito.

Básicamente, para los usuarios de balanzas, pesas y comparadores, nada cambiará inicialmente en cuanto a su trabajo diario y no implicará modificaciones en los procesos actuales. Para asegurar este punto, han participado en el desarrollo de la nueva definición representantes de la industria desde el primer momento.

En nuestro caso, la tecnología y el personal de Sartorius han estado relacionados desde el principio en el desarrollo de la redefinición del kilogramo. Este documento le brindará también una breve descripción de cómo Sartorius ha intervenido inicialmente y cómo sigue participando en esta innovación actualmente.

Introducción

Probablemente, todo el mundo ha escuchado ya los términos "prototipo/original del metro" y "prototipo/original del kilogramo". Si bien el prototipo del metro, una vara de platino-iridio de exactamente un metro de longitud, fue reemplazada como la definición de la unidad de medida "metro" en 1960, el prototipo del kilogramo sigue siendo, a principios de 2019, la definición de la unidad de medida "kilogramo". Un kilogramo se define simplemente como la masa del "prototipo internacional kilogramo" (IPK, como se le denomina formalmente) siendo un cilindro de platino-iridio con una altura y un diámetro de 39 mm que se custodia en el BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) cerca de París. El 16 de noviembre de 2018, el comité responsable decidió que a partir del 20 de mayo de 2019, esta definición sería reemplazada por una nueva basada en la constante fundamental h (la constante de Planck). También en la misma fecha, las unidades "amperio", "mol" y "kelvin" tendrán nuevas definiciones, lo que significa que las siete unidades básicas del SI (kilogramo, metro, segundo, mol, amperio, kelvin, candela) se definirán en base a constantes fundamentales. En realidad, el hecho de que esto no haya ocurrido antes con el kilogramo, como una de las unidades más importantes para el comercio, la economía y la industria, no se debe a una falta de necesidad, sino debido a la circunstancia de que no se había podido realizar tal definición hasta ahora con suficiente exactitud.

La definición del kilogramo que entrará en vigor el 20 de mayo de 2019 parece bastante poco interesante a primera vista [1]:

"El kilogramo se define tomando el valor numérico fijo de la constante de Planck h en $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ cuando se expresa en la unidad J.s, que es igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, donde el metro y el segundo se definen en términos de c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ".

Admitiendo como cierto que la comprensión intuitiva de esta nueva definición es peor que la anterior ("tanto como el IPK"), sin embargo, debido a la vinculación con las constantes fundamentales, es mucho más estable y segura para el futuro que previamente. De hecho, el IPK ha perdido aproximadamente $50\ \mu\text{g}$ en los últimos 100 años, como se puede ver en comparaciones con otros prototipos [2]. Sin embargo, como la masa del IPK es exactamente $1\ \text{kg}$ por definición, estrictamente hablando, todas las demás masas han ganado $50\ \mu\text{g}$ por kg durante este tiempo. Si bien esto puede no parecer mucho, esta es, por supuesto, una condición inaceptable en el mundo de alta tecnología de hoy.

Gracias a la nueva definición, se puede utilizar cualquier experimento para la realización de la unidad que vincule la masa con una de las constantes fundamentales, por lo que "solo" es necesario garantizar que no haya errores sistemáticos en este experimento y que la incertidumbre de medida se determine adecuadamente. En este momento, existen dos enfoques diferentes para vincular la masa con la constante fundamental h : el llamado experimento Avogadro ("la esfera de silicio") y la balanza de Kibble (también llamado balanza de Planck o balanza de Watt). Pareciera, a menudo, que estos dos enfoques compitieran entre sí. Sin embargo, era más bien uno de los requisitos previos de la redefinición: sería necesario obtuvieran resultados comparables a partir de dos enfoques diferentes. Ambos experimentos son, por tanto, necesarios.

Los dos subcapítulos siguientes le darán al lector interesado una breve descripción general de estas dos realizaciones. No obstante, se pueden encontrar explicaciones mucho más detalladas y datos adicionales en [3].

El experimento Avogadro.

La pieza central del experimento Avogadro es una esfera hecha de ^{28}Si isotópicamente puro que a menudo se considera erróneamente como un "nuevo prototipo de kilogramo". La verdad es que dicha esfera se puede utilizar para constituir la conexión requerida entre la masa y la constante fundamental h .

Si se multiplica la masa de un solo átomo de ^{28}Si , $m_{28\text{Si}}$, por el número de átomos en una esfera isotópicamente pura de este material, $n_{28\text{Si}}$, se obtendrá la masa de esta esfera, m_{sphere} . Además, la masa de un solo átomo se puede obtener dividiendo la masa de un mol de esta sustancia, $M_{28\text{Si}}$, por el número de átomos en un mol, la constante de Avogadro N_A , y el número de átomos en la esfera es el volumen de la esfera, V_{sphere} , dividida por el volumen de un solo átomo, $V_{28\text{Si}}$.

Como además, existe una relación conocida entre la constante de Avogadro y otras diferentes constantes fundamentales:

$$N_A = \frac{M_u \cdot c \cdot \alpha^2 \cdot A_r^e}{2 \cdot R_\infty \cdot h} \quad (1)$$

M_u : constante molar de masa;
 c : velocidad de la luz;
 α : constante de estructura fina;
 A_r^e : masa atómica relativa del electrón;
 R : constante de Rydberg,

se puede derivar la siguiente relación entre la masa de la esfera, m_{sphere} , y la constante de Planck h :

$$m_{\text{Kugel}} = m_{28\text{Si}} \cdot n_{28\text{Si}} = \frac{M_{28\text{Si}} \cdot V_{\text{Kugel}}}{N_A \cdot V_{28\text{Si}}} = \frac{M_{28\text{Si}} \cdot V_{\text{Kugel}} \cdot 2 \cdot R_\infty \cdot h}{V_{28\text{Si}} \cdot M_u \cdot c \cdot \alpha^2 \cdot A_r^e} \quad (2)$$

El aspecto práctico de esta ecuación es que en su lado derecho solo hay cantidades muy conocidas, excepto el volumen de la esfera, V_{sphere} . Por lo tanto, si se determina este volumen con una precisión extrema (es de ahí de donde proviene exactamente la determinación vinculada a una forma esférica, ya que para una esfera el volumen puede determinarse con mayor precisión) se puede calcular la masa de la esfera de manera absoluta. Esto puede no parecer muy emocionante al principio, pero de hecho es una novedad innovadora, ya que hasta ahora las masas solo podían determinarse en relación con otra, mientras que ahora es posible una determinación absoluta.

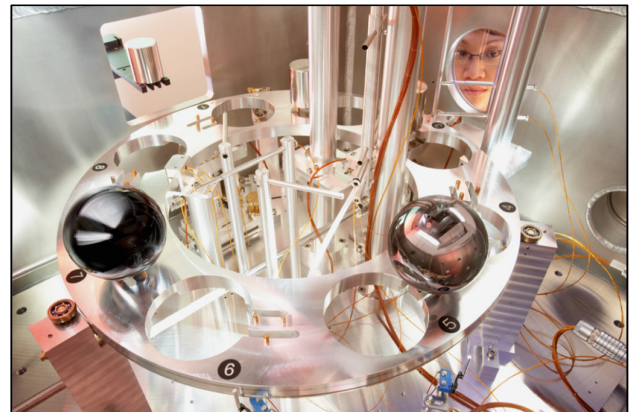


Figura 1: Dos copias de una esfera de silicio en un comparador de masas especialmente diseñado de Sartorius.

La balanza de Kibble

La llamada balanza de Kibble (también conocida como balanza de Planck o balanza de Watt) representa otra realización de la masa basada en la constante de Planck, cuyo principio es bastante similar al de muchas balanzas electrónicas modernas que funcionan con el llamado principio de compensación electromagnética. En primer lugar, se mide la corriente I a través de una bobina con una longitud L , que es necesaria para compensar el peso de la masa que debe determinar la fuerza electromagnética en la bobina en un campo magnético B :

$$m \cdot g = I \cdot B \cdot L \quad (3)$$

En un segundo paso, la misma bobina se mueve a través del campo magnético a la velocidad v y se mide el voltaje U inducido. Dado que para la tensión aplica entonces:

$$U = v \cdot B \cdot L \quad (4)$$

las ecuaciones (3) y (4) se pueden desarrollar eliminando $B \cdot L$ en los dos miembros de la ecuación de modo que estas dos cantidades B y L , que son difíciles de determinar con exactitud, desaparecen de la ecuación:

$$m \cdot g \cdot v = U \cdot I = \frac{v^2}{R} \quad (5)$$

La tensión U se puede medir como el n -fold de la llamada tensión Josephson $U_J = f_J \cdot h/2e$ donde f_J es una frecuencia de microondas que se puede configurar con mucha precisión, e es la carga elemental de un electrón y h es nuevamente la constante de Planck. La resistencia R en la ecuación (5) puede representarse además como una fracción entera de la constante de Klitzing $R_K = h/e^2$ y, por lo tanto, también depende de las constantes naturales e y h . Por lo tanto, la ecuación (5) se puede transformar en:

$$m = \frac{v \cdot n^2}{4 \cdot g \cdot v} \cdot f_J^2 \cdot h \quad (6)$$

Por lo tanto, al igual que la esfera de silicio establece una relación con la constante de Avogadro, la balanza de Kibble establece una relación entre la masa y la constante de Planck h , que permite una determinación absoluta de la masa.

El papel de Sartorius en la redefinición.

Por supuesto, Sartorius, como actor importante en la magnitud "masa", ha intervenido en la redefinición de la unidad "kilogramo" desde el principio.

En primer lugar, Sartorius ha intervenido en importantes discusiones y desarrollos relacionados con la redefinición desde el comienzo, desempeñando importantes funciones en los comités relevantes. Por ejemplo, Sartorius ostenta la presidencia del Grupo de Metrología Legal de la Asociación de Fabricantes a Escala Europea CECIP. El comité responsable de la redefinición (Conferencia General de BIPM sobre Pesos y Medidas) ha asegurado desde el inicio del proceso que las partes interesadas de la industria han estado involucradas a través de las asociaciones de fabricantes para garantizar que la redefinición no perjudique ni a la industria ni a sus clientes.

Por otro lado, también la tecnología de Sartorius ha estado significativamente presente en el proceso de redefinición: antes de que pudiera tener lugar la redefinición de la unidad "kilogramo" basada en la constante de Planck h , esta constante debía determinarse de manera muy precisa mediante el uso de las ecuaciones (2) y (6) al revés. Si se resuelven las dos ecuaciones en h , entonces se puede determinar la constante de Planck con mucha precisión con los dos métodos mencionados si la masa respectiva se conoce suficientemente bien. Este proceso exacto se llevó a cabo durante varios años en varios institutos de metrología para determinar finalmente un valor de referencia para h a partir de las mediciones independientes en diferentes ubicaciones y con ambos métodos. En varios institutos, por ej. El BIPM y el PTB, un comparador de masas Sartorius CCL1007 se usó para este propósito, diseñado y optimizado para la determinación de masas de pesas y esferas de silicio con la mayor precisión posible.

Además, en el segundo método para realizar la nueva definición, la balanza Kibble (o balanza Planck / Watt / Joule), los productos de Sartorius se utilizan al más alto nivel de metrológico: varias configuraciones de dichas balanzas Kibble en los Institutos Nacionales de Metrología incorporan células de carga de Sartorius, por ejemplo, la balanza Joule en el NIM (China) o la balanza de Watt en el BIPM.

¿Qué significa esto para los clientes de Sartorius de...

... comparadores de masas

Incluso si, como se describe anteriormente, la nueva definición del kilogramo hace posible determinar las masas en términos absolutos en lugar de compararlas como hasta ahora, los comparadores de masas seguirán siendo necesarios para varias tareas metrológicas en el futuro: por un lado, para realizar la "transferencia" de las nuevas realizaciones primarias a las pesas convencionales y, por otro lado, las pesas calibradas se seguirán utilizando como estándares de referencia, estándares de trabajo y equipos de prueba, que deberán ser calibrados con comparadores de masa.

El comparador de masas CCL1007 mencionado anteriormente fue desarrollado por Sartorius en colaboración con el BIPM / Francia a principios de la década de 2000, con el objetivo de determinar la masa de esferas de silicio de 1 kg con la mayor precisión posible mediante la comparación de masas. En un primer paso, la constante de Avogadro se debe volver a determinar como parte del experimento de Avogadro (ver arriba). Para este experimento fue utilizado el comparador de masas CCL1007 al igual que en el PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) en Braunschweig, Alemania.

Tras la introducción de la nueva definición de la unidad del SI de unidades "kilogramo", será posible que los institutos nacionales de metrología de todo el mundo, como el PTB en Alemania, utilicen este comparador de masas de manera independiente del Prototipo Internacional kilogramo (IPK) en París / Sèvres, como un escala de masa trazable para el Estado respectivo. Debido a que todo se basa en el kg, la determinación de masa, desde miligramos a la tonelada, se puede realizar en el futuro utilizando esferas SI.

Todo ello habla por sí mismo de que, incluso en el nivel metrológico más alto, el conocimiento y la tecnología de Sartorius son absolutamente fiables.



Figura 2:
Comparador de masas
Sartorius CCL1007.

... balanzas

Todas las balanzas fabricadas por Sartorius se ajustan durante la producción, se ensayan varias veces y, si procede (en el caso de balanzas verificadas) se evalúa la conformidad. Todos estos procesos se llevan a cabo con pesas que son calibradas regularmente por el laboratorio de calibración de masa de Sartorius, acreditado por el DAkkS (organismo de acreditación alemán) y que, por lo tanto, son trazables a la Norma aplicable a cada Estado. A través de la transición "perfecta" (es decir, sin un cambio notable en los valores) en la redefinición del kilogramo, no habrá ningún cambio destacable. En algún momento después del 20 de mayo de 2019, cuando el primer patrón de referencia del laboratorio de calibración de masa deba recalibrarse, esta recalibración se realizará en el PTB con una trazabilidad formal a un estándar según la nueva definición; posteriormente, la siguiente vez que se recalibre una pesa de producción, también será trazable formalmente a la nueva definición.

Al comprar una nueva balanza, es, irrelevante, por tanto, si la balanza se fabrica (o se ajusta / se prueba / se evalúa la conformidad) antes o después del 20.05.2019, ya que se proporciona una trazabilidad completa y continua de las pesas utilizadas y la "corrección" de una pesa o de una balanza no se modifica por la redefinición. Evidentemente, no es necesario esperar para la compra de una balanza, "a que ya cumpla con la nueva definición del kilogramo".

También en el caso de balanzas ya existentes, la redefinición no modificará nada. Independientemente del hecho de que recomendemos a nuestros clientes calibraciones regulares por nuestro Servicio, no hay necesidad de una calibración adicional derivada de la redefinición del kilogramo.

... pesas

También en el caso de la calibración de pesas, la redefinición del kilogramo no supondrá cambio alguno. Ni un certificado de calibración existente será invalidado por la nueva definición ni el peso en sí mismo. Evitando cualquier idea errónea aquí: para el usuario final, las pesas calibradas seguirán teniendo forma de cilindro o botón y no esféricas. Por lo tanto, las pesas existentes pueden seguir utilizándose para los fines habituales de prueba y de control de calidad independientemente de si están calibrados o no, aunque siempre recomendamos el uso de pesas calibradas para tales fines.

Y de igual manera que las balanzas, no hay necesidad de posponer la compra de una pesa a o juego de pesas para después del 20.05.2019.



Figura 3: Pesas de la Clase E2 de la serie "ProofLine" de Sartorius.

... calibraciones de pesas

Sartorius dispone de laboratorios de calibración en varios países con acreditaciones por las respectivas entidades nacionales de acreditación. En estos laboratorios de calibración, las pesas de los clientes se comparan con los patrones de referencia utilizando los comparadores de masa de Sartorius. Estos patrones de referencia se recalibran regularmente en los institutos nacionales de metrología mediante comparación con sus estándares de trabajo, y estos a su vez son calibrados por el instituto de metrología respectivo (posiblemente en varios pasos intermedios) contra el patrón nacional respectivo. Con las pesas, el principio de la "cadena de trazabilidad" se puede, como tal, demostrar fácilmente. Los patrones nacionales generalmente también son "solo" kilogramos de peso, que hasta ahora se comparaban en intervalos razonablemente largos con el "kilogramo original" (el IPK).

Después de redefinir el kilogramo, los institutos nacionales de metrología, de manera gradual, construirán o adquirirán realizaciones primarias de la definición del kilogramo (es decir, una balanza Kibble o una esfera de silicio) y calibrarán sus patrones contra ellos o contra los de otro laboratorio nacional de metrología.

Posteriormente, el paso formal de la nueva definición a lo largo de la cadena de trazabilidad invierte el orden descrito anteriormente: a partir del primario nacional, el kilogramo (con los pasos intermedios que apliquen) se transfiere a patrones de trabajo; posteriormente, a patrones de referencia o de trabajo de los laboratorios de calibración y finalmente a los patrones de los clientes.

Los requisitos establecidos de manera previa a la redefinición aseguran que ni los valores ni las incertidumbres cambian sistemáticamente como resultado de la nueva definición. En última instancia, el cliente final ni siquiera notará si su pesa se ha trazado al kilogramo original o ya a una realización primaria de la nueva definición. Como ya se ha dicho anteriormente, no es necesario, después del 20.05.2019, enviar todas las pesas a una recalibración no programada, ni tiene sentido aplazar la compra de una nueva pesa calibrada.

... calibraciones de balanzas

Sartorius también dispone de laboratorios de calibración acreditados para balanzas en varios países. Para calibrar las balanzas, generalmente se usan pesas calibradas previamente en un laboratorio de calibración de Sartorius acreditado para la calibración de pesas. Por tanto, aquí aplica lo mismo que en la sección anterior, ya que para las balanzas se añade otro paso intermedio en la cadena de trazabilidad; solo supondrá un poco más de tiempo (cuando sea preciso recalibrar la balanza) hasta que el cliente final obtenga una calibración de la balanza formalmente trazable a una realización primaria de acuerdo con la nueva definición. Sin embargo, también para balanzas, el cliente ni siquiera notará diferencias.

Conclusión

Incluso aunque la redefinición del kilogramo sobre la base de la constante de Planck representa un cambio de modelo real y puede considerarse un hito en la búsqueda de definiciones de las unidades de medida, estables y permanentemente válidas ahora y en el futuro, esto no supondrá definitivamente ningún cambio para el usuario final. Por tanto, no es necesario comprar, recalibrar o aplazar la adquisición tanto de balanzas como de pesas debido a la entrada en vigor de la nueva definición. Debido a las cuidadosas consideraciones previas a la redefinición, en la que participaron expertos de Sartorius, se asegura que la redefinición no suponga una "corrección" de, por ejemplo, los valores de las mediciones, ni que las incertidumbres aumenten como resultado de ello. El hecho de que los conocimientos técnicos y la tecnología de Sartorius jugaran un papel importante en el proceso de redefinición en diferentes apartados demuestra que la competencia de Sartorius en cuestiones metroológicas y técnicas es solicitada y reconocida en la actualidad al más alto nivel.

Referencias

1. Resolutions of the 26th General Conference on Weights and Measures (CGPM), 13.-16. November 2018, Versailles, France.
2. M. Stock, P. Barat, R. S. Davis, A. Picard und M. J. Milton, Metrologia 2015,52(2), 310.
3. H. Bettin, S. Schlamminger (Guest Editors): Focus on Realization, Maintenance and Dissemination of the Kilogram, Metrologia 2016, 53.

Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG
Otto-Brenner-Strasse 20
37079 Goettingen, Germany
Phone +49.551.308.0

www.sartorius.com

Specifications subject to change without notice.
Copyright Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG.
Ver. 1 | 2019 Mar | SP